



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

INOCULACIÓN DE HONGOS FORMADORES DE MICORRIZA ARBUSCULAR (HFMA) Y BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL (PGPR) EN PLANTAS DE AGUACATE (*Persea americana*)

LIDIA VELASCO VELASCO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **INOCULACIÓN DE HONGOS FORMADORES DE MICORRIZA ARBUSCULAR (HFMA) Y BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL (PGPR) EN PLANTAS DE AGUACATE (*Persea americana*)**, realizada por la estudiante: **LIDIA VELASCO VELASCO** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

DR. JULIÁN DELGADILLO MARTÍNEZ

ASESORA

DRA. ELIZABETH HERNÁNDEZ ACOSTA

ASESOR

DR. MARCO POLO CARBALLO SÁNCHEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, diciembre de 2022.

INOCULACIÓN DE HONGOS FORMADORES DE MICORRIZA ARBUSCULAR (HFMA) Y BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL (PGPR) EN PLANTAS DE AGUACATE (*Persea americana*)

Lidia Velasco Velasco, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

Los microorganismos que promueven el crecimiento vegetal y que permiten la sostenibilidad y rentabilidad de los cultivos, funcionan como complementarios a fertilizaciones inorgánicas y representan una alternativa a los altos costos de fertilizantes y al creciente deterioro de los recursos naturales. El aguacate, es de los cultivos que demanda sostenibilidad para su producción. En este trabajo se evaluaron los efectos en la concentración de nutrimentos y crecimiento por inoculación de hongos formadores de micorriza arbuscular (HFMA), Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), regadas con solución nutritiva Steiner (20%) con diferente pH (5.8 y 6.2) aplicados en plantas de aguacate criollo, raza mexicana (primer ensayo). Y la inoculación de PGPR, HFMA y Roca fosfórica (RF) aplicados desde semilla (segundo ensayo). Establecidos en invernadero con sustrato (perlita y espuma agrícola), desinfectados y regadas con agua potable. El diseño experimental empleado (factorial 2x2x2), se evaluó a los 181 DDT y 103 DDS, primer y segundo ensayo.

En el primer ensayo, la inoculación de HFMA y PGPR mejoró la absorción y aumentó la concentración (%) de N y P en la parte aérea de la planta. Mostró el mismo efecto en el diámetro y peso seco total de la planta. En el aspecto radical, se obtuvieron longitudes y volúmenes más altos respecto al testigo, 355% y 150%, respectivamente. La colonización bacteriana fue alta con la presencia de bacterias fluorescentes dentro del tejido de la raíz.

En el segundo ensayo se incrementó la concentración de N,P,K en tejido vegetativo, por efecto de la inoculación de PGPR y la aplicación de RF desde semilla. Respecto a la altura la determinó la aplicación de HFMA y RF. En Longitud y volumen, la mejor respuesta se obtuvo por inoculación de PGPR y se obtuvo colonización micorrizica inferior al 10 % que no fue suficiente para estimular el crecimiento en plántulas.

Palabras clave: Nutrientes, arquitectura radical, colonización, PGPR, HFMA, *persea americana*, raza mexicana.

INOCULATION OF ARBUSCULAR MYCORRHIZA FORMING FUNGI (HFMA) AND PLANT GROWTH PROMOTING BACTERIA (PGPR) IN AVOCADO PLANTS (*Persea americana*)

Lidia Velasco Velasco, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

The microorganisms that promote plant growth and that allow the sustainability and profitability of the crops, work as complements to inorganic fertilizations and represent an alternative to the high costs of fertilizers and the increasing deterioration of natural resources. Avocado is one of the crops that demands sustainability for its production. In a first trial, the effects on the concentration of nutrients and growth by inoculation of fungi that form arbuscular mycorrhiza (HFMA), plant growth promoting rhizobacteria (PGPR), irrigated with Steiner nutrient solution (20%) with different pH (5.8 and 6.2) applied to creole avocado plants, mexican race; were evaluated. In a second trial, inoculation of PGPR, HFMA and phosphoric rock (RF) applied from seed were evaluated. Both trials were established in a greenhouse with substrate (perlite and agricultural foam), disinfected and irrigated with drinking water. The experimental design used (2x2x2 factorial) was evaluated at 181 DAT and 103 DDS (both trials).

In the first trial, the inoculation of HFMA and PGPR improved uptake and increased the concentration (%) of N and P in the aerial part of the plant. It showed the same effect on the diameter and total dry weight of the plant. In the root, higher lengths and volumes were obtained compared to the control, 355% and 150%, respectively. Bacterial colonization was high in PGPR treatments, with the presence of fluorescent bacteria within the cortex tissue.

In the second trial, the concentration of N, P and K in vegetative tissue increased due to the effect of the inoculation of PGPR and the application of RF. Regarding the height, it was determined by the application of HFMA and RF. In Length and volume, the best response was obtained by PGPR inoculation and less than 10 % mycorrhizal colonization was obtained, which was not enough to stimulate growth of seedlings.

Keywords: Nutrients, radical architecture, colonization, PGPR, HFMA, *Persea americana*, Mexican race.

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca que me fue otorgada, para obtener el grado de maestra en ciencias.

Al programa de Edafología, área de microbiología del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, por permitirme el uso de sus instalaciones y equipos. Así como al programa de botánica por prestarme su equipo de escaneo de raíces.

Al Dr. Julián Delgadillo por el apoyo, paciencia, inspiración, enseñanzas y, además, por su confianza en este proyecto.

Al Dr. Marco Polo Carballo Sánchez por su amistad, apoyo en la evaluación, paciencia e importantes observaciones para el desarrollo de este proyecto.

A la Dra. Elizabeth Hernández Acosta por su apoyo y confianza.

Al Dr. César San Martín Hernández, por su amistad, sus aportaciones y enseñanzas

A todos aquellos profesores, amigos y compañeros que colaboraron en el desarrollo de este proyecto.

Agradecimientos a mi familia, hermanos y padres.

A esas personas que conocí en este proceso de formación, y que hoy por hoy somos amigos, los aprecio con el Alma. Conocerlos fue un placer, disfrutar de su amistad y conocimientos es una bendición.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
2.3. Hipótesis general	2
2.4. Hipótesis específicas	2
III. REVISIÓN DE LITERATURA	3
3.1. Rizosfera	3
3.2. Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR)	3
3.2.1. Solubilización de fosfatos por PGPR	4
3.2.2. Fijación de nitrógeno por PGPR	5
3.2.3. Solubilización de potasio por PGPR	5
3.2.4. Producción de reguladores del crecimiento vegetal (fitohormonas) por PGPR	6
3.2.4.1. Bacterias productoras de auxinas, etileno, ACC desaminasa y regulación de estrés	6
3.2.4.2. Bacterias productoras de giberelinas	8
3.2.4.3. Bacterias productoras de ácido abscísico (ABA)	8
3.2.5. Quelatación de hierro por PGPR	9
3.2.6. Efecto de biocontrol por PGPR	9
3.2.7. Biorremediación	10
3.3. Hongos formadores de micorriza arbuscular (HFMA)	11
3.3.1. Mecanismos de mejoramiento en el crecimiento de las plantas	11
3.3.2. Mecanismo de tolerancia al estrés biótico y abiótico	12

3.3.3.	Mecanismos en el mejoramiento de la salud del suelo	14
3.4.	Aguacate (<i>Persea americana</i>): generalidades, taxonomía y fenología	16
3.4.1.	Obtención de portainjertos de aguacate.....	16
3.4.2.	Portainjertos y cultivares de aguacate.....	16
3.4.3.	Requerimientos climáticos y edafológicos del aguacate	17
3.4.4.	Requerimientos nutrimentales.....	18
3.5.	Inoculantes microbianos en aguacate	21
3.6.	Sustrato en la producción frutícola de viveros.....	23
3.6.1.	Perlita	23
3.6.2.	Espuma fenólica.....	23
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
4.1.	Inoculación de hongos formadores de micorriza arbuscular y bacterias promotoras del crecimiento vegetal en plantas de aguacate regadas con solución nutritiva de diferente pH.	25
4.1.1.	Establecimiento del experimento.....	25
4.1.2.	Material vegetal	25
4.1.3.	Sustrato	26
4.1.4.	Preparación del inóculo bacteriano	27
4.1.5.	Inóculo de HFMA.....	29
4.1.6.	Solución nutritiva	29
4.1.7.	Evaluación de tratamientos	30
4.1.7.1.	Diámetro de tallo	30
4.1.7.2.	Peso seco de la parte aérea y de la raíz	30
4.1.7.3.	Concentración de nutrimental.....	31
4.1.7.4.	Crecimiento y arquitectura radical	31
4.1.7.5.	Colonización micorrízica.....	32
4.1.7.6.	Tamaño de poblaciones bacterianas.....	32
4.1.7.7.	Colonización de raíces por bacteria fluorescente inoculada.....	33
4.1.8.	Análisis estadístico.....	34
4.2.	Crecimiento y concentración de nutrimentos en plantas de aguacate inoculadas desde semilla con HFMA y PGPR y fertilizadas con roca fosfórica.	35

4.2.1.	Establecimiento del experimento.....	35
4.2.2.	Preparación del inóculo bacteriano	37
4.2.3.	Inóculo de HFMA.....	37
4.2.4.	Roca fosfórica	37
4.2.5.	Evaluación de tratamientos	38
4.2.5.1.	Porcentaje de germinación.....	38
4.2.5.2.	Altura, diámetro de tallo y número de hojas	38
4.2.5.3.	Peso seco de la parte aérea y de la raíz	39
4.2.5.4.	Concentración de nutrimental.....	39
4.2.5.5.	Crecimiento y arquitectura radical	39
4.2.5.6.	Colonización micorrízica.....	40
4.2.5.7.	Tamaño de las poblaciones bacterianas	40
4.2.5.8.	Colonización de raíces por bacteria fluorescente inoculada.....	41
4.2.6.	Análisis estadístico.....	41
V.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	42
5.1.	Inoculación de hongos formadores de micorriza arbuscular y bacterias promotoras del crecimiento vegetal en plantas de aguacate regadas con solución nutritiva de diferente pH.	42
5.1.1.	Diámetro de tallo	42
5.1.2.	Peso seco de la parte aérea y de la raíz	44
5.1.3.	Concentración nutrimental	48
5.1.4.	Crecimiento y arquitectura radical	52
5.1.5.	Colonización micorrízica	60
5.1.6.	Tamaño de las poblaciones bacterianas	63
5.1.7.	Colonización de raíces por bacteria fluorescente inoculada	68
5.2.	Crecimiento y concentración de nutrimentos en plantas de aguacate inoculadas desde semilla con HFMA, PGPR y fertilizadas con roca fosfórica.	71
5.2.1.	Porcentaje de germinación.....	71
5.2.2.	Altura, diámetro de tallo y número de hojas	71
5.2.3.	Peso seco de la parte aérea y de la raíz	74
5.2.4.	Concentración nutrimental	77

5.2.5.	Crecimiento y arquitectura radical	81
5.2.6.	Colonización micorrizica.....	88
5.2.7.	Tamaño de las poblaciones de microorganismos	91
5.2.8.	Colonización de las raíces por la bacteria fluorescente inoculada	94
VI.	CONCLUSIONES	97
VII.	LITERATUR CITADA	98
	APENDICE.....	118

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Los nutrimentos en el funcionamiento del metabolismo y fisiología de plantas de aguacate (modificado de Sánchez y Ramírez, 1999; Maldonado, 2002; Salazar, 2002; Taiz y Zeiger, 2010; Marschner, 2012; Alcántar <i>et al.</i> , 2016).	20
Cuadro 2. Conformación de tratamientos en plantas de aguacate.	25
Cuadro 3. Características de las cepas bacterianas	28
Cuadro 4. Solución Steiner (Baca-Castillo <i>et al.</i> , 2016).	29
Cuadro 5. conformación de tratamientos aplicados a las semillas.....	36
Cuadro 6. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, pH de la solución nutritiva y su interacción en el diámetro del tallo de plantas de aguacate criollo a los 181 DDT.	43
Cuadro 7. Efectos principales y simples de PGPR, HFMA, pH de la solución nutritiva y su interacción, en el peso seco de la parte aérea, de la raíz y total en plantas de aguacate a los 181 DDT.	47
Cuadro 8. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, pH de la solución nutritiva y su interacción en la concentración nutrimental (N, P, K) de plantas de aguacate criollo a los 181 DDT.	51
Cuadro 9. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, pH de la solución nutritiva y su interacción, en el crecimiento y arquitectura radical de plantas de aguacate a los 181 DDT.	54
Cuadro 10. Área proyectada y superficial (variable no paramétrica) de la raíz de plantas de aguacate a los 181 DDT, según el efecto por la aplicación de los tratamientos.	57
Cuadro 11. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, pH de la solución nutritiva y su interacción en la colonización micorrízica de plantas de aguacate criollo a los 181 DDT	62
Cuadro 12. Supervivencia de las PGPR por efecto de los tratamientos (efectos del HFMA, PGPR, pH de la solución nutritiva y su interacción) aplicados en plantas de aguacate a los 181 DDT.	65

Cuadro 13. Tamaño de la población de bacterias fluorescentes inoculadas por efecto de los tratamientos aplicados en plantas de aguacate (prueba no paramétrica) a los 181 DDT.	67
Cuadro 14. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, RF y su interacción en la altura de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS.	72
Cuadro 15. Número de hojas y diámetro de tallo (variables no paramétricas) de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS, por efecto de la aplicación de los tratamientos.	74
Cuadro 16. peso seco de la parte aérea (variable no paramétrica) de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS, según el efecto por la aplicación de los tratamientos.....	76
Cuadro 17. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, RF y su interacción, en el peso seco de raíz y biomasa seca total de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS.	77
Cuadro 18. . Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, RF y su interacción, en la concentración nutrimental de Nitrógeno, fósforo, Potasio de parte aérea de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS.....	80
Cuadro 19. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, RF y su interacción, longitud de raíces, volumen radical y área radical proyectada de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS.	83
Cuadro 20. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, RF y su interacción, en área radical superficial, puntas y ramificaciones de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS.....	85
Cuadro 21. porcentaje de colonización micorrízica de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS, por efecto de la aplicación de los tratamientos.....	90
Cuadro 23. Tamaño de poblaciones microbianas en rizósfera por efecto de los tratamientos (HFMA, PGPR, RF y su interacción) aplicados en plantas de aguacate criollo a los 103 DDS	92
Cuadro 24. Sobrevivencia de bacterias fluorescentes por efecto de PGPR, HFMA, RF y su interacción, en plantas de aguacate criollo a los 103 DDS.	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismos de promoción del crecimiento empleados por las PGPR (modificado de Rawat <i>et al.</i> , 2020; Ojuederie <i>et al.</i> , 2019).....	4
Figura 2. Modelo de acción de las PGPR en condiciones de estrés (Modificado de Orozco <i>et al.</i> , 2020; Rawat <i>et al.</i> , 2020; Ojuederie <i>et al.</i> , 2019).....	8
Figura 3. Aportaciones de la relación simbiótica de HFMA-planta en condiciones de estrés biótico y abiótico (modificado de Solanki <i>et al.</i> , 2021, Dowarah <i>et al.</i> , 2021; Few, 2018).....	14
Figura 4. Mecanismos de agregación del suelo (Modificado de Lehmann <i>et al.</i> , 2017; Rillig y Mummey, 2006).....	15
Figura 5. Extracción y desinfección de plantas.	26
Figura 6. Mezcla de sustrato y llenado de maceta.	27
Figura 7. Inoculación de HFMA y PGPR.....	30
Figura 8. Estructura radical, acomodo y distribución de raíces para el escaneo y análisis de parámetros con el software Winrhizo.	31
Figura 9. Proceso de clareo y tinción con azul tripano para determinación de colonización.....	32
Figura 10. Cajas de Petri para método de cuenta viable en cuatro medios de cultivo diferentes (PDA, Agar nutritivo+antibiótico, fuente combinada de C y agar nutritivo).	33
Figura 11. Cortes longitudinales de raíces de plantas de aguacate para determinar colonización por la bacteria fluorescente R44-DsRed.....	33
Figura 12. Selección, desinfección y siembra de semillas de aguacate criollo.	36
Figura 13. Aplicación del inóculo de HFMA, PGPR y RF en las semillas de aguacate.	37
Figura 14. Evaluación de germinación de semillas de aguacate.....	38
Figura 15. Evaluación de variables de desarrollo (altura y diámetro) en plántulas germinadas de aguacate.....	39
Figura 16. Arreglo y distribución de raíces para escaneo en Winrhizo.....	40

Figura 17. UFC en cuatro medios de cultivos diferentes (agar +antibiótico, Rennie, Agar nutritivo, PDA).....	40
Figura 18. Diámetro del tallo de plantas de aguacate criollo inoculadas con PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar. Las barras indican error estándar (SE). Letras diferentes sobre las columnas indican diferencias significativas [Tukey (DHS), $\alpha=0.05$].....	44
Figura 19. Porcentaje de nitrógeno, fósforo y potasio en parte aérea de plantas de aguacate criollo inoculadas con PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar. barras \pm desviación estándar con letras distintas en cada nutriente, indican diferencias estadísticas (Tukey (DHS), $\alpha=0.05$)]......	52
Figura 20. Proporción y uniformidad de las longitudes de raíces de las plantas de aguacate criollo inoculadas con PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar.	56
Figura 21. Volumen radical de las plantas de aguacate criollo inoculadas con PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar. Barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey (DHS), $\alpha=0.05$).	58
Figura 22. Imagen que muestra el sistema radical de algunas plantas de aguacate criollo representativas de los tratamientos con inoculación de PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada en riego.	60
Figura 23. Micrografías de raíces, a) no colonizada a 10x, b) colonizada con vesículas a 10x y c) colonizada y con vesículas a 40x; de plantas de aguacate criollo representativas de los tratamientos con inoculación de PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar.	63
Figura 24. Tamaño de la población de bacterias totales en la rizósfera de plantas de aguacate criollo con inoculación de PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar. Barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey (DHS), $\alpha=0.05$).	66
Figura 25. Tamaño de la población de bacterias fijadoras de N atmosférico en la rizósfera de plantas de aguacate criollo con inoculación de PGPR, HFMA	

<p>y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar. Barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey (DHS), $\alpha=0.05$).</p>	66
<p>Figura 26. Micrografías de fluorescencia con secciones de mayor brillo que indican la presencia de bacterias fluorescentes inoculadas colonizando los tejidos radicales de plantas de aguacate criollo con inoculación de PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar.....</p>	70
<p>Figura 27. Altura de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y fertilización con roca fosfórica. Las barras indican diferencia mínima significativa. Barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha=0.05$).....</p>	73
<p>Figura 28. Medianas del peso seco de la parte aérea (variable no paramétrica) de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y fertilización con roca fosfórica (RF).</p>	76
<p>Figura 29. Concentración de nutrimentos en parte aérea de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y RF. Las barras indican diferencia mínima significativa. Columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$).....</p>	81
<p>Figura 30. Distribución de las longitudes de raíces de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y fertilización con roca fosfórica (RF).....</p>	88
<p>Figura 31. Micrografías de colonización micorrízica, hifas intraradical a 40x y 10x, en las raíces de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y fertilización con roca fosfórica (RF).</p>	90
<p>Figura 32. Tamaño de la población de bacterias totales en las raíces de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y fertilización con roca fosfórica (RF).</p>	93
<p>Figura 33. Imágenes de microscopio óptico de epifluorescencia que indican colonización por bacterias fluorescentes en tejidos de las raíces de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y fertilización con roca fosfórica (RF).</p>	96

I. INTRODUCCIÓN

La producción de aguacate en México ha sido una actividad altamente sobresaliente que posiciona al país en primer lugar a nivel mundial y con ello, la alta aplicación de fertilizantes, pesticidas, antibióticos y todo tipo de insumos en los cultivos para mantener productividades altas. Esto a su vez, acarrea consigo problemas de deterioro del ecosistema, afecta la calidad y salud del suelo y por supuesto la calidad del agua (Zaki *et al.*, 2020).

Actualmente se opta por sistemas de cultivos sostenibles y eficientes; por ello, las investigaciones se tornan en el uso de microorganismos que promuevan el crecimiento y reduzcan el uso de fertilizantes inorgánicos. Otro aspecto importante es el ensalitramiento y desertificación de los suelos que aumenta desmedidamente; y con ello la necesidad erradicarlo o cultivar en dichas condiciones mediante cultivos tolerantes. Y por ello, se buscan alternativas para cultivos que no son tolerantes a esas condiciones como lo es el aguacate raza mexicana que se emplea como portainjerto para otros cultivares como el Hass, Mendez y otras variedades comerciales importantes.

Actualmente el mercado exige y demanda frutos de excelente calidad; por lo cual, se debe contar con portainjertos del mismo nivel de calidad, ya que de ello depende el éxito o el fracaso de su adaptabilidad durante el trasplante al campo, del establecimiento de la plantación y de la producción final (Barrientos-Priego *et al.*, 2015). Es necesario generar alternativas que permitan la sostenibilidad y rentabilidad de este tipo cultivos, mediante incorporación complementaria de microorganismos con capacidad promotora de crecimiento u otros beneficios que estos aportan.

Los hongos formadores de micorriza arbuscular (HFMA) y las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV o PGPR por sus siglas en inglés) tienen uso potencial como biofertilizantes, reducen los daños por fitopatógenos y complementan la demanda nutrimental de los cultivos, causando así una reducción importante en el uso de fertilizantes químicos u otros insumos agrícolas. En este estudio se evaluó el efecto que tienen los HFMA y las PGPR en portainjertos de aguacate provenientes de semilla raza mexicana.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo general

Evaluar el crecimiento y concentración de nutrimentos primarios en portainjertos de aguacate debido al riego con soluciones nutritivas de diferente pH, aplicación de roca fosfórica y a la inoculación con hongos formadores de micorriza arbuscular (HFMA) y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR).

2.2. Objetivos específicos

Determinar el crecimiento y concentración de nutrimentos primarios en portainjertos de aguacate regados con solución nutritiva con pH 5.8 o 6.2 e inoculados con HFMA y PGPR.

Determinar el crecimiento y concentración de nutrimentos primarios en plantas de aguacate inoculadas desde semilla con HFMA y PGPR y fertilización con roca fosfórica

2.3. Hipótesis general

La inoculación con hongos micorrízicos arbusculares en combinación con bacterias promotoras del crecimiento vegetal favorecen el crecimiento y absorción de nutrientes en plantas de aguacate *Persea americana* regadas con solución nutritiva pH 5.8 o 6.2 y aplicación de roca fosfórica.

2.4. Hipótesis específicas

El crecimiento y la concentración de nutrimentos primarios aumentan en portainjertos de aguacate regados con solución nutritiva de pH 6.2 e inoculados con HFMA y PGPR.

El crecimiento y concentración de nutrimentos primarios en plantas de aguacate aumenta con la inoculación con HFMA y PGPR desde semilla y con la fertilización con roca fosfórica.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Rizosfera

La rizosfera es una zona de escasos milímetros en la que una fracción del suelo entra en contacto íntimo con las raíces de las plantas y los microorganismos que encuentran un sitio idóneo para su desarrollo (Ilangumaran y Smith, 2017). Dicha área también se caracteriza por la actividad de diferentes grupos de microorganismos y cambios en las características físicas y químicas del suelo influenciadas por las raíces (Prasad et al., 2019). En la rizosfera se llevan a cabo interacciones intensas entre planta, suelo y microorganismos (Kumar *et al.*, 2015b). Diversos compuestos, nutrientes y metabolitos, como aminoácidos y azúcares, son fuente importante de energía y alimento para el crecimiento de bacterias y otros microorganismos, influyendo en su actividad (Sharma et al., 2020).

3.2. Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR)

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal o también conocidas como rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR, por sus siglas en inglés, plant growth promoting rhizobacteria; Kloepper *et al.*, 1980), son un grupo importante de bacterias, que representan entre 2 y 5% del total de bacterias que habitan en la rizosfera (Jha y Saraf, 2015). Dentro de los géneros más representativos se encuentran *Bacillus*, *Burkholderia*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Caulobacter*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Pantoea*, *Serratia*, entre otros (Ahemad y Kibret, 2013).

Las principales características de estas bacterias es que son de vida libre, que viven en el rizoplano y en algunos casos pueden colonizar células internas de las raíces; por lo cual son conocidas con endófitas (Sharma *et al.*, 2020). En cuanto a sus funciones, estas bacterias tienen la capacidad de promover y facilitar el crecimiento y desarrollo en las plantas por medio de mecanismos directos e indirectos (Figura 1; Santoyo *et al.*, 2016; Orozco *et al.*, 2018).

Dentro de los mecanismos directos se encuentra la aportación de nutrimentos mediante la solubilización de fosfatos y potasio, fijación de nitrógeno, producción de sideróforos

con efecto de quelatación de hierro, actividad del enzima ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) desaminasa, liberación de vitaminas y otros compuestos o metabolitos secundarios (como auxinas, citoquininas, etileno y giberelinas) que promueven el crecimiento vegetal (Glick 2012; Lugtenberg y Kamilove, 2019). Indirectamente, las bacterias tienen una actividad de biocontrol, mediante la producción de compuestos que funcionan como antibióticos, exopolisacáridos, enzimas hidrolíticas o provocan la resistencia sistémica inducida (ISR, por sus siglas en inglés) de las plantas (Glick 2012; Kumar *et al.*, 2017a; Singh *et al.*, 2017c; Figura 1).

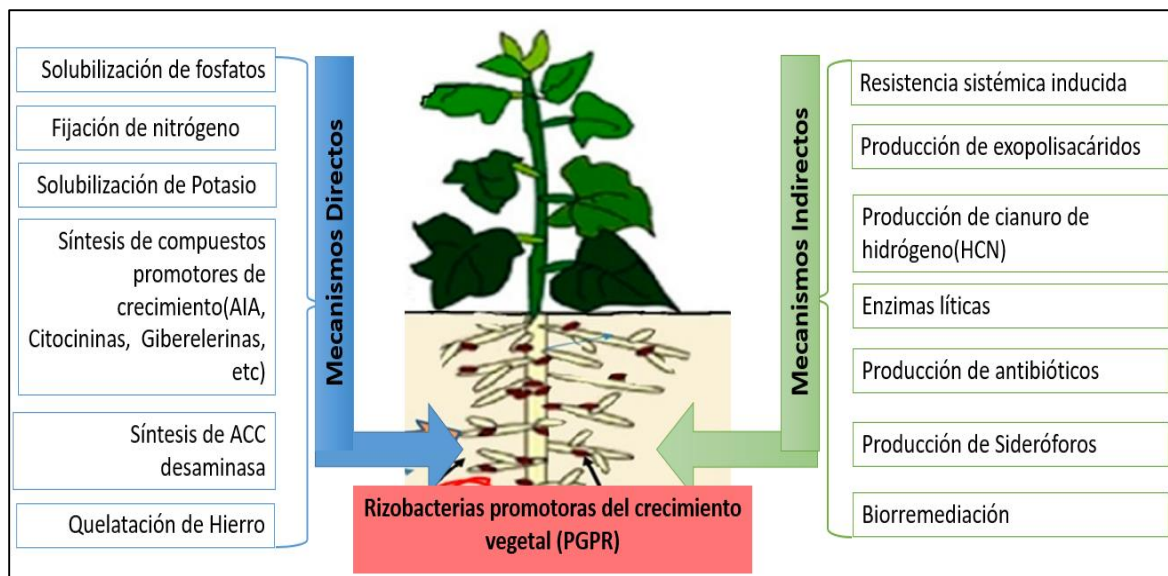


Figura 1. Mecanismos de promoción del crecimiento empleados por las PGPR (modificado de Rawat *et al.*, 2020; Ojuederie *et al.*, 2019).

3.2.1. Solubilización de fosfatos por PGPR

La disponibilidad del nutriente P en el suelo es limitada para cubrir las necesidades de las plantas; no obstante que se encuentra de manera suficiente, pero insoluble como sales minerales, fosfato de roca, tricálcico, dicálcico, hidroxapatita o compuestos orgánicos (Wang *et al.*, 2017). Las PGPR tienen la función principal de prevenir el proceso de adsorción y de fijación de fosfatos en condiciones particulares, mediante la liberación de P solubilizado (Khan y Joergensen, 2009). La solubilización se lleva a cabo mediante ácidos orgánicos, quelación y/o intercambio iónico (Van Der Heijden *et al.*,

2008) o por medio de enzimas P-solubilizantes como la fosfatasa, fitasa y liasa C-P, secretadas por los microorganismos (Singh *et al.*, 2020). Los principales ácidos orgánicos solubilizadores son: el ácido cítrico, malónico, fumárico, tartárico, glucónico, acético o glicólico (Singh *et al.*, 2020). La capacidad solubilizadora de las bacterias está relacionada con la acidificación del medio, tal es el caso del *Bacillus spp.* solubilizador de fosfatos que secreta ácido itacónico, láctico, isobutírico, isovalérico y acético que acidifican el medio y la rizosfera. También se ha documentado que estas bacterias solubilizan fosfatos por los exopolisacáridos secretados (Delvasto *et al.*, 2008).

3.2.2. Fijación de nitrógeno por PGPR

El N es uno de los nutrimentos altamente demandado por la planta, mismo que se encuentra en la atmosfera alrededor del 78% en forma de gas, siendo esta una forma no asimilable para las especies vegetales. Para aprovechar el N de la atmósfera es necesario convertir el N₂ a formas asimilables como amonio y nitrato (Singh *et al.*, 2019)

Las PGPR que presentan genes (*nifH*) permiten realizar el proceso de fijación de N₂ atmosférico, por medio de la enzima nitrogenasa (Montañez *et al.*, 2012), a otras formas de nitrógeno asimilable como el amonio (Santi *et al.*, 2013) y a nitratos mediante el proceso de nitratación (Straub *et al.*, 2013). Este tipo de bacterias es una alternativa empleada como biofertilización para adquirir parte del N que necesitan las plantas en su desarrollo (Defez *et al.*, 2017).

3.2.3. Solubilización de potasio por PGPR

El K es uno de los macronutrientes importantes para el desarrollo de las plantas después del N y el P (Marschner, 2012). Este elemento se encuentra en baja disponibilidad (1-2%) para las plantas (Sharma *et al.*, 2016) y más del 90% se encuentra de manera estructural en los minerales silicatados y rocas (Bhavya y Geetha, 2021). Las PGPR tiene la capacidad de solubilizar el K que se encuentra en las rocas debido a la secreción y producción de ácidos orgánicos y la hidólisis ácida (Bahadur *et al.*, 2017). Algunos géneros reportados para la solubilización de K son *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Thiobacillus*, *Paenibacillus sp.*, *Burkholderia*, *Arthrobacter* (Keshavarz *et al.*, 2013; Bhavya y Geetha,

2021) también destaca potencialmente *Azotobacter*, *Rhizobium* y *Flavobacterium* (Meena *et al.*, 2018).

3.2.4. Producción de reguladores del crecimiento vegetal (fitohormonas) por PGPR

Los compuestos que promueven el crecimiento vegetal mediante la elongación o división celular; también conocidos como fitohormonas, pueden ser producidos por PGPR y dentro de los principales se encuentran las auxinas, citoquininas, etileno, giberelinas y ácido abscísico (Glick, 2014). Otros metabolitos secundarios de origen microbiano y que promueven el crecimiento de las plantas son los brasinoesteroides, jasmonatos y estrigolactonas, al favorecer la tolerancia al estrés (Abd *et al.*, 2018).

3.2.4.1. Bacterias productoras de auxinas, etileno, ACC desaminasa y regulación de estrés

Dentro de las auxinas producidas por las PGPR se encuentran el ácido indol-3-acético (IAA) que favorece el crecimiento vegetal (Ali, 2015; Kumar *et al.*, 2015a). El AIA beneficia al sistema radical, aumentando el tamaño, peso, mayor ramificación y con ello el aumento en el área de exploración, mejora la capacidad de absorción y el desarrollo vegetal (Raheem *et al.*, 2018). Para tener estos efectos las concentraciones de AIA deben ser bajas, de lo contrario puede causarse retraso en el crecimiento (Malik y Sindhu, 2011).

El AIA también desempeña otra función de protección ante condiciones extremas provocadas por factores abióticos (sequía y salinidad), impulsando el sistema de defensa celular (Postma y Lynch, 2011). Para la síntesis de AIA las PGPR utilizan el precursor de AIA que es el L-triptófano secretado en la rizosfera por medio de la ruta del ácido indol-3-pirúvico (IPyA) (Spaepen *et al.*, 2007; Kang *et al.*, 2017)

Por otro lado, se encuentra el compuesto etileno que participa en procesos fisiológicos como desarrollo radical, senescencia foliar, abscisión de frutos, elongación celular, maduración de la fruta y el transporte de auxinas (Sun *et al.*, 2016; Glick, 2015). También

participa en la respuesta de la planta frente a estrés de tipo biótico y abiótico (Afzal *et al.*, 2019) como se muestra en la Figura 2.

Altas concentraciones de etileno proveniente de una fuente de estrés afectan severamente el desarrollo radical y brotes, producido por la enzima 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) oxidasa dentro de los tejidos de las plantas. Esto implica que, en plantas estresadas la S-adenosil-metionina (SAM) es convertida a ACC por la enzima ACC sintasa y por último ACC oxidado por la ACC oxidasa obteniendo el etileno (Ojuederie *et al.*, 2019; Orozco *et al.*, 2020).

En este sentido el AIA reduce los niveles de etileno en las plantas mediante la producción de ACC desaminasa mediada por bacterias como una estrategia de sobrevivencia (Ravanbakhsh *et al.*, 2018). Las bacterias que producen ACC desaminasa separan el precursor inmediato de etileno, es decir, ACC desaminasa en plantas produce amoníaco, α -cetobutirato y lo transportan para usarlo como fuente de N y lo reducen a nivel de etileno en las plantas y con ello mejoran el crecimiento (Gamalero y Glick 2015; Santoyo *et al.*, 2016). Las bacterias capaces de hidrolizar el ACC presentan un gen de ACC desaminasa (Sun *et al.*, 2009).

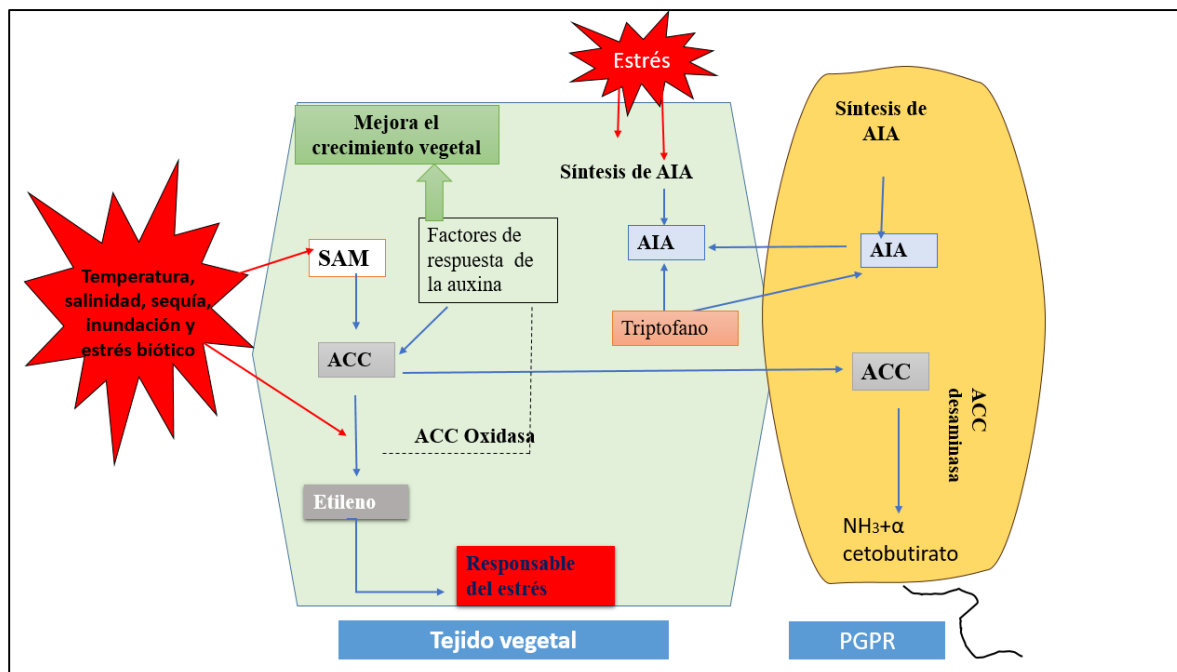


Figura 2. Modelo de acción de las PGPR en condiciones de estrés (Modificado de Orozco *et al.*, 2020; Rawat *et al.*, 2020; Ojuederie *et al.*, 2019).

3.2.4.2. Bacterias productoras de giberelinas

El ácido abscísico (ABA) participa en diferentes procesos fisiológicos, como la dormancia de la semilla, abscisión de órganos (Shahzad *et al.*, 2017) y en la expresión de genes relacionados con la respuesta a estrés de tipo biótico y abiótico (Sah *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2017). En condiciones de estrés por sequía, ABA mejora el sistema radical y con ello mejora la adquisición óptima de agua y nutrientes aumentando longitud y densidad de la raíz para profundizar y entrar en contacto con zonas del suelo con mayor contenido de humedad (Vysotskaya *et al.*, 2009). Algunas especies que comúnmente producen este tipo de compuestos son *Azospirillum brasilense*, *Arthrobacter koereensis*, *Bacillus amyloliquefaciens* y *B. licheniformis* (Egamberdieva *et al.*, 2017).

3.2.4.3. Bacterias productoras de ácido abscísico (ABA)

El ácido abscísico (ABA) participa en diferentes procesos fisiológicos, como la dormancia de la semilla, abscisión de órganos (Shahzad *et al.*, 2017) y en la expresión de genes relacionados con la respuesta a estrés de tipo biótico y abiótico (Sah *et al.*, 2016; Zhou

et al., 2017). En condiciones de estrés por sequía, ABA mejora el sistema radical y con ello mejora la adquisición óptima de agua y nutrientes aumentando longitud y densidad de la raíz para profundizar y entrar en contacto con zonas del suelo con mayor contenido de humedad (Vysotskaya *et al.*, 2009). Algunas especies que comúnmente producen este tipo de compuestos son *Azospirillum brasilense*, *Arthrobacter koereensis*, *Bacillus amyloliquefaciens* y *B. licheniformis* (Egamberdieva *et al.*, 2017).

3.2.5. Quelatación de hierro por PGPR

El Fe es importante en procesos fisiológicos y se encuentra de manera insoluble y no disponible (ion férrico Fe^{3+}) para su absorción por las plantas (Ammari y Mengel 2006) y en la mayoría de los casos encontrándose como hidróxidos, óxidos, carbonatos y fosfatos de Fe en el suelo (Afzal *et al.*, 2019). Las PGPR favorecen la absorción de Fe por las plantas mediante secreciones de sideróforos que son compuestos de bajo peso molecular y de alta afinidad que se unen al ion Fe^{3+} y lo translocan en la célula de la bacteria para reducirla a forma soluble de Fe^{2+} (Rawat *et al.*, 2020). Algunas bacterias reportadas que utilizan los sideróforos para mejora la absorción de Fe por las plantas son *Pseudomonas* (Rathore 2014), también *Bacillus megaterium*, *B. subtilis* y *Rhizobium radiobacter* que secretan sideróforos en condiciones alcalinas de 80–140 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (Ferreira *et al.*, 2019)

3.2.6. Efecto de biocontrol por PGPR

Las PGPR también actúan como agentes de biocontrol debido a la capacidad de restringir y limitar las afectaciones causadas por patógenos, por medio de síntesis de metabolitos secundarios que actúan como antibióticos, enzimas degradadoras de pared celular y activación del sistema de defensa de la planta, también conocido resistencia sistémica inducida (ISR; Pérez *et al.*, 2014; Molina *et al.*, 2015).

La producción de compuestos que inhiben o limitan el crecimiento de los patógenos, lo realizan mediante la desestabilización de la pared celular del patógeno (Liu *et al.*, 2017b). Dentro de los compuestos reconocidos como antibióticos que realizan esta acción se encuentran la azomicina, ácido 2,4-diacetil-fluoroglucinol, el ácido fenazina-1-carboxílico,

la fenazina-1-carboxamida, la piroluteorina, la pirrolnitrina, la omicina A, oligomicina A, kanosamina, zwittermicina A y xantobaccina (Odoh, 2017; Jayakumara *et al.*, 2020). De los géneros que los producen se encuentran *Burkholderia*, *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Stenotrophomonas* (Odoh, 2017; Santoyo *et al.*, 2019).

La producción de enzimas líticas por PGPR permite la perforación y/o degradación de la pared celular del hongo, su inhibición o eliminación (Villarreal *et al.*, 2018). Algunas enzimas como las quitinasas, celulasas, proteasas y β -1,3-glucanasas, que modifican pared (Mota *et al.*, 2017). Los lipopéptidos de bajo peso molecular anfifílicas brindan protección a la planta durante su crecimiento e inducen a resistencia sistémica (Hashem *et al.*, 2019).

La capacidad de biocontrol de las PGPR al utilizar el Fe se da por dos mecanismos: directamente por la formación de complejos de Fe^{3+} -sideróforos a nivel de membrana celular o al reducirlo extracelularmente a complejos de Fe^{2+} (Hider y Kong, 2010). Con la mínima disponibilidad del elemento Fe en la rizosfera regulada mediante el proceso de quelatación, se restringe el desarrollo y colonización de microorganismos, muchos de ellos fitopatógenos y dependientes de Fe para completar sus ciclos de vida (Kannoja *et al.*, 2019).

3.2.7. Biorremediación

En el proceso de biorremediación y por medio de diferentes mecanismos, las bacterias promotoras del crecimiento vegetal participan en la desintoxicación o alivio de estrés causados por contaminantes xenobióticos, metales pesados (algunos metaloides), residuos de pesticidas y otros compuestos tóxicos que se encuentran en el suelo (Rajkumar *et al.*, 2012; Rawat *et al.*, 2020). Entre los mecanismos de respuesta a contaminantes dirigidos por las PGPR se encuentra la biosorción, bioacumulación, precipitación (Sharma y Archana, 2016), supresión por barreras de permeabilidad, quelatación o retención extracelular e intracelular por alguna proteína/quelante, desintoxicación o transformación enzimática, reacciones de óxido-reducción, eficiencia en el transporte del metal, tolerancia pasiva y disminución en la sensibilidad a los iones metálicos mediante enzimas. Estos mecanismos generan alivio, tolerancia y resistencia para la planta (Wheaton *et al.*, 2015).

Este tipo de microorganismos mejoran la productividad y rendimientos agrícolas debido a la resistencia a este tipo de compuestos tóxicos (Etesami, 2018). Tal es el caso de *Acinetobacter junii* y *Bacillus flexus* tolerantes al As debido al gen *arsC* que codifica la proteína metalorreguladora que permite la desintoxicación del As (Marwa *et al.*, 2019)

3.3. Hongos formadores de micorriza arbuscular (HFMA)

Los hongos formadores de micorriza arbuscular (HFMA) forman parte importante del microbioma del suelo. Estos hongos establecen relaciones simbióticas con la mayoría de las plantas terrestres (Tedersoo *et al.*, 2018); de esta asociación simbiótica se presenta un crecimiento intra e intercelular en la corteza de la raíz, formando dos tipos de estructuras, arbusculos y vesículas (Quilambo, 2003). La formación de estructuras conocidas como hifas extrarradicales que exploran el área de la rizosfera permite múltiples interacciones en el suelo e influye a otros microorganismos por medio de sustancias llamados exudados fúngicos (Gahan y Schmalenberger, 2015; Wang *et al.*, 2016). Previo a la colonización de la raíz, se presenta el reconocimiento entre las dos partes, por medio de señalización de moléculas difusibles liberadas por ambos simbiontes (Kapulnik *et al.*, 2011). La producción de estrigolactonas que estimulan a los HFMA a colonizar las raíces de las plantas y formar las respectivas estructuras en ellas, dependen de las limitantes de P inorgánico en el suelo (Wang *et al.*, 2021). El P se encuentra en cantidades suficientes en el suelo, pero, aproximadamente un 90% se encuentra en estado no lábil y en precipitación con otros minerales. Solo un pequeño porcentaje del P se encuentra disponible para la absorción por las plantas (Gyaneshwar *et al.*, 2002; Plante, 2007). Por ello, Tiwari *et al.*, (2022) mencionan que más del 90% de plantas terrestres pueden vivir simbióticamente con HFMA.

3.3.1. Mecanismos de mejoramiento en el crecimiento de las plantas

Los HMFA están clasificados dentro de los biótrosos obligados y favorecen a la planta en muchos aspectos (Karasawa *et al.*, 2012), como el aumento del área de exploración radical, sobre todo en aquellos lugares poco accesibles y con ello permite la transferencia de agua y algunos nutrientes hacia la planta (Barea *et al.*, 2017). Los beneficios que obtiene la planta de las asociaciones micorrízicas presentan un costo de carbono

(Sawers *et al.*, 2018), lo que corresponde al suministro de carbohidratos y lípidos para el crecimiento del hongo (Keymer y Gutjahr, 2018; Lanfranco *et al.*, 2018).

En el aspecto nutrimental los hongos micorrízicos colaboran en la absorción de macroelementos como el Ca y Mg (Säle *et al.*, 2015), N en su forma amoniacal (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-), K, P y algunos microelementos como Cu y Zn (Cavagnaro, 2008; Lehmann, *et al.*, 2014).

Las micorrizas tienen la particularidad de absorber fosfatos en suelos deficientes de P disponible (Etesami *et al.*, 2021) y las hifas extrarradicales tienen la capacidad de extenderse mucho más allá de la rizosfera y traslocar el P en su forma de polifosfatos (Sato *et al.*, 2019). Las hifas también pueden descomponer moléculas orgánicas más grandes en el suelo y absorberlas (Bunn *et al.*, 2019). La transferencia de P dentro de las células de la raíz está a cargo de los arbúsculos de vida útil efímera. Estas estructuras fúngicas son formadas durante la colonización y determinadas por los genes *IPR* (familia de genes H^+ symporter); los cuales se encuentran tanto *in planta* como en el micelio extrarradical del hongo (Kobae *et al.*, 2016; Sawers *et al.*, 2017; Gutjahr y Parniske, 2017).

3.3.2. Mecanismo de tolerancia al estrés biótico y abiótico

Las asociaciones micorrízicas permiten el alivio o tolerancia al estrés (Figura 3) de tipo abiótico (Chang *et al.*, 2018) y biótico por medio de la inducción de resistencia sistémica adquirida (SAR), resistencia sistémica inducida (ISR), ácido jasmónico ácido (JA) o etileno (ET) (Jacott, *et al.*, 2017; Solanki *et al.*, 2021). En ambientes salinos las plantas micorrizadas mantienen la eficiencia fotosintética y conductancia estomática (Haque y Matsubara, 2018; Zhu *et al.*, 2018), la acumulación de prolina y otros azúcares que se desempeñan como osmoprotectores (Yamato *et al.*, 2008; Solanki *et al.*, 2021). También la reducción de iones Na^+ y Cl^- , los cuales tienden a homeostasis iónica (Li *et al.*, 2020) y con ello reducen el daño oxidativo y permiten continuar con el desarrollo vegetativo.

Algunas especies de hongos micorrízicos colonizan eficientemente especies vegetales que son hiper acumuladoras y tolerantes de metales pesados (Gaur y Adholeya, 2004), por lo tanto, los efectos benéficos de las micorrizas son el desarrollo y crecimiento en

condiciones estresantes por altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (Miransari, 2017).

En las plantas, las hifas tienen la capacidad de inmovilizar los metales pesados interno o externo, fijarlo en la pared celular, almacenarlo en la vacuola o simplemente quelatarlo con otros compuestos en el citoplasma (Ouziad *et al.*, 2005; Punamiya *et al.*, 2010).

La tolerancia al estrés hídrico en ambientes limitados por agua produce el cierre estomático y por ende la reducción del CO₂, lo que afecta el proceso fotosintético y disminución del carbono (Osakabe *et al.*, 2014). Las micorrizas intervienen en el aumento de superficie de contacto y exploración de espacios pequeños del suelo, para la absorción de agua mediante sus hifas y mejoramiento del flujo apoplástico del agua (Diagne *et al.*, 2020)

Los HFMA promueven control directo e indirecto de enfermedades, a través del mejoramiento en el crecimiento y vigor vegetativo por medio de la nutrición (Bencherif *et al.*, 2019); la regulación de metabolitos de crecimiento como, ácido indol acético (AIA), ácido abscísico (ABA), citoquininas (CT), ácido giberélico(GB) entre otros (Song *et al.*, 2020) y la competencia con otros microorganismos patogénicos (Wang *et al.*, 2018). Los HFMA tienen la capacidad de producir compuestos antifúngicos (polifenoles; Bencherif *et al.*, 2019), antibacterianos (polimixinas) y entre otras toxinas que combaten patógenos (Wang *et al.*, 2018; Kaur y Suseela, 2020).

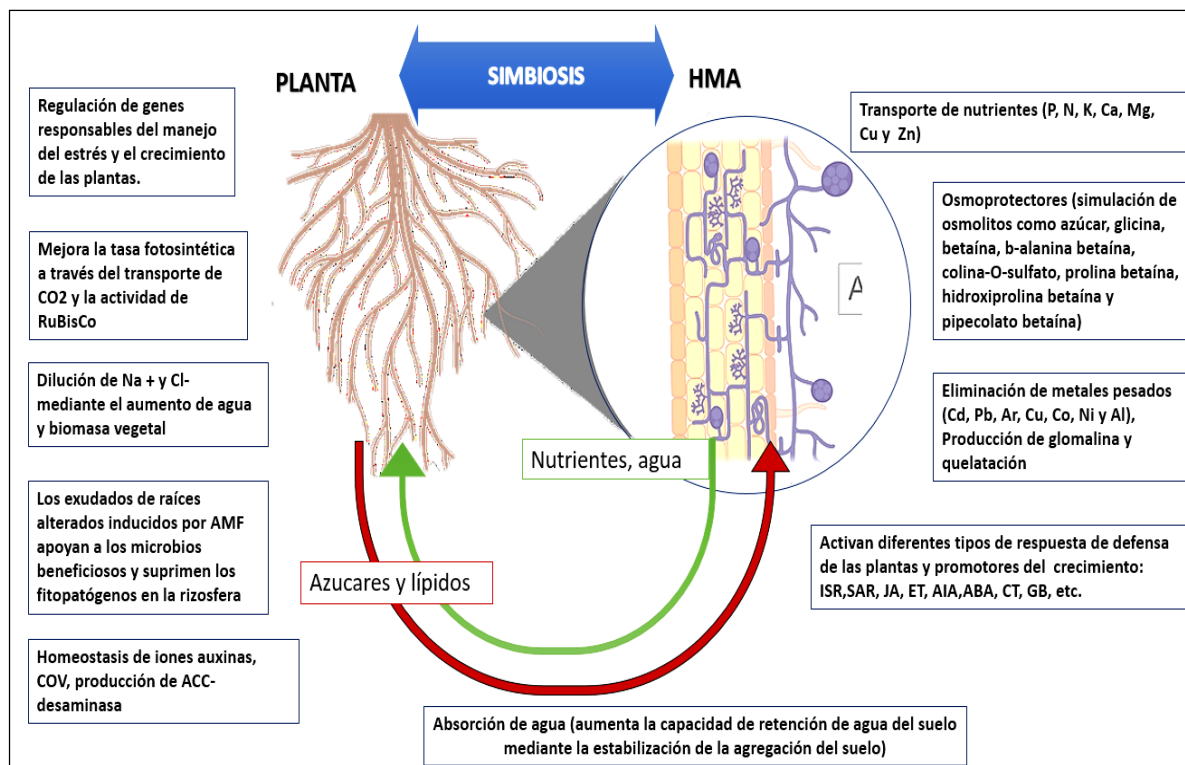


Figura 3. Aportaciones de la relación simbiótica de HFMA-planta en condiciones de estrés biótico y abiótico (modificado de Solanki *et al.*, 2021, Dowarah *et al.*, 2021; Few, 2018)

3.3.3. Mecanismos en el mejoramiento de la salud del suelo

Los HFMA brindan un servicio ecosistémico mediante restauración de los suelos degradados, principalmente por la agregación de las partículas del suelo (Leifheit *et al.*, 2014), con ello mejoran la calidad y salud del suelo en condiciones desfavorables, resultando un mejoramiento en la fertilidad física del suelo (Smith y Read, 2008). La agregación del suelo permite el crecimiento de raíces, estructuración de espacios porosos, aireación del suelo y la resistencia a la erosión (Lehman *et al.*, 2019).

Para el mejoramiento de la estructura del suelo se han descrito algunos mecanismos de agregación de partículas (Figura 4). El mecanismo biofísico permite la distribución y ramificación de las hifas extrarradicales y hay un entrelazamiento, alineación de partículas por la presión física y cambios en el potencial hídrico local causados por el micelio (Lehmann *et al.*, 2017). El mecanismo biológico se les atribuye básicamente a las interacciones que desempeñan los hongos micorrízicos con diferentes poblaciones y

redes alimentarias en el suelo (Rillig y Mummey 2006; Lehmann *et al.*, 2017). Mientras que el bioquímico se les atribuye a los productos fúngicos como los polisacáridos, glicoproteínas e hidrofobinas producidas por hifas vivas o en descomposición (Lehmann *et al.*, 2017). También participan las proteínas del suelo relacionadas con la glomalina (GRSP) su funcionalidad es actuar como un cementante de las partículas, otra particularidad es la insolubilidad que presenta con el agua lo que ofrece estabilidad y protección superficial de los agregados del suelo (He *et al.*, 2020).

Las plantas colonizadas por micorrizas liberan ácidos orgánicos y glicoproteínas, estos permiten la sorción, quelación e inmovilización de los metales pesados en el suelo (Gaur y Adholeya, 2004; Herath *et al.*, 2021).

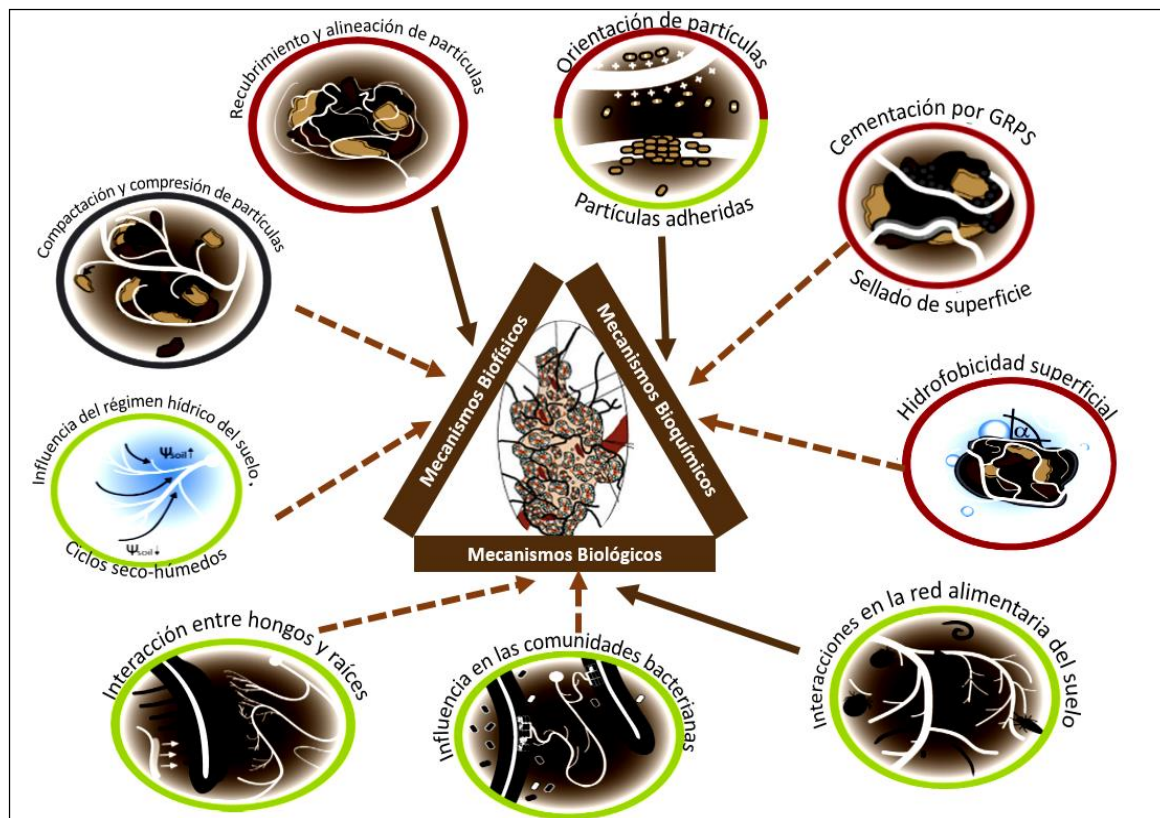


Figura 4. Mecanismos de agregación del suelo (Modificado de Lehmann *et al.*, 2017; Rillig y Mummey, 2006).

3.4. Aguacate (*Persea americana*): generalidades, taxonomía y fenología

El aguacate es un árbol frutal de hojas perennes, domesticado, autóctono de Mesoamérica (Boza *et al.*, 2018), que puede alcanzar alturas superiores a 20 metros e incluso de copas densas (Litz *et al.*, 2007). Este árbol pertenece a la Familia Lauraceae, Género *Persea*, Subgénero *Persea*, Especie *Persea americana* Mill. (Barrientos y López, 2000). En México existen 26 especies del género *Persea* Mill (Campos *et al.*, 2008), de los cuales Chiapas es el estado que tiene mayor diversidad de especies y subgénero *Persea*, seguido Oaxaca y Veracruz (Martínez *et al.*, 2016).

Tres principales razas botánicas; *P. americana* var. *Drymifolia* (mexicana), *P. americana* var. *Guatemalensis* (guatemalteca) y *P. americana* var. *Americana* (antillana) se conocen (Guzmán *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2009). Estas razas difieren por sus características morfológicas y fisiológicas (Barrientos *et al.*, 2010).

3.4.1. Obtención de portainjertos de aguacate

El aguacate es una especie de polinización cruzada y altamente heterocigótica y su reproducción por semillas presenta una descendencia altamente variable en cuanto a las características morfológicas genotípicas, no son uniformes y tardan demasiado tiempo en llegar a producción (oliveira *et al.*, 2008a; Castro *et al.*, 2009; Tripathi y Karunakaran, 2019). Aunque comercialmente aún se utilizan portainjertos procedentes de semilla, la propagación clonal vegetativa está obteniendo popularidad para reducir esos problemas y tener uniformidad en el desarrollo y rendimiento del árbol (De villiers y Ernst, 2015; Tripathi y Karunakaran, 2019). Este método de obtención de plántulas es exitoso siempre que se tenga un sistema radical bien desarrollado, saludable, uniforme y que tengan características sobresalientes del árbol (De Villiers y Ernst, 2007).

3.4.2. Portainjertos y cultivares de aguacate

En México, la mayoría de los cultivares de plantaciones comerciales han utilizado plantas injertadas (Zafar y Sidhu 2018); es decir, conformadas por dos partes (copa y raíz), siendo el tronco y copa el cultivar injertado y del portainjerto la raíz y la parte basal del tronco (Barrientos-Priego *et al.*, 2015). Las plantas injertadas deben presentar

compatibilidad y ser simbióticamente funcionales, tanto la parte área o vástago que se desempeña fotosintéticamente y el portainjerto que suministra el agua y los nutrientes por medio de las raíces (Lazare *et al.*, 2020); además de facilitar el intercambio de hormonas, proteínas y otras macromoléculas (Wang *et al.*, 2017).

Las variedades híbridas, o cultivares, son desarrolladas a partir de diferentes razas (Bergh, 1992), tal es el caso de Hass, Fuerte y Bancon derivados de la cruce entre mexicana y guatemalteca (Newett *et al.*, 2002). La raza mexicana se emplea actualmente como un portainjerto para la variedad Hass, destacada y aceptada en el mercado internacional por su sabor, dureza de cáscara entre otras particularidades del fruto (SAGARPA, 2007; Ferrer *et al.*, 2017). La raza mexicana se caracteriza por ser tolerante al frío y poco tolerante a la salinidad (Barrientos y López, 2000).

La importancia de un buen portainjerto no solamente radica en fungir como soporte, sino también como fuente de absorción nutrimental, tolerancia y resistencia a factores bióticos y abióticos, eficiencia en rendimiento, tamaño del árbol, entre otras características deseables a futuro en el cultivar (Barrientos-Priego *et al.*, 2015). En México, la mayoría de sus portainjertos que provienen de semillas criollas, ya que tienen genes resistentes a diversas condiciones edafoclimáticas, fitosanitarias (Sánchez, 1999) y presentan vigor y rusticidad en las plantas (Alberti *et al.*, 2018).

Por ello, la selección de portainjertos debe obedecer a determinadas características deseables y adaptables a cada región, en cuanto a clima, suelo y que a su vez exprese su potencial productivo en términos de rendimiento (Téliz *et al.*, 2007; Barrientos-Priego *et al.*, 2015; Barrientos- Priego, 2017).

3.4.3. Requerimientos climáticos y edafológicos del aguacate

El aguacate se desarrolla en tres principales climas: semicálido subhúmedo ((A)C(W2)(W)), templado subhúmedo (C(W2)((w)), semicálido subhúmedo ((A)C(w1)(w)). La altitud más común es entre 1,200 y 1600 m. Las condiciones propicias tienen lluvias en verano. Para el clima templado subhúmedo (C(w2)(w)), se ubica en una altitud de 1,900 a 2,300 m. (Anguiano *et al.*, 2007; Vargas *et al.*, 2007; Guzmán *et al.*, 2017). Las temperaturas están en función de las variaciones altitudinales y los ciclos

florales y reproductivos del árbol (Anguiano *et al.*, 2007). Las razas de aguacate tienen ciertas características genéticas que les permite desarrollarse en diversas altitudes, tal es el caso de la raza mexicana, que presenta mayor resistencia al frío con altitud de hasta 2000 metros, en clima de semitropical a templado. La raza guatemalteca se desarrolla entre 1000 a 2000 m de altitud y clima subtropical. Por último, la raza antillana presenta menor resistencia al frío y se ubica con altitud menor de 1000 m (Barrientos y López, 2000).

Los requerimientos edáficos representan un gran reto para este tipo de árbol debido a las exigencias por parte del sistema radical. Sus raíces que absorben nutrimentos se encuentran distribuidas en los primeros 16 cm de profundidad. Por lo que esta capa superficial debe presentar buen porcentaje de porosidad (Selladurai *et al.*, 2020). Tal como lo mencionan Salazar y Cortés (1986), el desarrollo radical vigoroso, uniforme, ramificado, abundante en raíces finas, eficiente en absorción de micronutrimentos, es favorecido por la buena aireación del suelo. De ahí que los suelos en los que se produce aguacate son jóvenes geológicamente, con buena estructura, alta capacidad de drenaje y ligeros (Tapia *et al.*, 2007). Las clases texturales que favorecen el crecimiento del aguacate van desde arenosas hasta las areno-arcillosas, con al menos 0.8 a 1 m de profundidad (Selladurai *et al.*, 2020; Garrido, 2013; Dane, 2016). Los suelos francos con buena capacidad de intercambio iónico, suficiente porosidad y retención de humedad, suelen ser los que favorecen el desarrollo radical del aguacate.

Por otro lado, estos suelos deben tener suficiente materia orgánica y pH de ácido a neutro (5.5. a 6.5). La tolerancia a la salinidad depende de la variedad o raza, tal es el caso de la raza antillana que es tolerante a la salinidad, mientras que la mexicana y guatemalteca presentan baja tolerancia (Barrientos y López, 2000; Nataren *et al.*, 2020). En suelos con pH superiores a 7 se presentan deficiencias nutrimentales, principalmente de micronutrientes (Bernal *et al.*, 2008).

3.4.4. Requerimientos nutrimentales

Los requerimientos nutrimentales o las dosis de fertilización están en función de la edad foliar, el tipo de portainjerto, el estado fenológico y fisiológico de la planta (Salazar-García

et al., 2015), el cultivar y la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Selladurai *et al.*, 2020).

La demanda nutrimental en huertos establecidos se relaciona con el potencial productivo, rendimiento, calidad del fruto y es dependiente de la oferta del suelo (Tagliavini *et al.*, 2000; Selladurai *et al.*, 2020). Tal y como lo mencionan Garciana y Ferrat (2001), para producir 1000 kg de fruta la demanda osciló de 150 y 300 g N, 50 y 110 g P₂O₅ y 300–500 g K₂O, 7–10 g Ca, 15–30 g Mg; 20–35 g S, 0,2–0,5 g Zn y B, 0,2 g Cu, 0.5–1.0 g Fe. Sánchez (2001), menciona que las dosis de NPK en kg ha⁻¹ es de 200-200-100 para Estado de México y Tapia *et al.*, (2007) especifican que es de 200-200-300 para Michoacán. Sin embargo, con la tecnificación en sistemas de riego, los análisis de suelo y foliar, es posible diseñar programas de fertirrigación más precisos, con metas de rendimiento y que consideren el contenido nutrimental del suelo.

El aguacate, al igual que otras plantas, requieren de un balance en todos los nutrimentos, para su óptimo crecimiento y desarrollo (Lovatt, 2013); por lo que es importante conocer el efecto de cada nutriente al realizar una aplicación excesiva o deficiente; además de tener muy claras las funciones específicas de cada uno de ellos (Novoa *et al.*, 2018). El Cuadro 1 muestra algunas de estas consideraciones.

Cuadro 1. Los nutrientes en el funcionamiento del metabolismo y fisiología de plantas de aguacate (modificado de Sánchez y Ramírez, 1999; Maldonado, 2002; Salazar, 2002; Taiz y Zeiger, 2010; Marschner, 2012; Alcántar *et al.*, 2016).

Nutrimento	Forma Absorción	Funciones
Nitrógeno (N)	NH ₄ ⁺ NO ₃ ⁻	Formación de todos los tejidos vegetales. Síntesis de aminoácidos (proteínas), nucleótidos (ADN, ARN) y reguladores del crecimiento vegetal. Constituyente de la clorofilas y formación de células nuevas.
Fósforo (P)	H ₂ PO ₄ ⁻ H ₂ PO ₄ ⁻²	Síntesis de ATP, nucleótidos (ADN, RNA), fosfolípidos, coenzimas y componente de los azúcares fosfatados. Participa en la producción y transferencia de energía.
Potasio (K)	K ⁺	Activador fisiológico, calidad de fruto resistencia a enfermedades. Actua como regulador del movimiento de agua y nutrientes, osmorregulador en la elongación celular, transporte de azúcares.
Calcio (Ca)	Ca ²⁺	Crecimiento, resistencia a enfermedades y vida de anaquel. Considerado como segundo mensajero en señalización. Componente de la lamela media de paredes celulares y da rigidez a los tejidos y estabilización de la pared celular. Actúa como cofactor con algunas enzimas involucradas en la hidrólisis de ATP y fosfolípidos.
Magnesio (Mg)	Mg ²⁺	Activador enzimático, constituyente de la clorofila, respiración. Participa en la síntesis de azúcares y la agregación ribosomal. Es esencial para la síntesis de proteínas.
Azufre (S)	SO ₄ ²⁻	Síntesis de dos aminoácidos, cisteína y metionina para la síntesis de proteínas. Es constituyente de la coenzima A, glutatión, biotina, adenosina-5-fosfosulfato y 3- fosfoadenosina.
Zinc (Zn)	Zn ²⁺	Activador enzimático. Calidad del fruto. Su función metabólica está basada en su fuerte tendencia a formar complejos tetrahedrales con N-, O- y particularmente con ligandos azufrados, mediante los cuales juega un papel funcional (catalítico) y estructural en reacciones enzimáticas.

Nutrimento	Forma Absorción	Funciones
Hierro (Fe)	Fe ²⁺	Constituyente del fitocromo, proteínas ferrosas en la fotosíntesis, fijación de N ₂ , respiración, transferencia de energía y participante en diversas reacciones.
Cobre (Cu)	Cu ²⁺	Participa en uniones enzimáticas, las cuales catalizan reacciones redox. Es un elemento de transición activo en procesos redox con funciones en fotosíntesis, respiración, metabolismo del C y N, y protección contra estrés oxidativo.
Manganeso (Mn)	Mn ²⁺	Crecimiento y reproducción. Participante en la actividad deshidrogenasa, decarboxilasas, oxidasa y peroxidasa. Es un cofactor enzimático en el complejo ATP-Mn (transferencia de energía).
Boro (B)	H ₂ BO ₃ ²⁻ H ₃ BO ₃	Crecimiento, reproducción, floración y desarrollo del fruto. Evidencia de ser importante en el transporte de carbohidratos.
Cloro (Cl)	Cl ⁻	Fotólisis del agua. Participante en la apertura y cierre estomático.
Molibdeno (Mo)	MoO ₄ ²⁻	Cofactor enzimático en la reducción de nitrato a amoníaco para la síntesis de proteínas.
Silicio (Si)	Si (OH) ₄	Estructura celular y resistencia a enfermedades.

3.5. Inoculantes microbianos en aguacate

Los inoculantes microbianos cada vez se toman con mayor frecuencia como opción para mejorar el desarrollo de portainjertos de aguacate, con o sin injertos, previo al trasplante en campo como se describen brevemente a continuación. En Uruapan Michoacán, México; Carreón *et al*, (2014), realizaron una evaluación de 12 inoculantes de hongos micorrízicos en plantas de aguacate en etapa vivero, en plantas de 60 días de edad e injertados, en el que se aplicaron *Gigaspora gigantea*, *Acaulospora delicata*, *Rhizophagus fasciculatus*(externo), Consorcio de Veracruz MTZ1-UV; *Rhizophagus fasciculatus*, *R. irregularis* 28-A, comunidad nativa de AMF; *R. irregularis* (MUCL), *R. fasciculatus* + *Azospirillum*; *Sclerocystis* aff. *rubiformis*, *Acaulospora laevis*, *Scutellospora*

pellucida y testigo. La evaluación la realizaron 5 meses después de la inoculación. Variables de desarrollo como número de hojas, diámetro de tallo, peso seco de raíz y del tallo fueron evaluadas al final del experimento. Resultados favorables para algunas variables y ciertas cepas eficientes de HMA se presentaron; sin embargo, mencionaron que el tiempo de experimentación debe ser mayor a 5 meses para que los resultados de la inoculación sean más evidentes.

Soriano *et al.*, (2021) manifestaron que los bioestimulantes radicales benefician el crecimiento de plantas de aguacate injertadas con la variedad Hass en un vivero comercial Tingambato, Michoacán. Bioestimulantes comerciales como Nutrisorb® L (ácidos carboxílicos, 11%), Mycoroot® (*Pisolithus tinctorius*, 1×10^6 UFCg⁻¹, *Rhizophagus intraradices*, 1×10^3 UFC g⁻¹; *Azospirillum brasilense*, 1×10^6 UFC g⁻¹, ácidos carboxílicos, 19,7%), Biofit®RTU (*Trichoderma harzianum*, $1,35 \times 10^5$ UFC g⁻¹, *Penicillium bilaiae* + *Penicillium* spp. + *Paecilomyces lilacinus*, $1,25 \times 10^7$ UFC g⁻¹, *Bacillus subtilis*, $1,25 \times 10^8$ UFC g⁻¹, *Azospirillum brasilense*, $1,25 \times 10^5$ UFC g⁻¹, ácidos carboxílicos, 34%) y Glumix® (*Glomus* spp. 1×10^3 UFC g⁻¹) se aplicaron. De lo anterior se concluyó que variables como el número de hojas, altura de la planta, longitud de la raíz principal, unidades SPAD, peso seco de la raíz y porcentaje de micorrización fueron mejoradas por los bioestimulantes. Además, reconocieron que se obtienen mejores resultados de crecimiento y desarrollo radical cuando se combinan microorganismos y ácidos orgánicos (Nutrisorb® L+ Biofit®RTU).

González *et al.* (2017) indicaron que aumenta el crecimiento de plantas de aguacate con diferentes niveles de P e inoculación hongos micorrízicos arbusculares. Los inoculantes micorrízicos (*Rizofermic*-UV, *Pacispora scintillans*) se aplicaron junto con fertilizante fosfatado(H₂PO₄). A los 401 días después de inocularse evaluaron altura de la planta, diámetro de tallo, número de hojas, área foliar, tasa de crecimiento, peso fresco y seco y porcentaje de colonización micorrízica. El uso de micorrizas y baja dosis de fósforo presenta mejor respuesta en las variables de crecimiento de la planta y colonización micorrízica.

Sotomayor *et al.* (2018) realizaron en Ecuador, una aplicación de *Trichoderma harzianum* (0.18 g planta⁻¹ a una concentración de 4.43 x 10⁸ UFC g⁻¹ de producto) y *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* (5 g planta⁻¹) en plantas de aguacate criollo. Los parámetros evaluados fueron peso seco de la raíz y de la parte aérea, concentración de Ca y N foliar y diámetro del tallo. De ello se obtiene que la micorriza incrementa el desarrollo vegetativo y radical, mientras que *Trichoderma* incidió en la acumulación foliar de N y Ca.

3.6. Sustrato en la producción frutícola de viveros

El sustrato es el medio constituido de material de origen sintético o natural que funge como soporte para las plantas, este puede o no aportar nutrientes dependiendo sus características y origen (Castañares, 2020). En el caso de producción de plantas frutícolas se tiene una etapa de crecimiento en viveros previo al establecimiento en el terreno definitivo. Por ello, el uso de un sustrato adecuado, lugar de crecimiento o propagación son aspectos fundamentales en etapa de vivero (Loggioldice *et al.*, 2009).

3.6.1. Perlita

Es un aluminosilicato de origen volcánico expandida a una alta temperatura que va de 1,000 a 2,000 °C (Kaufhold *et al.*, 2014). Este tipo de sustrato es empleado comúnmente para cultivos sin suelo, debido a su principal característica que es inerte y su baja capacidad de intercambio catiónico (0-1 mg L⁻¹) no interfiere en el aporte de nutrientes (Samartzidis *et al.*, 2005). Además, la perlita presenta buena aireación y baja capacidad de retención de agua (Castañares, 2020).

3.6.2. Espuma fenólica

La espuma fenólica, también conocida como espuma de polifenol o espuma agrícola, es un material de resina sintética inorgánica, es inerte, es considerada un medio físico que no aporta nutrientes, homogénea, muy ligera y mantienen una buena proporción de aire y agua. Aún en riegos pesados, la tasa de drenaje de la espuma fenólica permite el desarrollo radical, por su densidad aparente de 15-25 g L⁻¹ (Nemati *et al.*, 2021). Este tipo de sustrato favorece el drenaje y a la vez proporciona suficiente cantidad de agua

por la relación agua-aire. Las plantas se benefician de estas características al no limitar las condiciones aerobias para favorecer el enraizamiento. Este tipo de material se emplea normalmente en arreglos florales, y más recientemente, se busca su potencialidad de uso como sustrato para diversos cultivos. Desde el 2010, la investigación con esta espuma ha estado en curso; tal y como lo mencionaron Park *et al*, (2010, 2011). El uso de espuma fenólica en cultivos hidropónicos con alto valor comercial como frutas y verduras representa una alternativa sumamente eficiente.

Yoon *et al*, (2021) evaluó reguladores del crecimiento vegetal y sustratos para detectar el efecto del enraizamiento, crecimiento y desarrollo de esquejes de sauce (*Salix koriyanagi*). Sustratos como la perlita, espuma fenólica y madera aglomerada fueron utilizados. Aplicaciones de 3 concentraciones diferentes de reguladores de crecimiento (ácido indol-3-butírico (IBA) y ácido α -naftalenoacético (NAA) en esquejes de sauce, fueron realizadas. La mejor respuesta de enraizamiento se presenta en la dosis más baja de reguladores y en el sustrato con espuma fenólica, por lo que se catalogó como uno de los mejores sustratos para la propagación de esta planta.

Wang *et al*, (2021), en la propagación de esquejes de *Pyracantha angustifolia* C.K. Schneid. (Rosaceae); utilizaron diferentes sustratos de enraizamiento: sustrato BVB, lana de roca, Terra Plug y espuma fenólica; junto con tres diferentes auxinas: ácido indol-3-butírico (IBA), ácido α -naftalenoacético (NAA) y ácido indol-3-acético (IAA) en concentraciones de 0, 8 y 16 g L⁻¹ y el último factor el tiempo (30 s, 15 y 30 min) de inmersión de los esquejes. De los resultados obtenidos se concluye que el mejor sustrato es la espuma fenólica con 8 g L⁻¹ de IBA con 15 min de inmersión obteniendo mejor desarrollo radical, mayor porcentaje de enraizamiento y número de raíces.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Inoculación de hongos formadores de micorriza arbuscular y bacterias promotoras del crecimiento vegetal en plantas de aguacate regadas con solución nutritiva de diferente pH.

4.1.1. Establecimiento del experimento

El experimento fue desarrollado de enero a septiembre de 2022 en invernadero del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo; en las coordenadas 19° 27' 38.975" N, W 98° 54' 14.84" O y 2240 msnm. El diseño experimental empleado fue factorial 2³, teniendo como factores (HFMA, PGPR y pH de la solución nutritiva) con dos niveles cada uno y con ocho repeticiones para cada tratamiento, cada planta representó una unidad experimental. Los niveles considerados fueron: HFMA (10 g de inóculo, sin inóculo), PGPR (10 mL de suspensión bacteriana conformada por 4 cepas, sin bacterias) y de la solución nutritiva (pH 6.2, pH 5.8). Los tratamientos quedaron distribuidos como se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Conformación de tratamientos en plantas de aguacate.

TRATAMIENTOS
T1= HFMA+ PGPR+ pH 6.2
T2= HFMA+ PGPR+ pH 5.8
T3= HFMA+ pH 6.2
T4= HFMA+ pH 5.8
T5= PGPR + pH 6.2
T6= PGPR+ pH 5.8
T7= pH 6.2
T8= Testigo (pH 5.8)

HFMA: Hongo formador de micorriza arbuscular, PGPR: bacterias promotoras del crecimiento vegetal, pH: potencial hidronio.

4.1.2. Material vegetal

Las plantas de aguacate utilizadas tenían altura de 40 a 45 cm, variedad criolla raza mexicana, adquiridas en el Mercado de Cuemanco, Ciudad de México. Al momento de establecer los tratamientos, las plantas fueron extraídas de su bolsa de plástico,

desinfectadas con hipoclorito de sodio al 3% durante un min y posteriormente se trasplantaron en macetas con sustrato como se muestra en la Figura 5.

Según el tratamiento correspondiente, al sustrato se adicionó el inóculo de HFMA, posteriormente se aplicó los 10 mL del inóculo bacteriano (Figura 7) y por último se aplicó la solución nutritiva.



Figura 5. Extracción y desinfección de plantas.

4.1.3. Sustrato

El sustrato empleado fue una mezcla de Perlita (Marca Multiperl Mex) y espuma agrícola molida (PEATFOAM®, agroFOAM), esta es obtenida de los recortes de bloques que se utilizan como sustratos en hidroponía. La proporción fue determinada mediante una prueba de porosidad y drenaje por el método propuesto por De Boodt y Verdonck, (1972). Se optó por la proporción en volumen 3:1 (perlita-espuma) con 53.4 % de retención de agua, 33.7 % de aire y 87.1 % de porosidad total. La mezcla se realizó en húmedo y vaciado en bolsas de polietileno de 8 litros (marca comercial Gya Mex).

El proceso de desinfección fue realizado con un producto comercial Oxidate 2.0 (Bio Safe Systems®, Estados Unidos) con una dosis de 6 mL L⁻¹. A cada maceta se le agregaron 2 L del desinfectante dejándolo en reposo durante 24 h y por último fue drenado mediante perforación basal (Figura 6).



Figura 6. Mezcla de sustrato y llenado de maceta.

4.1.4. Preparación del inóculo bacteriano

Las cepas utilizadas de *Pseudomonas tolaasii* (A46 y P61), *Bacillus pumilus modificada* (R44-DsRed) y *Achromobacter xylosoxidans* (C56) pertenecen a la colección de cepas bacterianas del Área de Microbiología, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. Las características y descripción morfológica de estas cepas se muestran en el Cuadro 3.

La reactivación de las cepas A46, P61, C56 se realizó en medio agar nutritivo (BD BIOXON, México) e incubaron a 28 °C durante 72 h. Para la cepa R44-DsRed se le agregó al mismo medio, isopropil β -D-1-tiogalactopiranosido (IPTG) y ampicilina (1 $\mu\text{L mL}^{-1}$); las condiciones y tiempo de incubación fueron los mismos. Esta bacteria está transformada con el plásmido DsRed que le confiere producción de una proteína fluorescente roja (Red Fluorescent Protein) y resistencia a ampicilina para su selección en medios de cultivo. Esta cepa requiere IPTG para activar el plásmido en cultivo *in vitro*.

Las cepas bacterianas se sembraron en caldo nutritivo a 28 °C, a 180 rpm durante 72 h, en agitadora Orbital (Thermo scientific®, MAXQ, España) para su crecimiento. A la cepa R44-DsRed se le agregó al caldo nutritivo ampicilina e IPTG. Los cultivos obtenidos se centrifugaron a 3000 rpm durante 12 min para separar el concentrado microbiano de los nutrientes residuales del caldo nutritivo. Posteriormente, fue resuspendido en agua destilada estéril y por último se midió la concentración de células bacterianas en los inóculos, la cual fue de 10^9 UFC mL^{-1} de acuerdo con la escala de McFarland (McFarland,

1970). Se aplicaron 10 mL de esta suspensión con 4 cepas bacterianas a cada unidad experimental (Figura 7).

Cuadro 3. Características de las cepas bacterianas

Especie	Procedencia	Promoción del crecimiento vegetal	Características morfológicas
<i>Pseudomonas tolaasii</i> (A46)	Rizosfera de papa var. Alpha Valle Toluca, Estado México	Producción de auxinas, solubilización de fosfatos, efecto de biocontrol (Mendoza <i>et al.</i> , 2018).	Forma: circular Elevación: convexa Borde: ondulado Superficie: brillante liso Textura: viscosa Color: blanco opaco
<i>Pseudomonas tolaasii</i> (P61)	Rizosfera de papa var. Alpha Valle Toluca, Estado México	Producción de auxinas, solubilización de fosfatos, efecto de biocontrol (Mendoza <i>et al.</i> , 2018)	Forma: circular Elevación: convexa Borde: entero Superficie: suave brillante liso Textura: viscosa Color: blanco amarillento
<i>Bacillus pumilus</i> modificada (DsRed)	Rizosfera de papa var. rosita Valle Toluca, Estado México	Producción de auxinas y solubilización de fosfatos. (datos no publicados)	Forma: circular Elevación: convexa Borde: entero Superficie: suave brillante liso Textura: viscosa Color: blanco opaco
<i>Achromobacter xylosoxidans</i> (C56)	Aislado de composta en Texcoco, Estado de México	Producción de auxinas, promueve crecimiento radical en caña de azúcar. (datos no publicados)	Forma: puntiforme Elevación: papilar Borde: entero Superficie: opaco y rugoso Textura: Membranosa Color: blanco lechoso

4.1.5. Inóculo de HFMA

La especie *Rhizophagus intraradices* que se tiene en propagación con plantas trampa Vaporub (*Plectranthus coleoides Benth. c.v. mintleaf*) y pasto (*Cynodon dactylon*) en el invernadero del Área de Microbiología de Suelos. Se le evaluó colonización mediante el método de clareo y tinción con azul de tripano (Phillips y Hayman, 1970) en caliente y el porcentaje de colonización total con el método de Biermann y Linderman (1981).

El inóculo se obtuvo de las macetas en propagación con mayor porcentaje de colonización (85%), para ello se extrajeron las raíces con suelo rizosférico; estas se cortaron de un 1 a 2 cm aproximadamente, se mezcló hasta obtener 400 g aproximadamente, del cual se aplicó 10 g por unidad experimental (Figura 7).

4.1.6. Solución nutritiva

Las plantas se regaron con la solución nutritiva de Steiner (1984) (Cuadro 3), con 40 % de su concentración y composición, ajustada a pH 6.2 y 5.8. Para el ajuste de los niveles de pH se utilizó HCl y NaOH 1N.

Cuadro 4. Solución Steiner (Baca-Castillo *et al.*, 2016).

(C.E 2.8 dSm ⁻¹)	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe	B	Mn	Zn	Cu	Mo
ppm	168	31	112	273	180	48	3	0.5	0.5	0.05	0.025	0.002

Durante 2 meses de monitoreo el experimento se mantuvo con riegos cada 2 días con agua potable y solución nutritiva al 40% (2 veces por semana), con un gasto de 150 mL por unidad experimental. A partir del mes 3 se redujo la concentración al 20% (1 vez por semana) respetando los mismos niveles de pH y el resto del riego con agua potable.



Figura 7. Inoculación de HFMA y PGPR.

4.1.7. Evaluación de tratamientos

La evaluación se inició a partir de los 181 días después del trasplante (DDT); las plantas fueron extraídas de la maceta, se separó una cuarta parte del sistema radical (raíces y rizosfera) de cada unidad experimental y se formó una muestra compuesta por cada tratamiento. Los siguientes parámetros fueron valorados:

4.1.7.1. Diámetro de tallo

Durante el desarrollo del cultivo se determinó el diámetro de tallo en los 12 cm. Sobre superficie del sustrato, cada siete días en cada unidad experimental con un vernier digital (Steren MR)

4.1.7.2. Peso seco de la parte aérea y de la raíz

Para esta variable se separó la parte radical de la vegetativa. La parte aérea (tallos y hojas) fueron pesados en fresco y guardado en bolsas de papel. Las raíces fueron lavadas perfectamente con agua de la llave, se pesaron y guardaron en bolsa de papel. Posteriormente, los materiales vegetales se secaron en la estufa de aire forzado a 72 °C durante 96 h y por último pesados en balanza analítica (Sartorius SX-100).

4.1.7.3. Concentración de nutrimental

Se analizó la concentración de nutrimentos primarios (N, P, K) en parte vegetativa, para ello, la parte aérea se secó a 60 °C en estufa de aire forzado durante 24 horas, por segunda vez. El material vegetal seco se molió para obtener 3 muestras compuestas por tratamiento. Posteriormente, el análisis químico de tejido se realizó con las metodologías reportadas (Alcántar y Sandoval 1999).

4.1.7.4. Crecimiento y arquitectura radical

Para la determinación de parámetros radicales, las raíces fueron lavadas perfectamente con agua de la llave para eliminar los restos de sustrato, especialmente espuma de polifenol. Posteriormente fueron cortadas, evitando alterar la arquitectura radical. Las muestras de raíces de cada planta fueron colocadas en charolitas de plástico. En algunos tratamientos fueron distribuidas en al menos 4 charolas, debido a la gran cantidad de raíces por unidad experimental (Figura 8).

Por último, estas fueron escaneadas mediante el software de escáner con el equipo Winrhizo® Pro versión 2016. Los parámetros obtenidos fueron: volumen, longitud, distribuciones de las longitudes, área superficial y número de ramificaciones de las raíces.



Figura 8. Estructura radical, acomodo y distribución de raíces para el escaneo y análisis de parámetros con el software Winrhizo.

4.1.7.5. Colonización micorrízica

El porcentaje de colonización micorrízica se evaluó con el método de clareo y tinción con azul de tripano (Phillips y Hayman, 1970) en frío, para ello se tomaron raíces y se colocaron en una solución KOH al 10 % durante 7 días, lo que implicó 6 cambios de solución KOH, hasta la obtención de raíces claras. Posteriormente, a la muestra se le agregó azul tripano y se dejó en reposo por 24 h a temperatura ambiente. Se tomaron secciones de 3 cm aproximadamente para su montaje en portaobjetos, se cubrieron con cubreobjetos y por último se observaron en microscopio óptico (Iroscope OM-100) y a 60X. El proceso de clareo y tinción se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Proceso de clareo y tinción con azul tripano para determinación de colonización.

4.1.7.6. Tamaño de poblaciones bacterianas

La cuenta de microorganismos viables se realizó mediante conteo por diluciones seriadas de sustrato rizosférico. De la dilución 10^{-1} a la 10^{-6} fueron sembradas en cajas Petri con medios de cultivo. Mediante rastrilleo se distribuyó la alícuota de 100 μ L en cuatro medios diferentes, tres repeticiones de cada uno y con sus respectivas diluciones. Para bacterias totales se usó agar nutritivo (diluciones 10^{-5} y 10^{-6}), para R44-DsRed se usó agar nutritivo con ampicilina (diluciones 10^{-2} y 10^{-3}), para fijadoras de N atmosférico se usó medio de cultivo con fuente combinada de Carbono (C), (Rennie *et al.*, 1981; diluciones 10^{-2} y 10^{-3}), agar papa dextrosa (PDA; diluciones 10^{-2} y 10^{-3}). El conteo de colonias crecidas se realizaron 48 h después de su siembra (Figura 10) y se calculó el número de unidades formadoras de colonias (UFC) por cada g de sustrato rizosférico seco.

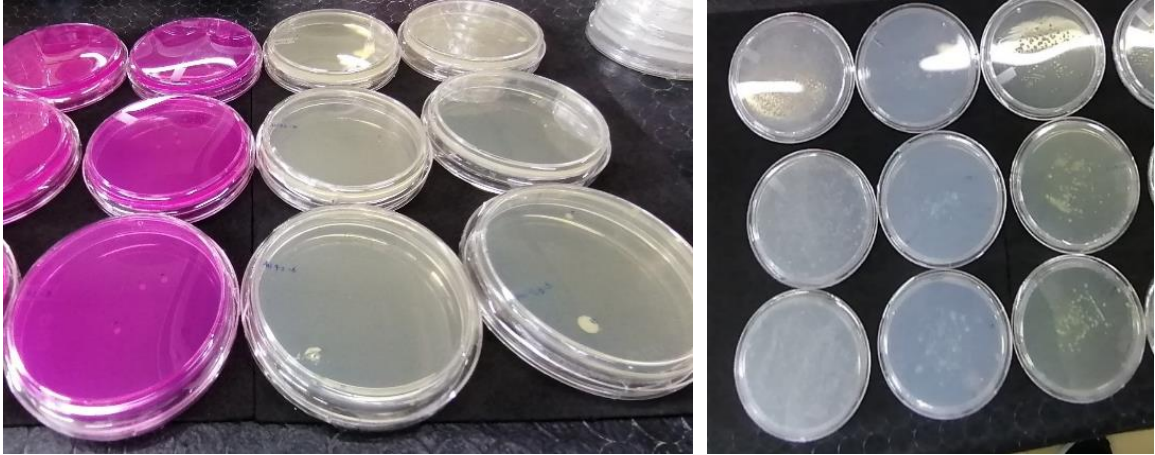


Figura 10. Cajas de Petri para método de cuenta viable en cuatro medios de cultivo diferentes (PDA, Agar nutritivo+antibiótico, fuente combinada de C y agar nutritivo).

4.1.7.7. Colonización de raíces por bacteria fluorescente inoculada

La colonización de la cepa R44-DsRed se determinó por microscopía de epifluorescencia utilizando el filtro Texas Red (Olympus BX-51). Para ello, las raíces finas se cortaron longitudinalmente y se colocaron en portaobjetos (segmentos de 1 cm aprox; Figura 11). Estos segmentos de raíz se observaron a 40X. Los parámetros de la proteína fluorescente son 25.9 kDa, el máximo de excitación es de 558 nm y el máximo de emisión es de 583 nm. Al final, las micrografías fueron obtenidas con cámara digital (QMax 2.9 Mpx) y procesadas con el programa informático Q-Capture (MR).



Figura 11. Cortes longitudinales de raíces de plantas de aguacate para determinar colonización por la bacteria fluorescente R44-DsRed.

4.1.8. Análisis estadístico

Para el análisis de datos de las variables obtenidas se utilizó el lenguaje de programación R y el ambiente R versión 4.2.1 para Windows. Para el análisis de varianza se consideró que los experimentos factoriales (efectos principales y simples) presentaron tratamientos distribuidos completamente al azar. La prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) se realizó solo a las variables que cumplieron con las pruebas de distribución normal (Shapiro-Wilk), independencia de datos y de homogeneidad de varianzas (la prueba de Bartlett). Para la variable tamaño de poblaciones de bacterias totales se realizó la transformación a logaritmo natural para uniformizar la distribución de datos. Los datos de las variables que no cumplieron con los supuestos se analizaron como variables no paramétricas mediante la prueba de Kruskal-Wallis.

4.2. Crecimiento y concentración de nutrimentos en plantas de aguacate inoculadas desde semilla con HFMA y PGPR y fertilizadas con roca fosfórica.

4.2.1. Establecimiento del experimento

El experimento fue establecido a cielo abierto en el Municipio de Texcoco, Estado de México; en los meses de abril a Julio, con temperaturas máxima de 35 °C y mínimo de 11 °C. En las coordenadas geográficas latitud: 19° 30.829' N, longitud: 98° 52.729' O, altitud: 2251 m.

Las semillas de aguacate utilizadas fueron de la variedad criolla raza mexicana, estas fueron obtenidas directamente del árbol en producción del Estado de Oaxaca, San Juan Bautista Atepec. Las semillas se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 1% durante 10 min, posteriormente se dejaron secar a la sombra. Las semillas se colocaron en bolsas de plástico con sustrato y posteriormente se aplicaron los tratamientos correspondientes (Figura 12).

Los inóculos con HFMA y con PGPR fueron depositados directamente sobre las semillas y por último la roca fosfórica (RF) fue aplicada a un lado de las mismas (Figura 13).

El sustrato se mezcló y desinfectó de la misma manera que se describe en el punto 4.1.3. de este documento, la proporción perlita: espuma empleada fue 2:1 (v/v) con 55.2 % de retención de agua, 37.3 % de aire y 92.5 % de porosidad total. La mezcla se realizó en húmedo y vaciado en bolsas de polietileno de 2 L (marca comercial Gya Mex).



Figura 12. Selección, desinfección y siembra de semillas de aguacate criollo.

El diseño experimental empleado fue un diseño factorial 2^3 , teniendo como factores (HFMA, PGPR y RF) con dos niveles cada uno y diez repeticiones para cada tratamiento, obteniendo un total de ocho tratamientos y 80 unidades experimentales, cada semilla una unidad experimental. Los niveles considerados fueron: HFMA (10 g de inoculante, sin inóculo), PGPR (10 mL de suspensión bacteriana inicial, sin inocular) y por último RF (10 ppm P_2O_5 , sin roca fosfórica) por cada unidad experimental y de acuerdo al volumen del contenedor. Los tratamientos quedaron distribuidos como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. conformación de tratamientos aplicados a las semillas.

TRATAMIENTOS
T1= HFMA+ PGPR+ RF
T2= HFMA+ PGPR
T3= HFMA+ RF
T4= HFMA
T5= PGPR + RF
T6= PGPR
T7= RF
T8= Testigo

HFMA: Hongo formador de micorriza arbuscular, PGPR: bacterias promotoras del crecimiento vegetal, RF: roca fosfórica.

Hasta el periodo de evaluación, las plantas se regaron con agua potable cada 48 h, con un gasto aproximado de 50 mL por unidad experimental.



Figura 13. Aplicación del inóculo de HFMA, PGPR y RF en las semillas de aguacate.

4.2.2. Preparación del inóculo bacteriano

El proceso de reactivación, cultivo y suspensión bacteriana fue similar al punto 4.1.4. de este documento. Una variante fue para el conteo de la carga bacteriana, ya que, en esta ocasión, las células bacterianas se contabilizaron con una cámara de Neubauer. La concentración de células bacterianas fue de 4.44×10^{11} y 7.7×10^{10} UFC mL⁻¹ para P61 y A46 respectivamente. Al momento de la siembra se aplicaron 10 mL de la suspensión bacteriana conteniendo estas 2 cepas. En la inoculación complementaria (75 días después del trasplante) se aplicaron las cepas C56 y R44-DsRed. Estas cepas fueron cultivadas en caldo nutritivo durante 72 h, resuspendidas con agua estéril y aplicadas a una concentración de 4.12×10^{10} y 2.44×10^{11} UFC mL⁻¹.

4.2.3. Inóculo de HFMA

El inóculo fue propagado, extraído de las raíces y área rizosférica de la planta trampa Vaporub (*Plectranthus coleoides* Benth. c.v. mintleaf), con condiciones de aplicación similares a las mencionadas en el punto 4.1.5. de este documento (Figura 12).

4.2.4. Roca fosfórica

La roca fosfórica empleada (10 ppm P₂O₅) fue de la marca comercial Grow Depot® (México), con la siguiente composición en ppm: Carbono (C) 4.63, Nitrógeno (N) 3.55,

Fósforo (P_2O_5) 25.073, Calcio (CaO) 45.16, Silicio (SiO_2) 10.005, Aluminio (Al_2O_3) 3.283, Hierro (FeO) 0.961, Sodio (Na_2O) 0.507, Magnesio (MgO) 0.043, Potasio (K_2O) 0.061, Azufre (SO_3) 0.08, Manganeso (MnO) 0.036, Zinc (Zn) 53.

4.2.5. Evaluación de tratamientos

La evaluación se inició a partir de los 35 días después de la siembra (DDS) para el caso del porcentaje de germinación y las variables de desarrollo, estas lecturas fueron realizadas cada 7 días y las otras fueron evaluadas al término del experimento (103 DDS y 68 días después de su emergencia), momento en el cual las plantas fueron extraídas de las macetas.

4.2.5.1. Porcentaje de germinación

El porcentaje de germinación se evaluó a los 35 DDS, relacionando la cantidad de semillas germinadas con respecto al total que fueron sembradas (Figura 14).



Figura 14. Evaluación de germinación de semillas de aguacate.

4.2.5.2. Altura, diámetro de tallo y número de hojas

Dentro de las variables de desarrollo se evaluó semanalmente la altura con un flexómetro (Truper®), el diámetro del tallo se midió en cada unidad experimental a 5 cm sobre la superficie del sustrato, con un vernier digital (Steren MR) y se contaron las hojas de cada planta (Figura 15).



Figura 15. Evaluación de variables de desarrollo (altura y diámetro) en plántulas germinadas de aguacate.

4.2.5.3. Peso seco de la parte aérea y de la raíz

Para esta determinación se realizaron pasos muy similares a los indicados en el punto 4.1.7.2. de este documento.

4.2.5.4. Concentración de nutrimental

La determinación de esta variable se realizó como esta indicado en el punto 4.1.7.3. de este documento.

4.2.5.5. Crecimiento y arquitectura radical

Para la determinación de estas variables se realizó el mismo procedimiento descrito en el punto 4.1.7.4. de este documento con el equipo WinRhizo. Imágenes de este experimento se presentan en la Figura 16.



Figura 16. Arreglo y distribución de raíces para escaneo en Winrhizo.

4.2.5.6. Colonización micorrízica

El porcentaje de colonización micorrízica se evaluó con el método de clareo y tinción con azul de tripano indicado a detalle en el punto 4.1.7.5. de este documento.

4.2.5.7. Tamaño de las poblaciones bacterianas

Se realizó mediante el método de cuenta viable, con diluciones decimales y siembra en los medios de cultivo descritos en el punto 4.1.7.7. de este documento (Figura 17).

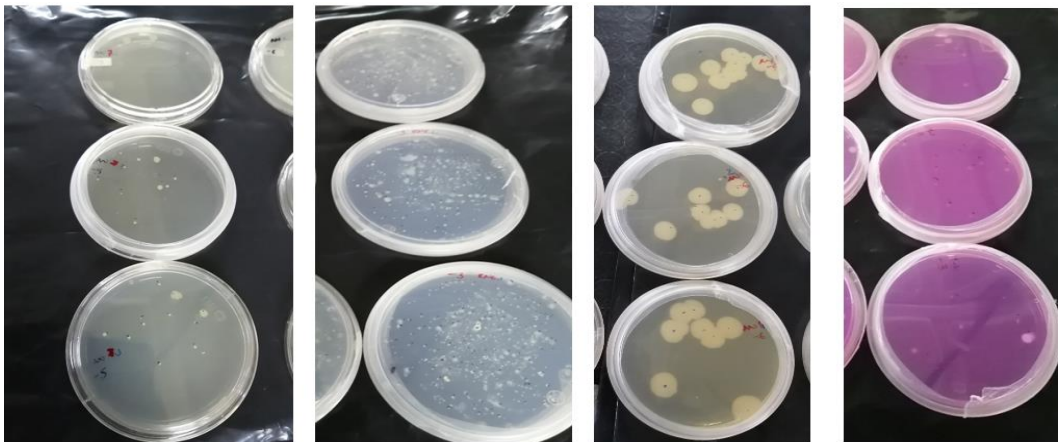


Figura 17. UFC en cuatro medios de cultivos diferentes (agar +antibiótico, Rennie, Agar nutritivo, PDA).

4.2.5.8. Colonización de raíces por bacteria fluorescente inoculada

La colonización de los tejidos radicales se evaluó mediante el proceso descrito en el punto 4.1.7.8. de este documento.

4.2.6. Análisis estadístico

Para el análisis de datos de las variables obtenidas se utilizó el lenguaje de programación R y el ambiente R versión 4.2.1 para Windows. de lenguaje libre y abierto. Para el análisis de varianza se consideró que los experimentos factoriales (efectos principales y simples) presentaron tratamientos distribuidos completamente al azar. La prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) se realizó solo a las variables que cumplieron con las pruebas de distribución normal (Shapiro-Wilk), independencia de datos y de homogeneidad de varianzas (la prueba de Bartlett). Los datos de las variables que no cumplieron con los supuestos se analizaron como variables no paramétricas mediante la prueba de Kruskal-Wallis.

V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Inoculación de hongos formadores de micorriza arbuscular y bacterias promotoras del crecimiento vegetal en plantas de aguacate regadas con solución nutritiva de diferente pH.

5.1.1. Diámetro de tallo

En el Cuadro 6 se muestran las medias del diámetro de tallo para los distintos tratamientos, donde, se indica que existieron diferencias estadísticamente significativas para esta importante característica de los portainjertos. Los factores inoculación con HFMA y con PGPR tiene una respuesta favorable en aumento del diámetro de tallo respecto al testigo. Así mismo, la solución nutritiva pH 5.8 fue mejor que 6.2. De esto, se destaca que el tratamiento con plántulas inoculadas con PGPR, HFMA y con solución nutritiva pH de 6.2 fueron las que tuvieron mayor diámetro de tallo. Curiosamente, el tratamiento con la utilización de solución nutritiva a pH 6.2, pero sin inoculación de microorganismos, presentó el diámetro de tallo más bajo (Figura 18).

Lo que implica que la inoculación de PGPR y HFMA, favorece el incremento en diámetro de tallo. Esto coincide con Angulo-Castro *et al.* (2018), obtuvieron que las cepas bacterianas (P61 y R44) mostraron mayor efecto en diámetro de tallo con respecto al testigo sin fertilizar en ambos cultivares de Chile; así mismo, la inoculación de HMA más efectivos en diámetro de tallo correspondieron a los consorcios H1 y H3. También, Cabanzo *et al.* (2020) obtuvieron diámetros de tallo (entre 13 y 5% más) en plántulas de Chile serrano con la inoculación de *P. tolaasii*.

Por otro lado, Sotomayor *et al.* (2022) indicaron diámetros de 7.5 mm y de 7.51 mm en plántulas de aguacate de cultivar criollo para los consorcios 1 y 2 respectivamente.

Cuadro 6. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, pH de la solución nutritiva y su interacción en el diámetro del tallo de plantas de aguacate criollo a los 181 DDT.

TRATAMIENTOS	DIÁMETRO DE TALLO (mm)
HFMA + PGPR+ pH 6.2	8.08 ± 0.90 a
HFMA + PGPR+ pH 5.8	7.68 ± 1.00 ab
HFMA + pH 6.2	6.66 ± 0.52 bc
HFMA+ pH 5.8	6.45 ± 0.94 c
PGPR + pH 6.2	6.36 ± 0.62 c
PGPR + pH 5.8	7.66 ± 0.69 ab
pH 6.2	4.90 ± 0.50 d
Testigo (pH 5.8)	5.81 ± 0.71 cd
DHS	1.19
Efectos principales	
HFMA	
SIN	6.19 ± 1.17 b
10 g	7.22 ± 1.07 a
PGPR	
SIN	5.96 ± 0.946 b
10 mL	7.45 ± 1.02 a
pH	
5.8	6.90 ± 1.14 a
6.2	6.51 ± 1.29 b
SIGNIFICANCIA*	
HFMA	***
PGPR	***
pH	*
HFMA x PGPR	NS
HFMA x pH	***
PGPR x pH	NS
HFMA x PGPR x pH	NS

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Promedios ± desviación estándar(sd) con letras distintas en la columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$). DHS = Diferencia Honestamente Significativa de Tukey. *No significativo y significativo a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

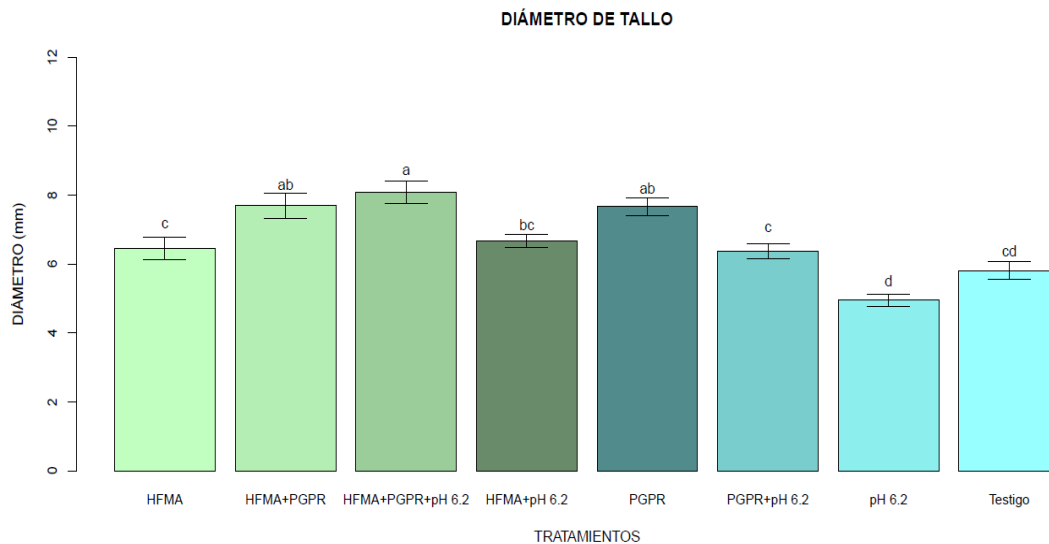


Figura 18. Diámetro del tallo de plantas de aguacate criollo inoculadas con PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar. Las barras indican error estándar (SE). Letras diferentes sobre las columnas indican diferencias significativas [Tukey (DHS), $\alpha=0.05$].

5.1.2. Peso seco de la parte aérea y de la raíz

En peso seco de la parte aérea (variable no paramétrica), las medias de los tratamientos mostraron diferencias relevantes estadísticamente, basadas en la prueba de Kruskal-Wallis (Cuadro 7). El factor más determinante para la variable de crecimiento de la parte aérea fue el pH de la solución nutritiva. En este parámetro se muestran reducciones por el incremento de pH respecto al tratamiento testigo. En el caso del tratamiento pH 6.2 sin inoculación de microorganismos, este generó una reducción del peso seco del 73.74% respecto al testigo (3.84 g con pH 6.2 y 14.62 g con pH 5.8). Otros tratamientos que fueron inoculados con bacterias, hongos formadores de micorrizas y con aumento de pH a 6.2, presentan reducciones menores del 50% respecto al testigo. Es decir, la inoculación con microorganismos benéficos aminoró los efectos del aumento del pH en la solución nutritiva.

Estos pesos son menores a los que obtuvieron Sotomayor *et al.* (2022), con la aplicación del consorcio bacteriano de 19.93 g, representando un incremento del 12% con respecto a su testigo. Por otro lado, Viera *et al.* (2017c), indicaron un incremento de biomasa seca del 10% con la inoculación de HFMA (*Glomus spp*) respecto a su tratamiento testigo.

López-Moctezuma, *et al.* (2005), reportaron peso seco vegetativo de 12.9 g., 12.9 g, 24 g. en plántulas de papayo (115 DDS), con inoculación de *Bacillus pumillus*, HMA (*Glomus* spp) y la combinación de ambos respectivamente. En este sentido también Rubin *et al.* (2017), indicaron que las PGPR tienen mejor respuesta en la mejora de los brotes vegetativos que en la biomasa de raíces en condiciones limitadas de agua.

El peso seco de raíz mostró efectos principales por HFMA, PGPR y efectos simples, aunque únicamente por la interacción HFMA*pH (Cuadro 7). La inoculación con PGPR se obtuvieron pesos de 6.41 ± 3.7 g a 11.79 ± 4.5 g y con HFMA pesos de 7.23 ± 4.40 a 11.14 ± 4.7 g, lo que implica que provocaron aumentos de casi el doble en el crecimiento de las raíces de las plantas de aguacate. El factor pH de la solución nutritiva mantuvo valores similares de peso seco de la raíz. Los tratamientos inoculados con PGPR, HFMA y su combinación presentaron mayor biomasa radical en los dos niveles de pH. Como es el caso del tratamiento HFMA+ PGPR con pH 5.8 que obtuvo un incremento de 127 % respecto al testigo, el tratamiento PGPR y HFMA con pH 6.2, mantuvo un buen crecimiento radical. Lo anterior implica que la respuesta por inoculaciones de microorganismos benéficos se obtuvieron aumentos de 3 a 127% respecto al testigo. Por lo contrario, el tratamiento irrigado con solución nutritiva con pH 6.2 y sin ningún tipo de inoculación presentó una disminución de 56% en biomasa seca radical respecto al testigo.

Esto coincide con lo que reportan Mutumba *et al.* (2018), el mayor contenido de materia seca de raíz se obtuvo con la inoculación de una mezcla de cepas (*Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp.) en dos genotipos de trigo bajo dos regímenes de riego. Por otro lado, Sotomayor *et al.* (2022) obtuvieron pesos secos de raíz de 5.19 g, 5.44 g para los consorcios 1 y 2 respectivamente. Lemus-soriano *et al.* (2021) mostraron que la mezcla Nutrisorb® L + Biofit® RTU presentó el mayor peso seco con 24.5 g, seguido por los tratamientos de Glumix® y Nutrisob® L + Mycoroot en plantas de aguacate.

En peso seco total (variable no paramétrica), presentó diferencias entre las medias de los tratamientos inoculados con PGPR y HFMA en los dos niveles de pH y respecto al testigo (Cuadro 7). El mayor peso de biomasa seca total se presentó con la inoculación

de PGPR a pH 5.8 con un incremento de 44%; mientras que tratamiento pH 6.2 y sin inoculación presentó una reducción de 64.1 % en el peso respecto al testigo, siendo este el más bajo en todos los tratamientos.

En este sentido, Gallart *et al.* (2022) indicaron que la inoculación con PGPR no afectó significativamente a la masa seca total de las plantas fertilizadas con N inorgánico. Así mismo, Angulo-Castro *et al.* (2018) determinaron que en los 2 cultivares de *C. annuum* se observó un mayor efecto positivo en el peso seco total por la inoculación con HMA en comparación con la inoculación con bacterias promotoras del crecimiento vegetal. El-Mageed *et al.* (2022) determinaron que el efecto de inoculación de sus aislados bacterianos tuvo un efecto positivo notable en los parámetros de crecimiento de las plantas con estrés y sin estrés.

Cuadro 7. Efectos principales y simples de PGPR, HFMA, pH de la solución nutritiva y su interacción, en el peso seco de la parte aérea, de la raíz y total en plantas de aguacate a los 181 DDT.

TRATAMIENTOS	PESO SECO DE LA PARTE AÉREA (NP)	PESO SECO DE LA RAÍZ	PESO SECO TOTAL (NP)
	(g)		
HFMA+ PGPR+ pH 6.2	14.88 ± 10.81 a	13.99 ± 2.50 ab	28.87 ± 13.22 a
HFMA+ PGPR+ pH 5.8	14.48 ± 10.12 ab	14.67 ± 4.25 a	29.16 ± 11.70 a
HFMA+ pH 6.2	10.97 ± 5.71 ab	9.24 ± 4.34 bc	18.97 ± 7.44 ab
HFMA+ pH 5.8	8.21 ± 3.87 ab	6.68 ± 2.29 cd	14.90 ± 5.55 b
PGPR + pH 6.2	9.49 ± 2.99 ab	8.00 ± 2.18 cd	18.73 ± 7.06 ab
PGPR+ pH 5.8	17.87 ± 2.63 a	11.50 ± 4.78 abc	29.38 ± 6.59 a
pH 6.2	4.36 ± 2.19 b	2.95 ± 1.42 d	7.315 ± 3.477 b
Testigo (pH 5.8)	13.93 ± 7.50 ab	6.46 ± 3.58 cd	20.39 ± 10.47 ab
Chi cuadrada (χ^2)	25.145	-----	32.298
p-value	0.0007151	-----	3.576e-05
DHS	-----	5.32	-----
Efectos principales			
HFMA			
SIN	-----	7.23 ± 4.40 b	-----
10 g	-----	11.14 ± 4.7 a	-----
PGPR			
SIN	-----	6.41 ± 3.7 b	-----
10 mL	-----	11.79 ± 4.5 a	-----
pH			
5.8	-----	9.80 ± 5.06 a	-----
6.2	-----	8.54 ± 4.8 a	-----
SIGNIFICANCIA[‡]			
HFMA	-----	***	-----
PGPR	-----	***	-----
pH	-----	NS	-----
HFMA x PGPR	-----	NS	-----
HFMA x pH	-----	**	-----
PGPR x pH	-----	NS	-----
HFMA x PGPR x pH	-----	NS	-----

(NP)=Variable no-paramétrica. HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Promedios ± desviación estándar con letras distintas en la columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha=0.05$).). DHS = Diferencia Honestamente Significativa de Tukey. [‡]No significativo y significativo a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

5.1.3. Concentración nutrimental

Para el porcentaje de N en parte vegetativa se determinó que existen diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 8). Siendo el tratamiento HFMA+PGPR+ pH 6.2 que presentó mayor concentración de N (21.7%), HFMA+PGPR (9.6 %), PGPR (8.8%), HFMA (5.6 %) respecto al testigo. Mientras que el tratamiento pH 6.2, mostró una reducción del 12.9% en porcentaje de concentración de N, respecto al testigo (Figura 19). Dentro de los efectos principales se tiene que estas diferencias los determinan los factores HFMA y PGPR.

En este aspecto, Gallart *et al.* (2022) indicaron que la inoculación de PGPR mejoró significativamente la eficiencia de absorción de N en las plántulas de aguacate cuando se aplicó conjuntamente con una combinación de fertilizantes de N inorgánicos y orgánicos. Karlidag *et al.* (2007) mencionaron que los tratamientos bacterianos aumentaron el contenido de elementos nutrientes de las plantas (PNE) de las hojas de manzana en comparación con los testigos. En específico, las inoculaciones OSU-142 aumentaron el contenido de N y las inoculaciones de M3 aumentaron el contenido de P.

Por otro lado, estos porcentajes son menores a los reportados por Sotomayor *et al.* (2022), en su ensayo de aplicación de consorcio 1 (2.34% N) en el consorcio 2 (2.27 % N) y testigo (2.48% N) donde no encontraron diferencias significativas entre consorcios.

Este nutrimento es de suma importancia por la cantidad requerida para el desempeño correcto del metabolismo de la planta. En el ámbito práctico está relacionado con el crecimiento y el color verde en las hojas. Sin embargo, su principal función es a nivel estructural, siendo constituyente de aminoácidos, enzimas, proteínas, coenzimas, vitaminas, ácidos nucleicos entre otros (Alcántar *et al.*, 2016).

En cuanto al porcentaje de P en parte vegetativa se determinó que existen diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 8). Todos los tratamientos que fueron inoculados con HMA o PGPR presentaron un incremento respecto al testigo. El tratamiento HFMA+PGPR presentó mayor porcentaje de P (53 %), seguido los otros tratamientos, HFMA + PGPR + pH (46 %), HFMA+ pH (43 %), PGPR + pH (33%), PGPR

y HMA (23%) respecto al testigo. Mientras que el tratamiento pH presentó una reducción del 3% respecto al testigo.

Estos porcentajes son mayores a los reportados por Sotomayor et al. (2022), en su ensayo de aplicación de consorcio 1 (0.12% P) en el consorcio 2 (0.11 % P) y testigo (0.1% P), no encontraron diferencias significativas entre tratamientos.

Por el contrario, Pereira *et al.* (2020) mencionaron que los bioinoculantes promovieron significativamente la biomasa de brotes y la eficiencia del uso de P y N por parte de las plantas de maíz. Viera et al., (2017b) determinaron que el efecto de microorganismos como micorrizas nativas favorece el incremento de la biomasa y absorción de P en plantas de aguacate.

Por otra parte, Mutumba *et al.* (2018), indicaron que la inoculación con cepas de *Bacillus* sp y *Pseudomonas* sp aplicadas por separado aumentó los niveles de NPK en Fontagro 8, pero sólo en plantas sometidas a sequía. Esto tiene congruencia a lo obtenido en este experimento, cuando se aumentó el pH 5.8 a 6.2 se encontró mayor porcentaje de fósforo en la parte aérea de la planta con la inoculación de PGPR y HFMA. Lo que implica que la inoculación de PGPR y HFMA promueven el crecimiento y le confiere tolerancia de estrés tipo abiótico a las plantas de aguacate.

Las plantas durante su fase vegetativa absorben el máximo P, y el P absorbido se almacena en frutos y semillas en desarrollo (Kumari *et al.*, 2022). El fósforo es uno de los nutrientes importantes no por su cantidad requerida, sino por sus funciones que desempeña en el metabolismo de la planta, como componente de ácidos nucleicos y de moléculas ricas en energía (Jiménez *et al.*, 2015). En el ámbito práctico se le atribuye su importancia para el crecimiento y formación de raíces, además de su importancia en etapa de floración y fructificación (Salazar, 2002)

En el porcentaje de K en parte vegetativa no existen diferencias significativas estadísticamente (Cuadro 8) entre tratamientos. Todos los tratamientos se comportan de manera similar al testigo, lo que indica que la inoculación de HFMA, PGPR y el nivel de pH no presentaron efecto en lo que respecta a la concentración de K en tejido vegetal.

Estos valores son mayores y concuerda a los que obtuvieron Sotomayor *et al.* (2022), en su ensayo de aplicación de consorcio 1 (1.66 % K) en el consorcio 2 (1.51 % K) y testigo (1.74%K), el que tampoco encontraron diferencias significativas estadísticamente entre sus tratamientos.

La demanda de K en una etapa vegetativa es muy baja a comparación a los requerimientos en otras etapas como desarrollo o fructificación. También se le atribuye a su importancia por conferir resistencia a estrés de tipo biótico y abiótico, fungen como osmoregulador en la apertura estomática y uso eficiente del agua ante condiciones de déficit hídrico.

El cultivo de aguacate es un cultivo altamente sensible a los gradientes diferenciales de pH y salinidad y, esto a su vez repercute en la eficiencia de absorción nutrimental vía raíz, así como la sobrevivencia de la planta en ambientes con condiciones limitantes. Estudios han reportado que el rango de pH del suelo adecuado para las plantas de aguacate es de 5.5- 6.5 (Bernal y Díaz, 2006). Sin embargo, Barbe (1995), indicó que huertos sanos y productivos se encuentran a pH 5.5-6.0, por lo que este rango de pH puede ser deseable en el manejo de estos suelos (Barber, 1995).

En este experimento, la Inoculación de PGPR y HFMA tiene efecto positivo en la absorción de nutrimentos principalmente en Nitrógeno y fósforo en los dos niveles de pH, y específicamente a pH 6.2. Esto coincide con lo que Kumari *et al.* (2022), mencionaron que la PGPR mejoran significativamente el crecimiento de cereales y otros cultivos hortícolas.

De acuerdo con Tapia, (2012) y su clasificación de concentración de nutrimentos en las hojas del aguacate, se tiene que el N se encuentra en el rango óptimo (1.3%-1.9%), P en el rango alto (>0.12%) y K en el rango alto (>1.5%).

Cuadro 8. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, pH de la solución nutritiva y su interacción en la concentración nutrimental (N, P, K) de plantas de aguacate criollo a los 181 DDT.

TRATAMIENTOS	N	P	K
	%		
Testigo (pH 5.8)	1.24 ± 0.032 c	0.13 ± 0.005 bc	1.80 ± 0.100 a
HFMA + pH 5.8	1.31 ± 0.015 bc	0.16 ± 0.015 ab	1.87 ± 0.055 a
HFMA +PGPR + pH 5.8	1.36 ± 0.030 b	0.20 ± 0.025 a	1.73 ± 0.111 a
HFMA + PGPR + pH 6.2	1.51 ± 0.043 a	0.19 ± 0.005 a	1.85 ± 0.070 a
HFMA + pH 6.2	1.30 ± 0.005 bc	0.18 ± 0.011 a	1.68 ± 0.032 a
PGPR + pH 5.8	1.35 ± 0.066 b	0.16 ± 0.005 ab	1.83 ± 0.065 a
PGPR +pH 6.2	1.30 ± 0.020 bc	0.17 ± 0.005 ab	1.77 ± 0.047 a
pH 6.2	1.08 ± 0.020 d	0.12 ± 0.020 c	1.75 ± 0.032 a
DHS	0.096	0.039	0.197
Efectos principales			
HFMA			
SIN	1.24 ± 0.11 b	0.150 ± 0.022 b	1.790 ± 0.063 a
10 g	1.37 ± 0.088 a	0.188 ± 0.019 a	1.785 ± 0.104 a
PGPR			
SIN	1.23 ± 0.099 b	0.154 ± 0.027 b	1.777 ± 0.088a
10 mL	1.38 ± 0.089 a	0.185 ± 0.019 a	1.797 ± 0.08 a
pH			
5.8	1.31 ± 0.060 a	0.168 ± 0.027	1.807 ± 0.09 a
6.2	1.29 ± 0.16 a	0.170 ± 0.029	1.767 ± 0.07 a
SIGNIFICANCIA*			
HFMA	***	***	NS
PGPR	***	***	NS
pH 6.2	NS	NS	NS
HFMA x PGPR	NS	NS	NS
HFMA x pH	***	NS	NS
PGPR x pH	***	NS	*
HFMA x PGPR x pH	NS	NS	*

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Promedios ± desviación estándar(sd) con letras distintas en cada columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$).). DHS = Diferencia Honestamente Significativa de Tukey. *No significativo y significativo a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

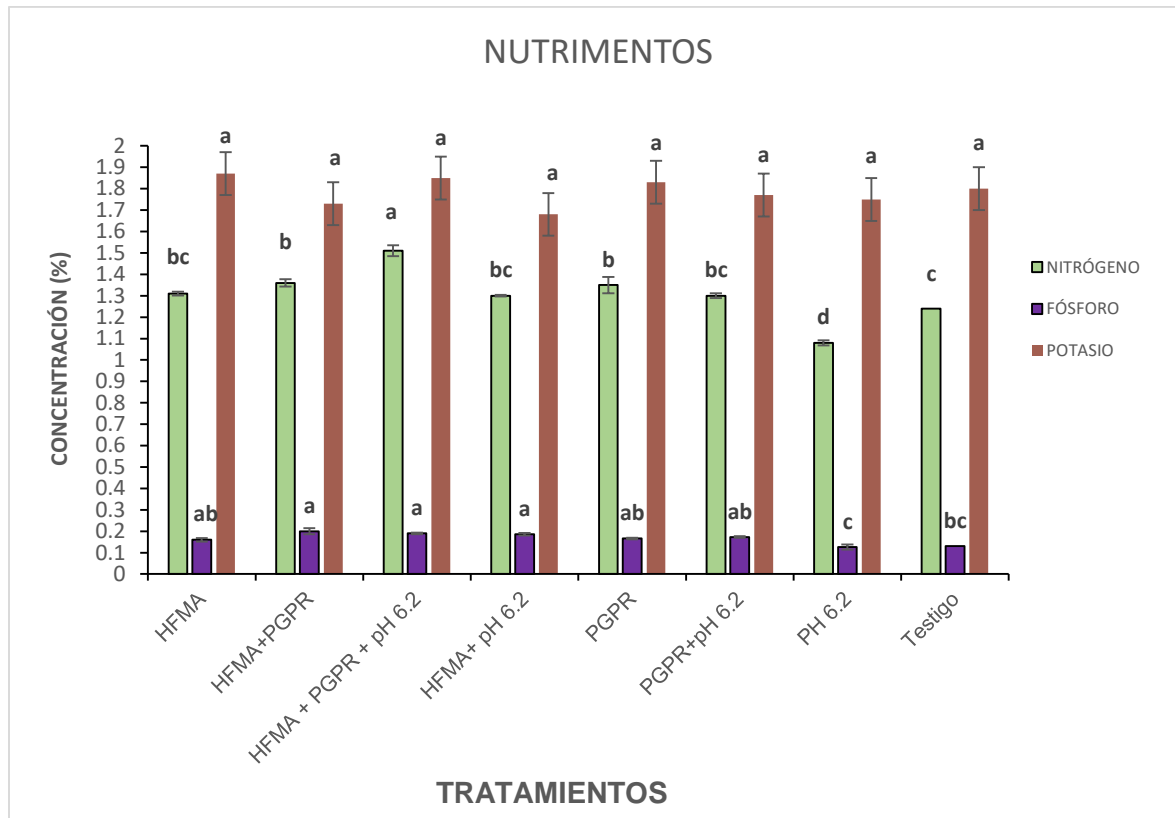


Figura 19. Porcentaje de nitrógeno, fósforo y potasio en parte aérea de plantas de aguacate criollo inoculadas con PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar. barras \pm desviación estándar con letras distintas en cada nutriente, indican diferencias estadísticas (Tukey (DHS), $\alpha=0.05$).

5.1.4. Crecimiento y arquitectura radical

Los resultados obtenidos mediante el sistema de análisis de imágenes de raíces Winrhizo®, indican diferencias entre tratamientos (Cuadro 9) para las variables, longitud de raíces, volumen radical, número de puntas y ramificaciones.

En el Cuadro 9 se muestran los efectos principales por la inoculación de HFMA, PGPR y pH sobre la longitud radical. De ello se evidenció que el tratamiento que presentó mayor longitud fue HFMA+PGPR con pH 6.2 (355%), posteriormente aquellos que también tuvieron respuesta favorable fueron los tratamientos inoculados con PGPR (291%), HFMA+PGPR (206%), PGPR+pH 6.2 (205%) respecto al testigo. En el tratamiento HFMA + pH (91%), HFMA (49%), sin la adición de PGPR se reduce la longitud radical

drásticamente. Mismo comportamiento para el tratamiento con aumento de pH y sin inoculación; el cual presentó una reducción de 50% en longitud respecto al testigo, siendo este el valor más bajo.

Al igual que Lemus-Soriano *et al.* (2021), reportaron longitud de raíz de 63.23 cm promedio como su mejor respuesta inoculados con Nutrisorb® L + Biofit® RTU en plántulas de aguacate. Mientras que Yuan *et al.* (2022), mostraron que una de sus cepas de PGPR (YDSY8) tuvo impacto en biomasa radical, ya que promovió la longitud de las raíces. Por el contrario, Cabanzo-Atilano *et al.* (2020), reportaron una disminución en longitud radical en chile serrano con la inoculación de P61, este efecto lo atribuye al estrés de adaptación en el trasplante. Así mismo, Glick (2014), indicó que PGPR puede aumentar la longitud de las raíces.

En este caso el aumento de pH fue determinante en el desarrollo de longitud de raíces, y la inoculación de PGPR Y HFMA favorecieron una mejor respuesta y tolerancia a esta condición. En este sentido, Cohen *et al.* (2015), señalan que la inoculación PGPR en plantas que crecen en condiciones extremas podría ayudar a la planta a enfrentar o tolerar parte de este estrés al aumentar la longitud de la raíz, lo que permite un mejor acceso al agua o nutrientes. El-Mageed *et al.* (2022), señalaron que las PGPR se consideran una de estas estrategias para la mitigación de los efectos perjudiciales del estrés por sequía en las plantas

Cuadro 9. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, pH de la solución nutritiva y su interacción, en el crecimiento y arquitectura radical de plantas de aguacate a los 181 DDT.

TRATAMIENTOS	LONGITUD DE RAÍCES cm	VOLUMEN RADICAL cm ³	PUNTAS num	RAMIFICACIONES num
Testigo (pH 5.8)	749.83 ± 275.0 cd	208.93 ± 8.6 d	2189 ± 1436.2 bc	2310.33 ± 824.75 b
HFMA + pH 5.8	1119.05 ± 586.5 cd	308.7 ± 17.2c	3411.0 ± 1916.1 abc	4367.33 ± 2886.2 ab
HFMA + PGPR + pH 5.8	2297.84 ± 1277 abc	516.86 ± 55.4 a	6474 ± 4305.1 abc	5973.33 ± 3251.3 ab
HFMA + PGPR + pH 6.2	3408.74 ± 95.4 a	519.9 ± 9.12 a	9285.33 ± 1916.49 a	9195.66 ± 1613.22 a
HFMA + pH 6.2	1431.44 ± 747.9 bcd	363.6 ± 44.69 bc	3044.33 ± 1367.2 abc	4327 ± 2474.8 ab
PGPR + pH 5.8	2934.96 ± 414 ab	513.3 ± 45.6 a	7758.3 ± 2546.45 ab	9590 ± 1175.8 a
PGPR + pH 6.2	2282 ± 669.6 abc	417.7 ± 5.59 b	6581.6 ± 1820.2 abc	7496 ± 2891.9 ab
pH 6.2	363.43 ± 151.5 d	95.8 ± 6.6 e	554.33 ± 197.8 c	1672 ± 549.7 b
DHS	1805.399	87.65	6293.157	6189.848
Efectos principales				
HFMA				
SIN	1582.74 ± 1165.16 a	308.95 ± 173.59 b	4270.8 ± 3447.6 a	5267.08 ± 3783.02 a
10 g	2064.27 ± 1150.40 a	427.29 ± 102.26 a	5553.6 ± 3470.3 a	5965.83 ± 3049.25 a
PGPR				
SIN	915.943 ± 597.23 b	244.29 ± 108.65 b	2299.6 ± 1646.76 b	3169.167 2092.0 b
10 mL	2731.06 ± 808.51 a	491.95 ± 54.50 a	7524.8 ± 2687.57 a	8063.750 ± 2536.06 a
pH				
5.8	1775.42 ± 1117.91 a	386.97 ± 142.3 a	4958.08 ± 3331.79 a	5560.2 ± 3399.3 a
6.2	1871.58 ± 1246.0 a	349.28 ± 164.8 b	4866.41 ± 3704.28 a	5672.6 ± 3508.9 a
SIGNIFICANCIA*				
HFMA	NS	***	NS	NS
PGPR	***	***	***	***
pH 6.2	NS	**	NS	NS
HFMA x PGPR	NS	***	NS	NS
HFMA x pH	*	***	NS	NS

TRATAMIENTOS	LONGITUD DE RAÍCES cm	VOLUMEN RADICAL cm³	PUNTAS num	RAMIFICACIONES num
PGPR x pH	NS	NS	NS	NS
HFMA x PGPR x pH	NS	NS	NS	NS

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Promedios \pm desviación estándar con letras distintas en cada la columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$).). DHS = Diferencia Honestamente Significativa de Tukey. *No significativo y significativo a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

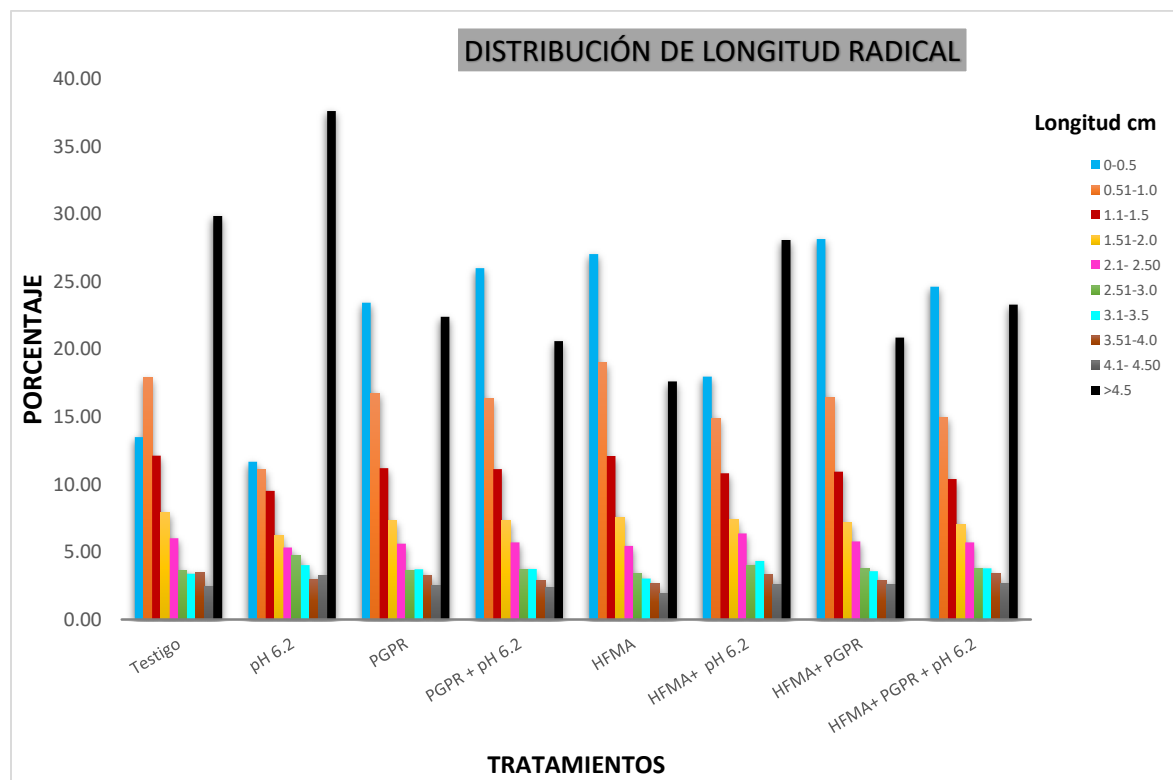


Figura 20. Proporción y uniformidad de las longitudes de raíces de las plantas de aguacate criollo inoculadas con PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar.

La mayor uniformidad de longitud de raíces de 0 - 2.5 cm se encuentra en los tratamientos inoculados con HFMA y PGPR aún con aumento de pH. Lo anterior indica que en el testigo y en el tratamiento con pH 6.2 sin inoculación de microorganismos benéficos, la arquitectura radical se centra en una raíz principal larga. Por lo contrario, en los tratamientos inoculados se promueve el desarrollo de un sistema radical más fibroso y con uniformidad en las longitudes de las raíces (Figura 20). El mayor porcentaje de raíces finas que comprende las longitudes de 0 a 0.5 cm, fue mayor en el tratamiento inoculado con HFMA y PGPR, el porcentaje más bajo lo mostró el tratamiento con aumento de pH a 6.2. Se conoce que la inoculación de microorganismos que promueven el crecimiento vegetal, por medio de compuestos como las auxinas, favorece el incremento de longitud radical (González y Fuentes, 2017). Las distribuciones de longitudes lo determinaron la inoculación PGPR y HFMA, como lo menciona Widnyana y Javandira (2016) que las PGPR del género *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp.

participan en la biosíntesis de fitohormonas como AIA, auxina que promueve la división celular y el alargamiento de las raíces (*Widnyana y Javandira, 2016*).

Cuadro 10. Área proyectada y superficial (variable no paramétrica) de la raíz de plantas de aguacate a los 181 DDT, según el efecto por la aplicación de los tratamientos.

TRATAMIENTOS	Área proyectada	Área superficial (cm ²)
Testigo (pH 5.8)	293.66 ± 20.36 c	922.57 ± 63.96 c
HFMA + pH 5.8	373.42 ± 190.44 bc	1173.15 ± 598.29 bc
HFMA+PGPR + pH 5.8	873.44 ± 465.01 abc	2744.00 ± 146.08 abc
HFMA + PGPR + pH 6.2	1478.45 ± 417.37 a	4644.69 ± 1311.21 a
HFMA+ pH 6.2	739.49 ± 375.87 abc	2323.17 ± 1180.84 abc
PGPR + pH 5.8	1173.49 ± 81.05 b	3686.62 ± 254.63 ab
PGPR + pH 6.2	885.42 ± 331.57 abc	2781.63 ± 1041.67 abc
pH 6.2	276.48 ± 64.99 c	868.58 ± 204.18 c
Chi cuadrada (χ^2)	17.28	17.28
p-value	0.01568	0.01568

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, RF= roca fosfórica. Promedios ± desviación estándar con letras distintas en columnas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$).

En el área proyectada radical (variable no paramétrica, Cuadro 10), se obtuvo una mediana mayor para el tratamiento HFMA+PGPR+pH 6.2. Enseguida, destacaron los tratamientos PGPR, HFMA+pH 6.2 superando la mediana del testigo. Los demás tratamientos presentaron un comportamiento similar al testigo.

En este aspecto, Singh *et al.* (2021), determinaron que tras la inoculación y colonización adecuada de bioinoculantes en la rizosfera en plantas de maíz, se estimó un mayor nivel de AIA y mayor efecto en la arquitectura de la raíz; lo que implicó aumento significativo ($p \leq 0.05$) en la superficie radical (449.73 cm²), superficie proyectada (143.15 cm²), estos valores fueron tan altos como 2.5 a 3.5 veces sobre las plantas de control no tratadas condiciones de estrés salino.

Para el área superficial de la raíz se tiene que, el valor más alto de la mediana lo obtuvo el tratamiento HFMA+PGPR+pH 6.2; posteriormente, los tratamientos inoculados con PGPR, HFMA+pH 6.2 y HFMA+PGPR; todos ellos presentaron una mediana superior a la del testigo. Los otros tratamientos se comportaron muy similar al testigo (Cuadro 10).

Tsegaye *et al.*, 2017 mencionan que las fitohormonas aumentan la longitud del pelo de la raíz y el área superficial de las raíces y, por lo tanto, mayor capacidad en absorción de agua y nutrientes para las plantas.

Ali *et al.* (2022) obtuvieron que, la aplicación de PGPR (NMTD17) inoculado en plantas de arroz y estrés salino aumentaron significativamente el área superficial y las puntas de las raíces, seguidas por las plantas inoculadas con GBSW22 y FZB42 de 2-3 veces en comparación con las plantas control.

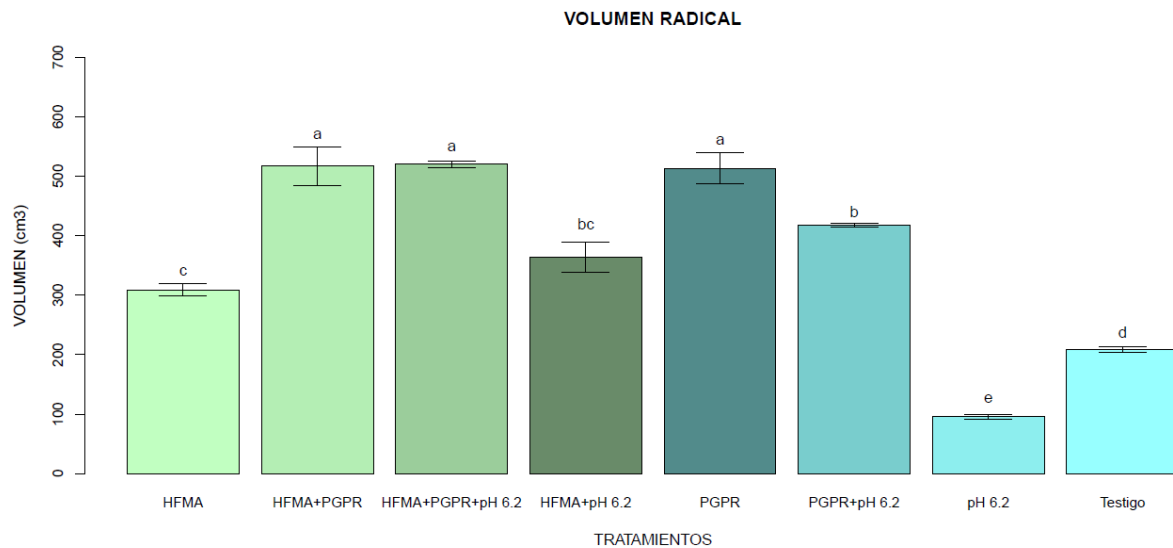


Figura 21. Volumen radical de las plantas de aguacate criollo inoculadas con PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar. Barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey (DHS), $\alpha=0.05$).

En volumen radical se obtuvieron respuestas similares a la longitud de raíces. La inoculación de PGPR y la combinación de PGPR con HFMA favorecieron el crecimiento del volumen radical (Cuadro 9 y Figura 21). Lo anterior representa un aumento de volumen radical de 140 a 150%, comparado con el testigo. El volumen radical en plantas

de aguacate inoculadas con PGPR y pH 6.2 representó un aumento de 99%, mientras que la HFMA y mismo pH implicó un aumento de 70%. A diferencia del tratamiento sin inoculación e irrigado con solución nutritiva pH 6.2, el cual presentó una disminución de 55% en volumen radical respecto al testigo.

Similar a lo que Angulo-Castro *et al.* (2018) indicaron, que el volumen radical obtuvo mayor respuesta por inoculación de las bacterias que por la de los HMA. También Pérez *et al.* (2015) obtuvieron incrementos en el volumen radical de hasta 64% en plántulas de mora (*Rubus glaucus* L.) en la inoculación de *Pseudomonas migulae* respecto a su tratamiento control. El volumen radical es importante ya que de ello dependen otros procesos como la absorción, transporte de agua y nutrimentos (Kheyri *et al.*, 2022).

En el número de puntas de raíces se presentaron diferencias entre los tratamientos como se muestran en el Cuadro 9. La inoculación con HFMA y con PGPR, en todos los tratamientos, superaron a los tratamientos sin inoculación. Los tratamientos inoculados únicamente con HFMA en combinación con los niveles de pH, tuvieron un aumento del 39 al 55%; mientras que el tratamiento pH 6.2 dio una reducción del 75% respecto al testigo (Cuadro 9). En este sentido Yuan *et al.* (2022), mostraron que PGPR estimuló el crecimiento de *A. thaliana* y alteró drásticamente la morfología de la raíz; algunas cepas aumentaron considerablemente el número de puntas de las raíces y raíces laterales (ramificaciones).

En referencia al número de ramificaciones que se derivan de la raíz principal y secundarias, la inoculación PGPR y su combinación con HFMA mejoró esta variable (Cuadro 9). El tratamiento inoculado con PGPR presentó mayor número de ramificaciones y, posteriormente, los otros tratamientos en combinación con HFMA y aumento de pH. La adición de HFMA tiene efecto notorio en la formación de ramificaciones respecto al testigo y al tratamiento pH (6.2). siendo este último tratamiento el que mostró menor ramificaciones respecto a los demás tratamientos incluyendo al testigo. Lo anterior puede verse de manera gráfica en la fotografía de la Figura 22.

Vacheron *et al.*, (2013) mencionaron que las PGPR inducen cambios significativos en la arquitectura del sistema radical a través de la producción de fitohormonas (IAA), que

mejoran la ramificación lateral de la raíz y la formación de pelos radiculares. Así mismo, Singh *et al.* (2021) determinaron un aumento significativo ($p \leq 0,05$) en número de puntas (4889,29), el número de ramificaciones (7951,57), con aumentos de 2,5 a 3,5 veces sobre las plantas de control no tratadas; tras la aplicación de inoculantes en plantas de maíz y en condiciones de estrés salino.

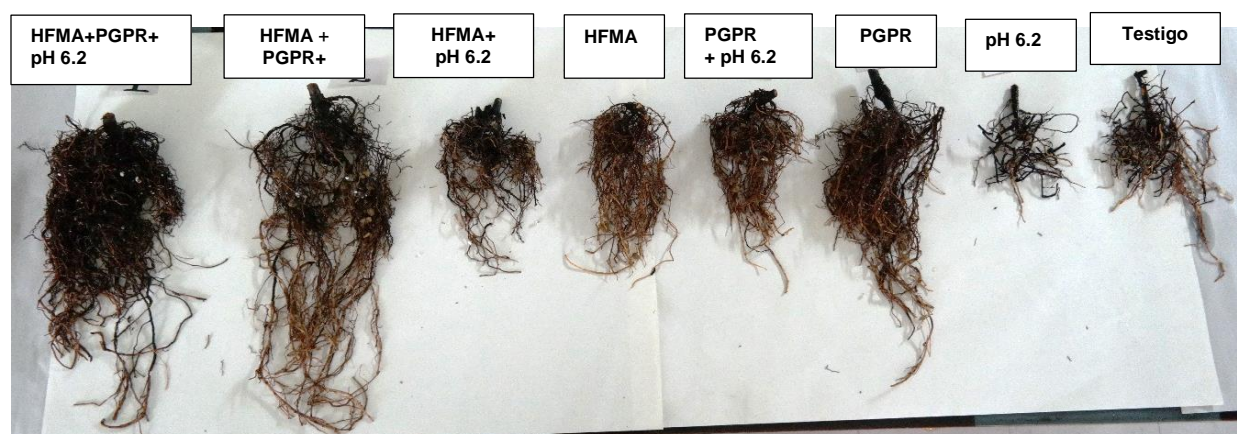


Figura 22. Imagen que muestra el sistema radical de algunas plantas de aguacate criollo representativas de los tratamientos con inoculación de PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada en riego.

5.1.5. Colonización micorrízica

En el porcentaje de colonización micorrízica se determinó que existen diferencias entre tratamientos, como se muestra en el Cuadro 11. El tratamiento que presentó mayor porcentaje de colonización (62.6%) fue el inoculado con PGPR + HFMA, mientras que los otros tratamientos HFMA, HFMA+pH 6.2, HFMA+PGPR+pH 6.2 mostraron porcentajes de 39.3, 30 y 42%, respectivamente. Los tratamientos que presentaron porcentajes inferiores al 3%, incluyendo al testigo, fueron aquellos que no se inocularon. Esta colonización baja puede atribuirse a contaminación entre tratamientos debido al manejo de las plántulas y al sustrato de germinación inicial que fue parcialmente desinfectado y retirado previo al trasplante, pero que pudo contener algunos propágulos micorrízicos no eliminados. La colonización consistió básicamente en la presencia de hifas extra e intra radicales y la presencia de vesículas dentro de las raíces, como se muestra en la Figura 23.

En este caso el aumento de pH de 5.8 a 6.2 tiene efecto en disminución del porcentaje de colonización, esto coincide con Hashem *et al.* (2016), probaron que estrés salino redujo la colonización de HMA en plantas de *Acacia gerrardii*.

En plantas de aguacate, Montañez *et al.* (2010) obtuvieron un porcentaje de colonización de HMA en diferentes suelos de (63%), (55%) y (45%). Mientras que Lemus-soriano *et al.* (2021) indicaron porcentajes de colonización micorrízica de 73% ,58% y 57% con inoculantes comerciales.

Por otro lado, Angulo-Castro *et al.* (2018) mostraron una colonización del 32,8% en chile jalapeño con la misma especie de inóculo empleado en este experimento.

Kapoor *et al.* (2008) mencionan que la inoculación micorrízica estimula el enraizamiento y el crecimiento; por lo tanto, la supervivencia del trasplante de esquejes y plántulas a los medios nutritivos. De acuerdo con lo anterior, las plántulas de aguacate presentaron buena respuesta a la inoculación de esta especie de HFMA en estas condiciones evaluadas.

Cuadro 11. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, pH de la solución nutritiva y su interacción en la colonización micorrizica de plantas de aguacate criollo a los 181 DDT

TRATAMIENTOS	COLONIZACIÓN MICORRIZICA %
Testigo (pH 5.8)	2.66 ± 1.15 c
HFMA + pH 5.8	39.33 ± 3.0 b
HFMA+ PGPR+ pH 5.8	62.67 ± 5.0 a
HFMA+ PGPR+pH 6.2	42.00 ± 9.16 b
HFMA+ pH 6.2	30.00 ± 8.71 b
PGPR	3.33 ± 1.15 c
PGPR+ pH 6.2	2.66 ± 1.15 c
pH 6.2	0.66 ± 1.15 c
DHS	14.13417
Efectos principales	
HFMA	
SIN	3.0 ± 2.0 a
10 g	43.5 ± 13.8 b
PGPR	
SIN	18.16 ± 18.03a
10 mL	28.33 ± 26.59b
pH	
5.8	27.0 ± 26.63 a
6.2	19.5 ± 18.6 b
SIGNIFICANCIA[‡]	
HFMA	***
PGPR	***
pH 6.2	**
HFMA x PGPR	**
HFMA x pH 6.2	**
PGPR x pH 6.2	NS
HFMA x PGPR x pH 6.2	NS

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Promedios ± desviación estándar con letras distintas en cada la columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$). DHS = Diferencia Honestamente Significativa de Tukey. [‡]No significativo y significativo a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

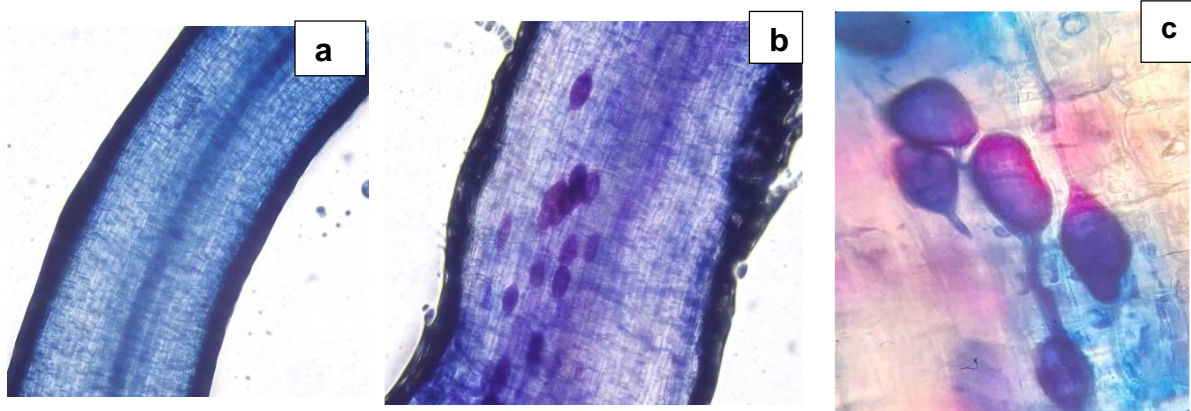


Figura 23. Micrografías de raíces, a) no colonizada a 10x, b) colonizada con vesículas a 10x y c) colonizada y con vesículas a 40x; de plantas de aguacate criollo representativas de los tratamientos con inoculación de PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar.

5.1.6. Tamaño de las poblaciones bacterianas

En bacterias totales, todos los tratamientos, excepto HFMA+ PGPR +pH 6.2, presentaron poblaciones menores al testigo; lo que significa que hay una reducción en el número de bacterias por efecto de la inoculación con HFMA o PGPR, así como por regar con una solución nutritiva con pH de 6.2 (Cuadro 12 y Figura 24). En este caso, en el tratamiento sin inoculación, pero cambiando el pH de la solución nutritiva de 5.8 a 6.2, la reducción en la población de bacterias totales fue la más drástica (Cuadro 12).

En este caso, los cambios en el gradiente de pH, determinó la permanencia o sobrevivencia de bacterias en la rizosfera, así como los riegos también implicaron lavados de células bacterianas. En este sentido Zarraonaindia *et al.* (2015), mencionan que factores abióticos interfieren en las interacciones microbioma-planta en la rizosfera como el PH, temperatura, salinidad entre otros. Por otro lado, García *et al.* (2017) evaluaron colonización de diazótrofos después de su inoculación y evaluación de *Azospirillum* en maíz, por el método de número más probable; no encontraron diferencias significativas entre las cepas, tanto en plantas control como estresadas. Sin embargo, el déficit hídrico provocó reducción de número de diazótrofos por g de peso fresco de la raíz en aproximadamente 3 órdenes de magnitud, para ambas cepas. Por otro lado,

Liffourrena y Lucchesi (2018) afirman que las bacterias compiten con la microbiota autóctona, adaptada y su depredación de la microfauna del suelo, sobre todo cuando se inoculan en forma desprotegida lo que conlleva a la rápida disminución de las bacterias introducidas

En lo que respecta a bacterias fijadoras de N atmosférico se presentaron diferencias entre los tratamientos (Cuadro 12). El tratamiento HFMA+PGPR superó a los tratamientos sin inoculación, los cuales tuvieron los valores más bajos. También los tratamientos HFMA+ pH 6.2, HFMA+PGPR+ pH 6.2 superaron al testigo (Cuadro 12). Los tratamientos PGPR, PGPR+pH 6.2, HFMA se comportaron similares al testigo, pero nuevamente, al aumentar el pH de la solución nutritiva de 5.8 a 6.2, la población de bacterias fijadoras de N atmosférico se reduce al máximo (Figura 25).

La permanencia de PGPR en los dos niveles de pH y el tipo de sustrato fueron factores que influyeron en su supervivencia. Como lo expresaron Rousk *et al.* (2010), diferentes estudios han demostrado que las proporciones bacteriano-fúngicas y las composiciones de la comunidad varían a través de un gradiente de pH. En este sentido, El-Mageed *et al.* (2022) indicaron que las cepas aisladas también tienen la capacidad de vivir, proliferar, mantener la vida y realizar sus actividades bajo algunas condiciones ambientales adversas, tales como; temperatura, aumento del pH y estrés salino. Así mismo, Adedeji *et al.* (2020) mencionaron que las PGPR pueden conferir una influencia positiva en la planta después de la entrada, mostrando así grandes habilidades competitivas sobre las comunidades rizosféricas residentes. Mientras que Nyoki y Ndakidemi (2018) indicaron que PGPR colonizan los tejidos internos de las plantas y mejoran su efecto promotor del crecimiento al proporcionar un entorno de O limitante requerido para la activación de N₂-fijación y transferencia más eficiente del N fijado a la planta hospedante.

Cuadro 12. Supervivencia de las PGPR por efecto de los tratamientos (efectos del HFMA, PGPR, pH de la solución nutritiva y su interacción) aplicados en plantas de aguacate a los 181 DDT.

TRATAMIENTOS	BACTERIAS FIJADORAS DE N ATMOSFÉRICO	BACTERIAS TOTALES
	(UFC g ⁻¹ sustrato seco)	
Testigo (pH 5.8)	1.8 e+03 ± 0.3e+03 d	12.64 e+05 ± 0.23 a
HFMA + pH 5.8	2.1 e+03 ± 4.163 e+03 c	8.72 e+05 ± 0.34 de
HFMA +PGPR+ pH 5.8	61.8 e+03 ± 3.1e+03 a	10.66 e+05 ± 0.56 bc
HFMA + PGPR +pH 6.2	41.5 e+03 ± 6.1 e+03 b	11.74 e+05 ± 0.25 ab
HFMA + pH 6.2	48.8 e+03 ± 9.9 e+03 ab	9.83 e+05 ± 0.51 cd
PGPR + pH 5.8	23.4 e+03 ± 3.2 e+03 c	9.46 e+05 ± 0.3 4 cde
PGPR + pH 6.2	126.3 e+03 ± 3.9 e+03 c	10.23 e+05 ± 0.797cd
pH 6.2	2.2 e+03 ± 0.7 e+03 d	8.3 e+05 ± 0.87 e
DHS	1.3 e+03	1.53 e+05
Efectos principales		
HFMA		
SIN	13471.67 ± 12149.07 b	10.16 e+05 ± 1.74 a
10 g	43358.33 ± 16294.42 a	10.24 e+05 ± 1.21 a
PGPR		
SIN	18546.67 ± 20510.87 b	9.87 e+05 ± 1.82 b
10 mL	38283.33 ± 16344.58 a	10.52 e+05 ± 0.97 a
pH		
5.8	27102.5 ± 22871.43 a	10.37 e+05 ± 1.58 a
6.2	29727.5 ± 19324.9 a	10.02 e+05 ± 1.39 a
SIGNIFICANCIA[‡]		
HFMA	***	NS
PGPR	***	**
pH	NS	NS
HFMA x PGPR	NS	***
HFMA x pH	NS	***
PGPR x pH	***	***
HFMA x PGPR x pH	***	***

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Promedios ± desviación estándar con letras distintas en la columna, indican diferencias estadísticas(Tukey, $\alpha = 0.05$). DHS = Diferencia Honestamente Significativa de Tukey. [‡]No significativo y significativo a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

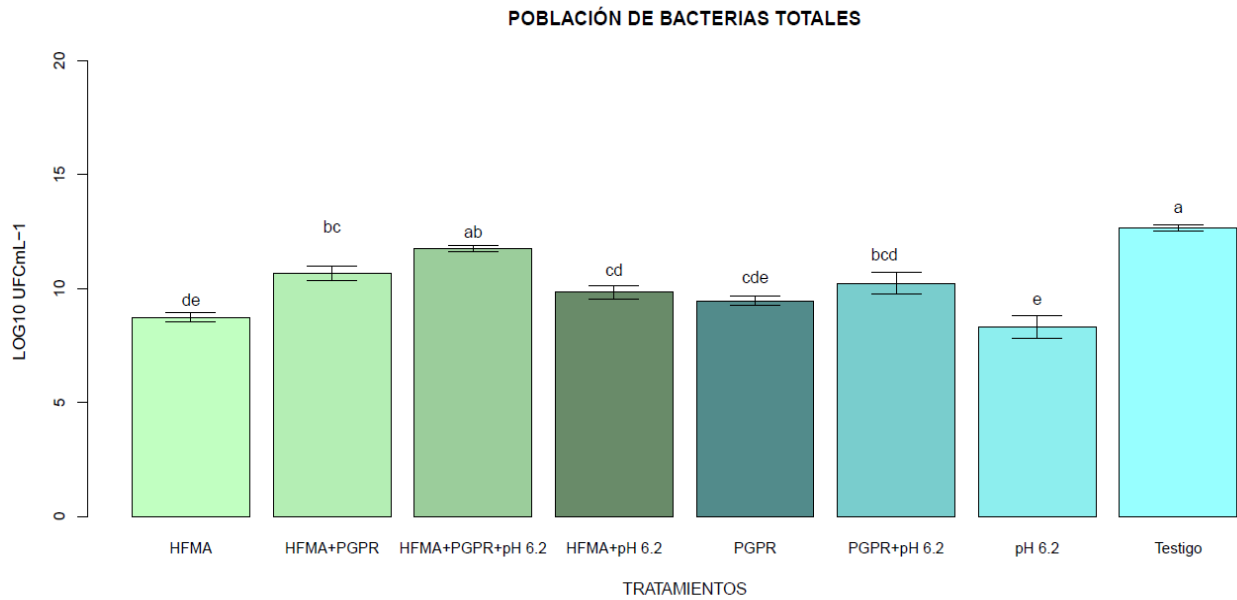


Figura 24. Tamaño de la población de bacterias totales en la rizósfera de plantas de aguacate criollo con inoculación de PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar. Barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey (DHS), $\alpha=0.05$).

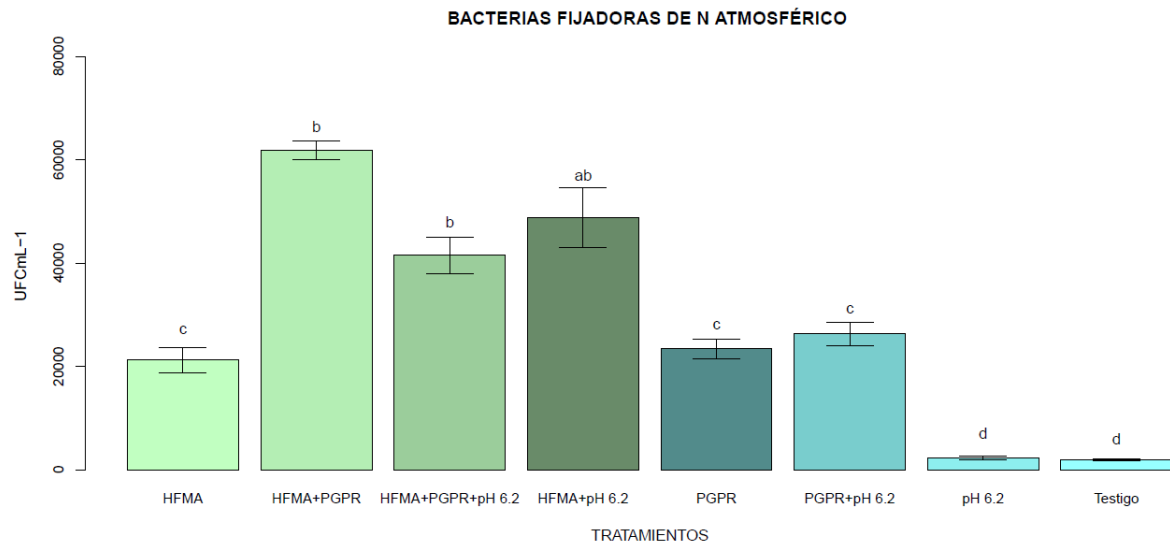


Figura 25. Tamaño de la población de bacterias fijadoras de N atmosférico en la rizósfera de plantas de aguacate criollo con inoculación de PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar. Barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey (DHS), $\alpha=0.05$).

En bacterias fluorescentes inoculadas (variable no paramétrica) se tiene que el tratamiento HFMA+ PGPR +pH 6.2 presentó mayor tamaño de la población, seguido del tratamiento HFMA+PGPR. El resto de los tratamientos se comportaron de manera similar y en el testigo no se presentaron bacterias fluorescentes (Cuadro 13). Lo anterior indica que la inoculación con HFMA favoreció el establecimiento en la rizósfera del aguacate de las bacterias fluorescentes inoculadas y que tienen actividad promotora del crecimiento vegetal.

A 181 días después de su inoculación se evaluó y se mostró la colonización de la bacteria fluorescente en la zona de la epidermis y córtex de la raíz. En este sentido, Fukami *et al*, (2017), indicaron que la colonización después de 1 h de inoculación con ambas cepas, las células marcadas con (EGFP)-I y (EYFP) mostraron que eran capaces de colonizar la superficie de las hojas y lo mismo se observó después de 1 día de inoculación. Sin embargo, después de 2 días de inoculación no detectaron las cepas en las superficies de las hojas de maíz.

Cuadro 13. Tamaño de la población de bacterias fluorescentes inoculadas por efecto de los tratamientos aplicados en plantas de aguacate (prueba no paramétrica) a los 181 DDT.

TRATAMIENTOS	BACTERIAS FLUORESCENTES INOCULADAS (UFC g⁻¹ sustrato seco)
Testigo (pH 5.8)	2.4 e+01 ± 4.2 e+01 e
HFMA+ pH 5.8	2. e+04 ± 6.5 e+03 bc
HFMA+PGPR+ pH 5.8	2.9 e+03 ± 5.2 e+03 b
HFMA+ PGPR + pH 6.2	6.1 e+04 ± 7.2 e+03 a
HFMA+ pH 6.2	2.8 e+04 ± 5.0 e+03 b
PGPR+ pH 5.8	7.1 e+03 ± 1.4 e+03 de
PGPR + pH 6.2	1.3 e+04 ± 2.2 e+03 cd
pH 6.2	2.0 e+02 ± 5.6 e+02 de
Chi cuadrada (χ^2)	21.882
p-value	0.0026

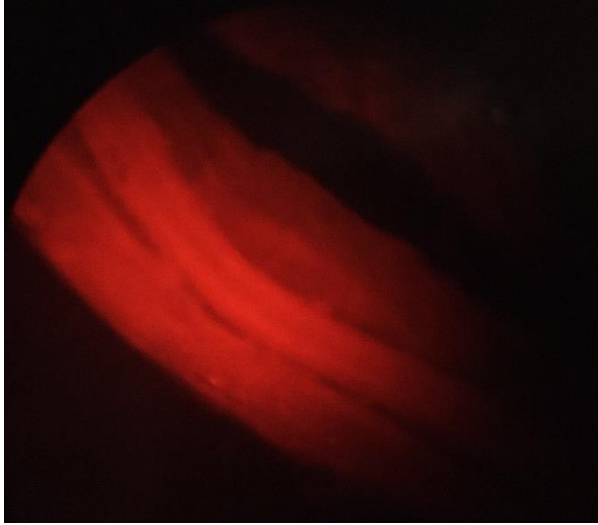
HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, RF= roca fosfórica. Promedios ± desviación estándar con letras distintas en columnas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$).

El tamaño de la población de hongos en la rizósfera no fue posible determinar para ninguno de los tratamientos, ya que no hubo crecimiento de hongos y sólo crecieron algunas bacterias.

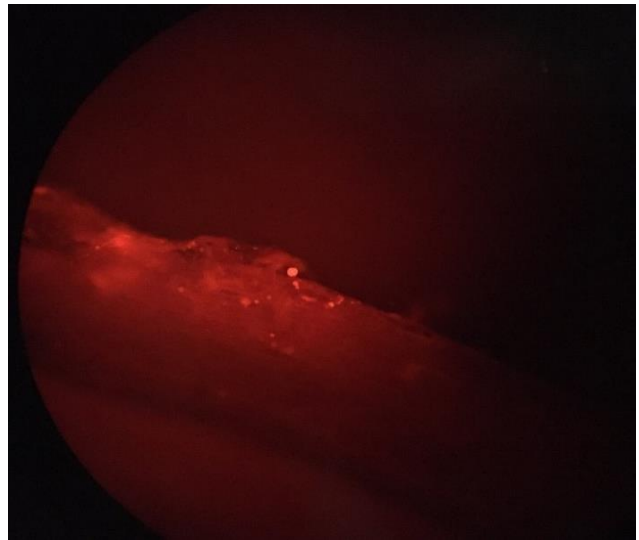
5.1.7. Colonización de raíces por bacteria fluorescente inoculada

De acuerdo con las observaciones con microscopio óptico de epifluorescencia, los tratamientos que no presentaron colonización de los tejidos vegetales por las bacterias fluorescentes inoculadas, las cuáles también tienen actividad promotora del crecimiento vegetal, fueron sólo inoculación de HFMA con solución nutritiva en ambos pH y sin inoculación con la solución nutritiva pH 5.8 (testigo) y 6.2 (Figura 26). Los tratamientos con inoculación de PGPR presentaron colonización de los tejidos radicales del aguacate por las bacterias fluorescentes. Esta colonización se vio favorecida por la inoculación con HFMA en ambos pH de la solución nutritiva (Figura 26).

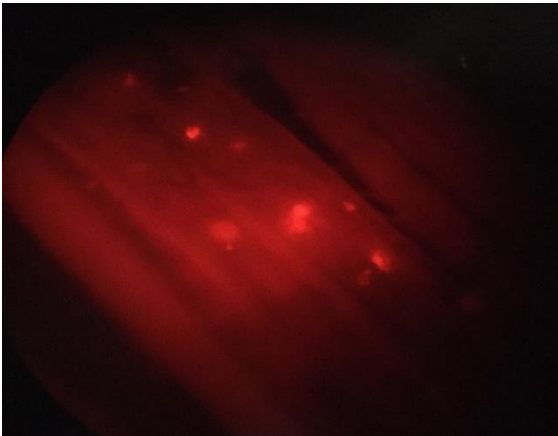
HFMA + pH 5.8



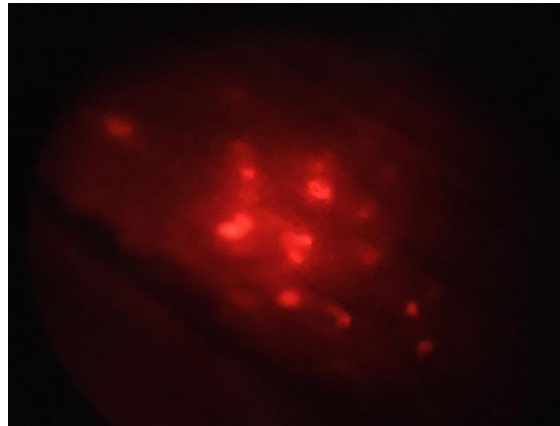
PGPR+ pH 6.2



HFMA + PGPR + pH 5.8



PGPR + pH 5.8



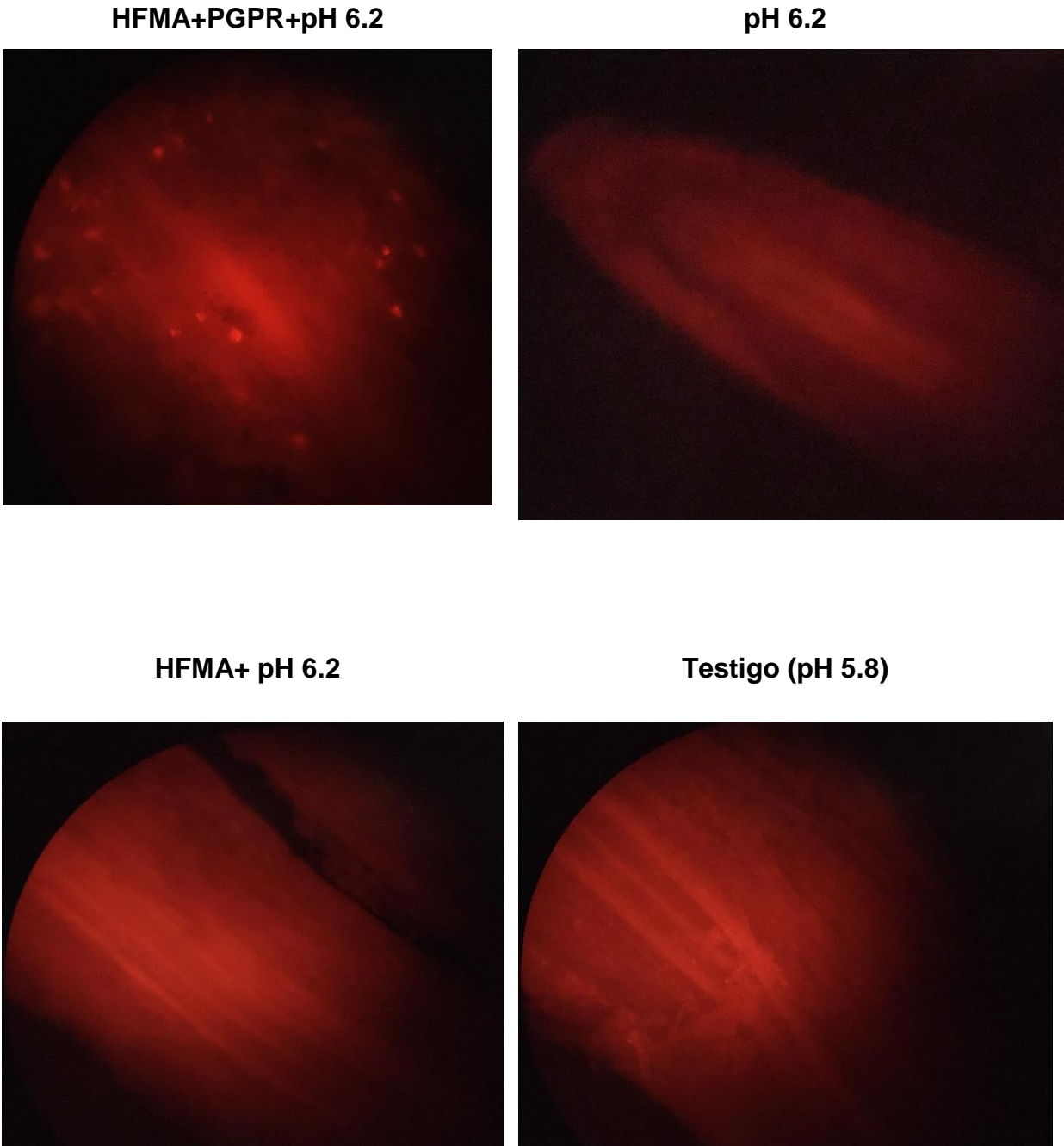


Figura 26. Micrografías de fluorescencia con secciones de mayor brillo que indican la presencia de bacterias fluorescentes inoculadas colonizando los tejidos radicales de plantas de aguacate criollo con inoculación de PGPR, HFMA y distinto pH de la solución nutritiva utilizada para regar.

5.2. Crecimiento y concentración de nutrimentos en plantas de aguacate inoculadas desde semilla con HFMA, PGPR y fertilizadas con roca fosfórica.

5.2.1. Porcentaje de germinación

El porcentaje de germinación de semillas fue similar en todos los tratamientos y superior al 70% a los 35 días después de la siembra (DDS); mientras que se alcanzó 100% de germinación hasta los 45 DDS. La propagación de las plantas de aguacate se realiza mediante el injerto de vástagos clonales altamente productivos sobre portainjertos rústicos y bien adaptados a las condiciones edafoclimáticas de la región. La mayoría de los países usan semillas, a pesar de su variabilidad genética, para producir portainjertos; debido a la rápida germinación y los vigorosos sistemas de raíces que desarrollan (Ben-Ya'acov y Michelson, 1995). La etapa de germinación es fundamental ya que de aquí se inicia el proceso de obtención de plántulas de calidad, por otro lado, Adedeji *et al.* (2020), mencionan que, durante la germinación de la planta, las señales y los exudados producidos podrían participar determinadamente en el reclutamiento de microorganismos. Esto a su vez conlleva a que la planta permita el reclutamiento e ingreso de Rizobacterias que promueven el crecimiento (PGPR).

5.2.2. Altura, diámetro de tallo y número de hojas

En el Cuadro 14 se muestran las medias de altura de plántulas a los 103 DDS. El tratamiento que tiene HFMA+ PGPR+ RF presentó mayor altura respecto al testigo; mientras que los tratamientos restantes presentaron valores similares (Figura 27). De acuerdo a los efectos principales generados por las interacciones, el factor que tiene mayor efecto en los tratamientos fue la inoculación de HFMA y la interacción entre HFMA x PGPR x RF (Cuadro 14).

Cuadro 14. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, RF y su interacción en la altura de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS.

TRATAMIENTOS	ALTURA (CM)
Testigo	10.34 ± 2.59 b
HFMA	13.83 ± 2.97 ab
HFMA+PGPR	12.72 ± 2.77 ab
HFMA+PGPR+RF	15.64 ± 2.77 a
HFMA+RF	12.32 ± 4.12 ab
PGPR	13.61 ± 4.39 ab
PGPR+RF	11.56 ± 2.09 ab
RF	13.21 ± 3.36 ab
DHS	4.49
Efectos principales	
HFMA	
SIN	12.18 ± 3.37 b
10 g	13.62 ± 3.5 a
PGPR	
SIN	12.42 ± 3.45 a
10 mL	13.38 ± 3.36 a
RF	
SIN	12.44 ± 3.57 a
10 ppm	13.38 ± 3.23 a
SIGNIFICANCIA[‡]	
HFMA	*
PGPR	NS
RF	NS
HFMA x PGPR	NS
HFMA x RF	NS
PGPR x RF	NS
HFMA x PGPR x RF	**

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Promedios ± desviación estándar con letras distintas en la columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$). DHS = Diferencia Honestamente Significativa de Tukey. [‡]No significativo y significativo a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

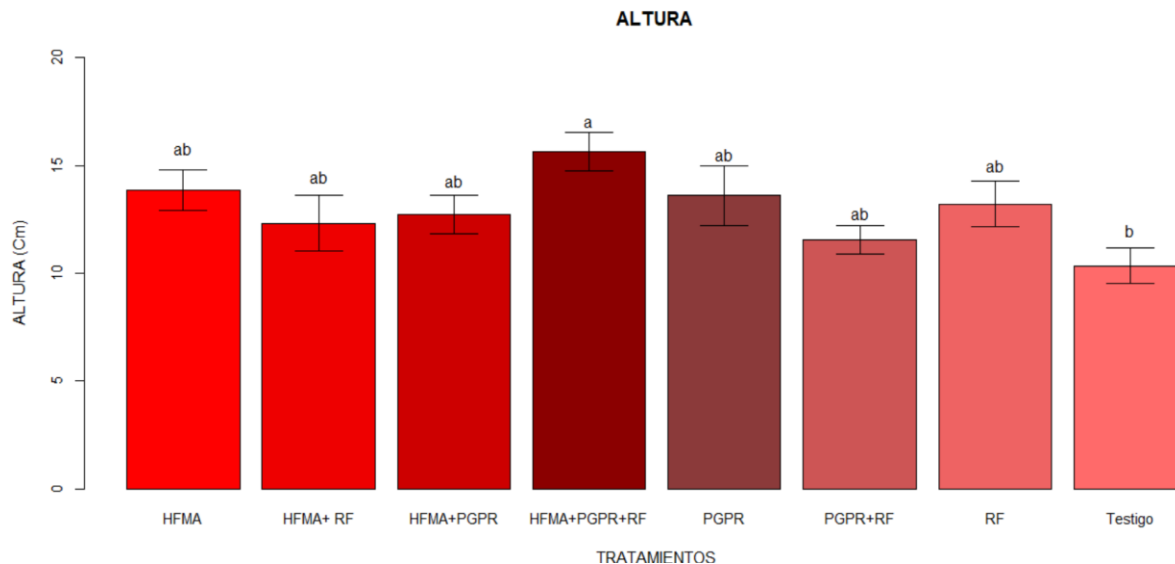


Figura 27. Altura de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y fertilización con roca fosfórica. Las barras indican diferencia mínima significativa. Barras \pm desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha=0.05$).

El número de hojas (variable no paramétrica) mostró diferencias entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Kruskal-Wallis (Cuadro 15). Siendo el tratamiento HFMA+PGPR+RF que presentó mayor número de hojas y posteriormente los tratamientos HFMA+PGPR, HFMA, PGPR y RF respecto al testigo.

El diámetro de tallo (variable no paramétrica) también mostró diferencias entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis (Cuadro 15) con un valor $p < 0.05$ de 0.00114. El valor de las medias mostró que el tratamiento con mayor diámetro de tallo fue HFMA+PGPR+RF. Los tratamientos PGPR, HFMA, RF y HFMA+PGPR mostraron diámetros de tallo muy similares entre ellos y mayores al testigo.

Para estas dos variables no se encontraron efectos contundentes por la aplicación del tratamiento, debido a que las plántulas aún dependían de las reservas de la semilla y ello implicó que las diferencias entre las medias fueran diferentes.

Cuadro 15. Número de hojas y diámetro de tallo (variables no paramétricas) de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS, por efecto de la aplicación de los tratamientos.

TRATAMIENTOS	Hojas (Núm)	Diámetro de tallo (cm)
Testigo	6.7 ± 1.25 c	3.13 ± 0.32 c
HFMA	8.3 ± 1.49 bc	3.79 ± 0.38 bc
HFMA+PGPR	8.9 ± 2.23 ab	3.59 ± 0.59 bc
HFMA+PGPR+RF	10.4 ± 1.57 a	4.59 ± 0.95 c
HFMA+RF	7.5 ± 1.35 bc	3.74 ± 0.31 bc
PGPR	8.2 ± 1.47 bc	3.88 ± 0.53 ab
PGPR+RF	7.3 ± 1.41 bc	3.59 ± 0.26 bc
RF	7.9 ± 0.87 bc	3.73 ± 0.45 bc
Chi cuadrada (χ^2)	25.485	23.997
p-value	0.0006223	0.001141

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, RF= roca fosfórica. Promedios ± desviación estándar con letras distintas en columnas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha=0.05$).

5.2.3. Peso seco de la parte aérea y de la raíz

En el peso seco de la parte aérea (variable no paramétrica) no se presentaron diferencias entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis (Cuadro 16). Las varianzas entre repeticiones del mismo tratamiento fueron muy grandes por lo que no se pudo demostrar estadísticamente diferencias entre tratamientos a pesar de que las plantas en algunos tratamientos pesaron 60% más que el testigo. Además, se determinó que los datos de esta variable no se ajustaron a una distribución normal y se analizaron por una prueba no paramétrica. Lo anterior puede observarse en la Figura 28. En torno a las características de la semilla de aguacate, se sabe que representan un porcentaje grande de la fruta (13 a 17%). Durante varias semanas pueden aportar los nutrientes y factores que requieren las plántulas de aguacate para su crecimiento inicial. Las semillas son altamente energéticas y ricas en varios componentes funcionales como polisacáridos, proteínas, lípidos, minerales y vitaminas. Además, las semillas de aguacate contienen metabolitos bioactivos como fenoles, flavonoides y taninos. También, se le adjudican numerosos usos tradicionales como aplicaciones dermatológicas. Son una buena fuente natural de ingredientes biológicamente activos para los sectores alimentario, farmacéutico y cosmético porque no contienen compuestos nocivos o peligrosos. Además, por su alto potencial antioxidante, previenen la oxidación

de los alimentos, un proceso de degradación de proteínas, vitaminas, carbohidratos y lípidos con especies reactivas de nitrógeno y oxígeno que modifica las propiedades nutricionales y sensoriales de los productos alimenticios (Bangar *et al.*, 2022). Con base en lo anterior, se supone que las plantas de aguacate en su etapa inicial obtuvieron sus nutrientes, y otros compuestos importantes, de las reservas de la semilla; de modo que los microorganismos inoculados no suministraron efecto evidente en el crecimiento de la planta y otras variables relacionadas. Además, El aguacate es extremadamente sensible a la salinidad, particularmente la raza mexicana. El factor principal en la sensibilidad a la salinidad es la toxicidad del cloro. Pero el sodio se suma al problema. Los portainjertos resistentes no translocan sodio al follaje. Por lo tanto, se puede eliminar la quema de hojas, pero permanece un efecto negativo sobre la productividad. El aguacate también es sensible a las condiciones alcalinas y sensible a la clorosis inducida por la cal. Ambos factores inducen un aspecto clorótico al árbol, por falta de absorción del hierro. Los portainjertos resistentes tienen la capacidad de absorber hierro en condiciones en las que los portainjertos sensibles no pueden (Ben-Ya'acov y Michelson, 1995). En este trabajo, el pH inicial del sustrato fue de 6; sin embargo, el agua de riego y la espuma utilizada como parte del sustrato, provocan acumulación de sales y probablemente aumento de pH. Esto pudo acrecentarse en los tratamientos con RF. Por lo anterior, los efectos de los tratamientos no se reflejaron en el crecimiento de las plantas.

Cuadro 16. peso seco de la parte aérea (variable no paramétrica) de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS, según el efecto por la aplicación de los tratamientos.

TRATAMIENTOS	PESO SECO DE LA PARTE AÉREA (g)
Testigo	0.88 ± 0.26 a
HFMA	1.34 ± 0.54 a
HFMA+PGPR	1.08 ± 0.32 a
HFMA+PGPR+RF	1.71 ± 0.85 a
HFMA+RF	1.08 ± 0.68 a
PGPR	1.32 ± 0.41 a
PGPR+RF	1.01 ± 0.21 a
RF	1.40 ± 0.26 a
Chi cuadrada (χ^2)	11.874
p-value	0.1048

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, RF= roca fosfórica. Promedios ± desviación estándar con letras distintas en columnas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$).

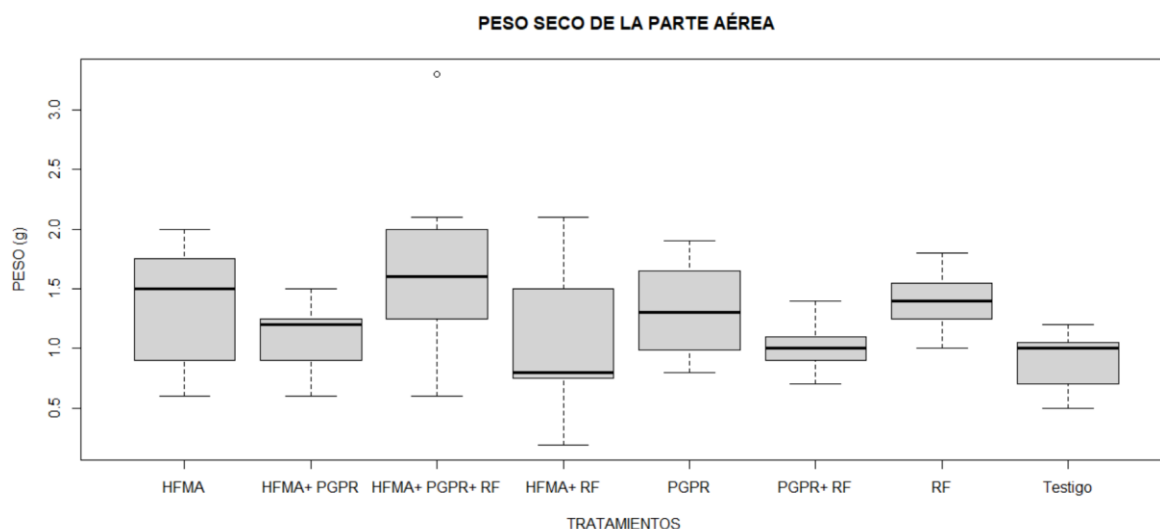


Figura 28. Medianas del peso seco de la parte aérea (variable no paramétrica) de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y fertilización con roca fosfórica (RF).

En el peso seco de la raíz y la biomasa seca total, no se presentaron diferencias ($p < 0.05$) entre los tratamientos, como se muestra en el Cuadro 17. El tiempo de evaluación fue muy temprano y no se pudieron observar las respuestas por efecto de inoculación de PGPR, HFMA Y RF desde la semilla.

Cuadro 17. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, RF y su interacción, en el peso seco de raíz y biomasa seca total de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS.

TRATAMIENTOS	PESO SECO DE LA RAÍZ	PESO SECO TOTAL (g)
Testigo	7.50 ±1.45 a	8.38 ± 1.52 a
HFMA	8.98 ± 0.67 a	10.32 ± 1.10 a
HFMA+PGPR	9.02 ± 1.84 a	10.11 ± 2.0 a
HFMA+PGPR+RF	9.37 ±2.45 a	11.08 ± 3.2 a
HFMA+RF	7.92 ± 1.37 a	9.01 ± 1.87 a
PGPR	8.5 ± 1.54 a	9.84 ± 1.93 a
PGPR+RF	8.84 ± 1.96 a	9.85 ± 2.00 a
RF	9.77 ± 0.99 a	11.17 ± 1.17 a
DHS	2.75	3.324917
Efectos principales		
HFMA		
SIN	8.65 ± 1.66 a	9.8 ± 1.8 a
10 g	8.82 ± 21.71 a	10.13 ± 2.20 a
PGPR		
SIN	8.54 ± 1.42 a	9.72 ± 1.76 a
10 mL	8.93 ± 1.89 a	10.22 ± 2.2 a
RF		
SIN	8.5 ± 1.5 a	9.66 ± 1.76 a
10 ppm	8.9 ± 1.82 a	10.28 ± 2.27 a
SIGNIFICANCIA[‡]		
HFMA	NS	NS
PGPR	NS	NS
RF	NS	NS
HFMA x PGPR	NS	NS
HFMA x RF	NS	NS
PGPR x RF	NS	NS
HFMA x PGPR x RF	NS	*

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Promedios ± desviación estándar con letras distintas en la columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$). DHS = Diferencia Honestamente Significativa de Tukey. [‡]No significativo y significativo a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

5.2.4. Concentración nutrimental

En el porcentaje de nitrógeno en parte vegetativa, se determinó que existe diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 18). Todos los tratamientos presentaron un incremento de N en tejido, excepto el tratamiento testigo que no tiene inoculaciones de

HFMA, PGPR y RF. El tratamiento PGPR+RF presentó mayor porcentaje de nitrógeno (31%), seguido los tratamientos HFMA+PGPR (18%), HFMA+ RF (14.2 %), RF (11.6%), PGPR (10.3 %), HFMA + PGPR + RF (6.4%) y por último el tratamiento testigo (Figura 29).

Estos valores son diferentes a los de Sotomayor et al., (2019b), en su trabajo de plántulas de aguacate con *Trichoderma*, micorriza y aplicación fosforada; no encontró diferencias estadísticas significativas entre sus tratamientos y su tratamiento testigo, excepto el tratamiento con *Trichoderma*, el único que presentó diferencia significativa. Los valores que obtuvieron son superiores a 1.68 % de N, mayores a los determinados en este ensayo.

En el porcentaje de P en parte vegetativa, se determinó que existen diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 18).

Todos los tratamientos presentaron un incremento de P en tejido vegetal, excepto el tratamiento testigo que no tiene inoculaciones de HFMA, PGPR y RF, siendo el tratamiento PGPR+RF que presentó mayor porcentaje de P (50%). Los otros tratamientos presentaron un aumento del 30% respecto al testigo, siendo este último el más bajo (Figura 29).

Sotomayor *et al.*, (2019b) indicaron que no encontraron diferencias estadísticas significativas entre sus tratamientos; *Trichoderma*, micorriza y su tratamiento testigo, pero si para el tratamiento con aplicación de P en plántulas de aguacate.

El P es un macronutriente importante para el desarrollo de los cultivos y la función fisiológica y su absorción se ha incrementado después de la inoculación con PGPR (Bechtaoui *et al.*, 2020).

Para el porcentaje de K en parte vegetativa se presentaron diferencias estadísticamente significativas (Cuadro 18). El tratamiento PGPR+RF presentó mayor porcentaje de concentración de K (77%), seguido los tratamientos PGPR (38%), HFMA+PGPR y el tratamiento HFMA + PGPR + RF alrededor de 31%, HFMA (19%) respecto al testigo. El tratamiento RF presentó un porcentaje de 3% menor al tratamiento testigo (Figura 29).

Para este nutrimento se muestra el efecto que tienen los microorganismos en el desarrollo de plántulas. Mientras que Sotomayor *et al.*, (2019b), en su trabajo de plántulas de aguacate con *Trichoderma*, micorriza y aplicación fosforada; no encontraron diferencias significativas para este nutrimento, se comportaron similares con su tratamiento testigo.

Cabe mencionar que esta etapa de plántula depende estrictamente de las reservas de las semillas y por ende depende de la calidad y tamaño de esta.

Cuadro 18. . Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, RF y su interacción, en la concentración nutrimental de Nitrógeno, fósforo, Potasio de parte aérea de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS.

TRATAMIENTOS	NITRÓGENO (N)	FOSFORO (P)	POTASIO (K)
	%.....		
Testigo	0.77 ± 0.05 e	0.10 ± 0.010 c	1.00 ± 0.09 c
HFMA	0.81 ± 0.00 de	0.12 ± 0.002 b	1.19 ± 0.04 bc
HFMA+PGPR	0.91 ± 0.02 b	0.13 ± 0.005 ab	1.30 ± 0.05 b
HFMA + PGPR + RF	0.82 ± 0.005 cde	0.13 ± 0.005 b	1.31 ± 0.01 b
HFMA+ RF	0.88 ± 0.02 bc	0.13 ± 0.005 ab	1.32 ± 0.02 b
PGPR	0.85 ± 0.005 bcd	0.13 ± 0.005 b	1.38 ± 0.13 b
PGPR+RF	1.01 ± 0.01 a	0.15 ± 0.005 a	1.77 ± 0.16 a
RF	0.86 ± 0.005 bcd	0.13 ± 0.010 b	0.97 ± 0.07 c
DHS	0.06320	0.0193	0.2563
Efectos principales			
HFMA			
SIN	0.87 ± 0.09 a	0.12 ± 0.021 a	1.28 ± 0.356 a
10 g	0.85 ± 0.04 a	0.13 ± 0.007 a	1.28 ± 0.060 a
PGPR			
SIN	0.83 ± 0.05 a	0.12 ± 0.015 b	1.12 ± 0.158 b
10 mL	0.90 ± 0.07 b	0.13 ± 0.009 a	1.44 ± 0.225 a
RF			
SIN	0.83 ± 0.06 b	0.12 ± 0.016 b	1.22 ± 0.16 b
10 ppm	0.89 ± 0.07 a	0.13 ± 0.011 a	1.34 ± 0.30 a
SIGNIFICANCIA*			
HFMA	NS	NS	NS
PGPR	***	***	***
RF	***	***	**
HFMA x PGPR	***	***	***
HFMA x RF	***	**	NS
PGPR x RF	*	*	NS
HFMA PGPR x RF	***	NS	**

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Promedios ± desviación estándar con letras distintas en la columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$). DHS = Diferencia Honestamente Significativa de Tukey. *No significativo y significativo a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

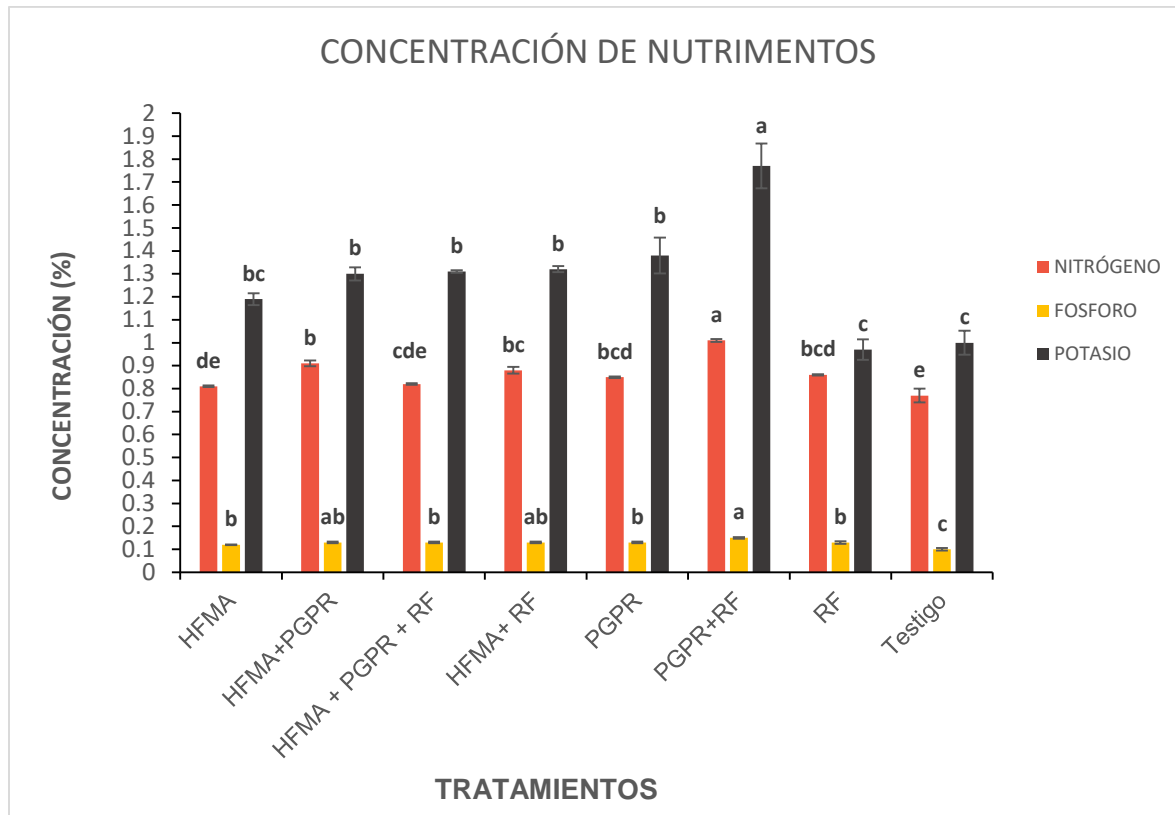


Figura 29. Concentración de nutrientes en parte aérea de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y RF. Las barras indican diferencia mínima significativa. Columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$).

5.2.5. Crecimiento y arquitectura radical

En el Cuadro 19 se muestran los efectos principales por la inoculación de HFMA, PGPR y RF sobre la longitud radical de plantas de aguacate, así como las diferencias ($p < 0.05$) entre tratamientos. De ello se demostró que el tratamiento que presentó mayor longitud de raíces fue HFMA+ PGPR+ RF (396%), que superó al testigo y al tratamiento sólo con RF. Posteriormente aquellos que también tuvieron respuesta favorable fueron los tratamientos inoculados con HFMA+PGPR (297%), PGPR+RF (292%), HFMA + RF (292%), HFMA (260%), PGPR (221%), RF (88%) respecto al testigo. Los factores significantes en esta variable fueron HFMA y PGPR (Cuadro 19).

En cuanto al volumen radical sí se presentaron diferencias entre tratamientos (Cuadro 19). El mayor volumen radical se obtuvo con la inoculación de PGPR (103%), los demás

tratamientos mostraron un aumento en el volumen radical respecto al testigo, para HFMA +RF (47.7%), RF (47.2%), HFMA (32%), HFMA + PGPR (30.28%), PGPR + RF (27.7%), HFMA + PGPR +RF (26.5%). Siendo el testigo el que presentó el volumen radical más bajo. Los factores que fueron significativos para esta variable fueron PGPR y las interacciones HFMA x PGPR, PGPR x RF y HFMA x PGPR x RF.

Cuadro 19. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, RF y su interacción, longitud de raíces, volumen radical y área radical proyectada de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS.

TRATAMIENTOS	LONGITUD DE RAÍCES (cm)	VOLUMEN RADICAL (cm³)	ÁREA RADICAL PROYECTADA (cm²)
Testigo	139.2 ± 42.94 c	85.35 ± 15.14 c	630.27 ± 202.56 a
HFMA	502.44 ± 246.74 ab	113.40 ± 29.66 bc	807.83 ± 82.54 a
HFMA+PGPR	554.16 ± 93.93 ab	111.21 ± 4.65 bc	810.63 ± 186.83 a
HFMA+ PGPR +RF	691.63 ± 22.42 a	108.69 ± 3.27 bc	863.60 ± 85.33 a
HFMA+RF	366.27 ± 58.15 abc	127.14 ± 14.46 b	760.28 ± 16.22 a
PGPR	448.12 ± 205.17 abc	173.62 ± 7.47 a	628.51 ± 110.86 a
PGPR +RF	546.80 ± 59.02 ab	109.04 ± 7.48 bc	864.34 ± 51.42 a
RF	263.04 ± 23.87 bc	125.78 ± 2.94 b	778.79 ± 142.41 a
DHS	348.49	38.33	112.70
Efectos principales			
HFMA			
SIN	349.29 ± 189.98 b	123.44 ± 34.70 a	230.92 ± 50.26 a
10 g	528.62 ± 167.87 a	115.11 ± 16.11 a	258.01 ± 32.48 a
PGPR			
SIN	317.74 ± 77.70 b	112.91 ± 23.42 b	236.91 ± 42.07 a
10 mL	560.18 ± 134.82 a	125.64 ± 29.39 a	252.03 ± 45.68 a
RF			
SIN	410.98 ± 221.48a	120.89 ± 36.87 a	228.96 ± 51.42a
10 ppm	466.93 ± 176.22a	117.66 ± 11.68 a	259.98 ± 28.50a
SIGNIFICANCIA*			
HFMA	**	NS	NS
PGPR	***	*	NS
RF	NS	NS	NS
HFMA x PGPR	NS	***	NS
HFMA x RF	NS	NS	NS
PGPR x RF	NS	***	NS

TRATAMIENTOS	LONGITUD DE RAÍCES (cm)	VOLUMEN RADICAL (cm ³)	ÁREA RADICAL PROYECTADA (cm ²)
HFMA x PGPR x RF	NS	**	NS

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Promedios \pm desviación estándar con letras distintas en la columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$). DHS = Diferencia Honestamente Significativa de Tukey. *No significativo y significativo a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 20. Efectos principales y simples por PGPR, HFMA, RF y su interacción, en área radical superficial, puntas y ramificaciones de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS.

TRATAMIENTOS	ÁREA RADICAL SUPERFICIAL (CM²)	PUNTAS (NUM)	RAMIFICACIONES (NUM)
Testigo	630.27 ± 202.56 a	97.33 ± 7.63 b	492.00 ± 54.83 a
HFMA	807.83 ± 82.54 a	1131.66 ± 948.89 ab	2187.66 ± 1746.84 a
HFMA+PGPR	810.63 ± 186.83 a	1382.33 ± 324.92 ab	1800.00 ± 1076.86 a
HFMA+ PGPR +RF	863.60 ± 85.33 a	1659.33 ± 347.030 a	2790.66 ± 752.83 a
HFMA+RF	760.28 ± 16.22 a	734.66 ± 233.38 ab	1416.33 ± 619.09 a
PGPR	628.51 ± 110.86 a	1138.00 ± 622.73 ab	1971.00 ± 911.0 a
PGPR +RF	864.34 ± 51.42 a	1390.33 ± 446.09 ab	2440.33 ± 822.07 a
RF	778.79 ± 142.41 a	684.33 ± 104.99 ab	1368.00 ± 166.14 a
DHS	354.08	1332.94	2586.49
Efectos principales			
HFMA			
SIN	725.48 ± 157.9 a	827.5 ± 610.23 a	1567.33 ± 926.19 a
10 g	810.5 ± 102.06 a	1227.0 ± 83.81 a	2048.66 ± 1104.40 a
PGPR			
SIN	744.29 ± 132.19 a	662 ± 569.49 b	1366 ± 1011.53 b
10 mL	791.77 ± 143.5 a	1392.5 ± 429.99 a	2250.5 ± 868.17 a
RF			
SIN	719.3 ± 161.56 a	937.33 ± 721.90 a	1612.66 ± 1189.83 a
10 ppm	816.75 ± 89.55 a	1117.16 ± 511.37 a	2003.83 ± 851.90 a
SIGNIFICANCIA*			
HFMA	NS	NS	NS
PGPR	NS	**	*
RF	NS	NS	NS
HFMA x PGPR	NS	NS	NS
HFMA x RF	NS	NS	NS

TRATAMIENTOS	ÁREA RADICAL SUPERFICIAL (CM ²)	PUNTAS (NUM)	RAMIFICACIONES (NUM)
PGPR x RF	NS	NS	NS
HFMA x PGPR x RF	NS	NS	NS

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Promedios \pm desviación estándar con letras distintas en la columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$). DHS = Diferencia Honestamente Significativa de Tukey. *No significativo y significativo a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

En el área radical proyectada, los tratamientos no mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) como se muestra en el Cuadro 19. Lo mismo sucedió para el área superficial radical (Cuadro 20). Sin embargo, para puntas de raíces, el tratamiento HFMA + PGPR + RF superó al testigo (Cuadro 20). En ramificaciones de raíces, no se presentaron diferencias entre tratamientos, pero para el factor inoculación con PGPR hubo significancia estadística (Cuadro 20).

En el porcentaje de distribución de longitudes de raíces se obtuvo que la proporción de raíces de longitud mayor (raíces mayores de 4.51cm) se presentó en el testigo, con un porcentaje de 40%; seguido del tratamiento RF (30%), HFMA+ RF (36%) lo que implicó una disminución en las otras longitudes. Efecto contrario para el tratamiento HFMA+ PGPR+ RF que presentó mayor porcentaje en la longitud menor ($0 - 0.05$) y una distribución más uniforme en las demás longitudes mayores respecto al testigo. Los otros tratamientos como PGPR, BPCH+ RF, tienen una tendencia a distribución uniforme y equilibrada entre las diferentes longitudes, sin embargo, aún presentaron un porcentaje poco mayor para la longitud mayor (>4.51) como se muestra en la Figura 30.

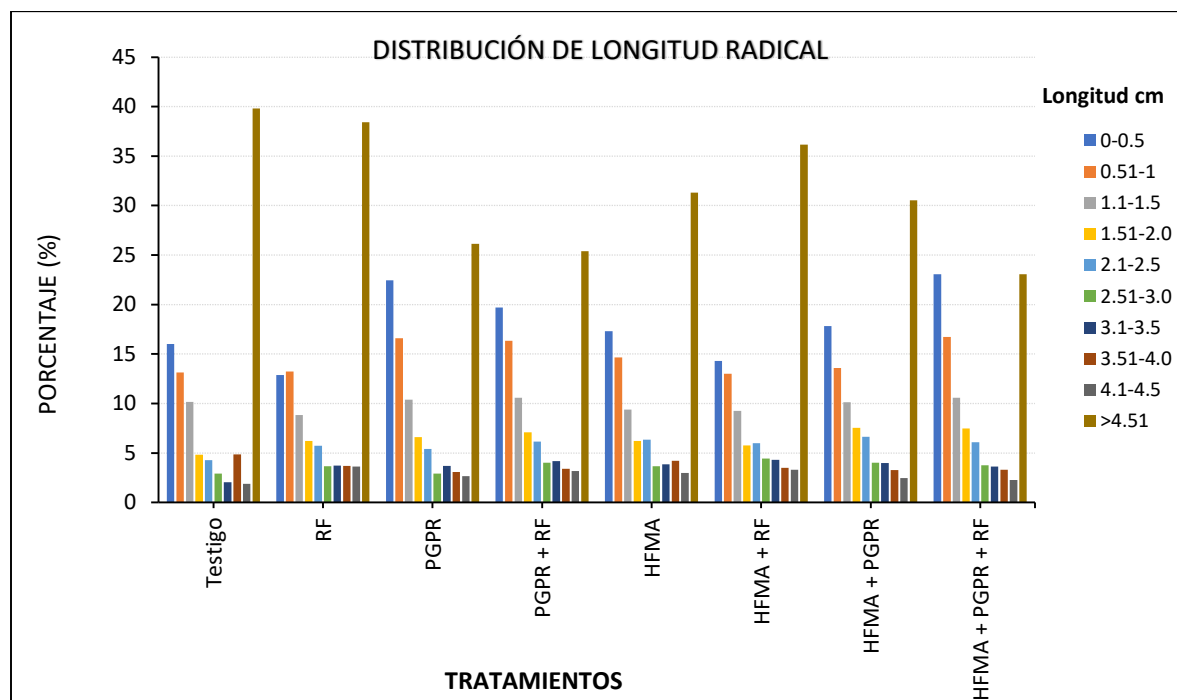


Figura 30. Distribución de las longitudes de raíces de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y fertilización con roca fosfórica (RF).

5.2.6. Colonización micorrizica

El porcentaje de colonización (variable no paramétrica) presentó diferencias entre tratamientos ($p < 0.05$), de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis (Cuadro 21). Las medias para colonización micorrízica mostraron que el tratamiento HFMA+ PGPR fue el mayor, mientras que los tratamientos como HFMA, HFMA+PGPR +RF y HFMA+RF tuvieron un comportamiento similar (Cuadro 21).

Estos valores se encuentran dentro del rango de colonización que reporta Viera et al. (2017) a los 120 días de su aplicación, donde, obtuvieron valores de colonización de 14.08 %, 12.38 %, 6.30%, 6.24 % en semillas.

Estos bajos porcentajes se le atribuye a la variabilidad genética de la semilla y, de acuerdo con Mustafa *et al.*, (2010) el proceso de colonización se manifiesta a partir del día 3 y se vigoriza al día 21, esto explicaría parte de la baja colonización ya que las semillas inician su germinación en el día 30 y están en función de la temperatura y viabilidad de la semilla. Otro aspecto importante es el tamaño de la semilla, lo que implica

una reserva de nutrientes (Bañuelos *et al.*, 2017); con esta premisa, a mayor tamaño mayor reserva de nutrimentos y con ello la asociación se limita debido a que el hospedante no emitiría los diálogos moleculares para realizar la simbiosis.

Los HFMA potencian en las plantas hospedantes la adquisición de nutrientes del suelo, aumentan la resistencia de las plantas frente a los estreses bióticos y abióticos y contribuyen a mantener el ciclo de nutrientes y la materia orgánica en el suelo. A su vez, las micorrizas reciben energía para el crecimiento y la reproducción de la planta huésped. Estos beneficios aumentan la salud de las plantas y la productividad de los árboles de cultivo anual y frutal, como los cítricos y la vid. Las mejoras en el crecimiento de las plantas micorrízicas con respecto a las plantas no inoculadas se ha definido como respuesta al crecimiento micorrízico. Aunque la ubicuidad de la simbiosis AMF, la MGR varía en gran medida en relación con la especie, el cultivar y las características del hongo. La industria de los viveros también aprovecha las ventajas de la biotecnología de HFMA mejorando las tasas de supervivencia de las plántulas micropropagadas, su calidad y el rendimiento una vez trasplantadas en el campo (Caruso *et al.*, 2021). En este caso, se presentó mayor colonización micorrízica en los tratamientos inoculados con HFMA pero insuficiente para el crecimiento. Los efectos de los hongos benéficos sólo se presentaron en forma de mayor desarrollo de raíces secundarias (raíz más fibrosa, Cuadros 19 y 20) y no en peso seco de parte aérea ni de raíz (Cuadros 16 y 17).

Cuadro 21. porcentaje de colonización micorrízica de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS, por efecto de la aplicación de los tratamientos.

TRATAMIENTOS	COLONIZACIÓN MICORRÍZICA TOTAL (%)	INDICE DE EFICIENCIA DE MICORRIZACIÓN
Testigo	0.0 ± 0.0 c	0
HFMA	5.3 ± 1.15 b	33.75
HFMA+PGPR	8.6 ± 1.15 a	23.02
HFMA+PGPR+RF	6.6 ± 1.15 ab	51.26
HFMA+RF	6.0 ± 2.0 ab	19.15
PGPR	0.0 ± 0.0 c	0
PGPR+RF	0.0 ± 0.0 c	0
RF	0.0 ± 0.0 c	0

Chi cuadrada (χ^2)	0.785	----
p-value	0.00017	---

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, RF= roca fosfórica. Promedios \pm desviación estándar con letras distintas en columnas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$).

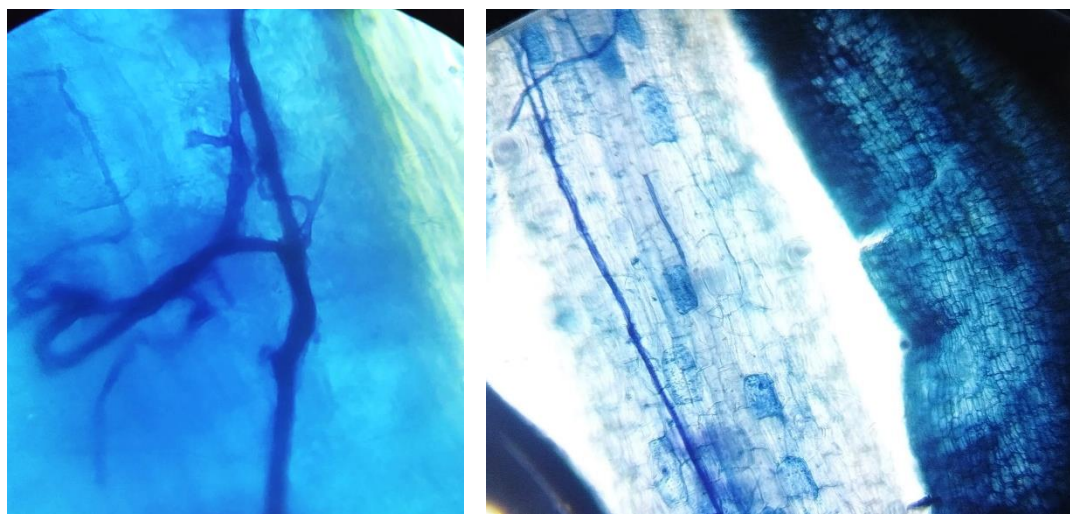


Figura 31. Micrografías de colonización micorrízica, hifas intrarradical a 40x y 10x, en las raíces de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y fertilización con roca fosfórica (RF).

5.2.7. Tamaño de las poblaciones de microorganismos

La población de bacterias totales (variable no paramétrica) mostró diferencias entre tratamientos ($p < 0.05$) con la prueba de Kruskal-Wallis (Cuadro 23). Las medias mostraron que el testigo presentó mayor cantidad de bacterias, seguido del tratamiento HFMA+ PGPR +RF. Los demás tratamientos mostraron crecimientos similares, siendo el tratamiento HFMA+ RF el que presentó la población más baja tal y como se muestran en la Figura 33.

La población de bacterias fijadoras de N atmosférico (variable no paramétrica) mostró diferencias entre tratamientos ($p < 0.05$) con la prueba de Kruskal-Wallis (Cuadro 23). Las medias mostraron que el tratamiento HFMA+ PGPR presentó mayor UFCmL⁻¹ seguido el tratamiento, testigo, HFMA, RF, HFMA+ RF, PGPR y por último HFMA+ PGPR + RF Y HFMA+ PGPR +RF, siendo este último el de menor número de bacterias fijadoras de N atmosférico (Cuadro 23).

En referencia a la población de hongos totales (variable no paramétrica) el análisis evidenció diferencias entre tratamientos ($p < 0.05$) con la prueba de Kruskal-Wallis (Cuadro 23). Las medias mostraron que el tratamiento PGPR presentó mayor población de hongos; posteriormente PGPR + RF y el testigo. Los tratamientos HFMA+ PGPR +RF, HFMA+ PGPR tuvieron poblaciones similares y por último RF, HFMA+ RF y HFMA fueron los más bajos en poblaciones de hongos (Cuadro 23).

Cuadro 22. Tamaño de poblaciones microbianas en rizósfera por efecto de los tratamientos (HFMA, PGPR, RF y su interacción) aplicados en plantas de aguacate criollo a los 103 DDS

TRATAMIENTOS	BACTERIAS TOTALES	HONGOS	BACTERIAS FIJADORAS DE N ATMOSFÉRICO
	(UFC g ⁻¹ suelo seco)		
Testigo	1.0 e+05 ± 2.4 e+03 a	7.7 e+03 ± 6.4 e+02 ab	2.7 e+04 ± 5.0 e+03 b
HFMA	1.6 e+04 ± 7.3 e+03 b	1.3 e+03 ± 7.3 e+01d	2.7 e+04 ± 1.5 e+03 b
HFMA+PGPR	5.9 e+03 ± 3.9 e+03 b	5.1 e+03 ± 1.0 e+03 c	4.1 e+04 ± 4.1 e+03 a
HFMA+PGPR+RF	9.3 e+04 ± 1.7 e+03 a	5.4 e+03 ± 6.2 e+02 bc	1.4 e+04 ± 9.4 e+02 d
HFMA+RF	1.5 e+01 ± 0.2 e+01 b	1.0 e+03 ± 2.1 e+02 d	2.0 e+04 ± 2.3 e+03 bcd
PGPR	1.8 e+04 ± 5.6 e+03 b	8.0 e+03 ± 6.8 e+02 a	1.5 e+04 ± 1.5 e+03 cd
PGPR+RF	1.4 e+04 ± 1.7 e+03 b	7.0 e+03 ± 2.0 e+03 abc	1.5 e+03 ± 3.1 e+02 cd
RF	1.4 e+04 ± 3.7 e+03 b	1.8 e+03 ± 1.8 e+03 d	2.2 e+04 ± 1.4 e+03 bc
Chi cuadrada (χ^2)	19.947	20.066	20.361
p-value	0.005686	0.005429	0.004841

HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, RF= roca fosfórica. Promedios ± desviación estándar con letras distintas en columnas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$).

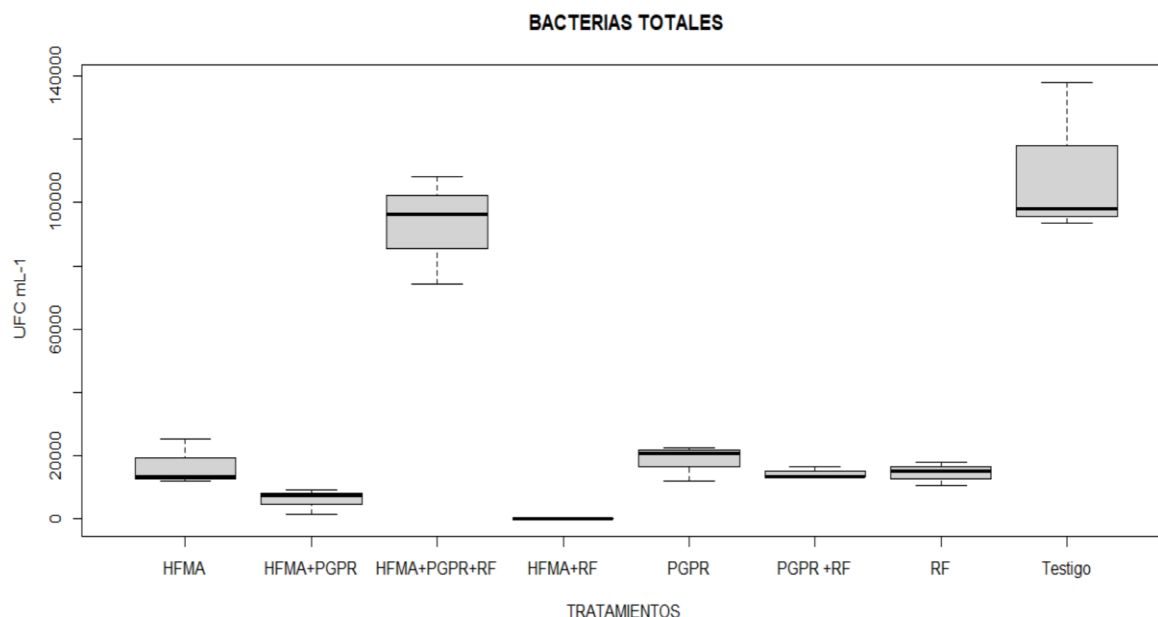


Figura 32. Tamaño de la población de bacterias totales en las raíces de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y fertilización con roca fosfórica (RF).

En la evaluación de sobrevivencia de bacterias fluorescentes inoculadas indicó que existen diferencias estadísticas entre tratamientos (Cuadro 24). Los tratamientos que presentaron mayor población de bacterias fluorescentes fueron PGPR, HFMA, HFMA + PGPR y HMA + PGPR + RF en comparación con el testigo. Los demás tratamientos presentaron valores similares (Cuadro 24). Los factores que fueron significantes para el tamaño de la población de bacterias fluorescentes inoculadas en la rizósfera de aguacate criollo fueron HFMA, RF y la interacción entre HFMA + PGPR + RF (Cuadro 24).

Cuadro 23. Supervivencia de bacterias fluorescentes por efecto de PGPR, HFMA, RF y su interacción, en plantas de aguacate criollo a los 103 DDS.

TRATAMIENTOS	BACTERIAS FLUORESCENTES INOCULADAS (UFC G⁻¹ SUELO SECO)
Testigo	2.6e+04 ± 2.7 e+03 ab
HFMA	3.4e+04 ± 1.6 e+03 a
HFMA+PGPR	3.0e+04 ± 2.5 e+03 a
HFMA+PGPR+RF	3.0e+04 ± 9.4 e+03 a
HFMA+RF	2.3e+04 ± 3.6 e+03 ab
PGPR	3.2e+04 ± 5.3 e+03 a
PGPR+RF	1.5e+04 ± 2.9 e+03 b
RF	2.1e+04 ± 4.7 e+03 ab
DHS	1.3 e+04
Efectos principales	
HFMA	
SIN	24152.86 ± 7543.6 b
10 g	29994.40 ± 6017.3 a
PGPR	
SIN	26663.55 ± 5759.9 a
10 mL	27483.71 ± 8842.1 a
RF()	
SIN	31182.80 ± 4313.93 a
10 ppm	22964.47 ± 7501.80 b
SIGNIFICANCIA[‡]	
HFMA	**
PGPR	NS
RF	***
HFMA x PGPR	NS
HFMA x RF	NS
PGPR x RF	NS
HFMA x PGPR x RF	**

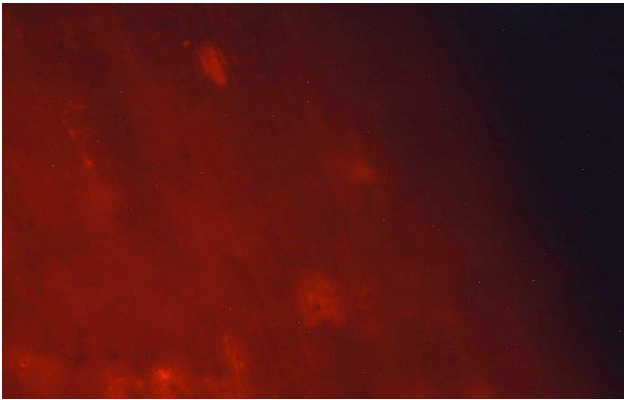
HFMA= hongos formadores de micorriza arbuscular, PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Promedios ± desviación estándar con letras distintas en la columna, indican diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$). DHS = Diferencia Honestamente Significativa de Tukey. [‡]No significativo y significativo a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

5.2.8. Colonización de las raíces por la bacteria fluorescente inoculada

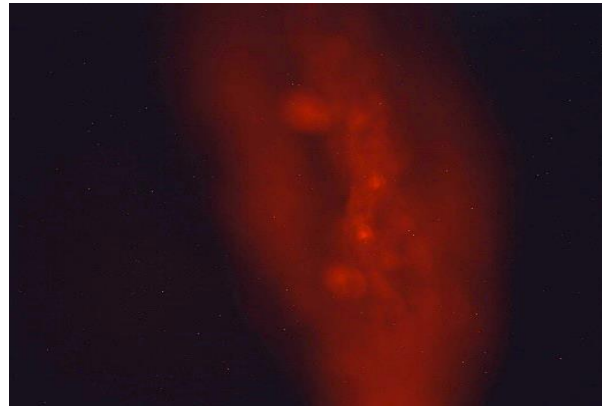
La evaluación de la cepa bacteriana R44-DsRed, en raíces de plantas de aguacate mediante microscopía de fluorescencia, mostró colonización radical positiva en todos los tratamientos. En algunos de estos colonizó en mayor proporción que en otros, tal y como se muestra en la Figura 34. La colonización en tratamientos que no fueron inoculados

con esta bacteria fluorescente se debió a la aleatorización de unidades experimentales al momento de establecer el experimento. La distribución de los tratamientos en el área experimental facilitó que, a través del riego, las bacterias se transportaran de una unidad a otra; por lo que se presentó colonización en plantas no inoculadas de inicio.

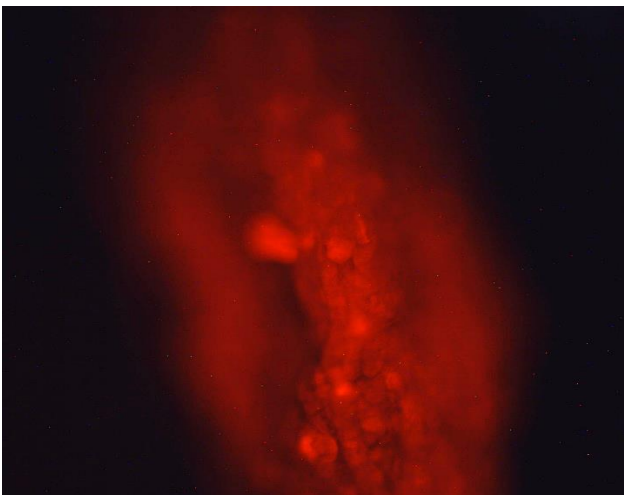
HFMA+PGPR+RF



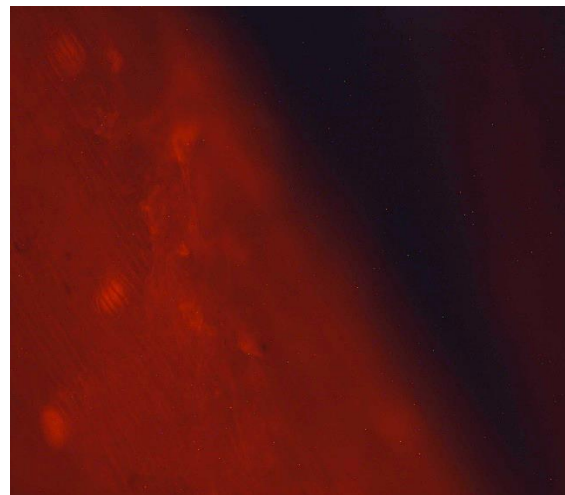
PGPR+RF



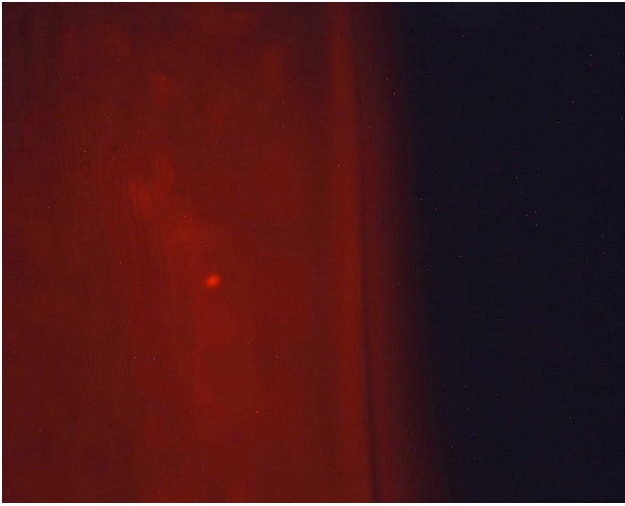
HFMA+PGPR



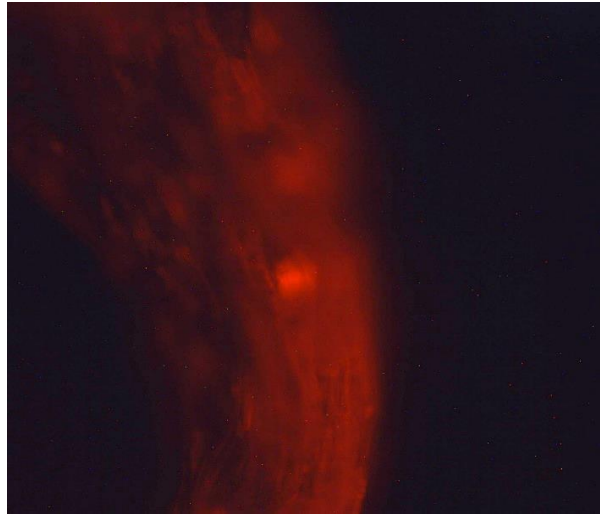
PGPR



HFMA+RF



RF



HFMA



Testigo

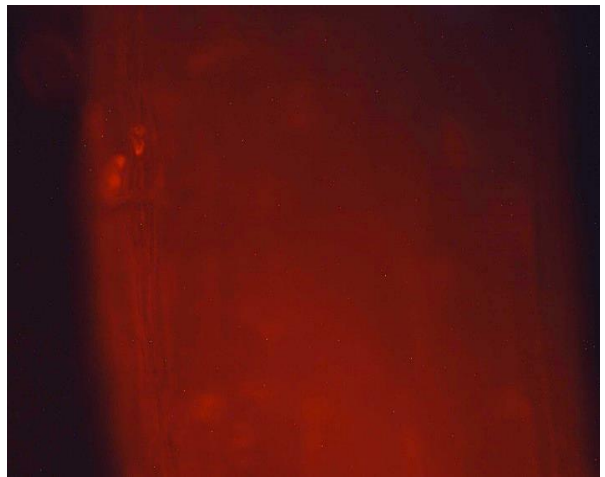


Figura 33. Imágenes de microscopio óptico de epifluorescencia que indican colonización por bacterias fluorescentes en tejidos de las raíces de plantas de aguacate criollo a los 103 DDS con inoculación de PGPR, HFMA y fertilización con roca fosfórica (RF).

VI. CONCLUSIONES

- Este estudio confirma el papel de los HFMA, PGPR, los efectos del pH y la roca fosfórica en el crecimiento y absorción de nutrimentos en plantas de aguacate, aunque con un comportamiento diferencial tanto en los efectos principales como en los simples.
- Con la inoculación de HFMA y PGPR en portainjertos de aguacate criollo regadas con solución nutritiva de diferente pH 6.2 aumentó el diámetro de tallo, peso seco total y la concentración de N y P en tejido vegetativo (tallos y hojas).
- La inoculación de PGPR fue determinante en el crecimiento y arquitectura radical en plantas de aguacate, regadas con solución nutritiva de diferente pH.
- El porcentaje de colonización fue suficiente para mejorar parámetros de crecimiento y concentración nutrimental en portainjertos de aguacate.
- La inoculación de PGPR desde semilla mejoró la longitud y volumen radical de las plantas.
- La inoculación desde semilla con HFMA no provocó aumento en el crecimiento de las plantas de aguacate
- Por otra parte, los efectos por la inoculación de PGPR, HFMA, suministro de roca fosfórica, e interacción de estos factores de estudio que se manejaron desde semilla se limitaron a favorecer la altura, número de hojas, diámetro del tallo y la concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en plantas de aguacate.

VII. LITERATUR CITADA

- Abd_Allah, E.F., Alqarawi, A.A., Hashem, A., Radhakrishnan, R., Al-Huqail, A.A., Al-Otibi, F.O.N., et al., 2018. Endophytic bacterium *Bacillus subtilis* (BERA 71) improves salt tolerance in chickpea plants by regulating the plant defense mechanisms. *J Plant Interact* 13 (1), 37-44.
- Adedeji, A. A., Häggblom, M. M., & Babalola, O. O. (2020). Sustainable agriculture in Africa: Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) to the rescue. *Scientific African*, 9, e00492. Doi:10.1016/j.sciaf.2020.e00492
- Afzal, I., Shinwari, Z. K., Sikandar, S., y Shahzad, S. (2019). Plant beneficial endophytic bacteria: mechanisms, diversity, host range and genetic determinants. *Microbiological research*, 221, 36-49.
- Ahemad, M. y Kibret, M. (2013). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University - Science*, 26(1), 1-20. doi:10.1016/j.jksus.2013.05.00
- Alberti, M. F., Brogio, B. D. A., Silva, S. R. D., Cantuarias-Avilés, T., y Fassio, C. (2018). Advances in propagation of avocado. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 40. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452018782>
- Alcántar, G. G.; Sandoval, V. M. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Guía de Muestreo, Preparación, Análisis e Interpretación. Publicación Especial Núm. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México. 155 p.
- Alcántar, G.G., Trejo, T. L. I., y Gómez, M. F. C. (2016). Nutrición de cultivos. Colegio de postgraduados. Biblioteca básica de agricultura. México, DF.
- Ali, B. 2015. Bacterial auxin signaling: Comparative study of growth induction in *Arabidopsis thaliana* and *Triticum aestivum*. *Turk J. Bot.* 39:1-9. doi. <https://doi.org/10.3906/bot-1401-31>.
- Ali, Q., Ayaz, M., Mu, G., Hussain, A., Yuanyuan, Q., Yu, C., ... y Gao, X. (2022). Revelando los mecanismos promotores del crecimiento vegetal de las cepas de *Bacillus* para elevar el crecimiento del arroz y su interacción con el estrés salino. *Frontiers in plant science*, 13, 994902-994902.
- Ammari T, Mengel K (2006) Total soluble Fe in soil solutions of chemically different soils. *Geoderma* 136(3–4):876–885
- Anguiano, C. J., Alcántar, J. J., Toledo, B. R., Tapia, L. M., y Vidales-Fernández, J. A. (2007). Caracterización edafoclimática del área productora de aguacate de Michoacán, México. In *International Avocado Society. Proceedings vi World Avocado Congress (Actas vi Congreso Mundial del Aguacate)*. Viña del Mar, Chile: *International Avocado Society*.

- Baca-Castillo, G.A. de J., E. Rodríguez-Cruz y A. Quevedo-Nolasco. 2016. La solución nutritiva en hidroponía. Primera edición. México.
- Bahadur I, Maurya BR, Meena VS, Saha M, Kumar A, Aeron A (2017) Mineral release dynamics of tricalcium phosphate and waste muscovite by mineral-solubilizing rhizobacteria isolated from indo-gangetic plain of India. *Geomicrobiol J* 34(5):454–466.
- Bangar, S. P., Dunno, K., Dhull, S. B., Siroha, A. K., Changan, S., Maqsood, S., y Rusu, A. V. (2022). Avocado seed discoveries: chemical composition, biological properties, and industrial food applications. *Food Chemistry: X*, 100507. <https://doi.org/10.1002/9780470650585.ch11>
- Bañuelos, J., Sangabriel C. W., Gavito, M. E., Trejo A. D., Camara, S., Medel O. R. y Carreon A. Y. (2017). Efecto de diferentes niveles de fósforo en aguacate inoculado con hongos micorrízicos arbusculares. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(7), 1509-1520.
- Bañuelos, J., Sangabriel Conde, W., Gavito, M. E., Trejo Aguilar, D., Camara, S., Medel Ortiz, R., & Carreon Abud, Y. (2017). Efecto de diferentes niveles de fósforo en aguacate inoculado con hongos micorrízicos arbusculares. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(7), 1509-1520.
- Barber S (1995) Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. Wiley Interscience, New York, 398 p.
- Barea J. M., Azcón R., Azcón-Aguilar C. (2017). "Mycorrhizosphere interactions to improve a sustainable production of legumes," in *Microbes for Legume Improvement* eds Zaidi A., Khan M., Musarrat J. (Cham: Springer;) 199–225. 10.1007/978-3-319-59174-2_9
- Barrientos, P. A. F., Reyes A. J. C., y Aguilar, M. J. J. (2010). Manual gráfico para la descripción varietal de Aguacate; Graphic Handbook for the Description of Avocado Varieties. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas - Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SNICS-SAGARPA) y la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Tlalnepantla, Estado de México, México. 136p. <https://chapingo.mx/horticultura/pdf/producto/libros.pdf>.
- Barrientos-Priego, A. F. (2017). Presente y futuro de los portainjertos y variedades de aguacate en el mundo y México. In *Memorias del V Congreso Latinoamericano del Aguacate*. Asociación de Productores y Exportadores de Jalisco (APEAJAL). Ciudad Guzmán, Jalisco, México (pp. 2-15).
- Barrientos-Priego, A. F., R. Muñoz-Pérez, M.W. Borys, and Ma. T. Martínez-Damián. 2006. Taxonomía, cultivares y portainjertos. pp. 31-59. In: Téliz, D, y A. Mora (Eds.). *El Aguacate y su Manejo Integrado*. 3ª edición, 1era reimpresión, (2015). Biblioteca Básica de Agricultura, Colegio de Postgraduados. Montecillos, México.

- Barrientos-Priego, A. F., y López-López, L. (2000). Historia y genética del aguacate. *El aguacate y su manejo integrado. Mundi-Prensa, Distrito Federal, México*, 19-31.
- Bechtaoui, N., Raklami, A., Benidire, L., Tahiri, A. I., Göttfert, M., & Oufdou, K. (2020). Effects of PGPR co-inoculation on growth, phosphorus nutrition and phosphatase/phytase activities of faba bean under different phosphorus availability conditions. *Pol. J. Environ. Stud*, 29(2), 1557-1565.
- Bencherif, K., Djaballah, Z., Brahimi, F., Boutekrabt, A., Dalpè, Y., y Sahraoui, A. L. H. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi affect total phenolic content and antimicrobial activity of *Tamarix gallica* in natural semi-arid Algerian areas. *South African Journal of Botany*, 125, 39-45.
- Ben-Ya'acov, A., y Michelson, E. (1995). Avocado rootstocks. *HORTICULTURAL REVIEWS-WESTPORT THEN NEW YORK-*, 17, 381-429. <https://doi.org/10.1002/9780470650585.ch11>
- Berger, B., Patz, S., Ruppel, S., Dietel, K., Faetke, S., Junge, H. y Becker, M. (2018). Formulación y aplicación exitosa de *Kosakonia radicincitans* promotoras del crecimiento vegetal en el cultivo de maíz. *BioMed research international*, 2018.
- Bergh, B. (1992). The origin, nature and genetic improvement of the avocado. *California Avocado Society Yearbook*, 76, 61-75. www.avocadosource.com/CAS.../CAS.../CAS_1992_PG_061.pdf.
- Bernal, J. A., Díaz, C. A., Tamayo, A., Córdoba, O. D. J., Londoño, M. E., Tamayo, P. J., y Londoño, M. (2008). *Tecnología para el cultivo del aguacate*. Corporación colombiana de Investigación Agropecuaria, Antioquia (Colombia).
- Bhavya, K., y Geetha, A. (2021). Plant Growth Promoting Rhizobacteria. *Chief Editor Dr. RK Naresh*, 61, 87.
- Boza, E. J., Tondo, C. L., Ledesma, N., Campbell, R. J., Bost, J., Schnell, R. J., y Gutiérrez, O. A. (2018). Genetic differentiation, races and interracial admixture in avocado (*Persea americana* Mill.), and *Persea* spp. evaluated using SSR markers. *Genetic resources and crop evolution*, 65(4), 1195-1215. <https://doi.org/10.1007/s10722-018-0608-7>
- Bunn, R. A., Simpson, D. T., Bullington, L. S., Lekberg, Y., y Janos, D. P. (2019). Revisiting the 'direct mineral cycling' hypothesis: arbuscular mycorrhizal fungi colonize leaf litter, but why. *The ISME journal*, 13(8), 1891-1898.
- Campos, R. E., Espíndola, B. M. C., y Mijares, O. P. (2008). Diversidad del género *Persea* y sus usos. Fundación Salvador Sánchez Colín CIC-TAMEX, S.C. Coatepec, Harinas. México. 59 p. [https://books.google.com/books/.../Diversidad del géneroperseaysusos.html?id](https://books.google.com/books/.../Diversidad%20del%20género%20perseaysusos.html?id).
- Carreón A., Y., Aguirre P. S., Gavito, M. E., Mendoza S. D. J., Juárez C. R., Martínez T. M., y Trejo A. D. (2014). Inoculación micorrízico arbuscular en portainjertos de

- plantas de aguacate cv'Hass' en viveros de Michoacán, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(5), 847-857.
- Caruso, T., Mafrica, R., Bruno, M., Vescio, R., y Sorgonà, A. (2021). Root architectural traits of rooted cuttings of two fig cultivars: Treatments with arbuscular mycorrhizal fungi formulation. *Scientia Horticulturae*, 283, 110083. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110083>
- Castañares, J. L. (2020). *El ABC de la Hidroponía*. EEA AMBA.
- Castro, A., Chávez, B., García, S., Reyes, R., y Bárcenas, O. (2013). Effect of mycorrhizal inoculants in the development of Mexican landrace avocado rootstocks. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(3), 407-413.
- Castro, V. M., Iturrieta, E. R., y Fassio, O. C. (2009). Rootstock effect on the tolerance of avocado plants cv. Hass to NaCl stress. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(3), 316-324.
- Cavagnaro, T. R. (2008). The role of arbuscular mycorrhizas in improving plant zinc nutrition under low soil zinc concentrations: a review. *Plant and Soil*, 304(1), 315-325.
- Chang, W., Sui, X., Fan, X.X., Jia, T.T., Song, F.Q., 2018. Arbuscular mycorrhizal symbiosis modulates antioxidant response and ion distribution in salt-stressed *Elaeagnus angustifolia* seedlings. *Front. Microbiol.* 9, 652. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00652>.
- Chen, H.; Morrell, P. L.; Ashworth, V. E. T. M.; Cruz, M. and Clegg, M. T. 2009. Tracing the geographic origins of major avocado cultivars. *J. Heredity*. 100(1):56-65.
- Cohen, A. C., Bottini, R., Pontin, M., Berli, F. J., Moreno, D., Boccanlandro, H., ... y Piccoli, P. N. (2015). *Azospirillum brasilense* mejora la respuesta de *Arabidopsis thaliana* a la sequía principalmente a través de la mejora de los niveles de ABA. *Physiologia Plantarum*, 153(1), 79-90.
- Colozzi-Filho, A. y J. O. Siqueira. 1986. Micorrizas vesículo-arbusculares em mudas de cafeeiro. I. Efeitos de *Gigaspora margarita* e edubacão fosfatotada no crescimento e nutricao. *Rev. Bras. Ciênc. Solo Campinas*, 10: 199-205.
- Dane, 2016. Cultivo de aguacate Hass (*Persea americana* Mill; *Persea nubigena* var. *Guatemalensis* x *Persea americana* var. *drymifolia*), plagas y enfermedades durante la temporada de lluvias. Insumos y factores asociados a la producción agropecuaria. 50.1-02. <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/>
- De Boodt, M. A. V. O., y Verdonck, O. (1971, June). The physical properties of the substrates in horticulture. In *III Symposium on Peat in Horticulture* 26 (pp. 37-44).

- De Villiers, A., y Ernst, A. (2015). Avocado rootstock research: Principles and practices. In *World Avocado Congress* (Vol. 8, pp. 40-5)
- De Villiers, A.I., y Ernst, A.A. (2007) Practical value of the Allesbeste micro cloning technique. *Proc. VI World Avocado Congr.*, Viña Del Mar., Chile, 1 pp.12-16.
- Defez, R., Anna Andreozzi, A., Bianco, C., 2017. The overproduction of Indole-3-acetic acid (IAA) in endophytes upregulates nitrogen fixation in both bacterial cultures and inoculated rice plants. *Microb Ecol* 74 (2), 441_452.
- Delvasto, P., Valverde, A., Ballester, A., Muñoz, J. A., González, F., Blázquez, M. L., ... - García-Balboa, C. (2008). Diversity and activity of phosphate bioleaching bacteria from a high-phosphorus iron ore. *Hidrometalurgia*, 92(3-4), 124-129.
- Diagne, N., Ngom, M., Djighaly, P. I., Fall, D., Hocher, V., y Svistoonoff, S. (2020). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and performance: Importance in biotic and abiotic stressed regulation. *Diversity*, 12(10), 370.
- Dowarah, B., Gill, S. S., y Agarwala, N. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi in conferring tolerance to biotic stresses in plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-16.
- Egamberdieva, D., S. J. Wirth, A. A. Alqarawi, E. F. Abd-Allah, and A. Hashem. 2017. Phytohormones and beneficial microbes: Essential components for plants to balance stress and fitness. *Front. Microbiol.* 8: 1-14. doi: <https://doi.org/10.3389/>
- El-Mageed, A., Taia, A., El-Mageed, A., Shimaa, A., El-Saadony, M. T., Abdelaziz, S., y Abdou, N. M. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria improve growth, morph-physiological responses, water productivity, and yield of rice plants under full and deficit drip irrigation. *Rice*, 15(1), 1-15.
- Etesami, H. (2018). Ecotoxicology and environmental safety bacterial mediated alleviation of heavy metal stress and decreased the accumulation of metals in plant tissues: mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 175-191.
- Etesami, H., y Jeong, B. R. (2021). Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate-solubilizing bacteria, and silicon to P uptake by plant: a review. *Frontiers in Plant Science*, 12,1355.
- Etminani, F., y Harighi, B. (2018). Isolation and identification of endophytic bacteria with plant growth promoting activity and biocontrol potential from wild pistachio trees. *The plant pathology journal*, 34(3), 208
- Ferreira CM, Vilas-Boas Â, Sousa CA, Soares HM, Soares EV (2019) Comparison of five bacterial strains producing siderophores with ability to chelate iron under alkaline conditions. *AMB Express* 9(1):78
- Ferrer-Pereira, H., Pérez Almeida, I. and Raymúndez Urrutia, M. (2017). Genetic characterization and diversity among avocado (*Persea americana* Mill.) genotypes

- from INIA-CENIAP, Venezuela. *Tree Genetics y Genomes*, 13(3): 56. <https://doi.org/10.1007/s11295-017-1128-x>
- Frew, A. (2018). 'Soil probiotics' promise bigger, healthier crops, but there's a downside. *The Conversation*, 23, 1-9.
- Fukami, J., Ollero, F. J., Megías, M., y Hungria, M. (2017). Phytohormones and induction of plant-stress tolerance and defense genes by seed and foliar inoculation with *Azospirillum brasilense* cells and metabolites promote maize growth. *AMB Express*, 7(1), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0453-7>
- Gahan, J., y Schmalenberger, A. (2015). Arbuscular mycorrhizal hyphae in grassland select for a diverse and abundant hyphospheric bacterial community involved in sulfonate desulfurization. *Applied Soil Ecology*, 89, 113-121.
- Gallart, M., Paungfoo-Lonhienne, C., y Trueman, S. J. (2022). Effects of a growth-promoting *Paraburkholderia* species on nitrogen acquisition by avocado seedlings. *Scientia Horticulturae*, 295, 110767. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110767>
- Gamalero E, Glick BR (2015) Bacterial modulation of plant ethylene levels. *Plant Physiol* 169:13–22
- García, J. E., Maroniche, G., Creus, C., Suárez-Rodríguez, R., Ramirez-Trujillo, J. A., y Groppa, M. D. (2017). In vitro PGPR properties and osmotic tolerance of different *Azospirillum* native strains and their effects on growth of maize under drought stress. *Microbiological Research*, 202, 21-29.
- Garciana, S. S., and I. L. Ferrat. 2001. Identifying fruit mineral removal differences in four avocado cultivars. *Better Crops* 15 (1):28–31.
- Garrido R. E. R. (2013). Áreas potenciales para el cultivo de Aguacate (*Persea americana* L.) cultivar "Hass" en el Estado de Guerrero, México. *Agro Productividad*, 6(5).
- Gaur A, Adholeya A. (2004). Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Current Science*. 86: 528-534.
- Glick B R. (2014) Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiol. Res.* 169: 30–39.
- Glick, B. R. (2012). Bacterias promotoras del crecimiento de las plantas: mecanismos y aplicaciones. *Scientifica*, 2012.
- Glick, B. R. (2015). *Beneficial plant-bacterial interactions* (pp. 1-28). Heidelberg: Springer.
- González, H. y Fuentes, N. 2017. Mecanismo de acción de cinco microorganismos promotores de crecimiento vegetal. *Rev. Cienc. Agric.* 34(1): 17-31.
- Gutjahr, C., y Parniske, M. (2017). Cell biology: control of partner lifetime in a plant–fungus relationship. *Current Biology*, 27(11), R420-R423.

- Guzmán, L. F., Machida-Hirano, R., Borrayo, E., Cortés-Cruz, M., Espíndola-Barquera, M. C. and Heredia-García, E. (2017). Genetic structure and selection of a core collection for long term conservation of avocado in Mexico. *Frontiers in Plant Science*, 8: 243. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00243>
- Gyaneshwar, P., Naresh Kumar, G., Parekh, L. J., y Poole, P. S. (2002). Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and soil*, 245(1), 83-93.
- Haque, S. I., y Matsubara, Y. I. (2018). Salinity tolerance and sodium localization in mycorrhizal strawberry plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(22), 2782-2792.
- Hashem, A., Abd-Allah, E.F., Alqarawi, A.A., Al-Huqail, A.A., Wirth, S., Egamberdieva, D., 2016. The interaction between Arbuscular Mycorrhizal fungi and endophytic bacteria enhances plant growth of *Acacia gerrardii* under salt stress. *Front. Microbiol.* 7, 1–15.<https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01089>.
- He, J. D., Chi, G. G., Zou, Y. N., Shu, B., Wu, Q. S., Srivastava, A. K., y Kuča, K. (2020). Contribution of glomalin-related soil proteins to soil organic carbon in trifoliolate orange. *Applied Soil Ecology*, 154, 103592.
- Herath, B. M. M. D., Madushan, K. W. A., Lakmali, J. P. D., y Yapa, P. N. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi as a potential tool for bioremediation of heavy metals in contaminated soil. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 10(3), 217-228.
- Hider, R. C., y Kong, X. (2010). Chemistry and biology of siderophores. *Natural product reports*, 27(5), 637-657.
- Ilangumaran, G., y Smith, D. L. (2017). Plant growth promoting rhizobacteria in amelioration of salinity stress: a systems biology perspective. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1768
- Jacott, C., Murray, J., Ridout, C. (2017). Trade-Offs in Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis: Disease Resistance, Growth Responses and Perspectives for Crop Breeding. *Agronomy*. 7. 75. [10.3390/agronomy7040075](https://doi.org/10.3390/agronomy7040075)
- Jayakumara, A., Kumara, V. P., Josepha, M., Nairb, I. C., Remakanthan, A., y Radhakrishnan, E. K. (2020). Plant growth-promoting mechanisms of endophytes. In *Microbial Endophytes* (pp. 57-74). Woodhead Publishing.
- Jha C K, Saraf M. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *E3 Journal of Agricultural Res. Develop.* (2015) 5: 108–119.
- Jiménez, S., O. Alvarado y H. Balaguera. 2015. Fluorescencia como indicador de estrés en *Helianthus annuus* L. Una revisión. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 9(1), 149160. Doi: [10.17584/rcch.2015v9i1.3753](https://doi.org/10.17584/rcch.2015v9i1.3753)

- Kang, S. M., M. Waqas, M. Hamayun, S. Asaf, A. L. Khan, A. Y. Kim, Y. G. Park, and I. J. Lee. 2017. Gibberellins and indole-3-acetic acid producing rhizospheric bacterium *Leifsonia xyli* SE134 mitigates the adverse effects of copper-mediated stress on tomato. *J. Plant Interact.* 12: 373-380. doi: <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1370142>.
- Kannoja, P., Choudhary, K. K., Srivastava, A. K., y Singh, A. K. (2019). PGPR bioelicitors: induced systemic resistance (ISR) and proteomic perspective on biocontrol. In *PGPR Amelioration in Sustainable Agriculture* (pp. 67-84). Woodhead Publishing.
- Kapoor, R., Sharma, D., y Bhatnagar, A. K. (2008). Arbuscular mycorrhizae in micropropagation systems and their potential applications. *Scientia Horticulturae*, 116(3), 227-239.
- Kapulnik, Y., Delaux, P.M., Resnick, N., Mayzlish-Gati, E., Wininger, S., Bhattacharya, C., ... y Koltai, H. (2011). Los estrigolactonas afectan la formación de raíces laterales y alargamiento del cabello de raíz en *Arabidopsis*. *Planta*, 233(1), 209-216.
- Karasawa, T., Hodge, A., y Fitter, A. H. (2012). Growth, respiration and nutrient acquisition by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* and its host plant *Plantago lanceolata* in cooled soil. *Plant, Cell y Environment*, 35(4), 819-828.
- Karlidag, H., Esitken, A., Turan, M., & Sahin, F. (2007). Effects of root inoculation of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, growth and nutrient element contents of leaves of apple. *Scientia Horticulturae*, 114(1), 16-20.
- Kaur, S., y Suseela, V. (2020). Unraveling arbuscular mycorrhiza-induced changes in plant primary and secondary metabolome. *Metabolites*, 10(8), 335.
- Keshavarz Z. J., Aliasghar zad, N., Oustan, S., Emadi, M., y Ahmadi, A. (2013). Isolation and characterization of potassium solubilizing bacteria in some Iranian soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(12), 1713-1723.
- Keymer, A., y Gutjahr, C. (2018). Transferencia de lípidos entre reinos en simbiosis micorrhiza arbuscular y más allá. *Curr. Opin. Planta Biol.* 44, 137–144. doi: 10.1016/j.pbi.2018.04.005
- Khan, K. S., y Joergensen, R. G. (2009). Changes in microbial biomass and P fractions in biogenic household waste compost amended with inorganic P fertilizers. *Bioresource technology*, 100(1), 303-309.
- Kheyri, Z., Moghaddam, M., y Farhadi, N. (2022). Inoculation efficiency of different mycorrhizal species on growth, nutrient uptake, and antioxidant capacity of *Calendula officinalis* L.: A comparative study. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*.

- Kloepper JW, Leong J, Teintze M, Schroth MN (1980) Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. *Nature* 286:885–886
- Kobae, Y., Ohmori, Y., Saito, C., Yano, K., Ohtomo, R., y Fujiwara, T. (2016). Phosphate treatment strongly inhibits new arbuscule development but not the maintenance of arbuscule in mycorrhizal rice roots. *Plant Physiology*, 171(1), 566-579.
- Kumar, A., Vandana, R.S., Singh, M., Pandey, K.D., 2015b. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR). A promising approach for disease management. In: Singh, J.S., Singh, D.P. (Eds.), *Microbes and environmental management*. Studium Press, New Delhi, pp. 195-209.
- Kumar, A., Verma, H., Singh, V.K., Singh, P.P., Singh, S.K., Ansari, W.A., et al., 2017a. Role of *Pseudomonas* sp. in sustainable agriculture and disease management. In: Meena V., Mishra P., Bisht J., Pattanayak A. (Eds.), *Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture*. Springer, Singapore, pp. 195_215.
- Kumar, V., Kumar, A., Pandey, K.D., Roy, B.K., 2015a. Isolation and characterization of bacterial endophytes from the roots of *Cassia tora* L. *Annals of Microbiology* 65,1391-1399.
- Kumari, R., Bhatnagar, S., Mehla, N. y Vashistha, A. (2022). Potencial de las enmiendas orgánicas (hongos AM, PGPR, vermicompost y algas marinas) en la lucha contra el estrés salino – Una revisión. *Estrés de la planta*, 100111.
- Lanfranco, L., Fiorilli, V., y Gutjahr, C. (2018). Comunicación de pareja y papel de nutrientes en la simbiosis micorriza arbuscular. *Nuevo Fitol.* 220, 1031–1046. doi: 10.1111/nph.15230
- Lazare, S., Haberman, A., Yermiyahu, U., Erel, R., Simenski, E., y Dag, A. (2020). Avocado rootstock influences scion leaf mineral content. *Archives of Agronomy and soil science*, 66(10), 1399-1409.
- Lehmann A, Zheng W, Ryo M, Soutschek K, Rongstock R, Maass S, Rillig MC (2019). Fungal traits important for soil aggregation. *bioRxiv*[Preprints] doi: 10.1101/732628
- Lehmann, A., Veresoglou, S. D., Leifheit, E. F., y Rillig, M. C. (2014). Arbuscular mycorrhizal influence on zinc nutrition in crop plants—a meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 69, 123-131.
- Lehmann, E.F. Leifheit, M.C. Rillig, (2017). Chapter 14 - Mycorrhizas and Soil Aggregation, Editor(s): Nancy Collins Johnson, Catherine Gehring, Jan Jansa, *Mycorrhizal Mediation of Soil*, Elsevier, Pages 241-262, ISBN 9780128043127, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804312-7.00014-0>.
- Leifheit, E. F., Veresoglou, S. D., Lehmann, A., Morris, E. K., and Rillig, M. C. (2014). Multiple factors influence the role of arbuscular mycorrhizal fungi in soil

- aggregation-a meta-analysis. *Plant Soil* 374, 523–537. doi: 10.1007/s11104-013-1899-2
- Lemus-Soriano, B. A., Venegas-González, E., y Pérez-López, M. A. (2021). Efecto de bioestimulantes radiculares sobre el crecimiento en plantas de aguacate. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(6), 1139-1144.
- Li, Z., Wu, N., Meng, S., Wu, F., y Liu, T. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) enhance the tolerance of *Euonymus maackii* Rupr. at a moderate level of salinity. *PLoS One*, 15(4), e0231497.
- Liffourrena, A. S. y Lucchesi, G. I. (2018). Células de *Pseudomonas putida* A encapsuladas en alginato de perlita (ATCC 12633): Preparación, caracterización y uso potencial como inoculantes vegetales. *Revista de Biotecnología*, 278, 28-33.
- Litz, R. E., Raharjo, S. H. T., y Lim, M. G. (2007). I. 7 Avocado. *Edited by T. Nagata (Managing Editor) H. Lörz*, 167.
- Liu, K., Newman, M., McInroy, J. A., Hu, C. H., y Kloepper, J. W. (2017b). Selection and assessment of plant growth-promoting rhizobacteria for biological control of multiple plant diseases. *Phytopathology*, 107(8), 928-936.
- Loggiodice, P. R. H., Sindoni, M., y Natera, J. R. M. (2009). Importancia de la selección y manejo adecuado de sustratos en la producción de plantas frutales en vivero. *Revista Científica UDO Agrícola*, 9(2), 282-288.
- López-Moctezuma, H., Ferrera-Cerrato, R., Farias-Larios, J., Aguilar-Espinosa, S., Bello, M. D. R. F., y López-Aguirre, J. G. (2005). Micorriza arbuscular, *Bacillus* y sustrato enriquecido con vermicomposta en el desarrollo de plantas de papayo. *Terra latinoamericana*, 23(4), 523-531.
- Lovatt, C. (2013). Hass avocado nutrition research in California. *Avocado Society Yearbook*, 96, 74-105.
- Lugtenberg B, Kamilove F (2019) PGPR. *Annual Reviews in Microbiology* 63: 541-556
- Maldonado, T. R. (2002). Diagnóstico nutrimental para la producción de aguacate Hass. Informe de investigación. UACH (Universidad Autónoma Chapingo). Texcoco, Estado de México, 56-168.
- Malik, D. K., y Sindhu, S. S. (2011). Production of indole acetic acid by *Pseudomonas* sp.: effect of coinoculation with *Mesorhizobium* sp. Cicer on nodulation and plant growth of chickpea (*Cicer arietinum*). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 17(1), 25-32.
- MARSCHNER, P. 2012. Marschner's Mineral nutrition of higher plants. Third edition. Academic Press. London. 649 p.
<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123849052>.

- Martínez, V. M., Campos, R. E., Ayala, A. J., Barrientos, P. A. F., y Espíndola, B. M. C. (2016). Diversidad y distribución del género *Persea* Mill., en México. In: *Agroproductividad*, 9 (4), 72-77. search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost...site.
- Marwa N, Singh N, Srivastava S, Saxena G, Pandey V, Singh N (2019) Characterizing the hypertolerance potential of two indigenous bacterial strains (*Bacillus flexus* and *Acinetobacter junii*) and their efficacy in arsenic bioremediation. *J Appl Microbiol* 126(4):1117–1127
- Meena VS, Maurya BR, Meena SK, Mishra PK, Bisht JK, Pattanayak A (2018) Potassium solubilization: strategies to mitigate potassium deficiency in agricultural soils. *GJBAHS* 7:1–3
- Mendoza, D. Y. P., Mancilla, A. G., Suárez, J. J. A., Guzmán, M. D. P. R., Barradas, O. G., y Delira, R. A. (2018). Characterization of the antifungal activity of three rhizobacterial strains against *Rhizoctonia solani*. *Spanish journal of agricultural research*, 16(4), 16
- Miransari, M. (2013). Microbios del suelo y la disponibilidad de nutrientes del suelo. *Acta physiologiae plantarum*, 35(11), 3075-3084.
- Miransari, M. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal tolerance in plants. In *Arbuscular mycorrhizas and stress tolerance of plants* (pp. 147-161). Springer, Singapore.
- Molina-Romero, D., Bustillos-Cristales, O. Rodríguez-Andrade, Y. E. Morales-García, Y. Santiago-Saenz, M. Castañeda-Lucio y J. Muñoz-Rojas. 2015. Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. *Biológicas* 17: 24-34.
- Montañez Orozco, I., Vargas Sarmiento, C., Cabezas Gutiérrez, M., y Cuervo Andrade, J. (2010). Colonización micorrizica en plantas de aguacate (*Persea americana* L.). *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 13(2), 51-60.
- Montañez, A., Blanco, A. R., Barlocco, C., Beracochea, M., y Sicardi, M. (2012). Characterization of cultivable putative endophytic plant growth promoting bacteria associated with maize cultivars (*Zea mays* L.) and their inoculation effects in vitro. *Applied Soil Ecology*, 58, 21-28
- Montoyontoya B, Osorio NW (2009) Mycorrhizal dependency of avocado at different levels of soil solution phosphorus. *Suelos Ecuat* 39(1):100-106.
- Mota, M. S., Gomes, C. B., Souza, I. T., y Moura, A. B. (2017). Bacterial selection for biological control of plant disease: criterion determination and validation. *brazilian journal of microbiology*, 48, 62-70.

- Mustafa, A. A. A.; Othman, R.; Zinal-Abidin, M. A. y Ganesan, V. 2010. Respuesta de crecimiento del maíz dulce (*Zea mays*) a la inoculación de *Glomus mosseae* en diferentes edades de las plantas. *Asian J. Plant Sci.* 9(6):337-343.
- Mutumba, Filipe Adriano, Zagal, Erick, Gerding, Macarena, Castillo-Rosales, Dalma, Paulino, Leandro, & Schoebitz, Mauricio. (2018). Plant growth promoting rhizobacteria for improved water stress tolerance in wheat genotypes.. *Journal of soil science and plant nutrition*, 18(4), 1080-1096. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005003003>
- Nataren V. J., Angel P., A. L. D., Megchún, G. J. V., Ramirez. H., E., y Meneses, M., I. (2020). Caracterización productiva del aguacate (*Persea americana* Mill.) en la zona de alta montaña Veracruz, México.
- Nelson, S. K., y Steber, C. M. (2016). Gibberellin hormone signal perception: down-regulating DELLA repressors of plant growth and development. *Annual plant reviews*, 49, 153-188.
- Nemati, R., Fortin, J. P., Craig, J., y Donald, S. (2021). Growing mediums for medical cannabis production in north america. *Agronomy*, 11(7), 1366. doi.org/10.3390/agronomy11071366
- Newett, S. D. E., Crandy, J. H., y Balerdi, C. F. (2002). Cultivars and rootstocks. In: Wiley, A. W., Schaffer, B. and Wolstenholme, B. N. (Eds.), *Avocado: Botany, Production and Uses*. CAB Publishing, pp. 161-187.
- Novoa, M. A., Miranda, D., y MELGAREJO, L. (2018). Efecto de las deficiencias y excesos de fósforo, potasio y boro en la fisiología y el crecimiento de plantas de aguacate (*Persea americana*, cv. Hass). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(2), 293-307.
- Nyoki, D., y Ndakidemi, P. A. (2018). Root length, Nodulation and Biological Nitrogen fixation of *Rhizobium* inoculated soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) grown under maize (*Zea mays* L.) intercropping systems and P and K fertilization. *Advances in BioResearch*, 9(1).
- Odoh, C. K. 2017. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): A Bioprotectant bioinoculant for Sustainable Agrobiolgy. A Review. *Int. j. Adv. Res. Biol. Sci.* 4: 123-142. doi: <http://dx.doi.org/10.22192/ijarbs.2017.04.05.014>
- Ojuederie, O. B., Olanrewaju, O. S., y Babalola, O. O. (2019). Plant growth promoting rhizobacterial mitigation of drought stress in crop plants: Implications for sustainable agriculture. *Agronomy*, 9(11), 712.
- Oliveira, I. V. D. M., Cavalcante, Í. H. L., Franco, D., y Martins, A. B. G. (2008a). Clonagem do abacateiro variedade "Duke 7" (*Persea americana* Mill.) por alporquia. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 30(3), 759-763

- Orozco, M. Del C., M. Del C. Rocha, B.R. Glick y G. Santoyo. 2018. Microbiome engineering to improve biocontrol and plant growth-Promoting mechanisms. *Microbiological REserch*, 208,25-31. DOI: 10.1016/j.micres.2018.01.005
- Orozco, M., M., Glick, B. R., y Santoyo, G. (2020). ACC desaminasa en bacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPB): un mecanismo eficiente para contrarrestar el estrés salinoso en los cultivos. *Investigación microbiológica*, 235, 126439. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126439>
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., y Tran, L. S. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in plant science*, 5, 86.
- Osorio NW (1997) Evolución en el tiempo de características químicas de Andisoles cultivados con crisantemo (*Dedranthema grandiflora*) en el oriente antioqueño. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Ouziad, F., Hildebrandt, U., Schmelzer, E., y Bothe, H. (2005). Differential gene expressions in arbuscular mycorrhizal-colonized tomato grown under heavy metal stress. *Journal of Plant Physiology*, 162(6), 634-649.
- Park, J.E., C.H. Ko, S.B. Lee, C.G. An, K.S. Kim, B.R. Jeong, and S.J. Hwang. 2011. Use of pellet and cube type phenolic foam as the medium for production of plug seedlings of 'Fascinato' paprika. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 29:79.
- Park, J.E., J.H. Kang, C.G. An, J.S. Jeong, S.H. Park, Y.J. Cheon, K.S. Kim, and S.J. Hwang. 2010. Use of phenolic foam as a medium for production of plug seedlings of 'Fascinato' paprika. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 28:47.
- Pereira, S. I. A., Abreu, D., Moreira, H., Vega, A., & Castro, P. M. L. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) improve the growth and nutrient use efficiency in maize (*Zea mays* L.) under water deficit conditions. *Heliyon*, 6(10), e05106.
- Pérez-Montaña, F., Alías-Villegas, C., Bellogín, R. A., Del Cerro, P., Espuny, M. R., Jiménez-Guerrero, I., y Cubo, T. (2014). Plant growth promotion in cereal and leguminous agricultural important plants: from microorganism capacities to crop production. *Microbiological research*, 169(5-6), 325-336.
- Phillips, J. M., y Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British mycological Society*, 55(1), 158-IN18.
- PLANTE, A. F. (2007). Soil biogeochemical cycling of inorganic nutrients and metals. In *Soil microbiology, ecology and biochemistry* (pp. 389-432). Academic Press.
- Postma, J.A., Lynch, J.P., 2011. Root cortical aerenchyma enhances the growth of maize on soils with suboptimal availability of nitrogen, phosphorus, and potassium. *Plant Physiol.* 156,1190–1201

- Prasad, M., Srinivasan, R., Chaudhary, M., Choudhary, M., Jat, L. K. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for sustainable agriculture: perspectives and challenges. In *PGPR amelioration in sustainable agriculture* (pp. 129-157). Woodhead Publishing.
- Punamiya, P., Datta, R., Sarkar, D., Barber, S., Patel, M., y Das, P. (2010). Symbiotic role of *Glomus mosseae* in phytoextraction of lead in vetiver grass [*Chrysopogon zizanioides* (L.)]. *Journal of hazardous materials*, 177(1-3), 465-474.
- Quilambo, Orlando. The vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *African Journal Biotechnology*, 2(12): 539-546. 2003.
- Raheem, A., A. Shaposhnikov, A. Belimov, I. C. Dodd, and B. Ali. 2018. Auxin production by rhizobacteria was associated with improved yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. *Arch. Agron. Soil Sci.* 64: 574-587. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1362105>.
- Rajkumar, M., Sandhya, S., Prasad, M.N.V., Freitas, H., 2012. Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation. *Biotechnol. Adv.* 30,1562–1574.
- Rathore P (2014) A review on approaches to develop plant growth promoting rhizobacteria. *Int J Recent Sci Res* 5:403–407
- Ravanbakhsh M, Sasidharan R, Voesenek L, Kowalchuk GA, Jousset A (2018) Microbial modulation of plant ethylene signaling: ecological and evolutionary consequences. *Microbiome* 6:52
- Rawat, P., Shankhdhar, D., y Shankhdhar, S. C. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria: a booster for ameliorating soil health and agriculture production. In *Soil Health* (pp. 47-68). Springer, Cham.
- Rennie RJ (1981) A single medium for the isolation of acetylene-reducing (Dinitrogen-fixing) bacteria from soils. *Canadian Journal Microbiology* 27: 8–14.
- Rillig, M.C., y Mummey, D.L. (2006). *Mycorrhizas and soil structure*. *The New phytologist*, 171 1, 41-53.
- Rousk, J., Bååth, E., Brookes, P. C., Lauber, C. L., Lozupone, C., Caporaso, J. G., Knight, R. y Fierer, N. (2010). Comunidades bacterianas y fúngicas del suelo a través de un gradiente de pH en un suelo cultivable. *La revista ISME*, 4(10), 1340–1351. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.58>
- Rubin, R. L., van Groenigen, K. J. y Hungate, B. A. (2017). Las rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas son más efectivas bajo sequía: un metanálisis. *Planta y suelo*, 416(1), 309-323.
- Sah, S. K., K. R. Reddy, and J. Li. 2016. Abscisic acid and abiotic stress tolerance in crop Plants. *Front. Plant Sci.* 7: 1- 26. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00571>.

- Salazar, G. S. (2002). Nutrición del aguacate, principios y aplicaciones. *INPOFOS, INIFAP. Querétaro, México*, 165.
- Salazar-García, S., González-Durán, I. J., y Ibarra-Estrada, M. E. (2015). Identification of the appropriate leaf sampling period for nutrient analysis in 'Hass' avocado. *HortScience*, 50(1), 130-136.
- Salazar-Garcia, S., y Cortés-Flores, J. I. (1986). Root distribution of mature avocado trees growing in soils of different texture. *Calif. Avocado Soc. Yrbk*, 70, 165-174.
- Säle, V.; Aguilera, P.; Laczko, E.; Mäder, P.; Berner, A.; Zihlmann, U.; Van der Heijden, M. G. A. and Oehl, F. 2015. Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.* 84: 38-52
- Samartzidis, C., Awada, T., Maloupa, E., Radoglou, K., y Constantinidou, H. I. (2005). Rose productivity and physiological responses to different substrates for soil-less culture. *Scientia horticultrae*, 106(2), 203-212.
- SÁNCHEZ G, P., y RAMÍREZ M, P. (1999) .Fertilización y nutrición del aguacatero. En: el aguacate y su manejo integrado. D. Teliz (ed.). Ed. Mundiprensa. Mexico, D.F pp 103-113
- Sánchez, P. J. de la L. (1999). Recursos genéticos de aguacate (*Persea americana* Mill.) y especies afines en México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 7-18. www.avocadosource.com/WAC4/WAC4_p007.pdf.
- Santi, C., Bogusz, D., y Franche, C. (2013). Biological nitrogen fixation in non-legume plants. *Annals of botany*, 111(5), 743-767.
- Santoyo, G., Moreno, H., G., Ma, M., Glick, R. B.(2016). Plant growth-promoting bacterial endophytes, *Microbiological Research*, Volume 183, Pages 92-99, ISSN 0944-5013, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008>
- Santoyo, G., Sánchez Y., J. M., y de los Santos. V, S. (2019). Methods for detecting biocontrol and plant growth-promoting traits in Rhizobacteria. In *Methods in rhizosphere biology research* (pp. 133-149). Springer, Singapore.
- Sato, T., Hachiya, S., Inamura, N., Ezawa, T., Cheng, W., y Tawaraya, K. (2019). Secretion of acid phosphatase from extraradical hyphae of the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* is regulated in response to phosphate availability. *Mycorrhiza*, 29(6), 599-605.
- Sawers, R. J. H., Ramírez-Flores, M. R., Olalde-Portugal, V., y Paszkowski, U. (2018). El impacto de la domesticación y la mejora de los cultivos en la simbiosis micorriza arbuscular en los cereales: los conocimientos de la genética y la genómica. *Nuevo Fitol.* 220, 1135–1140. <https://doi.org/10.1111/nph.15152>
- Sawers, R. J., Svane, S. F., Quan, C., Grønlund, M., Wozniak, B., Gebreselassie, M. N., y Paszkowski, U. (2017). Phosphorus acquisition efficiency in arbuscular

- mycorrhizal maize is correlated with the abundance of root-external hyphae and the accumulation of transcripts encoding PHT1 phosphate transporters. *New Phytologist*, 214(2), 632-643.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2007). http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar_comdeagr.html.
- Selladurai, R., y Awachare, C. M. (2020). Nutrient management for avocado (*Persea americana miller*). *Journal of plant nutrition*, 43(1), 138-147.
- Shahzad, R., A. L. Khan, S. Bilal, M. Waqas, S. M. Kang, and I. J. Lee. 2017. Inoculation of abscisic acid-producing endophytic bacteria enhances salinity stress tolerance in *Oryza sativa*. *Environ. Exp. Bot.* 136:
- Sharma A, Shankhdhar D, Shankhdhar SC (2016) Potassium-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in potassium solubilization and uptake. In: Meena V, Maurya B, Verma J, Meena R (eds) Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture. Springer, New Delhi, pp 203–219
- Sharma, R.K., Archana, G., 2016. Cadmium minimization in food crops by cadmium resistant plant growth promoting rhizobacteria. *Appl. Soil Ecol.* 107, 66–78.
- Sharma, V., Kaur, J., y Sharma, S. (2020). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: potencial para la agricultura sostenible. *Bioteconología Vegetal*, 20(3), 157-166
- Singh, B., Boukhris, I., Kumar, V., Yadav, A. N., Farhat-Khemakhem, A., Kumar, A., Alghamdi, O. A. (2020). Contribución de las fittasas microbianas a la mejora del crecimiento y la nutrición de las plantas: una revisión. *Pedofera*, 30(3), 295-313
- Singh, M., Kumar, A., Singh, R., Pandey, K.D., 2017c. Endophytic bacteria: a new source of bioactive compounds. *3 Biotech* 7 (5), 315.
- Singh, M., Singh, D., Gupta, A., Pandey, K. D., Singh, P. K., y Kumar, A. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria: application in biofertilizers and biocontrol of phytopathogens. In *PGPR amelioration in sustainable agriculture* (pp. 41-66). Woodhead Publishing.
- Singh, S., Singh, U. B., Trivdi, M., Malviya, D., Sahu, P. K., Roy, M., Sharma, P. K., Singh, H. V., Manna, M. C. y Saxena, A. K. (2021). Reestructuración de las respuestas celulares: conexión de la intervención microbiana con la aptitud ecológica y la adaptación al maíz (*Zea mays*L.) Cultivado en suelo salino-sódico. *Fronteras en microbiología*, 11, 568325. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.568325>
- Smith, SE, Read, D., 2008. Mycorrhizal Symbiosis. Academic Press, EE.UU., págs. 189–387

- Solanki, M. K., Kashyap, P. L., Kumari, B., Ansari, R. A., Sumbul, A., Rizvi, R., y Mahmood, I. (2021). Mycorrhizal fungi and its importance in plant health amelioration. In *Microbiomes and Plant Health* (pp. 205-223). Academic Press.
- Song, Z., Bi, Y., Zhang, J., Gong, Y., y Yang, H. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi promote the growth of plants in the mining associated clay. *Scientific reports*, 10(1), 1-9. 0.1038/s41598-020-59447-9
- Soriano, B. A. L., González, E. V., y López, M. A. P. (2021). Efecto de bioestimulantes radiculares sobre el crecimiento en plantas de aguacate. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(6), 1139-1144
- Sotomayor, A., Gonzáles, A., Cho, K. J., Villavicencio, A., y Viera, W. (2018) Uso De Microorganismos Para La Propagación En Vivero De Patrones De Aguacate (*Persea Americana* Mill.) Cultivar “Criollo”. 1er Congreso Mexicano Del Aguacate. Facultad De Agrobiología UMSNH. 25 A 27 Octubre 2018.
- Sotomayor, A., Gonzáles, A., Jin Cho, K., Villavicencio, A., Jackson, T., & Viera, W. (2019b). Effect of the application of microorganisms on the nutrient absorption in avocado (*Persea americana* Mill.) seedlings. *Journal of the Korean Society of International Agriculture*, 31(1), 17-24
- Sotomayor, A., Mejía, P., Morocho, D., Gaona, P., Viteri, P., Medina, L., y Viera, W. (2022). Consorcios microbianos aplicados en un sistema de producción de plántulas de aguacate cultivar “Criollo”. *Manglar*, 19(1), 15-23.
- Spaepen, S., Vanderleyden, J., Remans, R., 2007. Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiol. Rev.* 31, 425–448.
- Steiner AA (1984) The Universal Nutrient Solution. En Proc 6th Int. Cong. Soilless Cult. pp. 633-649
- Straub, D., Rothballer, M., Hartmann, A., and Ludewig, U. (2013). The genome of the endophytic bacterium *H. frisingense* GSF30(T) identifies diverse strategies in the *Herbaspirillum* genus to interact with plants. *Front. Microbiol.* 4:168. doi: 10.3389/fmicb.2013.00168
- Sun Y., Cheng Z., Glick B.R. 2009. La presencia de una mutación de delación de la desaminasa de 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) altera la fisiología de la bacteria endófito promotora del crecimiento de las plantas *Burkholderia phytofirmans* PsJN. *FEMS Microbiol. letón.* 296:131–136. doi: 10.1111/j.1574-6968.2009.01625.x
- Sun, L., Wang, X., y Li, Y. (2016). Aumento del crecimiento de las plantas y la absorción de cobre de las plantas huésped y no huésped por bacterias endófitas resistentes a los metales y promotoras del crecimiento de las plantas. *Revista internacional de fitorremediación*, 18(5), 494-501.

- Tagliavini, M.; Zavalloni, C.; Rombola, A. D.; Quartieri, M.; Malaguti, D.; Mazzanti, F.; Millard, P.; Marangoni, B. 2000. Mineral nutrient partitioning to fruits of deciduous trees. *Acta Horticulturae* 512: 131-140.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 2010. *Plant physiology*. 5th ed. Sinauer Associates, Sunderland, MA.
- Tapia, V., L., M. 2012. Nutrición orgánica y convencional de aguacate en Michoacán. Curso online INTAGRI.
- Tapia.V.L.M., Marroquín P. F.J., cortés T. I., Anguiano. C.J. y Castellanos R. J. Z. 2007. Nutrición del aguacate. pp. 89-105. In: Téliz, D, y A. Mora (Eds.). *El Aguacate y su Manejo Integrado*. 3^a edición, 1era reimpresión, (2015). Biblioteca Básica de Agricultura, Colegio de Postgraduados. Montecillos, México.
- Tedersoo L, S Sánchez-Ramírez, U Kõljalg, M Bahram, M Döring, D Schigel, T May, M Ryberg y K Abarenkov. 2018.High-level classification of the Fungi and a tool for evolutionary ecological analyses. *Fungal Diversity*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13225-018-0401>
- Tiwari, J., Ma, Y., y Baudh, K. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi: an ecological accelerator of phytoremediation of metal contaminated soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(2), 283-296.
- Tripathi, P. C., y Karunakaran, G. (2019). Standardization of time and method of propagation in avocado. *Journal of Applied Horticulture*, 21(1), 67-69.
- Tsegaye, Z., Assefa, F., y Beyene, D. (2017). Properties and application of plant growth promoting rhizobacteria. *Int J Curr Trends Pharmacobiol Med Sci*, 2(1), 30-43.
- Ullah A, Mushtaq H, Ali H, Munis MFH, Javed MT y Chaudhary HJ (2015b) Diazotrophs-assisted phytoremediation of heavy metals: a novel approach. *Environ Sci Pollut Res* 22:2505–2514
- Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M. L., Touraine, B., Moëgne-Loccoz, Y., Muller, D., y Prigent-Combaret, C. (2013). Rhizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas y funcionamiento del sistema radicular. *Frontiers in plant science*,4, 356.
- Van Der Heijden, M. G., Bardgett, R. D., y Van Straalen, N.M. (2008). La mayoría invisible: los microbios del suelo como impulsores de la diversidad y productividad de las plantas en los ecosistemas terrestres. *Ecology letters*, 11(3), 296-310.
- Vargas, T. V., Hernández, R. M. E., Gutiérrez, L. J., Plácido, D. C. J., y Jiménez, C. A. (2007). Clasificación climática del estado de Tamaulipas, México. *CienciaUAT*, 2(2), 15-19.
- Viera, W., Campaña, D., Gallardo, D., Vásquez, W., Viteri, P., & Sotomayor, A. (2017). Native mycorrhizae for improving seedling growth in avocado nursery (*Persea americana* Mill.).*Indian Journal of Science and Technology*, 10(25), 1-13.

- Viera, W., Campaña, D., Gallardo, D., Vásquez, W., Viteri, P., y Sotomayor, A. (2017). Native mycorrhizae for improving seedling growth in avocado nursery (*Persea americana* Mill.). *Indian Journal of Science and Technology*, 10(25), 1-13.
- Viera, W., Campaña, D., Gallardo, D., Vásquez, W., Viteri, P., y Sotomayor, A. (2017b). Native mycorrhizae for improving seedling growth in avocado nursery (*Persea americana* Mill.). *Indian Journal of Science and Technology*, 10(25): 1-13. doi: 10.17485/ijst/2017/v10i25/110415
- Villarreal., M. F., Villa. R, E. D., Cira. C., L. A., Estrada. A. o, M. I., Parra-Cota, F. I., y Santos.V, S. D. L. (2018). The genus *Bacillus* as a biological control agent and its implications in the agricultural biosecurity. *Revista mexicana de fitopatología*, 36(1), 95-130.
- Vysotskaya LB, Korobova AV, Veselov SY, Dodd IC, Kudoyarova GR (2009) ABA mediation of shoot cytokinin oxidase activity: assessing its impacts on cytokinin status and biomass allocation of nutrient deprived durum wheat. *Funct Plant Biol* 36:66–72
- Wang J, Jiang L y Wu R. 2017. Plant grafting: how genetic exchange promotes vascular reconnection. *New Phytol.* 214 (1):56–65. doi:10.1111/nph.14383.
- Wang, D., Lv, S., Jiang, P., Li, Y., 2017. Roles, regulation, and agricultural application of plant phosphate transporters. *Front Plant Sci* 8, 817.
- Wang, F., Shi, N., Jiang, R., Zhang, F., y Feng, G. (2016). In situ stable isotope probing of phosphate-solubilizing bacteria in the rhizosphere. *Journal of experimental botany*, 67(6), 1689-1701.
- Wang, M., Hu, J., Guo, G., Park, Y. G., y Jeong, B. R. (2021). Effect Of Auxins And Their Concentrations, Immersion Time, And Rooting Substrate On Rooting Of Cutting-Propagated *Pyracantha Angustifolia* Ck Schneid. *Propagation of Ornamental Plants*, 21(1), 3-10.
- Wang, P., Limpens, E., y Yao, R. (2021). Orchestrating plant direct and indirect phosphate uptake pathways. *Trends in Plant Science*.
- Wang, Y. Y., Yin, Q. S., Qu, Y., Li, G. Z., y Hao, L. (2018). Arbuscular mycorrhiza-mediated resistance in tomato against *Cladosporium fulvum*-induced mould disease. *Journal of Phytopathology*, 166(1), 67-74.
- Wheaton, G., Counts, J., Mukherjee, A., Kruh, J., Kelly, R., 2015. The confluence of heavy metal biooxidation and heavy metal resistance: implications for bioleaching by extreme thermoacidophiles. *Minerals* 5, 397–451.
- Yamato, M., Ikeda, S., y Iwase, K. (2008). Community of arbuscular mycorrhizal fungi in a coastal vegetation on Okinawa island and effect of the isolated fungi on growth of sorghum under salt-treated conditions. *Mycorrhiza*, 18(5), 241-249.

- Yoon, A., Oh, H. E., Kim, S. Y., y Park, Y. G. (2021). Plant growth regulators and rooting substrates affect growth and development of *Salix koriyanagi* cuttings. *Rhizosphere*, 20, 100437.
- Yuan, Y., Zu, M., Sun, L., Zuo, J., y Tao, J. (2022). Isolation and Screening of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) deaminase producing PGPR from *Paeonia lactiflora* rhizosphere and enhancement of plant growth. *Scientia Horticulturae*, 297, 110956.
- Zafar, T., y Sidhu, J. S. (2018). Avocado production, processing, and nutrition. *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing*, 509-534.
- Zaki, M.K., Rahmat, A., Pujiasmanto, B., 2020. Organic amendment and fertilizer effect on soil chemical properties and yield of maize (*Zea mays* L.) in rainfed condition. *Walailak J. Sci. Technol. (WJST)* 17 (1), 11_17.
- Zarraonaindia, I., Owens, S. M., Weisenhorn, P., West, K., Hampton-Marcell, J., Lax, S., ... y Gilbert, J. A. (2015). El microbioma del suelo influye en la microbiota asociada a la vid. *MBio*, 6(2), e02527-14.
- Zhou, C., F. Li, Y. Xie, L. Zhu, X. Xiao, Z. Ma, and J. Wang. 2017. Involvement of abscisic acid in microbe-induced salinealkaline resistance in plants. *Plant Signal. Behav.* 12: 1-4. doi:<https://doi.org/10.1080/15592324.2017.1367465>.
- Zhu, X., Cao, Q., Sun, L., Yang, X., Yang, W., y Zhang, H. (2018). Stomatal conductance and morphology of arbuscular mycorrhizal wheat plants response to elevated CO₂ and NaCl stress. *Frontiers in Plant Science*, 1363.

APENDICE

ANEXO 1

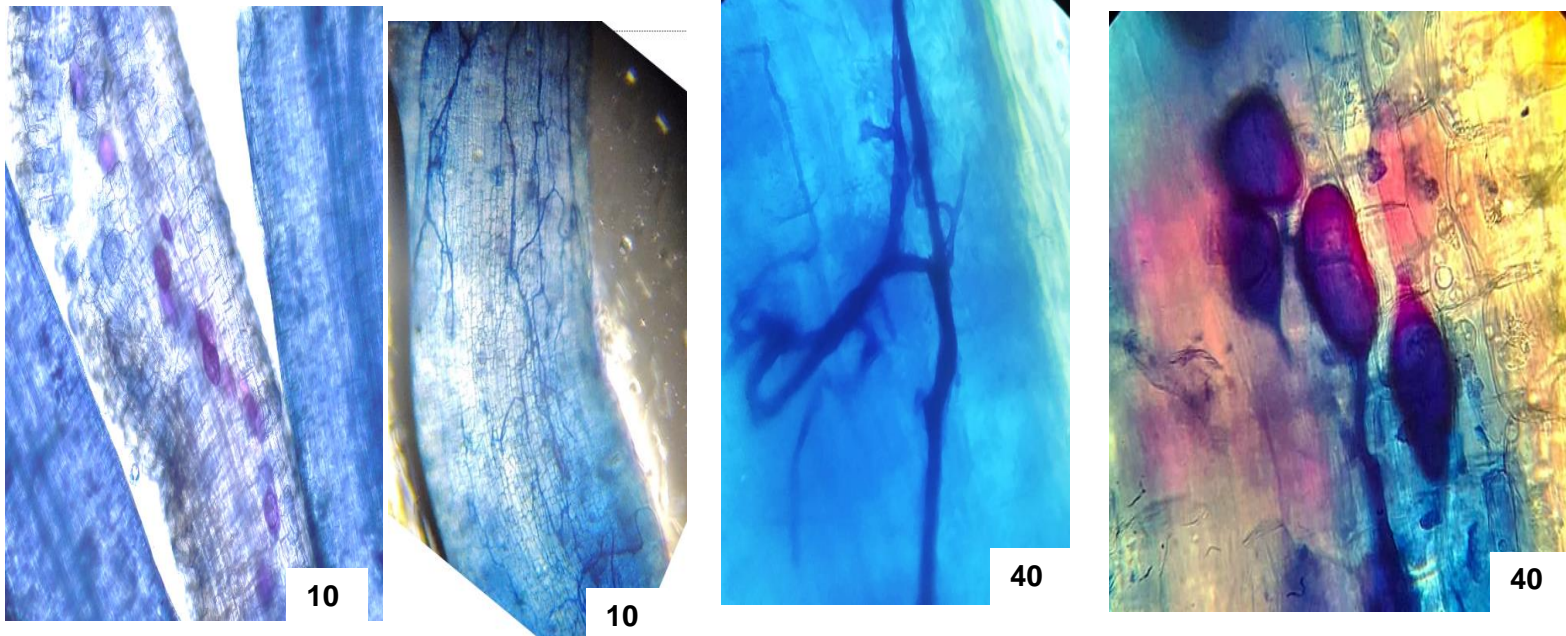


Figura A1. Micrografías de colonización micorrízica presencia de vesículas e Hifas intrarradicales a 10x y 40x en plantas de aguacate raza mexicana.



Figura A2. Imágenes de crecimiento y desarrollo radical en plantas de aguacate inoculadas con HFMA y PGPR, regadas con solución nutritiva con diferente pH (5.8 y 6.2). De izquierda a derecha (HFMA+ PGPR+ pH 6.2, HFMA+ PGPR+ pH 5.8, HFMA+ pH 6.2, HFMA+ pH 5.8, PGPR + pH 6.2, PGPR+ pH 5.8, pH 6.2, Testigo (pH 5.8).



Figura A3. Imágenes de crecimiento y desarrollo radical en plantas de aguacate inoculadas con HFMA, PGPR, RF desde semilla. HFMA+PGPR+RF, HFMA+PGPR, HFMA+RF, HFMA, PGPR+RF, PGPR, RF, Testigo.