

# Microorganismos benéficos con potencial agrícola: Una alternativa sostenible para la producción de café y calidad del suelo

## *Beneficial microorganisms in coffee: An alternative for a sustainable production of coffee and soil improvement*

Narcisa Urgiles-Gómez<sup>1,\*</sup>, Paúl Loján<sup>2</sup>, María Eugenia Ávila-Salem<sup>3</sup>, César Benavidez-Silva<sup>4</sup>, Leslye Hurtado<sup>1</sup>, Fernanda Livisaca<sup>1</sup>, Pedro Guaya<sup>1</sup>, Miguel Villamagua<sup>1</sup>, Laura Poma<sup>5</sup> y Lucía Quichimbo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador

<sup>4</sup> Centro de Investigaciones Territoriales (CIT), Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

<sup>5</sup> Facultad de Educación, el Arte y la Comunicación, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

\* Autor para correspondencia: narcisa.urgiles@unl.edu.ec

Fecha de recepción del manuscrito: 30/03/2022

Fecha de aceptación del manuscrito: 30/05/2023

Fecha de publicación: 30/06/2023

**Resumen**—La caficultura es una actividad importante en Ecuador ya que se practica en todas las regiones del país, bajo diferentes pisos altitudinales, tanto en monocultivos como en sistemas agroforestales. La principal característica del café ecuatoriano es sus exquisitos aroma y sabor, reconocidos a nivel internacional. Al ser una bebida de alto consumo, su comercialización constituye una fuente de ingresos importante para todos los actores que intervienen en los diferentes eslabones de su cadena de producción. El objetivo de la presente revisión bibliográfica fue la recopilación de diferentes experiencias alrededor del mundo relacionadas con la aplicación de microorganismos benéficos en el cultivo del café. Entre los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (MPCV) podemos mencionar a los hongos micorrízicos arbusculares, el género *Trichoderma* spp. y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. La literatura recopilada ha sido obtenida en el marco de un diseño experimental y análisis estadísticos rigurosos que validaron su publicación en artículos científicos o trabajos de tesis. Se analizó la información relevante publicada entre los años 2011 al 2022. Los resultados de las diferentes investigaciones sugieren un efecto positivo importante de la adición de MCPV en el desarrollo de las plantas a nivel de vivero y en cafetales asociados a sistemas agrícolas, agroecológicos y agroforestales. Se puede concluir que el uso de microorganismos en la caficultura constituye una alternativa sustentable para disminuir el uso de fertilizantes convencionales y pesticidas, conservando la fertilidad físico-química y promoviendo la diversidad microbiana del suelo.

**Palabras clave**—Inoculación, Vivero, Cafetales, Hongos micorrízicos arbusculares, Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal.

**Abstract**—The coffee production is an important economic activity in Ecuador. Coffee is grown in all regions of the country, under different altitudinal zones, both in monocultures and agroforestry systems. The main characteristic of Ecuadorian coffee is the exquisite aroma and flavor recognized internationally. Being a highly consumed beverage, its commercialization constitutes an important source of income for all actors involved in the different links of its production chain. The aim of this review was to collect experiences around the world related to the application of beneficial soil microorganisms on coffee cultivation. Among the most extensively studied plant growth-promoting microorganisms (PGPM) we can mention the arbuscular mycorrhizal fungi, *Trichoderma* spp., and plant growth-promoting rhizobacteria. Analyzed literature has been obtained in the frame of an experimental design and rigorous statistical analysis that validated their publication as scientific articles or thesis. Relevant information published between the years 2011 to 2022 was compiled. Briefly, the results of the reviewed articles suggest a significant positive effect of the addition of PGPM on the development of coffee seedlings and under agroforestry crops. It is concluded that the use of microorganisms in coffee cultivation constitutes a sustainable alternative to reduce the use of conventional fertilizers and pesticides to increase coffee production, and at the same time allows climate change mitigation, preserving physical and chemical soil fertility and promoting microbial diversity.

**Keywords**—Inoculation, Nursery, Coffee-plantations, Arbuscular mycorrhizal fungi, Plant growth-promoting rhizobacteria.

## INTRODUCCIÓN

El café es uno de los productos agroindustriales más importantes en el comercio internacional (Pothakos et al.,

2020); su producción primaria juega un papel fundamental en la economía de muchos países generando fuentes de empleo y produciendo importantes ingresos económicos (Figueroa-

Hernández et al., 2019). Durante el año cafetero 2018-2019, según la Asociación Nacional Ecuatoriana de Café (ANECAFÉ), la producción de este cultivo alcanzó los 268 000 millones de sacos de 60 kg, es decir, 352 500 quintales de café en grano en el Ecuador (EFE, 2017). A pesar de ello, se registró para el mismo año 2019 una creciente demanda nacional con una estimación de 2 200 000 sacos de 60 kg, para abastecer el consumo interno (Novillo et al., 2021). Por otro lado, a pesar del impacto del COVID-19 en la economía mundial, las exportaciones de café tuvieron resultados positivos en el primer trimestre del 2020 (Banco Central del Ecuador, 2020; Chiriboga et al., 2022).

Las especies de café económicamente importantes son: *Coffea arabica* y *C. robusta* dentro de las cuales existen múltiples variedades (Poza, 2014). Estas especies, durante los últimos 15 años, se han ubicado entre los primeros nueve cultivos con mayor superficie cosechada, produciéndose en 19 provincias del Ecuador (ESPAC, 2016). Su comercialización, industrialización y exportación son relevantes en la economía, desarrollo social y preservación ambiental, ya que se cultivan en diversas regiones del país, con participación de aproximadamente 105 000 familias, de las cuales el 70 % corresponde a pequeños productores (PRO-ECUADOR, 2016). En este contexto, las provincias de Loja, El Oro y Zamora Chinchipe en el sur del Ecuador presentan condiciones edafoclimáticas de altitud, precipitación, temperatura, humedad relativa y viento apropiados para su cultivo, lo cual las vuelve atractivas para la producción de café de calidad (Duicela-Guambi et al., 2017; COFENAC, 2013).

Dentro del manejo integrado de los cafetales, se debe considerar el manejo adecuado de la microbiología del suelo, ya que los microorganismos son responsables de la dinámica y transformación de los componentes orgánicos e inorgánicos para una correcta nutrición de las plantas (Acevedo y Delgado, 2019). Sin embargo, en las últimas décadas, su rol se ha visto opacado en la agricultura convencional debido a prácticas agrícolas inadecuadas y un uso excesivo de fertilizantes inorgánicos, herbicidas y plaguicidas generando efectos negativos en la microbiología del suelo, en el ambiente y en la salud humana (Correa, 2013). Los microorganismos pueden promover el crecimiento de las plantas a partir de mecanismos directos e indirectos. Entre ellos se destacan: fijación de nitrógeno, mejoramiento de las propiedades físicas del suelo, control de fitopatógenos, aumento del desarrollo radicular, asimilación de nutrientes de la planta, solubilidad de compuestos inorgánicos y transformación de compuestos orgánicos, producción de fitohormonas, etc. (Delgado, 2019). De ahí la importancia de los microorganismos en la ecología del suelo y en la promoción de cultivos de importancia económica y social y en donde muchos esfuerzos están siendo realizados para la selección de organismos con potencial agrícola (Pardo et al., 2021; Ferreira et al., 2019).

Entre los microorganismos capaces de promover el crecimiento de las plantas a través de mecanismos directos e indirectos se encuentran los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), los cuales se asocian simbióticamente con las raíces de la gran mayoría de las plantas terrestres y contribuyen a mejorar su eficiencia en la captación de nutrientes, al mejoramiento de la estructura del suelo y a la productividad de los cultivos (Avila-Salem et al., 2020; Hernández-Acosta et al., 2018). Pero un manejo inadecuado del suelo puede afec-

tar directamente su biodiversidad y frecuencia (Avila-Salem et al., 2020). Otro grupo de hongos bastante utilizados en la producción agrícola lo constituyen diferentes especies dentro del género *Trichoderma* debido a su rol como estimuladores del crecimiento vegetal y como agentes de biocontrol de fitopatógenos fúngicos radiculares como *Phytophthora* (Muthukumar et al., 2011) y *Fusarium* (Chen et al., 2019).

Además de los hongos, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV o PGPR por sus siglas en inglés) también cumplen un rol fundamental en el desarrollo de las plantas. Algunos de los géneros más conocidos son: *Alcaligenes*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Azotobacter*, *Enterobacter*, *Gluconacetobacter*, *Burkholderia*, *Arthrobacter*, *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Serratia*, entre otros (Saharan y Nehra, 2011). Sin embargo, su éxito en la aplicación agrícola dependerá de la cepa de PGPR utilizada, mas no del género ya que se ha reportado especificidad en la asociación microorganismo-planta (Drogue et al., 2012). El uso de PGPR como biofertilizantes se ha incrementado mucho en los últimos años con un enfoque para la agricultura sostenible y saludable (Mhatre et al., 2019; Delgado, 2019).

La presente revisión pretende recopilar los resultados relevantes obtenidos en la última década en el marco de la aplicación de HMA, *Trichoderma* y PGPR en la producción del café, y su posible uso en la producción agroecológica de este cultivo como una alternativa al uso indiscriminado de fertilizantes y pesticidas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La presente revisión bibliográfica recopiló las experiencias de diferentes investigaciones a nivel de laboratorio, invernadero y campo que se han realizado en torno a esta temática como una base de consulta para su posible implementación en la cadena productiva del café, así como la conservación del suelo y biodiversidad microbiana. Las bases de datos de consulta fueron revistas de Web of Science (WOS), SCOPUS, Google académico y Scielo de los años 2011 al 2022. Las palabras utilizadas como criterio de búsqueda fueron: microorganismos benéficos (beneficial microorganisms) y (AND) Suelo (Soil) como palabras clave integradoras, en conjunto (mediante OR) con las palabras clave aplicación, café, micorrizas, hongos micorrízicos arbusculares y bacterias. Debido a la escasa información sobre el tema en revistas indexadas se decidió expandir la búsqueda para incluir tesis de pregrado y postgrado. La información en diferentes secciones estuvo enfocada en aquellos microorganismos reportados con mayor frecuencia en este tipo de estudios: (1) hongos micorrízicos arbusculares (HMA), (2) *Trichoderma* spp. y (3) bacterias promotoras del crecimiento vegetal - BPCV o PGPR, principalmente bacterias fijadoras de nitrógeno, como *Bacillus* spp., mismos que se encuentran asociados al cultivo de café (Tabla 2).

## RESULTADOS

Una vez realizada la búsqueda en las bases de datos WOS y Scopus, se encontraron artículos científicos relacionados con los términos de búsqueda, aunque tres de ellos no estuvieron relacionados con la aplicación de microorganismos,

**Tabla 1:** Descripción de investigaciones publicadas durante el periodo 2011 - 2022 sobre uso y/o aplicación de microorganismos benéficos en la producción del café en sistemas agrícolas y forestales en Sudamérica.

Autor	Año	Condiciones del experimento/Ubicación	Objetivo	Tipo de publicación
Adriano-Anaya et al.	2011	Vivero/ Chiapas, México	Evaluar el efecto <i>Azospirillum</i> sp. (cepa 11B) y <i>Azotobacter</i> sp. (cepa PACHAZ 08), sólo y en combinación, sobre el crecimiento y desarrollo de plántulas de café en etapa de vivero.	Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Latindex
Carhuavilca	2011	Campo/Provincia La Convención, Departamento de Cusco, Perú	Producción de plantas de café con inóculos de <i>Trichoderma</i> spp.	Tesis de Grado Universidad Nacional de San Antonio Abad Del Cusco.
Trejo et al.	2011	Invernadero y campo/Estado de Veracruz, México/	Producción de plantas de café con inóculos de HMA.	Revista chilena de historia natural Latindex
Andrade-Montalvo	2012	Campo/Cantón Píllaro, Tungurahua, Ecuador	Determinar la eficacia de <i>Trichoderma harzianum</i> y <i>T. viride</i> para el control de marchitez en mora de castilla ( <i>Rubus glaucus</i> Benth).	Tesis de pregrado Escuela Politécnica de Chimborazo
Cuéllar-Gaviria	2014	Vivero/Finca productora La Sierra, ubicada en el Suroeste de Antioquia - Colombia.	Crecimiento de plantas de café utilizando el bioformulado con base en <i>B. subtilis</i> EA-CB0575.	Tesis de maestría. Universidad EAFIT
Santana-Aragone	2014	Campo/Babahoyo, provincia de Los Ríos, Ecuador	Comportamiento agronómico del cultivo de café a las aplicaciones de varios microorganismos.	Tesis de pregrado. Universidad de Babahoyo
Zhirvi-Ordoñez	2016	Vivero/Parroquia Molleturo, provincia del Azuay, Ecuador	Producción de plantas de café con inóculos de <i>Trichoderma</i> spp	Tesis de maestría. Universidad de Cuenca
Cisneros et al.	2017	Laboratorio y Vivero/El Palmar, Municipio de Dagua, departamento del Valle del Cauca, Colombia	Producción de plantas de café con inóculos de <i>Bacillus</i> spp	Biocología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. Latindex
Hernández-Acosta et al.	2018	Vivero/Estado de Veracruz, México	Producir plántulas de café con inóculos de HMA.	Agro Productividad. Latindex
Del Águila et al.	2018	Vivero/ Provincia de San Martín, Distrito de Tarapoto, Perú	Evaluar el efecto de los HMA en la producción de plantas de café vigorosas con características morfológicas ideales para su trasplante	Información tecnológica Latindex
Vallejos-Torres et al.	2019	Vivero y Campo/Distrito de Huambo, provincia Rodríguez de Mendoza, Perú	Producción de plantas de café con inóculos de HMA	Información tecnológica. Latindex
Gómez-Acevedo y Pulido Delgado	2019	Germinador y Vivero/Junín, Táchira, Venezuela	Determinar el efecto de la adición de HMA y <i>Trichoderma</i> sobre el desarrollo de plántulas de café.	Universidad & Ciencia Latindex

**Tabla 1:** Descripción de investigaciones publicadas durante el periodo 2011 - 2022 sobre uso y/o aplicación de microorganismos benéficos en la producción del café en sistemas agrícolas y forestales en Sudamérica.

<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>Condiciones del experimento/Ubicación</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Tipo de publicación</b>
Cabrera-Rodríguez et al.	2020	Laboratorio/Veracruz, México.	Determinar el microbioma del suelo en cafetales manejados bajo sistemas de producción orgánicos o convencionales mediante secuenciación masiva de rRNA 16S.	Emirates Journal of Food and Agriculture. ISI Web of knowledge
Ávila-Bayona et al.	2020	Campo/Sasaima, Cundinamarca, Colombia	Determinar el impacto de las micorrizas en los indicadores de calidad del suelo, particularmente en los parámetros microbianos y enzimáticos a lo largo del tiempo durante el primer año de aplicación.	Ingeniería Solidaria. Latindex
Urgiles et al.	2020	Invernadero/Provincia de Loja, Ecuador	Caracterización morfológica de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) asociados al café en sistemas agroforestales de la provincia de Loja, Ecuador.	Bosques Latitud Cero. Latindex
Ramos-Cabrera et al.	2021	Laboratorio y almacigo/Hacienda Los Naranjos, municipio de Cajibío, Cauca, Colombia.	Bacterias endofíticas solubilizadoras de fósforo de café Var. Bourbon y su evaluación en la promoción de crecimiento en el cultivo de café Var. Castilla.	Biología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. Ltindex
Chambe-Mamani et al.	2021	Laboratorio y Campo/Provincia Sandía, de la Región Puno, Perú	Producción de plantas de café con inóculos de <i>Trichoderma</i> spp	Polo del conocimiento. Latindex

sino a estudios de la diversidad microbiana asociada al café, por lo que no fueron incluidos en la presente revisión. Luego de realizada la revisión en Google académico y Scielo se encontraron nueve artículos científicos relacionados con los criterios de búsqueda, a los cuales se adiciona la información de tres Tesis de pregrado y dos Tesis de Maestría. La mayor parte de trabajos se encontró en la plataforma Scielo con 11 artículos publicados en diferentes revistas Latindex - "Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal" (Tabla 1). En algunos casos debido a su importancia también se incluyeron trabajos publicados antes del 2011 pero que no constan en la tabla 1 (particularmente los siguientes: Sánchez et al., 2000, Osorio et al., 2002, Cupull-Santana et al., 2003 y Guilcapi-Pacheco et al., 2009).

### Aplicación de HMA en plantas de café

De acuerdo a Trejo et al. (2011), la inoculación con HMA aislados de fincas cafetaleras favoreció significativamente el crecimiento de plantas de café en comparación con cepas de HMA de diferente origen, por ello el uso de inoculantes basados en consorcios integrados por más de una especie de HMA tiene especial importancia para asegurar mayores efectos benéficos en sus hospederos. En un estudio realizado por Vallejos-Torres et al. (2019) se evaluaron las respuestas en campo de clones de café var. Caturra con la inoculación de consorcios de HMA y la aplicación de diferentes dosis de compost. Para esto, plántulas clonadas de café se colocaron en viveros, y 3 meses después fueron llevadas a campo. Los consorcios y/o inóculos de HMA se recolectaron a partir de muestras de suelo rizosférico de las plantas de café de cultivos, estos fueron multiplicados en camas con sustrato estéril, utilizando plantas trampa de maíz (*Zea mays*) por un periodo de 60 días, para luego extraer las esporas. Se utilizaron cuatro consorcios o inóculos de HMA, identificados en la rizósfera y recolectados de plantas de café robusta, tolerantes a la roya amarilla. En el primer consorcio se identificaron cinco especies de HMA (*Acaulospora* sp, *A. foveata*, *A. mellea*, *Glomus* sp1 y *G. geosporum*), en el segundo también se identificaron cinco especies (*Acaulospora scrobiculata*, *A. rhemii*, *A. sp*, *Glomus* sp y *G. aggregatum*), en el tercero se identificaron ocho especies (*Acaulospora rugosa*, *A. foveata*, *A. mellea*, *Glomus* sp1., *Glomus* sp2., *G. geosporum*, *G. sinuosum* y *Ambispora appendicula*) y en el cuarto consorcio se identificaron seis especies (*Acaulospora* sp., *A. tuberculata*, *A. rhemii*, *A. foveata*, *Glomus* sp2. y *G. geosporum*). Posteriormente, se realizó la inoculación de esporas de HMA en los clones de café al mismo tiempo que la transferencia de estacas enraizadas a bolsas con sustrato estéril para su aclimatación. Se inocularon 3000 esporas del consorcio de HMA a cada clon, en contacto directo con las raíces de las plántulas clonales de café. Seguidamente, se instalaron en campo plántulas de café micorrizadas y aclimatadas. Los resultados mostraron que la introducción de HMA en cultivos de café es de gran importancia en el desarrollo de las plántulas, ya que el manejo adecuado de estos microorganismos como biofertilizantes favorece la producción del cultivo de café a menor costo y con plantas más vigorosas, sanas y vitales para su trasplante en campo.

En un estudio similar realizado en Veracruz (México)

por Hernández-Acosta et al. (2018), se reportó el uso de dos inóculos de HMA en condiciones de vivero. El primero, un consorcio de Zac-19 (identificado como *Rhizophagus diaphanus*), *G. claroides* y *G. diaphanum*, un segundo consorcio conformado por *Rhizophagus aggregatus*, cuya fuente de inóculo fueron raíces de *Phaseolus vulgaris* L. Se aplicaron 10 g de inóculo por unidad experimental, a 4 cm de profundidad. Para la siembra utilizaron una mezcla de suelo y materia orgánica con un bajo contenido de fósforo (P), y pH de 6,5. El suelo fue regado un día antes, y la semilla junto con el inóculo fueron cubiertos con suelo y una capa delgada de tezontle (roca roja de origen volcánico) previamente esterilizado. Se evaluaron las variables: volumen radical con el método volumen desplazado, peso seco con una balanza granataria, porcentaje de colonización micorrízica en las raíces y el número de esporas por gramo de suelo seco. Los resultados mostraron que el inóculo Zac-19 promovió de forma más eficiente el desarrollo de las plantas respecto al testigo, generando un aumento en altura (198 % mayor al testigo), área foliar (676 %), volumen de la raíz (910 %) y peso seco (1063 %). Por otra parte, el estudio de Trejo et al. (2011) evaluó el efecto de siete consorcios de HMA aislados de fincas cafetaleras con diferente nivel de tecnología (bajo, medio y alto) para el crecimiento de plantas de café variedad Garnica, en condiciones de invernadero y campo. El inóculo micorrízico provino de muestras de campo con diferente grado de tecnificación propagado en cultivos trampa. Posteriormente, se extrajeron las esporas de HMA del suelo y se caracterizaron morfológicamente con base a las descripciones del INVAM (2004). Para la inoculación de las plántulas, se preparó una mezcla de suelo con arena desinfectada, posteriormente, las semillas se desinfectaron y luego pregerminaron durante una semana. Una vez que apareció la radícula, se estableció un almácigo con arena estéril, hasta que se obtuvieron plántulas con presencia de hojas y cotiledones. Se inocularon las plántulas individualmente con 10 g de una mezcla de fragmentos de raíces con 58 % de colonización y con suelo de cada consorcio micorrízico, obtenidos de los cultivos trampa. Se evaluó su efectividad con base en la altura de las plantas, comparando plantas fertilizadas vs. el testigo, cada 30 días a partir de los 90 días después de la inoculación. A los 130 días, fueron llevadas a campo con el fin de evaluar el efecto de los consorcios en la supervivencia de las plantas, las cuales fueron trasplantadas y distribuidas completamente al azar. La evaluación en campo se realizó hasta los 290 días después de la inoculación. Los resultados mostraron que, a mayor nivel de tecnificación de la producción de café, menor número de especies de HMA. En invernadero los consorcios de HMA incrementaron la altura de las plantas en un 91 % con relación al testigo. En campo, las plantas inoculadas mostraron mayores niveles de sobrevivencia que los testigos.

Otro estudio reportado por Urgiles et al. (2020) se enfocó en el aislamiento y caracterización morfológica de HMA procedentes de sistemas agroforestales asociados al cultivo de café de las zonas de Malacatos, Chaguarpamba y Lozumbé, de la provincia de Loja (Ecuador). Primeramente, se recolectaron muestras de suelo y raicillas de alrededor de las plantas de café, las que se multiplicaron en cultivos trampa utilizando plántulas de *Plantago lanceolata* L. como planta hospedera, a las cuales se las mantuvo dentro de Sunbags (Sigma-Aldrich) para evitar contaminación. La observación

de estructuras de HMA en las raíces de la planta hospedera fue realizada mediante el protocolo descrito en Urgiles et al. (2009). Los resultados de la caracterización morfológica de las esporas de HMA mostraron la presencia de los géneros *Acaulospora* (2 morfotipos) y *Glomus* (9 morfotipos) en las plantas trampa. Con ello, se estableció un consorcio de HMA (biofertilizante), utilizando propágulos de esporas, hifas y masas de micelio, suelo y raicillas de *Plantago lanceolata* L. provenientes de los sistemas agroforestales asociados al café. De la misma manera, Osorio et al. (2002) observó que el crecimiento de las plantas de café mejora con la aplicación de enmiendas orgánicas, y se incrementó aún más con la inoculación de 3 fuentes de inóculo micorrízico: (1) *Entrophospora colombiana*, (2) inóculo exótico a base de *Glomus manihotis*, *G. fasciculatum* y *E. colombiana*, y (3) un inóculo nativo a base de un mix de esporas con predominancia de esporas del género *Glomus* spp. pero se reduce drásticamente en suelos no modificados.

También Sánchez et al. (2000) reportan que las plántulas de café de las variedades Caturra Rojo y Catuaí Amarillo inoculadas con 14 cepas de HMA (*Glomus fasciculatum*, *G. manihotis*, *G. spurgum*, *G. agregatum*, *G. mosseae1*, *G. mosseae2*, *G. mosseae3*, *G. mosseae4*, *G. etunicatum1*, *G. etunicatum2*, *G. intraradices*, *G. occultum*, *G. caledonium* y *Acaulospora scrobiculata*) en tres tipos de suelos, presentaron resultados heterogéneos dependiendo de la cepa de HMA, de la variedad de café y del tipo de suelo. Sin embargo, algunas cepas como *G. fasciculatum*, *G. mosseae* y *G. intraradices* mostraron los mejores resultados en la mayor parte de escenarios. Del Águila et al. (2018) en su estudio reportan que al evaluar el efecto de la inoculación de ocho consorcios de HMA de diferentes procedencias en plantas de café var. Caturra, se obtuvo un incremento promedio de la altura de las plantas de 10,65 % de los tratamientos inoculados respecto al tratamiento testigo e incrementos de 77,45 hasta 239,31 % en el área foliar de plantas inoculadas respecto al testigo.

### **Aplicación de *Trichoderma* en la producción de plantas de café**

*Trichoderma* es un género de hongos del suelo distribuido en todo el planeta y que abarca algunas especies utilizadas frecuentemente como agentes de biocontrol, entre las más utilizadas en la agricultura se pueden mencionar: *T. atroviride*, *T. harzianum*, *T. asperellum*, *T. virens*, *T. longibrachiatum* y *T. viride*. Se encuentran de manera natural en diferentes zonas y hábitats, especialmente donde existe materia orgánica o desechos vegetales en descomposición y son utilizadas frecuentemente como biocontrolador de microorganismos fitopatógenos del suelo como *Pythium* y *Fusarium* y para el control de nemátodos (Guzmán-Guzmán et al., 2023). *Trichoderma* se clasifica como un hongo promotor del crecimiento vegetal, debido a que producen la enzima 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) desaminasa y algunas fitohormonas (Tyskiewicz et al., 2022).

Debido a su capacidad de adaptación a diversas condiciones ambientales y sustratos presenta un elevado potencial de uso en diferentes condiciones y procesos tecnológicos para su multiplicación (Sivila y Alvarez, 2013). Sus principales usos son: (1) estimulador del crecimiento vegetal, (2) protec-

ción de semillas contra el ataque de patógenos y (3) como alternativa a los fertilizantes químicos y plaguicidas (Castro y Rivillas, 2012). En un estudio de Zhirvi-Ordoñez (2016) en la parroquia Molleturo al noroeste del cantón Cuenca (Ecuador) se evaluaron dos cepas nativas de *Trichoderma* (*T. harzianum* -Rifai y *T. koningii*) a una concentración inicial de 1x10<sup>6</sup> UFC/ml (unidades formadoras de colonias/mililitro) y posteriormente diluidas en 3 concentraciones: 15, 20 y 25 cm<sup>3</sup>/L y una cepa comercial de *T. harzianum* a una concentración de 1,5, 2 y 2,5 g/L en el control de *Rhizoctonia* sp. en semilleros de café. Se estableció un diseño experimental que consistió en 11 tratamientos, de los cuales 9 consistían en aplicaciones de las dos *Trichoderma* nativas y una comercial a tres diluciones, 1 tratamiento con un fungicida (Captan) y un testigo absoluto a base de agua estéril. La metodología aplicada constó de una fase de laboratorio y otra de campo. Los resultados obtenidos mostraron que todos los tratamientos con *Trichoderma* mostraron un porcentaje de emergencia mayor que los 2 tratamientos testigos, pero la especie *T. harzianum* aplicada en dosis de 20 cc/litro mostró la mayor emergencia de plántulas con un porcentaje de 95 % comparado con el 79 y 76 % de los testigos tratados con captan y agua destilada, respectivamente. El menor porcentaje de incidencia de *Rhizoctonia* fue en el tratamiento *T. harzianum* aplicado en dosis de 20 cc/L con un valor de 4,25 %, comparado con el 20 y 29 % de los testigos tratados con captan y agua destilada, respectivamente. Así mismo, Carhuavilca (2011) en la provincia La Convención, del Departamento de Cusco (Perú), evaluaron *T. harzianum* y *T. viride* Pers y una combinación de las dos cepas en el control del ojo de pollo (*Mycena citricolor* Berk. Curtis) del café var. Catimor, con una edad de 7 años de producción y con un distanciamiento de plantación de 2 por 1 metro y una densidad de 5 000 plantas/ha y sombra con especies vegetales como guabos (*Inga feuillei*), aguacate (*Persea americana*) y albizia (*Albizia julibrissin*). Se aplicó un diseño experimental con 5 tratamientos y 3 repeticiones. Los tratamientos fueron: Testigo absoluto, Testigo con Caldo Bordelés, *T. harzianum*, *T. viride* y una mezcla de *T. harzianum* y *T. viride*, que se aplicaron a una concentración de 108 conidias/gramo por planta. Se realizaron 5 aplicaciones con bomba de mochila distribuidas en un lapso de 40 días. Los parámetros que se evaluaron en el experimento fueron la incidencia y severidad de la enfermedad durante 4 meses de observación. Los resultados mostraron que el tratamiento en el que se observó un menor incremento de la incidencia de ojo de pollo (inóculo inicial versus inóculo final) fue el de *T. viride* con 5,88 % y con respecto al testigo con Caldo Bordelés el incremento fue de 37,5 %. Por otro lado, la severidad del ojo de pollo en el tratamiento testigo con Caldo Bordelés se redujo en un 57,22 % mientras que en la combinación de cepas de *Trichoderma* la reducción fue del 35,62 %. Por otra parte, Chambe-Mamani et al. (2021) realizaron un estudio con el objetivo de evaluar la efectividad del control biológico y químico de la roya (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br) en plantas de café de 5 años de edad de la var. Caturra, con el uso de especies nativas de *Trichoderma* spp. Se aplicaron seis tratamientos: *Trichoderma* sp1, *Trichoderma* sp2, *T. viride*, *T. harzianum*, hidróxido de cobre y un testigo. En la fase de campo se realizaron 5 aplicaciones foliares cada 10 días en plantas de café con las cepas de *Trichoderma* spp. con una concentración de esporas

de  $1 \times 10^7$  UFC/mL. Las variables que se midieron fueron la incidencia y severidad de la roya amarilla en las plantas de café durante la quinta aplicación (50 días). Los resultados obtenidos mostraron que el tratamiento con *T. viride* obtuvo los mejores resultados con incidencia del 39,33% y severidad del 14,50%, respectivamente en comparación con el tratamiento testigo 90,67% y 77,67% de incidencia y severidad, respectivamente. Los resultados mostraron que la incidencia de la roya amarilla fue menor en los tratamientos con hidróxido de cobre, *T. viride* y *T. harzianum* con 32%, 39,33 y 55,33% respectivamente (Tabla 2).

**Tabla 2:** Promedios de 10 repeticiones por tratamiento de la incidencia y severidad de *Hemileia vastatrix* a la quinta aplicación de los tratamientos. Letras diferentes dentro de la misma columna indican diferencias significativas entre los tratamientos con el test de Duncan al 95% de probabilidad.

Tratamientos	Incidencia (%)	Severidad (%)
T1 - <i>Trichoderma viride</i>	39,33 a	14,50 a
T2 - <i>Trichoderma harzianum</i>	55,33 b	23,67 b
T3 - <i>Trichoderma</i> sp. (nativa 1)	57,33 b	23,00 b
T4 - <i>Trichoderma</i> sp. (nativa 2)	75,33 c	39,33 c
T5 - Hidróxido de cobre	32,00 a	11,83 a
T6 - Testigo	90,67 d	77,67 d

Fuente: Chambe-Mamani et al. (2021).

La sustitución de productos químicos por *T. harzianum* garantizan la germinación de las semillas de café con menos impactos en el ambiente, mientras que la doble inoculación de micorrizas en el germinador y vivero garantiza la obtención de posturas de óptima calidad, comprobándose que la co-inoculación de ambos biofertilizantes constituye una alternativa de protección fitosanitaria durante los estadios de germinador y vivero, económicamente factible para la producción de plántulas de café (Acevedo y Delgado, 2019). En Ecuador Guilcapi-Pacheco (2009) evaluó dos dosis de aplicación, 10 y 20 g/L (no indica número de ufc/gr), en semilleros de café variedad Caturra utilizando productos a base de *T. harzianum* y *T. viride* y encontró que la emergencia de las semillas a los 45 días fue mayor en los tratamientos con *T. harzianum* y *T. viride* con las dosis más altas de aplicación, dando valores de 97,9% y 93,7% respectivamente comparado con el 83,8% de germinación del testigo. Así mismo, la incidencia de damping-off en el testigo sin aplicación de *Trichoderma* fue de 50,82%, mientras que en los tratamientos con dosis baja del inoculante (*T. harzianum* y *T. viride*) fue mucho menor, concretamente 10,23% y 12,07%, respectivamente. Resultados similares se encontraron para todas las variables de desarrollo (altura, diámetro del tallo y vigor de la planta) de las plantas a los 90 días después del repique a fundas.

En un estudio desarrollado en Cuba por Cupull-Santana et al. (2003) se evaluó el efecto de la aplicación de *Trichoderma viride* en forma de semilla peletizada ( $3 \times 10^9$  UFC/ml) o como suspensión conidial ( $5 \times 10^8$  UFC/ml) en el desarrollo de plántulas de café en etapa de vivero y el control de *Rhizoctonia solani* Kuhn. Los resultados de emergencia de las plantas a los 60 días mostraron diferencias significativas entre los tratamientos con *T. viride* peletizada y suspensión obteniendo 68,3% y 65,8% de emergencia, respectivamente, mientras que en el tratamiento testigo se obtuvo un 30%. Respecto al porcentaje de incidencia de *Rhizoctonia* en las plántulas de

café a los 100 días se encontró que en los tratamientos con *T. viride* peletizada y suspensión la incidencia fue del 7 y 5,5% respectivamente, mientras que en el tratamiento testigo fue del 53,6%. También se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos con *Trichoderma* y el testigo en las diferentes variables de desarrollo de las plántulas: altura, diámetro, número de pares de hojas y masa seca foliar.

Según Bartra-Lescano (2017), la incidencia y severidad de la roya del cafeto es menor cuando se aplica *T. harzianum*. El control químico de la roya es eficaz, sin embargo, contamina el ambiente, es costoso y tiene un alto riesgo en el desarrollo de resistencia (Canjura-Saravia, 2000). Por tanto, los microorganismos benéficos como *Trichoderma* spp. constituyen una alternativa sana y limpia para combatir plagas y enfermedades en las plantas (Andrade-Montalvo, 2012).

### Utilización de PGPR en la producción de plantas de café

Las PGPR por su siglas en inglés (plant-growth promoting rhizobacteria) son un grupo polifilético de bacterias del suelo que promueven el crecimiento de las plantas a través de mecanismos directos como por ejemplo: producción de fitohormonas como el ácido indolacético (IAA), solubilización de fosfatos, producción de sideróforos, fijación biológica de nitrógeno, producción de ACC (ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico) o mecanismos indirectos como: producción de ACC deaminasa y sideróforos, inducción de resistencia sistémica, antagonismo de hongos y bacterias patógenas a través de varios mecanismos (producción de antibióticos, enzimas degradadoras de la pared celular, quorum quenching) (Olanrewaju et al., 2017; Mohanty et al., 2021). En este sentido las PGPR constituyen una alternativa biotecnológica para promover el crecimiento del cultivo de café (Kejela et al., 2016).

En una investigación de Adriano-Anaya et al. (2011) se evaluó el efecto de *Glomus intrarradices*, *Azospirillum* sp. (cepa 11B) y *Azotobacter* sp. (cepa PACHAZ 08), solos y en combinación, sobre el crecimiento y desarrollo de plántulas de café var. Bourbon en etapa de vivero. Las plántulas seleccionadas fueron inoculadas con 1 mL del cultivo bacteriano que contenía  $1 \times 10^8$  UFC/mL y 1 cm<sup>2</sup> de medio gelificado con raíces que contenían esporas y micelio de HMA. Se evaluaron 8 tratamientos resultantes de la aplicación de los microorganismos solos o en combinación con 100 repeticiones por tratamiento. Los resultados mostraron que los tres biofertilizantes tuvieron un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo en las plántulas de café en vivero, además de promover la síntesis de clorofila y un incremento del 58,5% del nitrógeno total del área foliar en relación con los tratamientos no inoculados. La cepa 11B de *Azospirillum* tuvo un efecto positivo en ocho de los nueve parámetros evaluados.

En un estudio realizado por Cisneros et al. (2017) en Colombia, se evaluaron microorganismos solubilizadores de fosfato aislados de estudios previos de la rizósfera de plantas de café var. Caturra, luego seleccionaron los microorganismos *Kocuria* sp., *Bacillus subtilis*, *Sagenomella diversispora* y *Penicillium ochrochloron*. Se sembraron un total de 1000 semillas y se mantuvieron bajo condiciones ambientales por 80 días, para luego inocular el sistema radicular de las plántulas, en el caso de los hongos con  $1 \times 10^6$  UFC/mL y en el caso de las bacterias con  $1 \times 10^8$  UFC/mL. Se realizó un diseño

completamente al azar con 23 tratamientos: los tratamientos del 1 al 11 contenían un sustrato de suelo + pulpa de café descompuesta, del 12 al 22 contenían suelo + pulpa de café descompuesta + RF (roca fosfórica; 40 ppm) y el tratamiento 23 contenía suelo + DAP (2 g/planta). Los resultados mostraron diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto a concentración de P, y se encontró que los valores más altos se consiguieron en los tratamientos sin RF. En cambio, el menor contenido de P se dio en suelo en los tratamientos con RF, por lo que se puede concluir que el uso de microorganismos solubilizadores de fósforo mejoran la disponibilidad de P en el suelo.

El estudio de Cuéllar-Gaviria (2014) fue realizado en la finca productora La Sierra al suroeste de Antioquia, Colombia. Se usó la cepa *B. subtilis* EA-CB0575, con el fin de promover el crecimiento en plantas de café var. Castilla a nivel de almácigo. Se evaluó la cepa bacteriana en forma de bioformulado a base de pesta (harina, semolina, caolín industrial y goma Xanthan) a dos concentraciones:  $1 \times 10^8$  UFC/ml y  $1 \times 10^7$  UFC/ml disuelta en agua. Se incluyeron además dos controles: formulación a base de pesta (P) sin la bacteria y control absoluto a base de agua (C). El experimento se realizó en etapa de germinador y en etapa de almácigo. En etapa de germinador se realizó un diseño de bloques completos al azar en donde 100 semillas fueron seleccionadas por tratamiento y sumergidas en el tratamiento correspondiente para luego ser colocadas en camas de arena para su germinación. Los tratamientos fueron distribuidos aleatoriamente. Luego de 8 semanas, 20 chapolas fueron seleccionadas al azar para evaluar: longitud aérea, longitud radicular y diámetro del tallo. Los resultados mostraron que el tratamiento con concentración de  $1 \times 10^7$  UFC/ml causó un aumento significativo del diámetro de la planta en un 8,3% comparado con el control (C). No hubo diferencias significativas en las demás variables evaluadas. En etapa de almácigo no se observaron diferencias significativas respecto al control.

Ramos-Cabrera *et al.* (2021) realizaron un estudio en el municipio de Cajibío (Cauca-Colombia), con la finalidad de buscar bacterias endofíticas solubilizadoras de fósforo (PBS) provenientes de las raíces de plantas de café var. Bourbon y su efecto en la promoción de crecimiento en el cultivo de café var. Castilla. Las bacterias fueron aisladas del sistema radicular de plantas del café e identificadas molecularmente. Finalmente, realizaron una evaluación del efecto de estas en la promoción de crecimiento del café en etapas de almácigo. Cuando las plantas emitieron el primer par de hojas se inocularon con las cepas End-F-5 y End-F-34 en una concentración de  $1 \times 10^8$  UFC/mL, los tratamientos fueron: testigo absoluto, inoculado con End-F-5, inoculado End-F-34 e inoculado con End-F-34 + End-F-5. Se evaluó el crecimiento de las plantas por medio de la evaluación de las variables: número de hojas, longitud de tallo, peso seco de raíz, parte aérea de planta y contenido de fósforo en tejido. En cuanto al diseño estadístico se estableció un diseño completamente al azar con tres réplicas. Las cepas End-F-34 y End-F-5 presentaron mejor capacidad para solubilizar fósforo en los ensayos *in vitro*, por lo que se utilizaron en el ensayo de inoculación en café en etapa de semillero. Los resultados en invernadero también demostraron que los tratamientos con las cepas End-F-5 y End-F-5+End-F-34 tuvieron los mejores resultados respecto al número de hojas, ya que este parámetro aumentó en un 4,8

y 3,7% respectivamente en relación al control.

El objetivo del uso de PGPR como biofertilizantes se ha incrementado en las últimas décadas. En una investigación en la que se obtuvieron 42 cepas de *Bacillus* provenientes de cultivos de café de Etiopía se encontró que la cepa BT42 identificada como *Bacillus amyloliquefaciens* demostró las mejores características como antagonista de *Colletotrichum gloeosporioides* y *Fusarium oxysporum*. Además, se encontró que BT42 poseía excelentes características en la producción de: ácido indolacético (AIA), amonio y sideróforos, incrementando el crecimiento de las plantas y demostrando su potencial como biofertilizante (Kejela *et al.*, 2016). Otro de los géneros ampliamente distribuidos en el suelo y que ha demostrado un efecto positivo en el crecimiento de las plantas es *Pseudomonas*, cuya principal característica es su potente efecto inhibitorio de patógenos del suelo. Este efecto se puede explicar por la producción de compuestos bacterianos, como sideróforos, ácido cianhídrico y antibióticos.

## CONCLUSIONES

Los estudios de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y su inoculación en plántulas de café han demostrado que mejoran su crecimiento y desarrollo, debido a la relación simbiótica que establecen con las raíces de las plántulas, permitiendo obtener un mayor número de plantas sanas y vigorosas, e influyendo positivamente en la productividad de cultivos agroforestales y del café. Se ha evidenciado que la aplicación de abonos orgánicos junto a biofertilizantes con base en consorcios de HMA, mejora la nutrición y el desarrollo de las plantas de café, representando una alternativa sostenible para la agricultura y silvicultura y la conservación del suelo. Por otra parte, la aplicación de hongos del género *Trichoderma* constituyen una alternativa que permite el control biológico de hongos patógenos en sistemas de producción agroecológica o agroforestal de café, promoviendo un alto porcentaje de germinación, crecimiento y desarrollo de plántulas, tanto en vivero como en plantaciones.

Es imprescindible el aprovechamiento de las comunidades microbianas presentes en el suelo en cuanto a su diversidad y funcionalidad, sumado a otros procesos esenciales para una eficiente multiplicación, correcta formulación y aplicación de los inoculantes en cultivos de café. En este sentido, la utilización de microorganismos rizosféricos benéficos constituye una opción sostenible, debido a su potencial para incrementar la captación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, pero también para promover el crecimiento de las plantas debido a su capacidad de producir fitohormonas y actuar como antagonistas de enfermedades radiculares. Cabe destacar que estos hongos y bacterias, en combinación con programas de fertilización apropiados, podrían mejorar el manejo adecuado de los recursos naturales. En este sentido, los resultados de varias investigaciones indican que la aplicación de estos microorganismos, sea como bioformulaciones basadas en una cepa o en consorcios microbianos, tiene un gran potencial para mejorar la productividad del café, y permiten la conservación y recuperación del recurso suelo.



## AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Loja por el financiamiento y apoyo logístico para el desarrollo del proyecto de investigación 10-DI-FARNR-2021.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: NUG, MEAS y PL, ; metodología: CBS y NUG; análisis formal: PL y NUG; investigación: NUG y LH ; redacción-preparación del borrador original: NUG, PL, MEAS y CBS; redacción —revisión y edición: NUG ; visualización: NUG, LH y LP; supervisión: NUG, PL, MEAS, CBS, LH, FL, PG, MV, LP y LQ. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Narcisa Urgiles-Gómez: NUG. Paúl Loján: PL. María Eugenia Ávila-Salem: MEAS. César Benavidez-Silva: CBS. Leslye Hurtado: LH. Fernanda Livisaca: FL. Pedro Guaya: PG. Miguel Villamagua: MV. Laura Poma: LP y Lucía Quichimbo: LQ.

## FINANCIAMIENTO

El presente estudio fue financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Loja, a través del proyecto de investigación 10-DI-FARNR-2021.

## REFERENCIAS

- Adriano-Anaya, M. de L., Jarquín-Gálvez, R., Hernández-Ramos, C., Figueroa, M. S. y Monreal-Vargas, C. T. (2011). Biofertilización de café orgánico en etapa de vivero en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 417–431.
- Andrade-Montalvo, C. M. (2012). Evaluación del efecto de la aplicación de *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma viride* para el control de marchitez en mora de castilla (*Rubus glaucus* Benth) en el cantón Píllaro, provincia de Tungurahua. Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- Avila-Bayona, C. P., Alvarez-Cano, M. A. y Avellaneda-Torres, L. M. (2020). Soil quality indicators associated with the application of mycorrhizal fungi in coffee plantations. *Ingeniería Solidaria*, 16(3), 1-23
- Avila-Salem, M. E., Montesdeoca, F., Orellana, M., Pacheco, K., Alvarado, S., Becerra, N., Marín, C., Borie, F., Aguilera, P., y Cornejo, P. (2020). Soil biological properties and arbuscular mycorrhizal fungal communities of representative crops established in the Andean region from Ecuadorian highlands. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4), 2156–2163.
- Banco Central del Ecuador (2020). La pandemia incidió en el crecimiento 2020: La economía ecuatoriana decreció un 7,8%. Consultado el 08 de mayo del 2023. URL: <https://www.bce.fin.ec/boletines-de-prensa-archivo/la-pandemia-incidio-en-el-crecimiento-2020-la-economia-ecuatoriana-decrecio-7-8>
- Bartra-Lescano, A.H. (2017). Efecto de control del *Trichoderma harzianum* Rifai y fungicidas en el control de *Hemileia vastatrix* Berk. Br. en el Distrito de Hermilio Valdizán–Huánuco. Perú
- Cabrera-Rodríguez, A., Trejo, R., García, C., Arreola, J., Nava, E., Vaca, F., Díaz, C., y Meza, C. (2020). A metagenomic approach in the evaluation of the soil microbiome in coffee plantations under organic and conventional production in tropical agroecosystems. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 32(4) 263-270.
- Canjura-Saravia, E. M. (2000). Reproducción masiva de *Verticillium* sp. hiperparásito de roya del café, *Hemileia vastatrix*. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, 66, 13-19.
- Carhuavilca, N. (2011). Evaluación de la eficacia de especies de *Trichoderma* spp en el control del ojo de pollo del café, en la provincia de la convención. Tesis de grado. Universidad Nacional de San Antonio Abad Del Cusco, Perú.
- Castro, A., y Rivillas, C. (2012). *Trichoderma* spp. Modos de acción, eficacia y usos en el cultivo de café. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Chambe-Mamani, E. S., Apaza-Apaza, S., & Aguilar-Ancota, R. (2021). Control biológico (*Trichoderma* spp.) y químico de roya amarilla (*Hemileia vastatrix* Berk & Br.) del cafeto (*Coffea arabica* L.) en la provincia de Sandia-Puno. *Polo del Conocimiento*, 6(2), 500-520.
- Chen, S., Ren, J., Zhao, H., Wang, X., Wang, T., Jin, S., Wang, Z., Li, C., Liu, A., y Lin, X. (2019). *Trichoderma harzianum* improves defense against *Fusarium oxysporum* by regulating ROS and RNS, metabolism, redox balance, and energy flow in cucumber roots. *Phytopathology*, 109(6), 972–982.
- Chiriboga, G., Peñaherrera, S., Londoño-Larrea, P., Castillo, L., Carvajal C, G., & Montero-Calderón, C. (2022). The effect of the chemical composition on the sensory characterization of Ecuadorian coffee. *Current Research in Food Science*, 5(2022) 2022-2032
- Cisneros, C. A., Franco, J. M., Realpe-Fernandez, M., Fuenmayor, J. C. (2017). Influencia de microorganismos en la disponibilidad de fósforo en plántulas de café (*Coffea arabica*). *Biotechnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 15(1), 19–25.
- COFENAC, Consejo Cafetalero Nacional (2013). Situación del sector cafetalero ecuatoriano: diagnóstico. Portoviejo, Ecuador. 71 p
- Correa, O. (2013). Los microorganismos del suelo y su rol indiscutido en la nutrición vegetal. Aportes de La Microbiología a La Producción de Los Cultivos. Editorial de La Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina, 1–11.
- Cupull-Santana, R, Andrew-Rodríguez, C. M, Pérez-Navarro, Delgado-Pérez Y., Cupull-Santana, M.C (2003). Efecto de *Trichoderma viride* como estimulante de la germinación, en el desarrollo de posturas de cafetos y el control de *Rhizoctonia solani* Kuhn. *Centro Agrícola*, 30(1).
- Cuéllar-Gaviria, T. (2014). Evaluación de la promoción de crecimiento del *Bacillus subtilis* EA-CB0575 en cultivos de banano, crisantemos y café. Tesis de maestría, Universidad EAFIT.
- Del Águila, K., Vallejos, G., Arévalo, L., y Becerra, A. (2018). Inoculación de consorcios micorrícicos arbusculares en *Coffea arabica*, variedad Caturra en la región San Martín. *Información Tecnológica*, 29(1), 137–146

- Delgado, M. (2019). Los microorganismos del suelo en la nutrición vegetal. Orius Biotech USA. Recuperado el 7 de abril de 2020 en <https://www.oriusbiotech.com>.
- Drogue, B., Doré, H., Borland, S., Wisniewski-Dyé, F., & Prigent-Combaret, C. (2012). Which specificity in cooperation between phytostimulating rhizobacteria and plants? *Research in microbiology*, 163(8), 500-510.
- Duicela-Guambi, L. A., Velázquez-Cedeño, S. R., & Farfán-Talledo, D. S. (2017). Calidad organoléptica de cafés arábigos en relación a las variedades y altitudes de las zonas de cultivo, Ecuador. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 18(1), 67-77.
- EFE (Agencia de noticias internacional) (2017), marzo 9, Producción mundial de café bajó un 1,7% en año 2016-2017 y no cubre la demanda. Recuperado el 05 de mayo de 2023. <https://www.economista.net/economia/Produccion-mundial-de-cafe-bajo-1.7-en-ano-2016-2017-y-no-cubre-demanda-20171206-0032.html>
- ESPAC, Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua (2016). Informe sobre estadísticas agropecuarias. Recuperado el 7 de abril de 2021. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec>
- Ferreira, C. M. H., Soares, H. M. V. M., & Soares, E. V. (2019). Promising bacterial genera for agricultural practices: An insight on plant growth-promoting properties and microbial safety aspects. *Science of The Total Environment*, 682, 779-799.
- Figuroa-Hernández, E., Pérez-Soto, F., Godínez-Montoya, L., & Perez-Figuroa, R. A. (2019). Los precios del café en la producción y las exportaciones a nivel mundial. *Revista mexicana de economía y finanzas*, 14(1), 41-56.
- Gómez-Acevedo, D., y Pulido-Delgado, L. (2019). Hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma harzianum*: alternativas ecológicas para la producción de posturas de café (*Coffea arabica* L.) En el estado Táchira, Venezuela/arbuscular micorrízico fungus and *harzianum trichoderma r*: ecological alternati. *Universidad y Ciencia*, 8, 12-28.
- Guilcapi-Pacheco, E. (2009). Efecto de *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma viride* en la Producción de Plántulas de Café (*Coffea arabica*) Variedad Caturra a Nivel de Vivero. Riobamba. 95p. Tesis de pregrado, Escuela superior Politécnica de Chimborazo.
- Guzmán-Guzmán, P., Kumar, A., de los Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F.I., Orozco-Mosqueda, M.d.C., Fadiji, A. E., Hyder S., Babalola O.O & Santoyo, G. (2023). *Trichoderma* Species: Our Best Fungal Allies in the Biocontrol of Plant Diseases—A Review. *Plants*, 12 (3), 432.
- Hernández-Acosta, E., Trejo-Aguilar, D., Ferrera-Cerrato, R., Rivera-Fernández, A., & González-Chávez, M. C. (2018). Hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento de café (*Coffea arabica* L.) variedades Garnica, Catimor, Caturra Y Catuaí. *Agroproductividad*, 11 (4), 61-67.
- INVAM. (2004). International culture collection of (vesicular) arbuscular mycorrhizal fungi. West Virginia University.
- Kejela, T., Thakkar, V., y Thakor, P. (2016). *Bacillus* species (BT42) isolated from *Coffea arabica* L. rhizosphere antagonizes *Colletotrichum gloeosporioides* and *Fusarium oxysporum* and also exhibits multiple plant growth promoting activity. *BMC Microbiology*, 16(1), 1-13.
- Mhatre, P., Karthik, C., Kadirvelu, K., Divya, K. L., Venkatasalam, E. P., Srinivasan, S., Ramkumar, G., Saranya, C., y Shanmuganathan, R. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A potential alternative tool for nematodes bio-control. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 119-128.
- Mohanty, P., Singh, P. K., Chakraborty, D., Mishra, S., & Pattnaik, R. (2021). Insight into the role of PGPR in sustainable agriculture and environment. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 667150, 1-12
- Muthukumar, A., Eswaran, A., & Sanjeevkumar, K. (2011). Exploitation of *Trichoderma* species on the growth of *Pythium aphanidermatum* in chilli. *Brazilian Journal of Microbiology*, 42, 1598-1607.
- Novillo, J., Romero, H., y Cevallos, H. (2021). Análisis del pronóstico de las exportaciones del camarón en el Ecuador a partir del año 2019. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 55-61.
- Olanrewaju, O. S., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33, 1-16.
- Osorio, N., Alzate, J., y Ramirez, G. (2002). Coffee seedling growth as affected by mycorrhizal inoculation and organic amendment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 33(9-10), 1425-1434.
- Pardo, S., Mazo, D. y Rojas, D. (2021). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal: filogenia, microbioma, y perspectivas. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/36978>.
- Pothakos, V., De Vuyst, L., Zhang, S. J., De Bruyn, F., Verce, M., Torres, J., Callanan, M., Moccand, C., & Weckx, S. (2020). Temporal shotgun metagenomics of an Ecuadorian coffee fermentation process highlights the predominance of lactic acid bacteria. *Current Research in Biotechnology*, 2, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2020.02.001>
- Pozo, M. (2014). Análisis de los factores que inciden en la producción de café en el Ecuador 2000-2011. Tesis de grado. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- PRO-ECUADOR. 2016. Boletín de Análisis Mercados Internacionales. Recuperado el 7 de abril de 2021, en <http://www.proecuador.gob.ec/exportadores/sectores/cafe/>
- Ramos-Cabrera, E.V., Delgado-Espinoza, Z. Y., Murillo-Muñoz, R. A., Muñoz-Díaz, V. E., y Hoyos-García, J. (2021). Evaluación de bacterias endofíticas solubilizadores de fósforo en café, una alternativa sostenible. *Biocatalysis en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(2), 94-107.
- Saharan, B., y Nehra, V. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. *Life Sciences and Medicine Research*, 21, 1-30.
- Sánchez, C., Rivera, R., González, C., Cupull, R., Herrera, R., & Varela, M. (2000). Efecto de la inoculación de hongos micorrizógenos (HMA) sobre la producción de posturas de cafetos en tres tipos de suelos del macizo montañoso Guamuhaya. *Cultivos Tropicales*, 21(3):5-13
- Santana-Aragone, D. X. (2014). Efectos de la aplicación de microorganismos fijadores de nitrógeno, complementa-

- rios a la fertilización química en una plantación de Café variedad Caturra Rojo en la zona de Babahoyo. Tesis de Grado, Universidad Técnica de Babahoyo.
- Sivila, N., y Alvarez, S. (2013). Producción artesanal de Trichoderma. Tecnologías Para La Agricultura Familiar. Tecnologías Agroecológicas Para La Agricultura Familiar. Ed. Universitaria de Jujuy.
- Trejo, D., Ferrera, R., García, R., Varela, L., Lara, L., y Alarcón, A. (2011). Efectividad de siete consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en plantas de café en condiciones de invernadero y campo. *Revista chilena de historia natural*, 84(1), 23-31.
- Tyśkiewicz, R., Nowak, A., Ozimek, E., y Jaroszuk-Ścisiel, J. (2022). Trichoderma: The current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and stimulation of plant growth. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(4), 2329.
- Urgiles, N., Guachanamá, J., Granda, I., Robles, Á., Encalada-Cordova, M., Loján, P., Avila, M., Hurtado, L., Poma, N., y Collahuazo, Y. (2020). Caracterización morfológica de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) asociados al café en sistemas agroforestales de la provincia de Loja, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 10, 137–145.
- Urgiles, N., Loján, P., Aguirre, N., Blaschke, H., Günter, S., Stimm, B., & Kottke, I. (2009). Application of mycorrhizal roots improves growth of tropical tree seedlings in the nursery: a step towards reforestation with native species in the Andes of Ecuador. *New Forests*, 38, 229-239.
- Vallejos-Torres, G., Arévalo, L., Iliquin, I., y Solis, R. (2019). Respuesta en Campo de Clones de Café a la Inoculación con Consorcios de Hongos Micorrízicos Arbusculares en la Región Amazonas, Perú. *Información tecnológica*, 30(6), 73-84.
- Zhirvi-Ordoñez, C. M. (2016). Evaluación de dos (2) especies nativas y una comercial de Trichoderma sp. como agente de control de los hongos que ocasionan el damping off (*Rhizoctonia* spp.) en semilleros de café (*Coffea arabica* L.) variedad bourbón. Tesis de posgrado, Universidad de Cuenca