

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y**  
**AMBIENTALES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA**



USO DE BIOFERTILIZANTES MICROBIANOS EN CULTIVOS DE  
IMPORTANCIA ECONÓMICA EN AMÉRICA LATINA: REVISIÓN  
SISTEMÁTICA.

PLAN DE TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

**AUTOR/A:**

WILSON SEBASTIÁN ANDRADE RUEDA

**DIRECTOR:**

Blgo. PEDRO MIGUEL BARBA ESTRELLA MSc.

**Ibarra – Ecuador**

**2023**

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN  
CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES  
ESCUELA DE INGENIERIA EN  
BIOTECNOLOGÍA

## “USO DE BIOFERTILIZANTES MICROBIANOS EN CULTIVOS DE IMPORTANCIA ECONÓMICA EN AMÉRICA LATINA: REVISIÓN SISTEMÁTICA”

Trabajo de grado revisado por el Comité Asesor, por lo cual se autoriza su presentación como  
requisito parcial para obtener Título de:

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

APROBADO:

Blgo. Pedro Barba MSc.

**DIRECTOR**

  
FIRMA

Ing. María Cristina Echeverría PhD.

**MIEMBRO TRIBUNAL**

  
FIRMA

Blga. Sania Ortega MSc.

**MIEMBRO TRIBUNAL**

  
FIRMA



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004521728		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Andrade Rueda Wilson Sebastián		
DIRECCIÓN:	Calixto Miranda y Tobías Mena		
EMAIL:	wsandrader@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062605736	TELÉFONO MÓVIL:	0984934808

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Uso de biofertilizantes microbianos en cultivos de importancia económica en América latina: Revisión Sistemática.
AUTOR:	Andrade Sebastián
FECHA:	19/05/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Biotecnología
ASESOR /DIRECTOR:	Blgo. Pedro Barba MSc.

#### 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 19 días del mes de mayo de 2023

EL AUTOR:

  
Wilson Sebastián Andrade Rueda  
C.I.: 1004521728

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a toda mi familia mi madre Beatriz, mi hermana Fernanda por su apoyo moral y económico durante toda mi carrera y trabajo de titulación. De forma especial, mi gratitud a mi pareja Andrea Ramírez con su amor y ayuda pude salir adelante en los momentos más fuertes durante este proceso. También, a mi tío Luis Andrade por todo el soporte económico que me brindó, cumpliendo las promesas que hizo a mi padre.

De igual manera, deseo agradecer al MSc. Pedro Barba, mi director por todo su conocimiento y paciencia. A mis asesoras MSc. Sania Ortega y PhD. María Cristina Echeverría. Es oportuno mencionar a dos profesores muy especiales que marcaron mi vida estudiantil y personal MSc. Santiago Zarate y MSc. Gabriel Chimbo.

## **Dedicatoria**

Todo el trabajo y esfuerzo va dedicado a mi padre Wilson Andrade y mi abuelito Jacinto Andrade, que en paz descansen y los llevo todos los días en mi memoria y corazón. El sueño de toda su vida era verme convertido en un profesional. Desde cualquier lugar donde se encuentre sentirá un gran orgullo. De igual manera, a mis sobrinos Damaris Gavilánez; Francisco y Francesca Unda que todos los días me cautivan con su inocencia y ternura.

## Tabla de contenido

ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS .....	10
1. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1 Antecedentes .....	13
1.2 Problema .....	14
1.3 Justificación .....	15
1.4 Pregunta directriz .....	16
1.5 Objetivos .....	16
Objetivo general .....	16
Objetivos específicos .....	16
2. MARCO TEORICO .....	17
2.1 Fertilización del suelo .....	17
2.2 Biofertilizantes .....	22
2.2.1 Biofertilizantes bacterianos .....	22
2.3 Biofertilizantes fúngicos .....	27
2.3.1 Hongos Micorrícicos Arbusculares (HMA) como biofertilizantes .....	27
2.3.1.1 Mecanismos de solubilización de fósforo por HMAs .....	27
2.3.1.2 Mecanismos fúngicos de solubilización de Potasio .....	30
2.4 Otros biofertilizantes microbianos .....	30
2.5 Beneficios de uso de biofertilizantes en los cultivos .....	31
2.6 Herramientas informáticas para el análisis de datos cualitativos y cuantitativos .....	34
3. METODOLOGÍA .....	39
3.1 Revisión documental .....	39
3.2 Análisis de datos obtenidos .....	40
3.3 Análisis de redes sociales .....	42
3.4 Cálculo del porcentaje de incremento de las variables agrícolas entre los cultivos inoculados y el grupo control .....	43
3.5 Análisis Multivariado con los parámetros agronómicos extraídos .....	43
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	45
4.1. Revisión documental .....	45
4.2. Identificación de microorganismos utilizados como biofertilizantes en los estudios seleccionados .....	46
4.3. Evaluación de los efectos de aplicación de biofertilizantes microbianos en variables productivas del cultivo .....	53

4.4. Clasificación de géneros microbianos mediante análisis de conglomerados jerárquicos en base a sus efectos de aplicación en cultivos vegetales .....	69
4.5. Evolución del uso de biofertilizantes microbianos en países de América Latina .....	75
4.6. Importancia de los biofertilizantes en América Latina .....	82
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	87
5.1. Conclusiones.....	87
5.2 Recomendaciones .....	88
REFERENCIAS.....	90
ANEXOS.....	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Fósforo remanente del suelo no aprovechado por las plantas tratadas con fertilizantes fosfatados, que provoca la contaminación de cuerpos hídricos.....	19
<b>Figura 2</b> Producción de óxido nitroso en suelos aplicados fertilizantes nitrogenados..	20
<b>Figura 3</b> Acidificación del suelo por la aplicación prolongada de fertilizantes químicos	21
<b>Figura 4</b> Fijación biológica de nitrógeno atmosférico por bacterias simbióticas y no simbióticas.....	24
<b>Figura 5</b> Colonización de raíces por bacterias simbióticas.....	25
<b>Figura 6</b> Colonización de raíces por parte de Hongos Micorrízicos Arbusculares.....	27
<b>Figura 7</b> Mecanismos de solubilización de P en hongos.....	28
<b>Figura 8</b> Micrografías electrónicas que muestran la penetración de las hifas arbusculares en minerales de K.....	30
<b>Figura 9</b> Elementos principales de un grafo.....	35
<b>Figura 10</b> Vértices o nodos que componen a un grafo.....	35
<b>Figura 11</b> Aristas que conectan los nodos en un grafo.....	35
<b>Figura 12</b> Tipos de grafos.....	36
<b>Figura 13</b> Diferencias entre un grafo dirigido y no dirigido.....	36
<b>Figura 14</b> Ejemplo de una Red Social Artificial.....	37
<b>Figura 15</b> Ejemplo de un conjunto de datos agrupados mediante análisis de clúster....	38
<b>Figura 16</b> Elementos de las redes sociales artificiales generadas.....	42
<b>Figura 17</b> Pesos de salida y entrada en las redes sociales artificiales generadas.....	42
<b>Figura 18</b> Diagrama de flujo para la estrategia de selección de fuentes bibliográficas	45
<b>Figura 19</b> Análisis de redes de los microorganismos usados como biofertilizantes de los artículos incluidos en el estudio.....	48
<b>Figura 20</b> Dendrograma derivado del análisis de conglomerados a partir de los porcentajes de incremento por genero microbiano.....	70
<b>Figura 21</b> Análisis de Componentes Principales en los efectos generados por el uso de biofertilizantes microbianos.....	73
<b>Figura 22</b> Análisis de Componentes Principales de las variables agronómicas con mayor impacto en los géneros microbianos empleados como biofertilizantes.....	74
<b>Figura 23</b> Tendencia de las publicaciones en países de América Latina desde el año 2005 hasta 2022.....	76
<b>Figura 24</b> Análisis de redes de los cultivos aplicados biofertilizantes microbianos en diferentes países de América Latina.....	78
<b>Figura 25</b> Análisis de redes entre cultivos y especies microbianas empleadas como biofertilizante en América Latina.....	81
<b>Figura 26</b> Principales países que exportan fertilizantes químicos al Ecuador.....	85
<b>Figura 27</b> Biofertilizante de origen ecuatoriano Fertibacter-maíz elaborado por el INIAP.....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Ácidos secretados por los principales hongos solubilizadores de fósforo.....	29
<b>Tabla 2</b> Moléculas de las fitohormonas producidas por los biofertilizantes microbianos.....	33
<b>Tabla 3</b> Criterios de inclusión y exclusión para la selección de artículos científicos....	39
<b>Tabla 4</b> Criterios de recolección y clasificación de datos aplicados a cada artículo .....	40
<b>Tabla 5</b> Codificación de microorganismos empleados en los artículos analizados.....	41
<b>Tabla 6</b> Microorganismos que participaron en cada consorcio microbiano presentado en los estudios analizados.....	49
<b>Tabla 7</b> Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable rendimiento de cultivo (kg/ha) .....	55
<b>Tabla 8</b> Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable altura de la planta (cm) .....	57
<b>Tabla 9</b> Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable longitud de la raíz (cm).....	59
<b>Tabla 10</b> Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable biomasa seca total (g) .....	61
<b>Tabla 11</b> Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable biomasa seca del tallo (g) .....	63
<b>Tabla 12</b> Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable biomasa seca del tallo (g) .....	65
<b>Tabla 13</b> Diferencia entre control versus cultivo tratado con biofertilizante para la variable fósforo foliar (%) .....	67
<b>Tabla 14</b> Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable potasio foliar (%).....	68
<b>Tabla 15</b> Estadístico de prueba para la idoneidad de los datos para transformarse en componentes principales.....	71
<b>Tabla 16</b> Principales productos comerciales de biofertilizantes producidos en el continente americano.....	82
<b>Tabla 17</b> Distribución de las solicitudes e invenciones de patentes con biofertilizantes en países de América Latina.....	83
<b>Tabla 18</b> Cantidad de fertilizantes químicos aplicados a los cultivos agrícolas más importantes del Ecuador, en el año 2020. ....	84

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1</b> Distribución de los pesos de salida en los géneros microbianos empleados como biofertilizantes .....	124
<b>Anexo 2</b> Distribución de los pesos de salida en los géneros microbianos empleados como biofertilizantes .....	124
<b>Anexo 3</b> Valor numérico de los pesos de entrada correspondiente a las especies empleadas como biofertilizantes .....	125
<b>Anexo 4</b> Valor numérico de los pesos de salida correspondiente a los géneros empleados como biofertilizantes .....	126
<b>Anexo 5</b> Matriz de coeficientes de puntuación para la extracción de componentes principales.....	127
<b>Anexo 6</b> Matriz de Componentes principales .....	128
<b>Anexo 7</b> Diagrama de puntos de los géneros microbianos usados como biofertilizantes en diferentes especies vegetales .....	128
<b>Anexo 8</b> Análisis de Redes Sociales Artificiales de los años de publicación de cada genero microbiano usado como biofertilizante .....	129
<b>Anexo 9</b> Géneros microbianos usados como biofertilizantes ordenados por su año de publicación.....	130
<b>Anexo 10</b> Especies vegetales tratadas con biofertilizantes microbianos ordenadas por su año de publicación.....	130
<b>Anexo 11</b> Instructivo de uso didáctico FertiBacter en maíz distribuido por el INIAP	131

## RESUMEN

Con el fin de satisfacer la demanda de alimentos en la población, en la industria agrícola se han empleado fertilizantes de síntesis química para la producción y desarrollo eficiente de cultivos a gran escala. Sin embargo, el uso excesivo y prolongado de estos productos, provoca impactos negativos al ambiente como: emisión de gases efecto invernadero, eutrofización de cuerpos hídricos y acidificación del suelo. Con estos antecedentes, en el mundo científico se han investigado diversas alternativas amigables con el ambiente que permitan la producción masiva de cultivos vegetales, como es el caso de la aplicación de biofertilizantes microbianos. En este sentido, se realizó una revisión sistemática con el fin de identificar el efecto del uso de biofertilizantes microbianos en cultivos de importancia económica en Latinoamérica. La investigación inició con la búsqueda de artículos científicos experimentales mediante la palabra clave “Biofertilizers”, en bases de datos bibliográficas electrónicas como: Web of Science, SpringerLink, Nature, ScienceDirect, Dialnet, Scielo y Pubmed. Se filtraron los estudios a través de diferentes criterios de inclusión y exclusión, en concordancia con la metodología PRISMA. Como resultado se incorporaron un total de 106 trabajos de investigación, de los cuales se recopiló y almacenó la información más relevante, en una matriz de datos en el software Excel (versión 2304). En el caso de los datos cualitativos pertenecientes a los microorganismos empleados como biofertilizantes, se sometieron a un Análisis de Redes Sociales Artificiales (ARSA). En consecuencia, se determinó con un peso de entrada igual a 25 que el tratamiento de biofertilización más frecuente en la región es a través de consorcios microbianos, conformados por dos especies. Con respecto a la inoculación microbiana individual, con un peso de salida de 10 la especie más empleada fue *Azospirillum brasilense*. Posteriormente, se recolectaron todos los datos cuantitativos sobre efectos físicos y nutricionales, producidos por los microorganismos en los cultivos aplicados. Evidenciando tendencias heterogéneas desde el 1% hasta el 100%. Para finalizar, se analizó el contexto de América Latina en la producción científica y programas nacionales referentes al empleo de biofertilizantes. De esta forma, se observó que las naciones con mayor desarrollo en la región son: México, Brasil, Argentina, Colombia y Cuba.

**Palabras clave:** Biofertilizantes microbianos, análisis de redes, América Latina, suelo agrícola, cultivos agrícolas.

## ABSTRACT

To satisfy the population's demand for food, the agricultural industry has used chemical fertilizers for the efficient production and development of crops on a large scale. However, the excessive and prolonged use of these products causes negative environmental impacts such as greenhouse gas emissions, eutrophication of water bodies and soil acidification. Against this background, the scientific world has been researching various environmentally friendly alternatives that allow the massive production of vegetable crops. In this sense, a systematic review was carried out to identify the effect of the use of biofertilizers on crops of economic importance in Latin America. The research began with a search for experimental scientific articles using the keyword "Biofertilizers" in electronic bibliographic databases such as: Web of Science, SpringerLink, Nature, ScienceDirect, Dialnet, Scielo and Pubmed. Due to the large amount of information in the sources, the studies were filtered through different inclusion and exclusion criteria, in accordance with the PRSIMA methodology. With this procedure, a total of 106 research works were obtained, from which the most relevant information was compiled and stored in a data matrix in Excel software. Regarding the qualitative data pertaining to the microorganisms used as biofertilizers. These data were subjected to an Artificial Social Network Analysis (ARSA), which determined with an input weight equal to 25 that the most frequent biofertilization treatment in the region is through microbial consortia, made up of two species. With respect to individual microbial inoculation, with an output weight of 10, the most frequently used species was *Azospirillum brasilense*. Subsequently, all quantitative data on the physical and nutritional effects produced by the microorganisms on the applied crops were collected. Consequently, a calculation of the percentage increase between the biofertilizer treatment and the control, in the variables previously mentioned, was applied. Heterogeneous trends from 1% to 100% were observed. Likewise, it was observed that microorganisms generate positive results in certain agricultural parameters more than in others. Finally, the Latin American context was analyzed in terms of scientific production and national programs related to the use of biofertilizers. In this way, it was observed that the nations with the greatest development in the region are Mexico, Brazil, Argentina, Colombia and Cuba.

**Key words:** microbial biofertilizers, network analysis, Latin America, agricultural soil, agricultural crops.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La agricultura es una actividad de vital importancia que satisface las necesidades alimenticias del ser humano (Sultan et al., 2020). En ese sentido, los cultivos agrícolas dependen de la disponibilidad de nutrientes como: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), cobre (Cu), manganeso (Mn), hierro (Fe), boro (B), níquel (Ni), molibdeno (Mo), cloro (Cl), zinc (Zn), cobalto (Co), sodio (Na), silicio (Si), selenio (Se), vanadio (V), entre otros microelementos, para su desarrollo (McGrath et al., 2014).

Por consiguiente, desde el siglo XX, para asegurar la suficiencia de estos nutrientes en el suelo, se ha empleado hasta la actualidad la fertilización convencional (productos provenientes de síntesis química) en los sistemas de cultivo de Latinoamérica y el mundo (Barbier, 2003; Wuang et al., 2016). Sin embargo, el uso excesivo y prolongado de fertilizantes químicos generan impactos negativos al ambiente, como incremento de gases de efecto invernadero, degradación del suelo y eutrofización de cuerpos hídricos (Kratz et al., 2019).

Con el fin de garantizar técnicas agrícolas respetuosas con el medio ambiente, y reducir la contaminación de fuentes de agua, se ha implementado la fertilización orgánica, en la que se emplean productos de origen biológico (Miransari, 2011). Estas prácticas surgieron en Suiza alrededor del año de 1940 y tomaron protagonismo en la década de 1980 (Darnhofer et al., 2010). A diferencia de la fertilización convencional, los biofertilizantes generan diferentes beneficios, como la acumulación de nutrientes y materia orgánica, control natural de enfermedades, conservación de recursos naturales renovables, entre otros (Epule, 2019).

Entre los métodos de fertilización orgánica se incluye la fertilización de origen microbiano, que son inóculos de microorganismos que crean relaciones simbióticas en suelos cultivables, mejorando así la asimilación de nutrientes (Berg, 2009). Se obtienen a través de diferentes técnicas de biotecnología y se utilizan desde 1981 con buenos resultados, destacando por su inocuidad al medio ambiente y los beneficios que proporcionan a los agricultores (Yuan et al. 2017).

## 1.2 Problema

La población mundial se encuentra en un constante crecimiento y se ha estimado que para el año 2050 llegará a ser de 9,7 billones de habitantes. Este rápido crecimiento intensifica la industrialización, urbanización y la producción agrícola a gran escala (Macik et al., 2020). Para satisfacer las necesidades alimenticias en el futuro será necesario innovar en la producción de cultivos agrícolas (Ehrlich y Harte, 2015). Por lo tanto, la fertilización del suelo juega un rol fundamental, ya que la disposición adecuada de nitrógeno y fósforo permite el desarrollo óptimo de las plantas (Wang et al., 2019). Con este fin, durante muchos años se ha aplicado fertilizantes convencionales provenientes de síntesis química (Vasile et al., 2015).

En América Latina, la agricultura es una de las principales fuentes económicas. Esta región gasta 11 billones de dólares anuales en la importación de fertilizantes químicos (Armada et al., 2014). De este modo, representa la principal fuente de nutrición en el suelo, debido al amplio desconocimiento del impacto negativo en el ambiente (Charcopa et al., 2017).

La aplicación de fertilizantes nitrogenados disminuyen el pH del suelo de 0.3 a 0.8 unidades, debido a la producción de protones en el proceso de nitrificación (Wu et al., 2019). También, inducen la deficiencia de nutrientes como fósforo, calcio, potasio, magnesio y aumentan la concentración de metales tóxicos, como aluminio o manganeso, y la concentración de estos pueden mermar el rendimiento de los cultivos (Dai et al., 2017).

La fertilización del suelo por compuestos nitrogenados produce, además, óxido nitroso, un gas de efecto invernadero que permanece en la atmósfera e impide el regreso de los rayos solares al espacio. En las tres últimas décadas, las emisiones de NO<sub>2</sub> generadas por la intensificación de las actividades agrícolas han pasado de 5,7 millones a 6 millones por año (Anderson et al., 2016).

Finalmente, los fertilizantes químicos fosfatados generan remanentes en el suelo que son arrastrados por la lluvia a cuerpos hídricos cercanos. Estos nutrientes se acumulan y generan un crecimiento excesivo de algas, que disminuyen el oxígeno disuelto del agua comprometiendo, así, la vida de otras especies del ecosistema. Se estima que la concentración de P en un lago cambia de 10 a 45 mg/m<sup>3</sup> debido al impacto de los

compuestos anteriormente mencionados (Bloem et al., 2017; Huang et al., 2017; Pal, 2020).

### **1.3 Justificación**

La agricultura es una de las actividades antropológicas más importantes en el planeta porque garantiza el abastecimiento de alimentos a la población mundial. Estos alimentos deben ser saludables y obtenidos con tecnologías amigables con el ambiente (Ning et al., 2017). Especialmente en América Latina debido a la amplia diversidad biológica, así como climas tropicales y subtropicales, que permiten el desarrollo de una gran variedad de cultivos agrícolas, es la fuerza económica principal de la región. Además, aporta el 14% de la producción agrícola mundial (Campen, 2011; Sanabria, 2014).

Ante la problemática planteada previamente sobre el uso de fertilizantes químicos, una alternativa ecológica y sostenible son los biofertilizantes. Estos proveen al suelo de cultivo, múltiples beneficios sin generar impactos negativos al ambiente (Zakeel y Safeena, 2019). Especialmente, los biofertilizantes microbianos que colonizan la rizosfera, mejorando las condiciones nutritivas del suelo e incrementando la disponibilidad de macro y micronutrientes, mediante fijación de nitrógeno, solubilización de fósforo, potasio y hierro (Bhowmik, 2018).

Así mismo, la aplicación de biofertilizantes microbianos incrementa la materia orgánica del suelo, retención de agua y actúan como tampones regulando el pH del suelo. También, se consideran agentes de biocontrol debido a que producen antibióticos y antifúngicos que le otorgan resistencia a la planta ante el ataque de fitopatógenos. Otros metabolitos secundarios que se generan son fitohormonas importantes en el crecimiento de las plantas y activación de la mitosis en las células vegetales (Dhir, 2017).

Por otro lado, el empleo de biofertilizantes en los cultivos, además de mejorar las condiciones de cultivo en el suelo para un desarrollo óptimo de las plantas, contribuye con la conservación del ambiente. Al reducir los fertilizantes químicos ricos en nitrógeno y fósforo, también se reducirá la emisión de óxido nitroso, un gas de efecto invernadero relacionado con el calentamiento global y la eutrofización de ecosistemas acuáticos (Floody et al., 2018).

Al evidenciar brevemente los diferentes beneficios que conllevan los biofertilizantes, la presente investigación aborda esta temática en el contexto de América Latina, mediante una revisión bibliográfica sistemática. Para esto, se recopiló datos referentes a rendimientos y producción en suelos de cultivo de la región, en los cuales se aplicaron inóculos microbianos. Se analizaron publicaciones científicas en donde se estudió la utilización de biofertilizantes microbianos en cultivos agrícolas mostrando éxito en su aplicación. De esta forma, se evidenció todos los aportes que podrían brindar información relevante a la industria agrícola manteniendo un equilibrio con el ambiente.

#### **1.4 Pregunta directriz**

¿Cuál es el efecto de la aplicación de biofertilizantes microbianos en los cultivos de importancia económica en América Latina?

#### **1.5 Objetivos**

##### **Objetivo general.**

- Realizar una revisión sistemática sobre el efecto de la aplicación de biofertilizantes microbianos en cultivos de América Latina.

##### **Objetivos específicos**

- Identificar los tipos de microorganismos mayormente utilizados para la síntesis de biofertilizantes.
- Evaluar los efectos de la aplicación de biofertilizantes microbianos en variables productivas de los cultivos.
- Analizar el impacto de los biofertilizantes en América Latina.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEORICO

#### 2.1 Fertilización del suelo

La actividad más importante en el proceso de la agricultura es la fertilización, debido a que las plantas requieren varios nutrientes esenciales para su desarrollo fisiológico y rendimiento (Prashar y Shah, 2016). La fertilización del suelo puede ser orgánica o inorgánica y se aplica en forma basal o superficial; pero tiene un fin común: brindar a una especie vegetal los nutrientes que permitan su crecimiento (Delgado et al., 2016).

Estos nutrientes se clasifican en: a) Macronutrientes: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca) y azufre (S) (N. Sharma & Singhvi, 2017). b) Micronutrientes: boro (B), cobalto (Co), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), y zinc (Zn). Se requieren en mínimas concentraciones pero tienen un carácter esencial (Marschner y Rengel, 2012).

##### 2.1.1 Fertilización convencional

Los fertilizantes convencionales son de origen sintético y obtenidos de compuestos como la urea, cianamida de calcio y lignosulfonatos. En los cuales, nutrientes como el nitrógeno, fósforo y potasio se encuentran en altas concentraciones y su liberación en el suelo es directa e inmediata (Guertal, 2009). Estos fertilizantes generalmente pueden presentarse en forma sólida o líquida. Con respecto a la primera, los agricultores la disuelven en el agua de riego o se aplican directamente a la planta; mientras la segunda, generalmente se añade al sistema de riego o se mezcla con herbicidas (Reséndez et al., 2017).

De igual manera, el contenido de nutrientes en los fertilizantes dependen de la fuente que han sido extraídos, como en el caso de los fertilizantes nitrogenados, entre los que se encuentran la Urea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ), Nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), Salitre de Chile ( $\text{KNO}_3 + \text{NaNO}_3$ ), que contienen 46%, 35%, 21%, 15%, de nitrógeno, respectivamente (Sharma, 2017). Con relación a los fertilizantes fosforados, los porcentajes de fosfato disponibles son 30% en Superfosfato Múltiple  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  y 45% en el Triple Superfosfato  $\text{Ca}(\text{NH}_2\text{PO}_4)_2$  (Rodríguez et al., 2017).

Finalmente, en los fertilizantes potásicos el Óxido de potasio ( $K_2O$ ) se encuentra tanto en el Cloruro de potasio ( $KCl$ ) (50%) y Sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ) (50%) ,(Shilev, 2013). También, hay disponibles fertilizantes combinados denominados NPK, en los cuales se hallan todos los macronutrientes ya que se conforman de Cloruro de potasio ( $KCl$ ), Fosfato monoamónico ( $NH_4H_2PO_4$ ) y Nitrato de amonio ( $NH_4NO_3$ ), en diferentes concentraciones (Kumar et al., 2019).

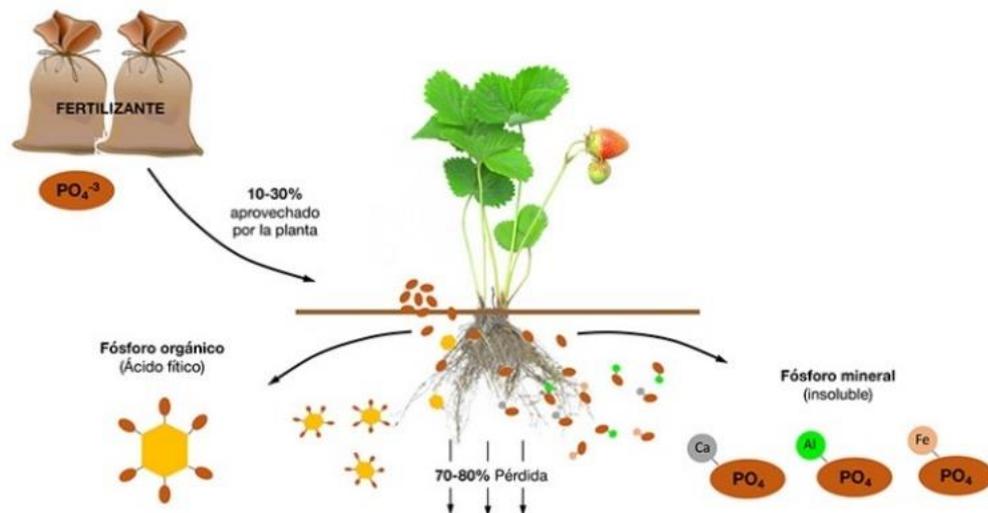
### **2.1.1.1 Efectos de la fertilización convencional**

#### **Contaminación del agua**

La aplicación intensiva de fertilizantes fosfatados es una de las causas principales para la eutrofización de ecosistemas acuáticos, en razón de que este elemento es inmóvil y se adhiere fácilmente a las partículas del suelo (Savcı, 2012). Por tal motivo, las plantas solo absorben entre un 10%-15% del total dosificado, con tendencia a acumularse y ser arrastrados por precipitaciones o lixiviarse hasta aguas subterráneas. Finalmente, estos compuestos desembocan en cuerpos hídricos, donde generan hipoxia y proliferación incontrolada de algas (Darch et al., 2014).

Estas últimas disminuyen las concentraciones de oxígeno disuelto y en consecuencia generan la muerte de especies pelágicas (Sharma y Singhvi, 2017). Adicionalmente, la turbidez generada en la superficie por la presencia masiva de dichas algas, impiden el paso de la luz solar a capas acuáticas más profundas (Figura 1) (Khan et al., 2020).

De igual manera, el tratamiento con fertilizantes nitrogenados se cataloga como otro factor que provoca la eutrofización de zonas acuáticas. El nitrógeno mineral por acción de los microorganismos nativos del suelo se transforma en nitrato, una forma asimilable para las plantas (Anibasa, 2012). No obstante, solo el 50% es aprovechado por estas, mientras el porcentaje restante se volatiliza. Se estima que hasta el 10% de este compuesto se elimina de la zona radicular hasta lixiviarse y alcanzar masas de agua subterráneas o superficiales (Hijbeek et al., 2018).



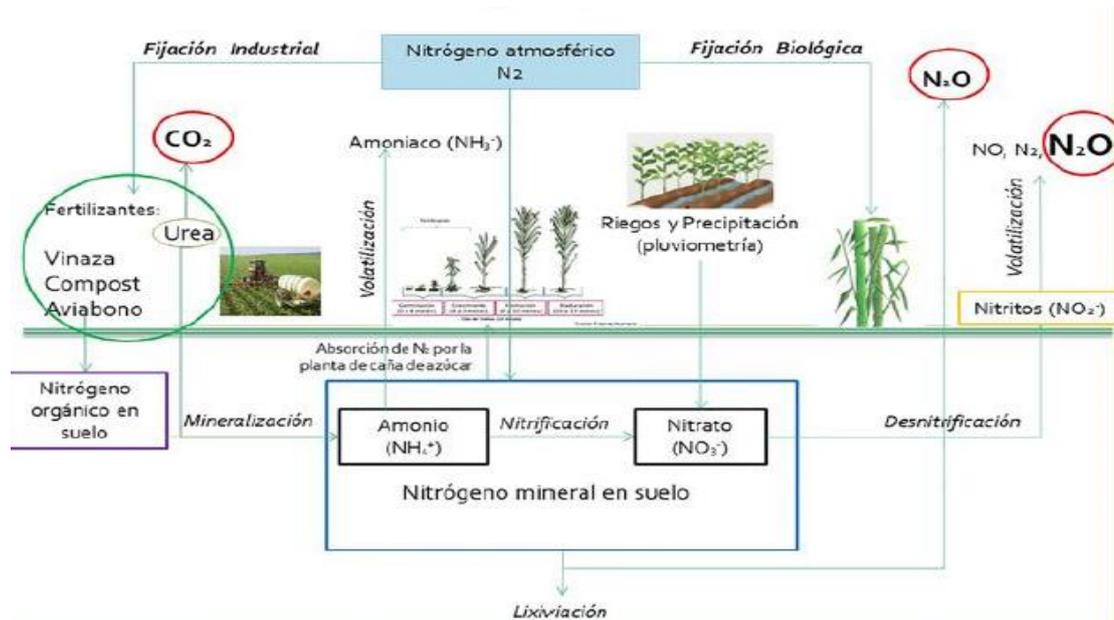
**Figura 1** Fósforo remanente del suelo no aprovechado por las plantas tratadas con fertilizantes fosfatados, que provoca la contaminación de cuerpos hídricos. Procedente de García et al., 2018.

### Emisiones de gases de efecto invernadero

Se denomina efecto invernadero al calentamiento de la superficie terrestre debido a la retención de los rayos solares por la presencia de gases como Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), Metano ( $\text{CH}_4$ ), Ozono ( $\text{O}_3$ ) y Óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (Rosa y Dietz, 2012). Dicho efecto se estima que modificará la temperatura de la tierra entre 1.0 y 3.7°C, así como las precipitaciones globales y el nivel del mar (Anderson et al., 2016).

En este contexto, el 60% de la emisión de  $\text{N}_2\text{O}$  provienen de las actividades agrícolas. Particularmente, en los suelos tratados con nitrógeno mineral mediante reacciones químicas de nitrificación por medio de microorganismos del suelo, este se convierte en nitratos para su absorción en las plantas (Estrada et al., 2017). Al mismo tiempo, como resultado de la desnitrificación se generan compuestos volátiles como el óxido nitroso y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) que deposita en la atmosfera (Rütting et al., 2018) (Figura 2).

Con respecto al amoníaco, también existe otro efecto adverso debido a que esta molécula se oxida en la atmosfera y se convierte en ácido nítrico, que al combinarse con vapor de agua, desencadena la lluvia ácida que produce abrasiones en la vegetación (Pahalvi et al., 2021).



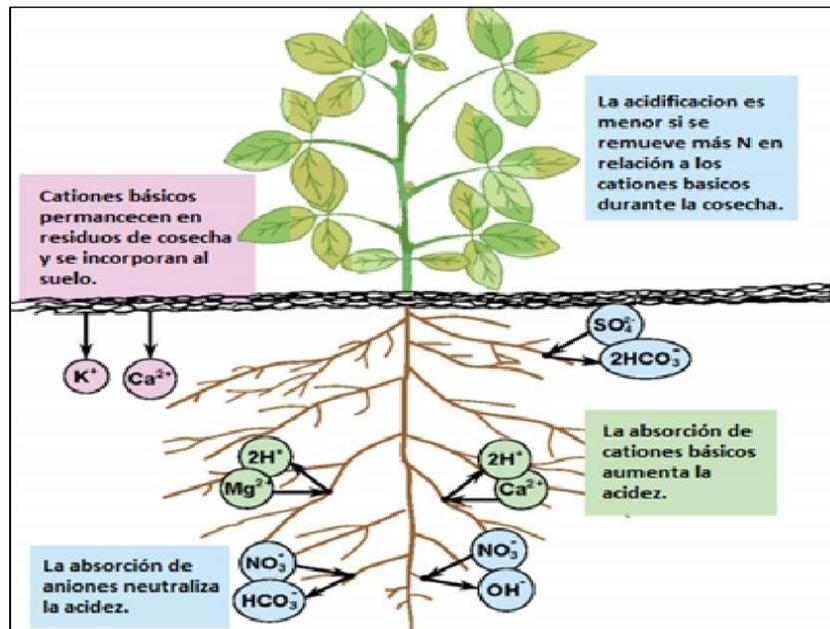
**Figura 2** Producción de óxido nitroso en suelos aplicados fertilizantes nitrogenados. Procedente de Astudillo et al., 2018

### Acidificación del suelo

La acidificación del suelo es uno de los mayores problemas para los ecosistemas terrestres. Sus efectos son asignados principalmente al empleo de fertilizantes nitrogenados como urea y amoníaco. Las cantidades excesivas de estos provocan la pérdida de aniones nitrato y el agotamiento de cationes base como  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  y  $Na^+$  en el suelo (Oelofse et al., 2013).

Por lo tanto, inciden en la supresión de su capacidad amortiguadora, lo cual facilita los descensos de pH inferiores a 5,5 (Thomas et al., 2019). El descenso del pH en el suelo reduce de tamaño de la planta así como su rendimiento, disminuye la disponibilidad de elementos nutritivos y acumula elementos tóxicos como el aluminio (Figura 3) (Tian y Niu, 2015).

En el caso del tratamiento con Triple Superfosfato, que en su contenido existen oligoelementos como el cadmio (Cd) y arsénico (As), en condiciones de acidez, estos metales pesados aumentan su movilidad acumulándose en las plantas. En algunos casos pueden llegar a los productos alimenticios del ser humano (Cooper et al., 2018).



**Figura 3** Acidificación del suelo por la aplicación prolongada de fertilizantes químicos. Procedente de Intagri ,2015.

## 2.1.2 Fertilización orgánica

### 2.1.2.1 Generalidades

Es la aplicación de fertilizantes elaborados con materia prima biológica como desechos animales o vegetales. En estos, los nutrientes esenciales como el nitrógeno, fósforo y potasio para las plantas son liberados en cantidades mínimas en periodos de tiempo extensos (Thakur, 2017). El tratamiento de suelos agrícolas con este tipo de fertilización conlleva múltiples beneficios microbiológicos, físicos y bioquímicos, como aumentar la materia orgánica a corto plazo, mejorar la cantidad de organismos nativos del suelo y optimizar la cantidad de nutrientes esenciales existentes en el suelo (Ciesielczuk et al., 2015).

Los fertilizantes orgánicos pueden clasificarse en naturales, como el estiércol orgánico de animales (aves de corral, peces, ganado vacuno, ganado equino), y procesados entre los que se encuentran harina de huesos de animales, harina de semillas de algodón, harina de sangre animal, algas marinas, fresno de madera (Glaser et al., 2015; Shaji et al., 2021).

## **2.2 Biofertilizantes**

Son todos los compuestos derivados de seres vivos que confieren nutrientes minerales y promueven el crecimiento de las plantas (Meena y Busi, 2019). Pueden ser preparados con estiércol animal, materia vegetal en descomposición o inóculos microbianos. Adicionalmente, proveen al suelo de cultivo humedad constante y retención de agua sin generar los efectos adversos de la fertilización tradicional (Wang et al., 2019).

Los biofertilizantes microbianos son aquellos basados en especies microbianas activas que se aplican directamente en las plantas y colonizan la rizósfera o el interior del hospedero, induciendo su crecimiento mediante la disponibilidad o fijación de nutrientes. Para su preparación se utilizan bacterias, hongos y cianobacterias (Giri et al., 2019). Los fertilizantes microbianos mejoran el rendimiento productivo de los cultivos sin efectos contraproducentes al ambiente (Schütz et al., 2018). También, crean relaciones simbióticas con las plantas brindando protección contra agentes fitopatógenos, mediante la secreción de moléculas o inhibición por competición (Patil y Solanki, 2016).

### **2.2.1 Biofertilizantes bacterianos**

La interacción entre los microorganismos y las raíces ocurren en la rizósfera. En este microambiente, las raíces liberan diferentes compuestos, como azúcares, ácidos orgánicos, vitaminas y aminoácidos, que reúnen a diferentes filos bacterianos, tales como Proteobacterias alfa y beta, Acidbacterias, Verrucomicrobia, Actinobacteria, Bacteroidetes, Firmicutes y Planctomycetes (Patra et al., 2016).

Por tal motivo, existe una gran afinidad entre bacterias y plantas que ha sido aprovechado para formular diferentes tipos de biofertilizantes bacterianos. Los géneros más estudiados son *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter* y *Klebsiella* (Hesham et al., 2021). La aplicación de biofertilizantes bacterianos presenta diversos beneficios, como la fijación biológica de nitrógeno, absorción de fósforo y potasio, producción de fitohormonas, inhibición de la síntesis de etileno en situaciones de estrés vegetal (Verbon y Liberman, 2016).

### **2.2.2 Bacterias fijadoras de nitrógeno**

El nitrógeno es un nutriente limitante en el desarrollo de las plantas y tradicionalmente ha sido suplementado en la producción agrícola mediante productos sintéticos. Sin embargo, la agricultura orgánica ha cambiado este procedimiento por la

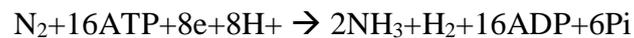
fijación biológica de este elemento, por parte de diversos grupos bacterianos. De este modo, el nitrógeno incorporado por las plantas es destinado a la síntesis de aminoácidos y ácidos nucleicos (Suthar et al., 2017). Este tipo de bacterias se clasifican en 2 grupos: simbióticas y no simbióticas, que se detallarán a continuación.

### 2.2.2.1 Mecanismo de fijación biológica de nitrógeno

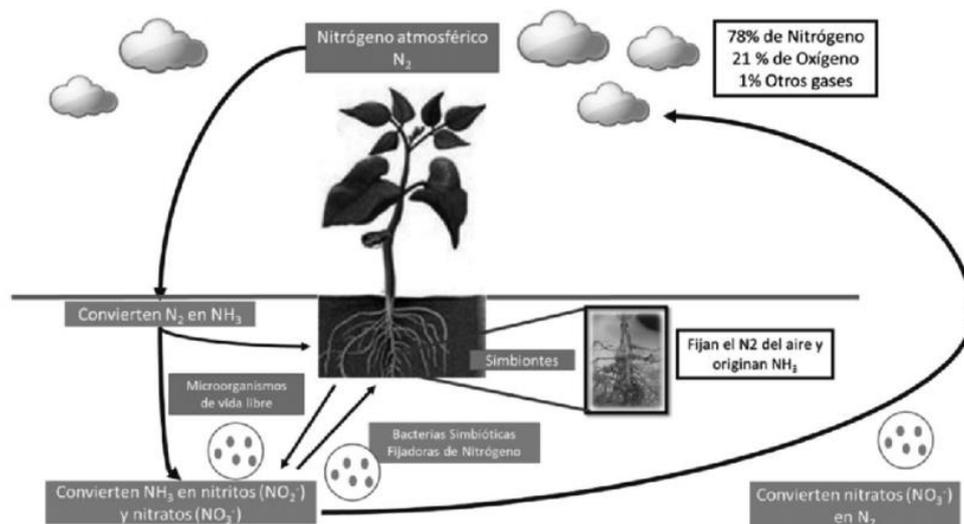
Existen alrededor de noventa géneros bacterianos conocidos como diazotrofos que llegan a las plantas mediante la colonización de raíces, transmisión de semillas, arrastre de suelo o inoculación de hojarasca. Dichos géneros disponen de un complejo enzimático de nitrogenasas conformado por enzimas como la di nitrogenasa y di nitrogenasa reductasa, codificados por un grupo de genes denominados *nif* (*nifH*, *nifD*, *nifK*) (Pfeiffer et al., 2017).

Además, este complejo incluye diversas proteínas y cofactores, y que, en conjunto, se encargan de capturar y reducir la forma de nitrógeno presente en la atmósfera ( $N_2$ ) en  $NH_3$  (Mus et al., 2016). Dicha molécula es una forma química asimilable para las plantas a través de la ruta de la glutamina sintasa y este proceso se resume en la siguiente formulación estequiométrica de la Ecuación 1 (Rosenblueth et al., 2018):

#### **Ecuación 1** Fijación biológica de N en bacterias



En la ecuación anterior se demuestra que el proceso de fijación biológica de nitrógeno tiene altos requerimientos energéticos por parte de la célula, y que debe ser cubierto mediante el consumo de carbono. La tasa de fijación de  $N_2$  depende del microorganismo y del tipo de sistema al que pertenezca (vida libre o simbiótica). Sin embargo, en ambos casos puede suprimirse por la presencia de  $NO_3^-$  y  $NH_4^+$  en el suelo (Figura 4) (Dessureault et al., 2012).



**Figura 4** Fijación biológica de nitrógeno atmosférico por bacterias simbióticas y no simbióticas. Tomado de García et al., 2018.

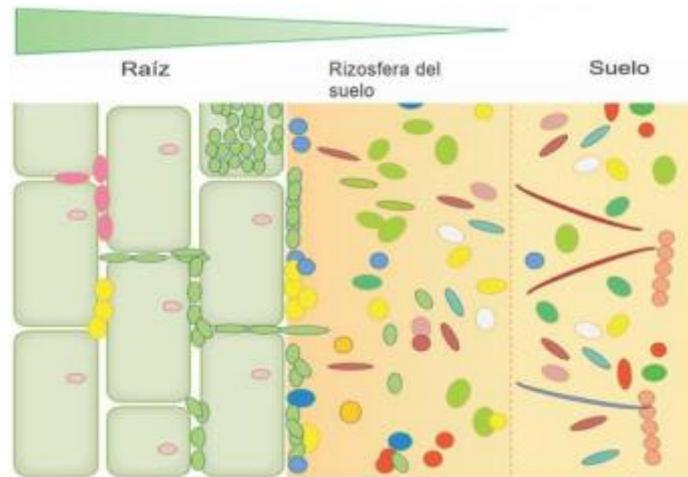
#### 2.2.2.2 Bacterias fijadoras de nitrógeno no simbióticas

Las bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre no establecen relaciones simbióticas con los organismos vegetales. Por lo tanto, no invaden el tejido de la raíz, únicamente se ubican alrededor asimilando y metabolizando  $N_2$  atmosférico mediante las enzimas nitrogenasas, para lo cual requieren un estimado de 100g de carbono para fijar 1g de nitrógeno (Oberson et al., 2013). El género bacteriano representativo es *Azotobacter*, con tasas de rendimiento metabólico más altas en la fijación de  $N_2$  atmosférico. Además, se ha reportado su capacidad de liberar fitohormonas de crecimiento como ácido Giberelico (GA) y Ácido indol-3-acético (IAA). La especie más estudiada de este género, desde inicios del siglo XX, es *Azotobacter chroococcum*, y su rendimiento aproximado de fijación de nitrógeno es 20-40 kg N/ha (Berthrong et al., 2014).

#### 2.2.2.3 Bacterias fijadoras de nitrógeno simbióticas

A diferencia del grupo anterior, este se caracteriza por formar relaciones endosimbióticas mediante nódulos en las raíces de la planta hospedera (Figura 5). Para lograr la fijación de 1g de nitrógeno, con el fin de cubrir hasta en un 90% de las necesidades este elemento en el ejemplar vegetal, se requiere 7g de carbono (Mahmud et al., 2020). Los géneros representativos son *Rhizobium* y *Bradyrhizobium*, que se caracteriza por formar asociaciones mutualistas con especies vegetales específicas como: *Phaseolus vulgaris*, *Gyicine max*, *Cicer arietinum*, *Vicia faba* y *Lens culinaris*. El

rendimiento estimado de fijación de nitrógeno es 40-50kg N/ha, en condiciones de campo (Bellenger et al., 2014; Shamseldin et al., 2017).



**Figura 5** Colonización de raíces por bacterias simbióticas. Tomado de Duchén et al., 2021.

### 2.2.3 Bacterias solubilizadoras de fósforo

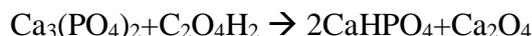
El fósforo es otro nutriente esencial en las plantas constituyendo el 0.2% de su peso seco total. Sin embargo, en los suelos tan solo existe una concentración de 0.02 ppm y de esa cantidad el 50% se encuentra en formas orgánicas insolubles para las plantas como fosfatos de inositol, ésteres de fosfatos y fosfolípidos (Hernández et al., 2022). En este sentido, las bacterias solubilizadoras de fosfato son una gran opción para cubrir los requerimientos de este elemento en las plantas, debido a que representan el 50% de microorganismos en el suelo (Otieno et al., 2012).

El mecanismo de solubilización más conocido de compuestos fosfatados inorgánicos, como el fosfato di cálcico y tricálcico, consiste en la liberación de ácidos orgánicos, como el ácido glucónico, cítrico, láctico, málico, oxálico y fórmico del periplasma de las células bacterianas (Kalayu, 2019). En consecuencia, la liberación de estas sustancias al suelo baja el pH hasta valores de 4.5, con el fin de generar un efecto de quelado de los iones metálicos unidos a los grupos fosfato por parte de los grupos hidroxilo y carboxilo presentes en los ácidos orgánicos (Sahoo y Gupta, 2014).

Todo este proceso convierte el fósforo a formas solubles como fosfatos dibásicos y monobásicos (Ecuación 2). Las plantas pueden incorporar estas formas químicas y

destinarlas a procesos de fotosíntesis o conformación de ácidos nucleicos (Khan et al., 2014).

### **Ecuación 2 Solubilización de fósforo en microorganismos**



Otro mecanismo de solubilización de fósforo es la producción de enzimas fosfatasas, que se activan cuando en el suelo hay presencia de compuestos como humus, estiércol, coloides y residuos vegetales, que contienen fosfato orgánico. La solubilización del fósforo presente en el fosfato orgánico ocurre por la hidrólisis enzimática de las fosfomonoesterasas (Sharon et al., 2016).

Como resultado de la desfosforilación del fosfato orgánico se obtiene el fósforo inorgánico soluble, para que pueda ser asimilado por las plantas (Walia et al., 2017). Entre las especies con mejores rendimientos en absorción de fosfato están, *Kluyvera cryocrescens*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus atrophaeus* y *Paenibacillus macerans*. La capacidad máxima de solubilización que se reporta es 116 mg P/L (Vandana et al., 2017).

#### **2.2.4 Bacterias solubilizadoras de potasio**

El potasio se involucra en procesos de activación enzimática y degradación de azúcares. En el suelo existen reservas de este elemento en la superficie arcillosas y feldespato, pero no pueden ser absorbidas por las plantas. Por tal motivo, las bacterias juegan un rol importante en la absorción de este mineral. Estas tienen de la capacidad de solubilizar el potasio mineral del suelo, que se encuentra en la mica y la biotita (Jiménez et al., 2020).

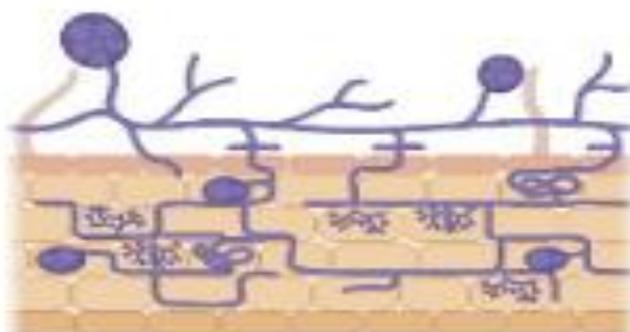
El mecanismo celular para este proceso es la producción de ácidos orgánicos como el ácido málico, cítrico y tartárico (Bahadur et al., 2019). Estos compuestos disminuyen el pH del suelo y rompen los minerales de potasio desencadenando una liberación lenta de formas de potasio solubles en agua que las plantas puedan incorporar (Rajawat et al., 2019). Las especies registradas como solubilizadoras de potasio son *Bacillus circulans*, *Bacillus edaphicus*, *Burkholderia sp.*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Arthrobacter sp.*, *Paenibacillus mucilaginosus*, *P. frequentans*, *P. glucanolyticus*, *Cladosporium sp.*, *Aminobacter sp.*, *Sphingomonas sp.*, y *Enterobacter hormaechei* (Maçik et al., 2020).

## 2.3 Biofertilizantes fúngicos

### 2.3.1 Hongos Micorrícicos Arbusculares (HMA) como biofertilizantes

Los Hongos Micorrícicos Arbusculares (HMA) forman relaciones simbióticas mutualistas con el 90% de las raíces de las plantas, específicamente con el sistema radicular pivotante (Figura 6). Dicha asociación planta-hongo contribuye a mejorar la absorción de nutrientes y el desarrollo del hospedero mediante la secreción de sustancias reguladoras de crecimiento vegetal (Vigneron et al., 2018). Todo esto sucede mientras los HMAs toman de las raíces de las plantas carbono, aminoácidos y péptidos para el desarrollo normal su metabolismo (Mohammadi, 2017).

Adicionalmente, los HMAs reducen el estrés de las plantas generada por una carga elevada de macronutrientes como Zinc (Zn), Cu (Cobre), Fe (Hierro) y Manganeseo (Mn), evitando su acumulación en tejidos vegetales mediante diversos mecanismos de desintoxicación (Ruytinx et al., 2020).

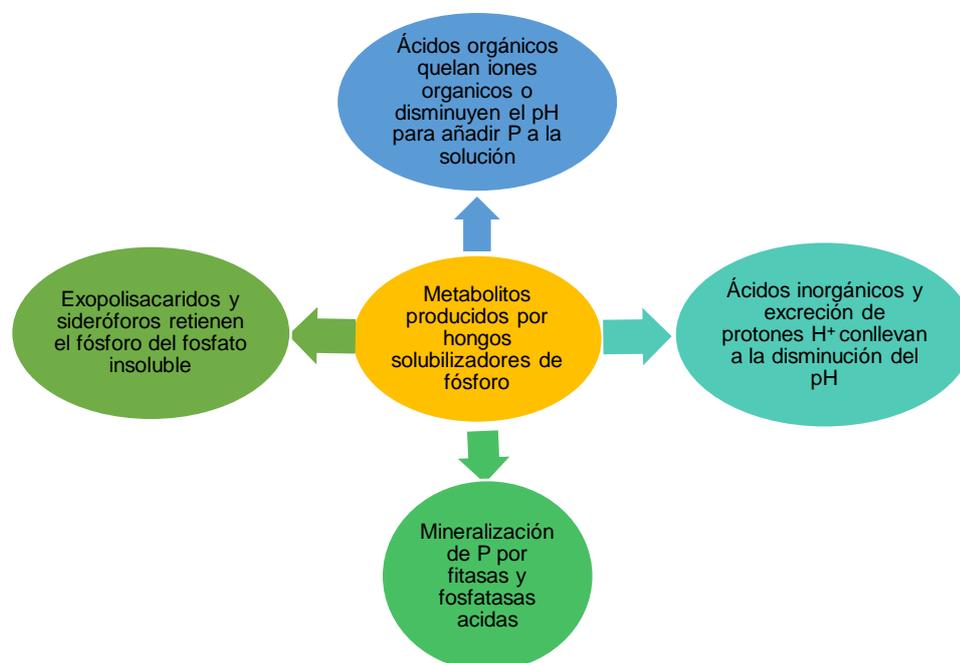


**Figura 6** Colonización de raíces por parte de Hongos Micorrícicos Arbusculares. Tomado de Walia et al., 2017.

#### 2.3.1.1 Mecanismos de solubilización de fósforo por HMAs

Los hongos solubilizadores de fósforo, que constituyen solo el 0.5-1% de la población fúngica, son capaces de mejorar la absorción y transferencia de este elemento en las raíces de sus hospederos, al aumentar el área de absorción y alterar el pH del suelo. Es importante destacar que los mecanismos de solubilización de fósforo difieren según si se encuentra en formas orgánicas o inorgánicas (Cavagnaro et al., 2015).

En este contexto, los hongos disponen de una serie de recursos para transformar dicho elemento a formas químicas asimilables para las células vegetales. Entre estos mecanismos se encuentran la liberación de enzimas extracelulares y síntesis de iones hidroxilo, ácidos orgánicos, sideróforos y exopolisacáridos (Figura 7) (Kumar et al., 2015; Torres y Reyes, 2014).



**Figura 7** Mecanismos de solubilización de P en hongos. Adaptado de (Walia et al., 2017).

Para la solubilización de fosfato inorgánico, los hongos segregan diferentes ácidos orgánicos del área externa a la membrana plasmática como el ácido láctico, glucónico, cítrico, tartárico, fumárico, entre otros similares a los existentes en las bacterias que realizan la misma actividad (Tabla 1).

Sin embargo, la eficiencia de estos ácidos en el proceso depende de la cantidad de grupos hidroxilo y carboxilo que contenga, así como su estabilidad para formar complejos metal-orgánicos, y hasta la actualidad diferentes autores atribuyen al ácido glucónico como el mejor (Chen y Liu, 2019).

Posterior a su liberación, el ácido orgánico quelata los cationes enlazados al fósforo e intercambia los grupos de anión fosfato separando el fósforo soluble. Una vez transformado el fósforo (soluble) es capturado por las raíces y en el caso de las

asociaciones micorrícicas es transportado por las arbusculas a vesículas de almacenamiento especializadas (Dhir, 2017b).

**Tabla 1** Ácidos secretados por los principales hongos solubilizadores de fósforo.

Adaptado de Walia et al., 2017.

Hongos solubilizadores de fósforo	Ácidos orgánicos producidos
<i>Aspergillus flavus</i> , <i>A. candidus</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. terreus</i> , <i>A. wentii</i> , <i>Fusarium</i> <i>oxysporum</i> , <i>Penicillium</i> sp., <i>Trichoderma</i> <i>isridae</i>	Láctico, málico, acético, tartárico, cítrico, fumárico, glucónico
<i>Aspergillus flavus</i> , <i>A.niger</i> , <i>Penicillium</i> <i>canescens</i>	Oxálico, cítrico, glucónico, succínico, málico, glucónico, oxálico

En el caso de la solubilización de fósforo orgánico se realiza mediante la producción de enzimas extracelulares como fitasas, fosfonatasas y fosfatasas (Behera et al., 2014). De estas últimas, las fosfomonoesteresas son el grupo más reconocido en este proceso y actúan en la materia orgánica, hidrolizando o desfosforilando los enlaces de tipo fosfoéster o fosfoanhídrido, con el fin de liberar el fósforo soluble (Berruti et al., 2015).

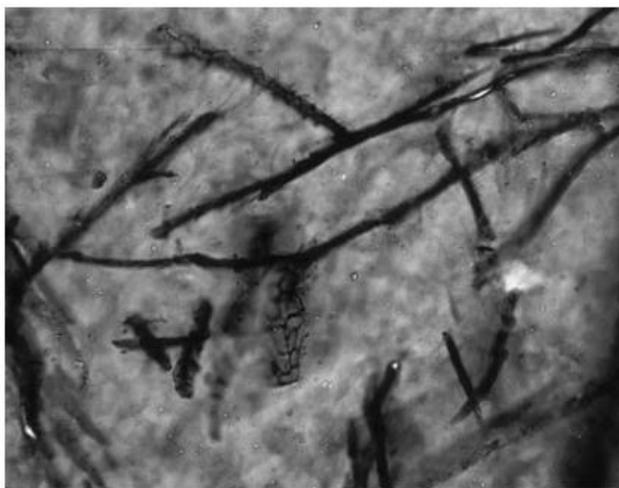
También las raíces de las plantas producen este tipo de enzimas, pero se ha comprobado que las de origen microbiano tienen más afinidad con este sustrato (fósforo orgánico) (Singh, 2019). Otra fuente de fósforo que representa el 50% del total contenido en el suelo, es el fitato, que se almacena en las semillas y polen de las plantas, dicho compuesto es hidrolizado por las enzimas fosfatasas para separar la forma soluble de fósforo para las especies vegetales (Kumar , 2016).

Entre las principales generos solubilizadores de fósforo orgánico se encuentran : *Achrothcium*, *Alternaria*, *Arthrobotrys*, *Aspergillus*, *Cephalosporium*, *Cladosporium*, *Curvularia*, *Cunninghamella*, *Chaetomium*, *Fusarium*, *Glomus*, *Helminthosporium*, *Micromonospora*, *Mortierella*, *Myrothecium*, *Oidiodendron*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Phoma*, *Pichia fermentans*, *Populospora*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, *Rhizopus*, *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces*, *Schwanniomyces*, *Sclerotium*, *Torula*, *Trichoderma* y *Yarrowia* (Restrepo et al., 2015).

### 2.3.1.2 Mecanismos fúngicos de solubilización de Potasio

Los organismos fúngicos liberan el potasio de su forma mineral presente en el suelo mediante hidrólisis ácida, reacciones de quelación y secreción de polímeros similar a los mecanismos de las bacterias (Nelofer et al., 2016). En este sentido, se conoce que los hongos producen ácidos orgánicos como el oxálico y protones  $H^+$  en el suelo de la rizosfera para disminuir el pH y transformar el potasio presente en feldespato ( $KAlSi_3O_8$ ), ilita ( $KH_3O$ ), albita ( $NaAlSi_3O_8$ ) o polvos de roca de silicato en forma de cationes asimilables para las plantas (Devi et al., 2020).

Adicionalmente, los hongos pueden ejercer mecanismos físicos para reducir el tamaño de las partículas en los minerales que contienen potasio y formar superficies con mejor reactividad (Meena et al., 2013). De igual forma, algunas especies de hongos micorrícicos solubilizan formas minerales complejas de potasio, como la hornblenda, para su huésped. Esto lo consiguen mediante la excreción de compuestos orgánicos con bajo peso molecular, por las puntas de sus hifas, las cuales que generan túneles microscópicos acelerando la velocidad de erosión de dichos minerales (Figura 8) (Prajapati et al., 2012).



**Figura 8** Micrografías electrónicas que muestran la penetración de las hifas arbusculares en minerales de K. Tomado de van Schöll et al., 2008.

## 2.4 Otros biofertilizantes microbianos

### 2.4.1 Cianobacterias como potenciales biofertilizantes

Las cianobacterias son organismos unicelulares autótrofos que viven en ecosistemas acuáticos y hasta la actualidad se han identificado 150 géneros. Las

cianobacterias se consideran como potenciales biofertilizantes, por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico. Las especies más eficientes con respecto a fijación de Nitrógeno son *Nostoc linkia*, *Anabaena variabilis*, *Aulosira fertilissima*, *Calothrix sp.*, *Tolypothrix sp.*, y *Scytonema sp.*, las cuales presentan rendimientos de 20 hasta 60 kg de N/ha (Chittora et al., 2020).

Al uso de cianobacterias como biofertilizantes se le atribuye múltiples beneficios adicionales a la fijación de Nitrógeno, la secreción de metabolitos secundarios que actúan como hormonas de crecimiento, transporte de nutrientes y mejoran la materia orgánica del suelo (Joshi et al., 2020). De igual forma, los extractos de Cianobacterias tienen propiedades de biocontrol, por la presencia de compuestos como los polifenoles y ácido benzoico, los cuales actúan como bactericidas e insecticidas, respectivamente (Guo et al., 2020).

#### **2.4.1.1 Cianobacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre**

Estas Cianobacterias se caracterizan por fijar nitrógeno y carbono atmosférico. Benefician al suelo porque aumenta su valor nutricional de materia orgánica y nitrógeno. Se pueden encontrar principalmente en los campos de arroz donde sus condiciones fisiológicas son óptimas. Entre las especies principales se encuentran *Aphanothece*, *Gloeocapsa*, *Microcystis*, *Chroococcus Oscillaroria*, *Plectonema*, *Lyngbya*, *Anabaena*, *Aulosira*, *Calorhrix*, *Cylindrospermum*, *Camptylonema*, *Fiscerella*, *Gloeotrichia*, *Mastigocladus*, *Nostoc*, *Nodularia*, *Nostochopsis*, *Rivularia*, *Scyronema*, *Westiella* (Syiem et al., 2017).

#### **2.4.1.2 Cianobacterias fijadoras de nitrógeno simbióticas**

Las Cianobacterias pueden formar relaciones simbióticas con organismos fotosintéticos y no fotosintéticos. La principal relación asociativa es *Azolla-Anabanea* en los cultivos de arroz. La microalga *Anabaena azollae* se asocian con la especie de helecho de agua *Azolla pinnata*. En esta asociación, la microalga atrapa el nitrógeno atmosférico y lo transfiere al helecho de agua, mientras este toma carbohidratos esenciales para cumplir con sus requerimientos nutricionales (Kuraganti et al., 2020). Como resultado de esta interacción, se incrementan los rendimientos en los cultivos de arroz y al mismo tiempo regula el pH y temperatura del agua (Jarrín et al., 2016).

### **2.5 Beneficios de uso de biofertilizantes en los cultivos**

### **2.5.1 Reducción de óxido nitroso (NO<sub>2</sub>)**

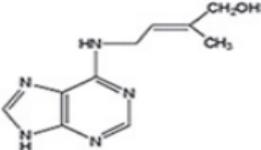
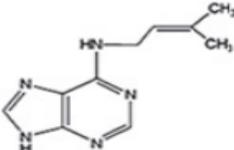
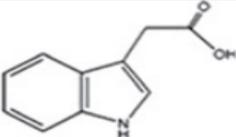
El óxido nitroso se produce en los procesos de nitrificación y desnitrificación que forman parte del ciclo del nitrógeno (An et al., 2021). Sin embargo, es un gas de efecto invernadero producido en suelos agrícolas fertilizados con productos de síntesis químicas ricos en nitrógeno. Las plantas tratadas con nitrógeno mineral solo utilizan hasta un 30% de las dosis administradas, mientras el resto es convertido en NO<sub>2</sub> por microorganismos aeróbicos presentes en suelos (Tonhauzer et al., 2020). En este contexto, se ha demostrado que los biofertilizantes de HMAs pueden reducir hasta en 46% las emisiones de NO<sub>2</sub> en suelos tratados con urea, debido a que las hifas fúngicas superan en la competencia por NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a los microorganismos nitrificantes (Teutscherova et al., 2019).

### **2.5.2 Producción de fitohormonas**

Otra ventaja de los biofertilizantes microbianos es la liberación de fitohormonas que son productos del metabolismo secundario como las auxinas y citoquininas, de vital importancia en las plantas (Tabla 2). Las auxinas son sintetizadas por los microorganismos en presencia del triptófano, existente en los exudados de las raíces (Fahad et al., 2015). Estas moléculas (auxinas) participan en la división y diferenciación de células vegetales, germinación de semillas, aumento del xilema y promoción del sistema radicular (Mahanty et al., 2017).

Las citoquininas activan la división celular y regulan el crecimiento de tejidos y órganos vegetales. De igual forma, influyen en la formación de la estructura vascular embrionaria, señalización nutricional, expansión de las hojas y producción de clorofila (Tomer et al., 2016).

**Tabla 2** Moléculas de las fitohormonas producidas por los biofertilizantes microbianos.  
Adaptado de Wong et al., 2015.

Citoquininas	Molécula
Trans-zeatin (tz) N <sup>6</sup> -(2-Isopentil)-adenina	 <p style="text-align: center;">tz</p>
	 <p style="text-align: center;">iP</p>
Auxinas	Molécula
Ácido indol-3-acético (IAA)	 <p style="text-align: center;">IAA</p>

Otro beneficio que se le atribuye a la aplicación de biofertilizantes es la reducción de estrés abiótico, que en producción agrícola a gran escala puede generar pérdidas económicas considerables (Chávez et al., 2012). Ante esta situación (estrés abiótico), las plantas tienen diferentes mecanismos de respuesta como es el caso del aumento en la síntesis de etileno. En este contexto, la aplicación de biofertilizantes reduce la respuesta al estrés disminuyendo los niveles de etileno y promoviendo el crecimiento radicular. También, mejoran la resistencia a metales pesados como el calcio y níquel en los tejidos vegetales (Ihsan et al., 2019).

### 2.5.3 Biocontrol

Los biofertilizantes microbianos ofrecen a las plantas mecanismos de resistencia ante los ataques de fitopatógenos, mediante la producción de metabolitos secundarios que actúan como antifúngicos; entre estos encontramos: viscosinamida, fenazinas, pioleorina, pirrolnitrina, gliotoxina y gliovirina (Pirttilä et al., 2021). Así mismo, las

bacterias empleadas como biofertilizantes pueden segregar una variedad de enzimas hidrolíticas como lipasas, proteasas y glucanasas que generan lisis celular en hongos. Por otra parte, también se ha reportado la producción de antibióticos que inhiben el crecimiento bacteriano como iturinas, micosubtilina D, surfactina, fengycina, zwittermicina (Shaikh y Sayyed, 2015).

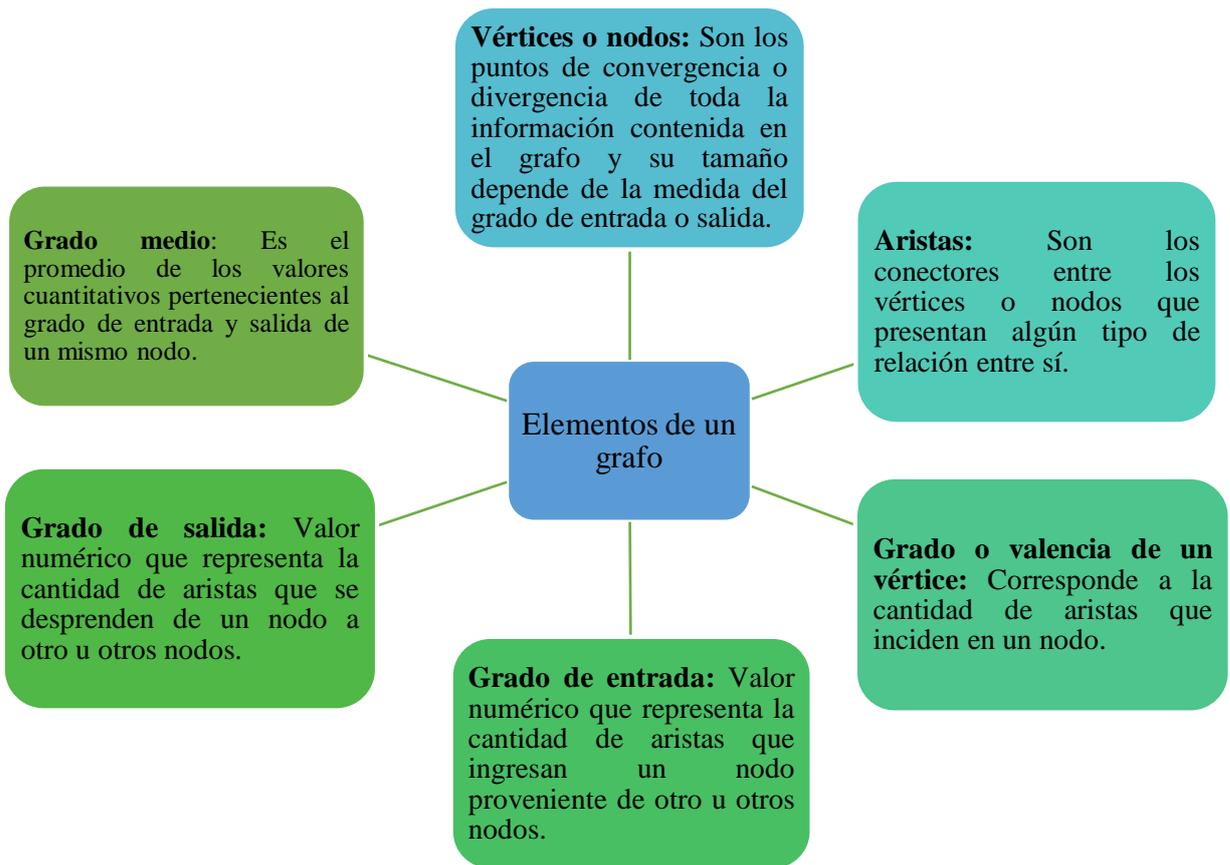
#### **2.5.4 Biodiversidad del suelo**

La aplicación de biofertilizantes microbianos, además de aumentar la disponibilidad de nitrógeno y fósforo soluble en el suelo, mejora significativamente la materia orgánica disponible en rizosfera hasta en 75%, y la capacidad de retención hídrica. Así mismo, con el metabolismo de los microorganismos inoculados, es posible regular el pH en suelos alcalinos debido a la producción de ácidos orgánicos. En combinación, todas estas condiciones mencionadas anteriormente favorecen el aumento en diversidad y número de microorganismos nativos (González et al., 2013; Sharma et al., 2012).

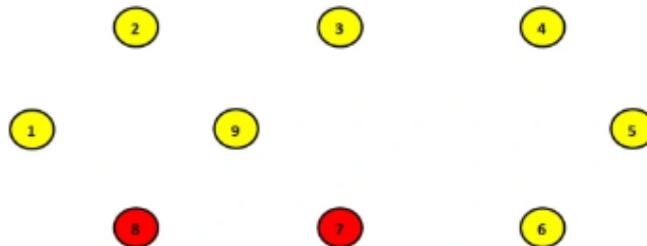
### **2.6 Herramientas informáticas para el análisis de datos cualitativos y cuantitativos**

#### **2.6.1 Grafos y componentes de un grafo**

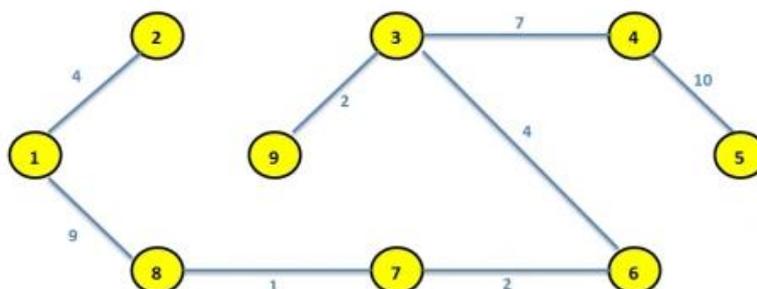
Los grafos son representaciones gráficas que permiten analizar las relaciones entre un conjunto de objetos mediante aristas que los conectan (Montebello, 2016). A pesar de su aparente simplicidad, los grafos son ampliamente utilizados para modelar información compleja en diversas áreas del conocimiento (Bianco, 2016). Los componentes principales de un grafo y sus tipos según Tsagkis et al., 2022 se resumen en las Figuras 9-12.



**Figura 9** Elementos principales de un grafo.

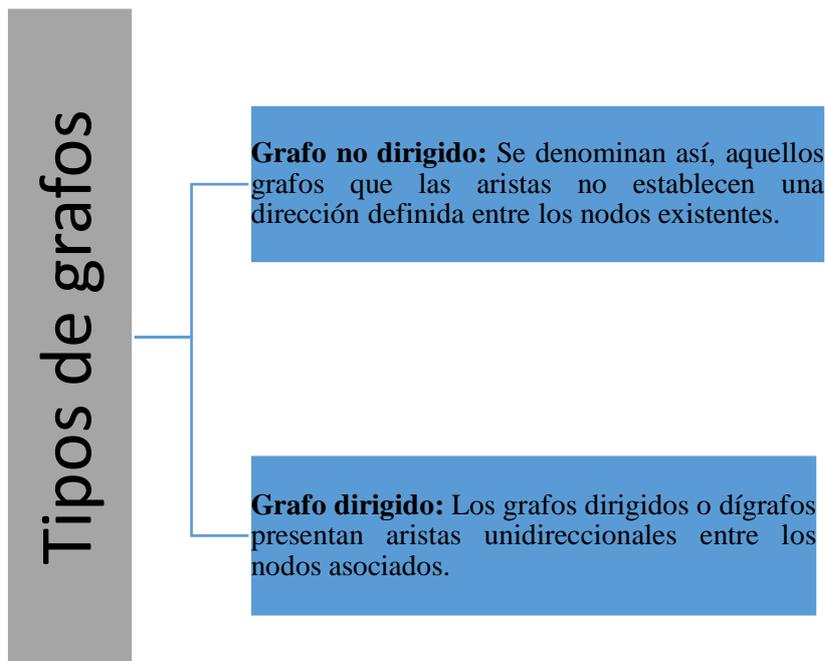


**Figura 10** Vértices o nodos que componen a un grafo. Tomado de Arias, 2012.

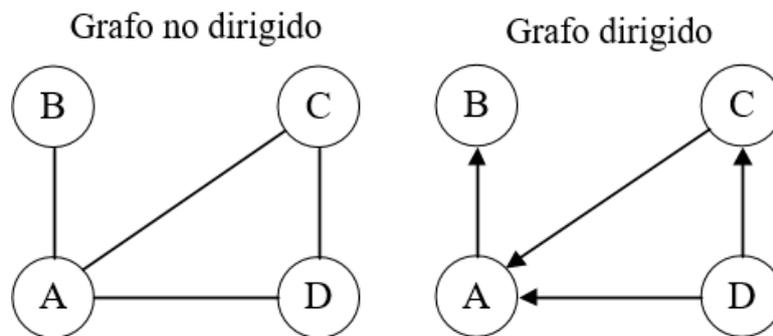


**Figura 11** Aristas que conectan los nodos en un grafo. Tomado de Arias, 2012.

## Tipos de grafos



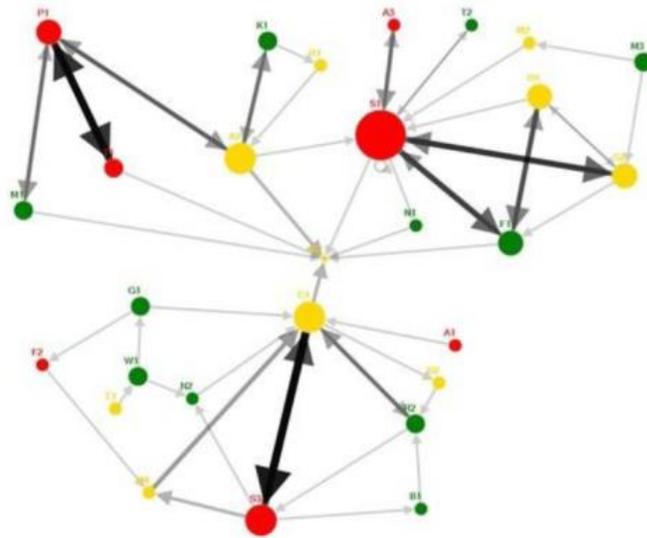
*Figura 12* Tipos de grafos.



**Figura 13** Diferencias entre un grafo dirigido y no dirigido. Tomado de Bianco, 2016.

### 2.6.2 Redes sociales artificiales

Las redes sociales artificiales (RSA) se definen como una interacción estadística entre un grupo de datos complejos que se visualizan mediante un grafo, agrupándose en forma de nodos. En función de su importancia y la relación existente entre estos, se representa mediante aristas (Figura 14) (Sallaberry et al., 2013). La estructura y la disposición de los elementos que conforman la RSA se encuentra estrechamente vinculada con los diversos algoritmos existentes (Agarwal y Liu, 2009).



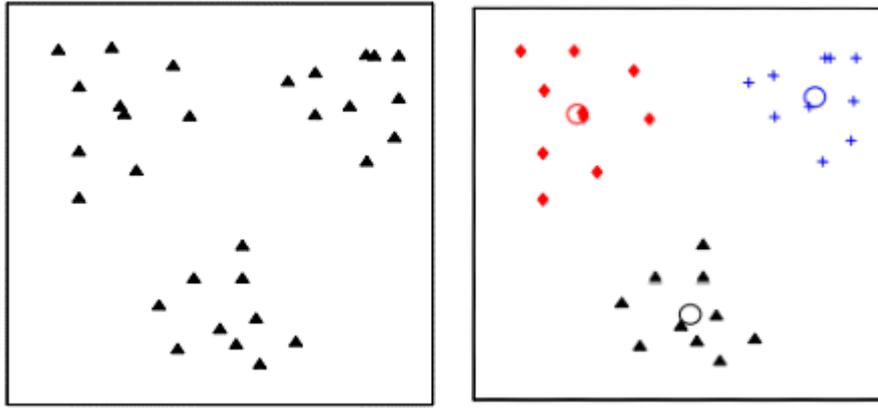
2016).

**Figura 144** Ejemplo de una Red Social Artificial. Tomado de Kuz et al., 2016.

En muchos casos la visualización de la RSA puede dificultarse en gran medida dependiendo el número de datos incluidos. Por tal motivo, existen diferentes algoritmos de distribución que mejoran la estética y simetría de la red como es el caso del algoritmo de Fruchterman y Reingold. el cual cambia la posición de cada nodo mediante múltiples iteraciones hasta encontrar la más óptima y evita el cruce entre enlaces, mientras mantiene el tamaño uniforme de los mismos (Schönfeld y Pfeffer, 2019).

### 2.6.3 Agrupación basada en algoritmos de clasificación

El análisis de conglomerados es una técnica del aprendizaje automático no supervisado que se utiliza para identificar subgrupos de datos en un conjunto de datos extenso, con el objetivo de dividirlos en diferentes conglomerados según un criterio de clasificación previamente establecido (Figura 15) (Wang y Biljecki, 2022). Existen varios algoritmos de clasificación basados principalmente en la jerarquía de datos, centroides, densidad y distribución. No obstante, el algoritmo más utilizado y fácil de comprender para datos aleatorios es el método K-means (Park et al., 2021).



**Figura 15** Ejemplo de un conjunto de datos agrupados mediante análisis de clúster. Tomado de Jain, 2010.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Revisión documental

El presente estudio recopiló información bibliográfica de artículos científicos en el periodo enero 2005 – junio 2022, con el fin de exponer antecedentes claros y reales de la aplicación de biofertilizantes microbianos en cultivos de importancia económica en América Latina.

##### 3.1.1 Búsqueda en bases de datos electrónicas

Inicialmente, se realizó una búsqueda de artículos científicos en siete bases de datos bibliográficas de amplio reconocimiento en el ámbito científico, como son: Web of Science, SpringerLink, Nature, ScienceDirect, Dialnet, Scielo y Pubmed. La búsqueda se realizó usando “Biofertilizers” como palabra clave, para evitar pérdida de información (Botella y Zamora, 2017).

##### 3.1.2 Selección de fuentes bibliográficas

En cada plataforma de búsqueda se estableció previamente el filtro correspondiente al tiempo de publicación (según lo descrito anteriormente) y se seleccionaron únicamente artículos experimentales. La eliminación de documentos duplicados se realizó mediante la herramienta web Rayyan.

Posteriormente, se procedió a cribar los estudios encontrados con base en los criterios de inclusión y exclusión (Tabla 3) que se establecieron para esta investigación (Meier, 2019). También, se empleó la declaración PRISMA para justificar la elegibilidad individual de los artículos analizados (Urrútia y Bonfill, 2010).

**Tabla 3** Criterios de inclusión y exclusión para la selección de artículos científicos

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
<ul style="list-style-type: none"><li>Publicaciones entre los años 2005-2022</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Artículos duplicados</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>Estudios realizados en América Latina</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Aplicación de biofertilizantes no microbianos</li></ul>

- Empleo de biofertilizantes microbianos
  - Datos de identificación de los microorganismos usados como biofertilizante (Género o especie).
  - Evaluación de los efectos generados del biofertilizante en variables como: rendimiento, altura de la planta, longitud de la raíz, biomasa y porcentaje de macronutrientes foliares (NPK).
  - Investigaciones sin identificación del microorganismo probado
  - Limitación de la evaluación únicamente en parámetros del fruto
- 

### 3.2 Análisis de datos obtenidos

En esta sección, se realizó la descripción, análisis e interpretación de todos los documentos recolectados en el proceso anterior. La finalidad fue destacar las propiedades y características de los diferentes biofertilizantes microbianos, así como su mecanismo de acción fisiológica al asociarse con las plantas. Además, se analizó los diferentes casos de estudio exitosos sobre la aplicación de estos en las actividades agrícolas de importancia económica en América Latina.

#### 3.2.1 Extracción de datos en las fuentes bibliográficas seleccionadas

Una vez seleccionados los artículos científicos, se realizó la lectura y extracción de los datos que se presentan en la Tabla 4. Los mismos fueron ordenados y almacenados en una matriz elaborada en una hoja de cálculo en el programa informático Excel (versión 2304).

**Tabla 4** Criterios de recolección y clasificación de datos aplicados a cada artículo

<b>Datos generales</b>	<b>Identificación de microorganismos empleados como biofertilizantes</b>	<b>VARIABLES agrícolas evaluadas en cada publicación</b>
Título	Microorganismo aplicado como biofertilizante	Rendimiento
Revista	Género y especie	Altura de la planta
Año de publicación		Longitud de la raíz
País		Biomasa seca total
		Biomasa seca de la raíz
		Nitrógeno foliar
		Fósforo foliar
		Potasio foliar

### 3.2.2 Tratamiento de datos

En lo que respecta a la información cualitativa almacenada en la matriz, se corrigió la sintaxis de todos los elementos y para el caso de microorganismos empleados, estos se codificaron como se representa en la Tabla 5.

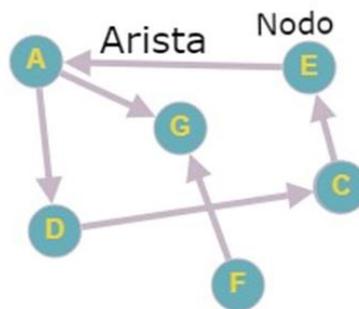
**Tabla 5** Codificación de microorganismos empleados en los artículos analizados.

<b>Microorganismo empleado</b>	<b>Género</b>	<b>Especie</b>
<i>Azospirillum brasiliense</i>	<i>Azospirillum</i>	<i>A. brasiliense</i>
En el caso de inoculación con más de un microorganismo	Consorcio	Consorcio

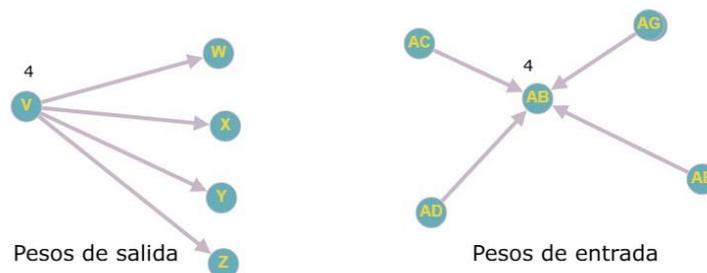
En relación con los datos numéricos pertenecientes a las variables agrícolas, se estandarizaron las unidades de medida de la siguiente forma: Rendimiento(kg/ha), Altura de la planta (cm), Longitud de la raíz (cm), Diámetro del tallo (mm), Área foliar (cm<sup>2</sup>), Biomasa seca total (g), Biomasa seca del tallo (g), Biomasa seca de la raíz (g), Biomasa fresca total (g), Nitrógeno foliar (%), Fósforo foliar (%), Potasio foliar (%).

### 3.3 Análisis de redes sociales

Las redes sociales artificiales (Figura 16) presentadas en este documento, fueron elaboradas con el programa Gephi (versión 0.9.7), mediante la generación de grafos dirigidos ponderados. En los nodos representados por circunferencias se encuentran los elementos del análisis y la relación que existen entre estos, se visualizan mediante las aristas (flechas). La ponderación del grafo (Figura 17) en cada nodo se realizó a partir de los pesos de entrada (número de veces que una arista apunta a un nodo) y salida (número de veces que una arista se desprende del nodo).



**Figura 16** Elementos de las redes sociales artificiales generadas.



**Figura 17** Pesos de salida y entrada en las redes sociales artificiales generadas

También, se empleó el método de mezclado correspondiente a la suma de nodos. Para mejorar la representación visual de la red, se escogió el algoritmo de poda

Fruchterman-Reingold (Álvarez y Aguilar, 2005). En total se realizaron 3 grafos que corresponden al análisis de redes que representa la relación entre géneros-especies, especie-cultivo y país-cultivo.

### **3.4 Cálculo del porcentaje de incremento de las variables agrícolas entre los cultivos inoculados y el grupo control**

Los datos de las variables agrícolas recopiladas previamente provinieron de diferentes artículos científicos experimentales, que evaluaron los inoculantes microbianos en diversas especies vegetales y condiciones ambientales. Por lo tanto, se utilizó la metodología presentada por Fuentes y Caballero, (2006) que se describe en la Ecuación 3. Dicho procedimiento consiste en el cálculo de un porcentaje de incremento entre los resultados numéricos de aplicación del biofertilizante microbiano en determinado cultivo vegetal frente al control.

*Ecuación 3 Porcentaje de incremento de variable agrícola en la especie vegetal inoculada y su control*

$$D(\%) = \frac{I-C}{C} * 100$$

Donde:

D (%) = Porcentaje de incremento de variable agrícola en la especie vegetal inoculada y su control.

I= Valor numérico procedente de la variable de cultivo evaluada en determinada especie vegetal con inoculación microbiana.

C= Valor numérico procedente de la variable de cultivo evaluada en determinada especie vegetal sin inoculación microbiana.

### **3.5 Análisis Multivariado con los parámetros agronómicos extraídos**

En esta sección se realizó una clasificación en grupos de comportamientos similares a los microorganismos de mayor importancia en los artículos científicos estudiados en América Latina. El punto de inicio fue la elaboración de una matriz de datos en Excel con todos los porcentajes de incremento correspondientes a los parámetros agronómicos como: Rendimiento, Altura, Longitud de la raíz, diámetro del Tallo, Biomasa Seca Total, Macronutrientes NPK Foliare y los géneros microbianos, con los cuales se obtuvieron estos efectos en diversos cultivos vegetales.

### **3.5.1 Análisis de conglomerados por géneros microbianos**

Con la matriz de variables cuantitativas generada en el apartado anterior, se elaboró un análisis de conglomerados jerárquicos en el programa INFOSTAT (versión 2017.1.2). En cuanto a la medida de distancia se estableció la Distancia Euclídea al cuadrado, debido a que se trató con datos cuantitativos. De igual manera, para conseguir conglomerados compactos y de gran tamaño se seleccionó el método de clasificación de Ward (Sakr y Zomaya, 2019). Finalmente, para visualizar los niveles de similitud entre los conglomerados formados, se elaboró un dendrograma (Figura 20).

### **3.5.2 Análisis de Componentes Principales**

El Análisis de Componentes Principales se efectuó en el software estadístico INFOSTAT (versión 2017.1.2) con la matriz de datos construida previamente. Para iniciar, se seleccionaron todas las variables cuantitativas para la ejecución del algoritmo. Con respecto a la opción de descriptivos, se marcaron las opciones de matriz de correlaciones y la prueba de KMO con un nivel de significancia igual a 0,05. Este estadístico muestra la proporción de varianzas entre los parámetros indicados previamente con el fin de detectar idoneidad para la formación de componentes principales (Jang, 2021).

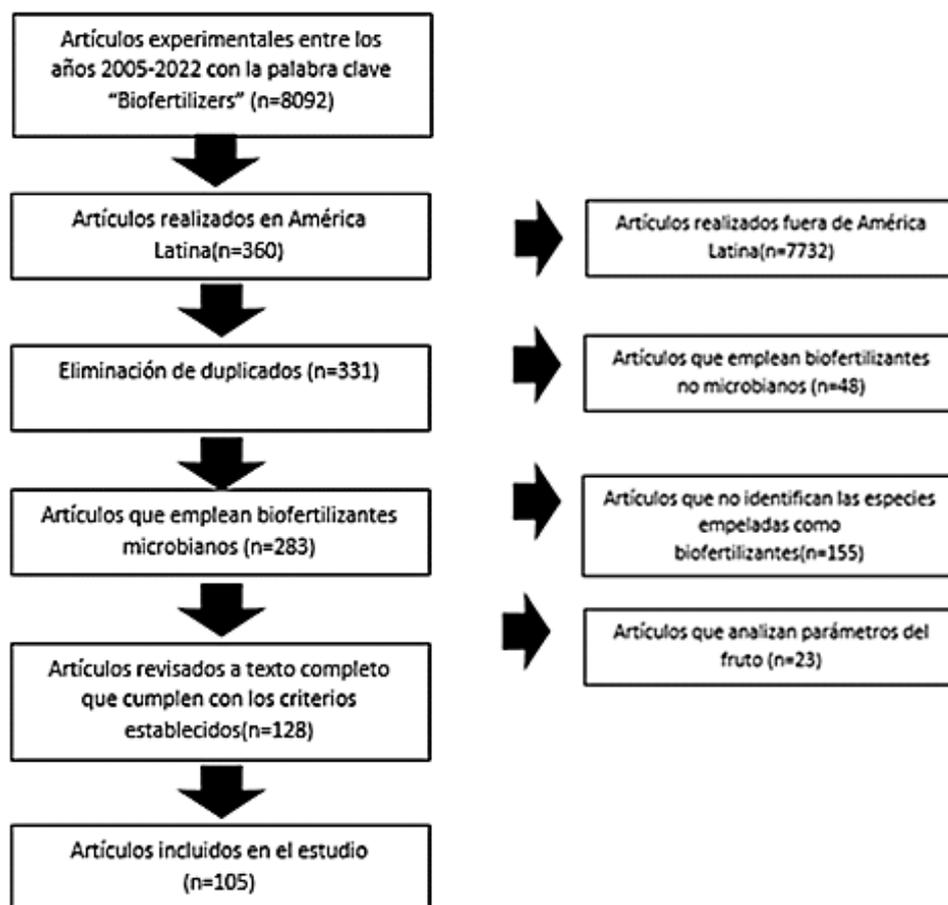
En el proceso de extracción de componentes principales se eligió el criterio de valores propios mayores que uno. Posteriormente, con las puntuaciones factoriales del número de componentes generadas, se elaboró un gráfico tipo Biplot que represente la distribución de las variables y géneros microbianos (Salvatore et al., 2016).

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Revisión documental

Utilizando la palabra clave “Biofertilizers”, con el filtro de selección en artículos de tipo experimental entre los años 2005-2022, se encontró un total de 8092 referencias. Las cuales se distribuyeron en seis bases de datos bibliográficas: Web of Science (491), SpringerLink (3010), Nature (73), ScienceDirect (2953), Dialnet (369), Scielo (253), Pubmed (1434). Aplicando los criterios de inclusión y exclusión detallados previamente en la metodología, se obtuvo 105 estudios que fueron tomados en cuenta para el análisis. A continuación, en la Figura 18, se resume dicho proceso.



**Figura 18** Diagrama de flujo para la estrategia de selección de fuentes bibliográficas

## **4.2. Identificación de microorganismos utilizados como biofertilizantes en los estudios seleccionados**

En la Figura 19, se presenta un análisis de redes artificiales con todos los microorganismos empleados como biofertilizantes en cada una de las publicaciones integradas a la investigación. Estos fueron separados en géneros y especies, mismos que se evaluaron a partir de los pesos de salida y entrada respectivamente. En cada circunferencia se encuentran los géneros hallados, mientras más grande sea el tamaño de su diámetro mayor es el peso de salida correspondiente. Por lo tanto, se encontró que en las publicaciones evaluadas predominó el uso de Consorcios, es decir, la co-inoculación de dos o más microorganismos, presentando el peso de salida más alto, correspondiendo a 25.

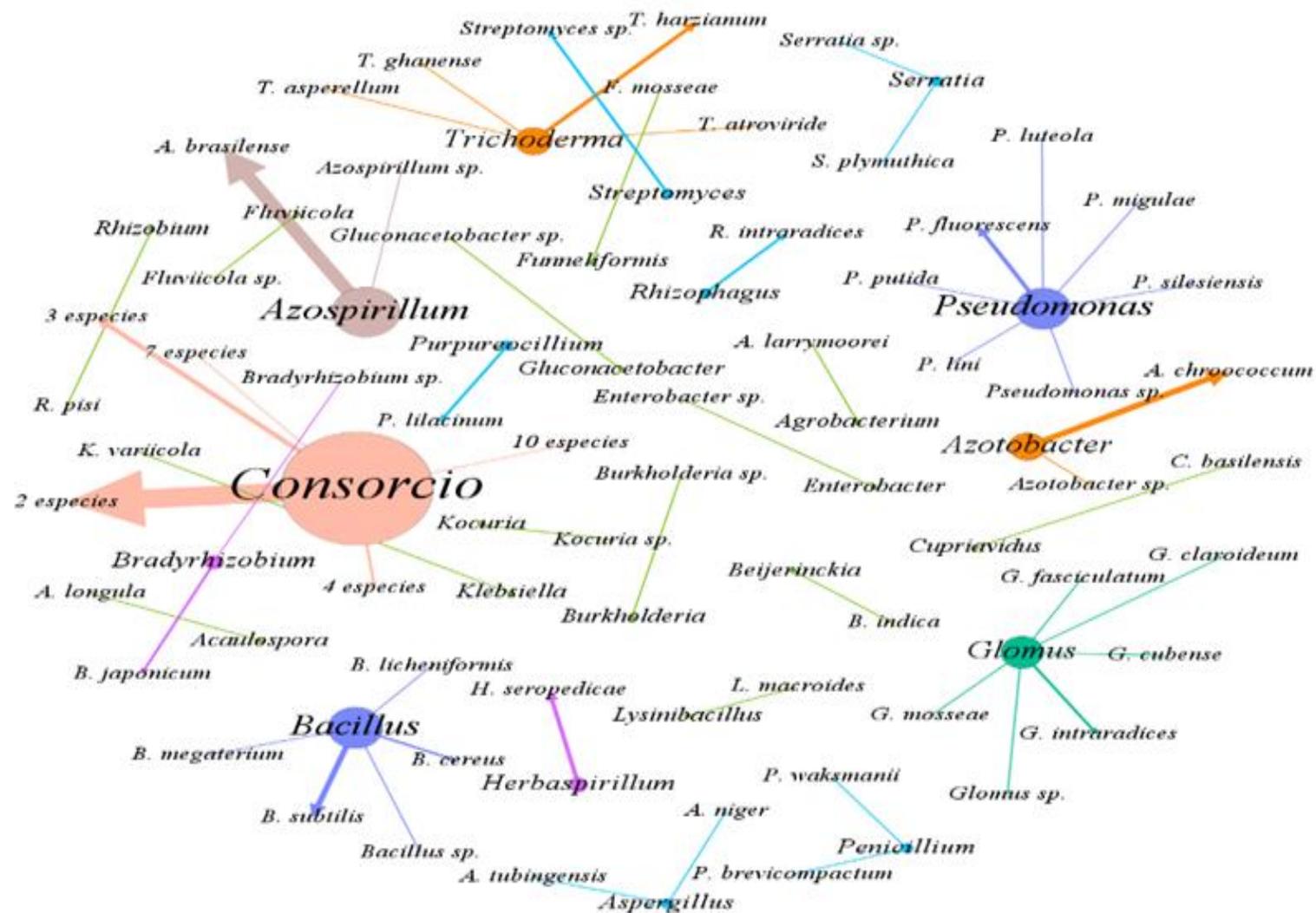
Esto se debe a que en la naturaleza, los microorganismos del suelo se encuentran en comunidades y mediante la co-inoculación se pretende replicar estas condiciones, y los investigadores esperan mejores resultados en comparación a la inoculación individual (Gómez et al., 2021). En este sentido, la combinación de microorganismos en la rizosfera procura aunar los beneficios de cada especie microbiana presente en el consorcio (Sarma et al., 2015).

Estas interacciones podrían generar efectos sinérgicos positivos, por la variedad de mecanismos de promoción vegetal y absorción de nutrientes, por lo cual mejorarían el crecimiento y calidad de las plantas (Emmanuel y Babalola, 2020). Además, Cappellari et al., (2015) sugieren que la inoculación de consorcios en cultivos vegetales debe realizarse con microorganismos nativos del suelo en el cual se va a experimentar. Puesto que dichos microorganismos están adaptados al entorno y son intrínsecamente más competitivos por los nutrientes en comparación a cepas endógenas.

Con respecto a las especies que formaron parte de los consorcios encontrados en los artículos científicos examinados, se detallan en la Tabla 6. Se observó una diversidad de combinaciones entre bacterias pertenecientes al mismo género o diferentes géneros, hongos micorrícicos y hongos filamentosos, y en algunos casos, combinación de ambos, tanto hongos como bacterias.

Con relación a la inoculación de cepas bacterianas pertenecientes a diferentes géneros, se ha reportado que las plantas incrementan los niveles de carbohidratos y

proteínas, así como biomasa. Estos efectos se atribuyen a la optimización de la fijación de nitrógeno y producción de IAA (de Andrade et al., 2019).



**Figura 19** Análisis de redes de los microorganismos usados como biofertilizantes de los artículos incluidos en el estudio.

Aunque la co-inoculación se realice con especies pertenecientes a grupos taxonómicos diferentes, algunos estudios sugieren que la simbiosis micorrícica puede mejorarse al inocular ciertas especies bacterianas, especialmente aquellas del género *Pseudomonas*. Según Rigamonte et al. (2010), estas bacterias pueden estimular el crecimiento de las hifas y facilitar su entrada en las raíces de la planta. Además, la literatura disponible indica que las bacterias Gram positivas tienen una mayor afinidad con las esporas de HMAs, tal como lo sugieren Selvakumar et al. (2016) y Xie et al. (2018).

Los mecanismos de interacción entre bacterias y hongos no se han comprendido por completo, pero Poveda y Eugui (2022) señalan que, el crecimiento de las plantas mediante la inoculación de consorcios con estas cepas microbianas, se debe a la absorción de nutrientes como fósforo y nitrógeno, así como la inhibición de hongos fitopatógenos. No obstante, Velmourougane et al., (2017) sugieren la importancia de ensayos in vitro que demuestren la compatibilidad entre estas especies previo a la inoculación en organismos vegetales. Para demostrar la compatibilidad, deben formarse biopelículas en el que las bacterias coexistan con las capas de micelio fúngico.

**Tabla 6** Microorganismos que participaron en cada consorcio microbiano presentado en los estudios analizados.

<b>Identificación</b>	<b>Microorganismos</b>
Consorcio 1	<i>Pseudomonas fluorescense</i> + <i>Azotobacter chococum</i>
Consorcio 2	<i>Glomus fasciculatum</i> + <i>Scutellospora heterogama</i> + <i>Glomus mosseae</i> + <i>Glomus manihotis</i> + <i>Acaulospora rugosa</i> + <i>Entrophospora colombiana</i>
Consorcio 3	<i>Glomus fasciculatum</i> (Hoi like) + <i>Rhizobium leguminosarum</i>
Consorcio 4	<i>Azospirillum brasilense</i> + <i>Rhizoglomus irregulare</i>
Consorcio 5	<i>Glomus intrarradices</i> + <i>Azotobacter sp.</i> + <i>Azospirillum sp.</i>
Consorcio 6	<i>Azospirillum brasilense</i> + <i>Chromobacterium violaceum</i>

- Consorcio 7 *Rhizobium leguminosarum* + *Rhizophagus irregularis*  
 Consorcio 8 *Bacillus flexus* + *Bacillus megaterium*  
 Consorcio 9 *Azotobacter vinelandii* + *Bacillus cereus* + *Bacillus licheniformis* + *Pseudomonas fluorescens* + *Glomus fasciculatum* + *Scutellospora heterogama* + *Glomus mosseae* + *Glomus manihotis* + *Acaulospora rugosa* + *Entrophospora colombiana*  
 Consorcio 10 *Glomus intraradices* + *Azospirillum brasilense*  
 Consorcio 11 *Bacillus velezensis*, *Bacillus subtilis* + *Azospirillum brasilense*  
 Consorcio 12 *Azotobacter vinelandii* + *Penicillium sp.*  
 Consorcio 13 *Rhizobium leguminosarum* + *Bacillus subtilis* + *Lactobacillus bulgaricus* + *Saccharomyces cerevisiae*  
 Consorcio 14 *Glomus intraradices* + *Azotobacter chroococcum*  
 Consorcio 15 *Gigaspora sp.* + *Glomus sp.*  
 Consorcio 16 *Rhizobium leguminosarum* + *Spirulina*  
 Consorcio 17 *Glomus mosseae* + *Bradyrhizobium japonicum*  
 Consorcio 18 *Bradyrhizobium elkanii* + *Glomus hoi like*  
 Consorcio 19 *Bacillus subtilis* + *Lactobacillus bulgaricum* + *Saccharomyces cereviciae*  
 Consorcio 20 *Azospirillum brasilense* + *Glomus intraradices*  
 Consorcio 21 *Acaulospora mellea* + *Acaulospora scrobiculata* + *Claroideoglomus etunicatum* + *Funneliformis geosporum*  
 Consorcio 22 *Bacillus sp.* + *Azospirillum brasilense* + *Rhizophagus intraradices*  
 Consorcio 23 *Sinorhizobium meliloti* + *Pseudomonas sp.*  
 Consorcio 24 *Azotobacter sp.* + *Glomus cubense*  
 Consorcio 25 *Azospirillum sp.* + *Pseudomonas fluorescens*
-

Sin embargo, es preciso señalar que no todas las combinaciones pueden generar estimulaciones positivas en las plantas inoculadas en comparación con la aplicación individual de agentes microbianos (Jansa et al., 2008). Al formarse consorcios complejos que impliquen más de dos microorganismos, se dificulta la comprensión de los mecanismos de acción entre las especies involucradas y el resultado podría ser incierto (Couillerot et al., 2013).

Los dos factores más importantes que podrían afectar la sinergia en los consorcios microbianos, por un lado, es la competencia por los exudados de las raíces pertenecientes a la planta hospedera o los nutrientes disponibles en el suelo. Por otro lado, la producción de metabolitos secundarios por parte de las cepas microbianas involucradas en el consorcio como el 2,4-diacetilcloroglucinol (DAPG), las mismas que podrían anular el crecimiento de otras especies presentes (Meynet et al., 2011). De igual forma, un factor importante que influye en la respuesta de la inoculación mediante consorcios microbianos es el genotipo del cultivo utilizado y el tipo de suelo (Mohandas et al., 2013)

Con respecto a la interacción de los consorcios microbianos inoculados con las comunidades de microorganismo nativos del suelo, representan una competencia por los nutrientes disponibles, pero también facilitan el establecimiento de estos consorcios. Esto se debe a que las especies microbianas autóctonas modulan los ciclos biogeoquímicos e influyen en la dinámica de entrada y salida de nutrientes del suelo. (Camelo et al., 2011; Perdomo et al., 2017).

Por otro lado, en el análisis de los géneros de microorganismos inoculados de forma individual, con base a sus pesos de salida, se consiguieron los siguientes resultados: *Azospirillum* (11), *Bacillus* y *Pseudomonas* (9), *Glomus* (7), *Azotobacter* y *Trichoderma* (6), *Bradyrhizobium* y *Herbaspirillum* (3). Como se puede notar, el género *Azospirillum* ha sido empleado con mayor frecuencia. La primera descripción de este género data de 1925 por Beijerinck *Sprillum*, y posteriormente en 1973 los estudios taxonómicos de Peña- Cabriales y Dobereneir renombraron a este género como *Azospirillum* (Tarrand et al., 1978) y se han reportado hasta la actualidad 21 especies (Herrera et al., 2020).

Por lo tanto, en las últimas décadas se han realizado estudios a nivel fisiológico, genético y bioquímico que lo han convertido en el género más caracterizado. El conocimiento generado a partir de este género no brinda una idea más amplia de sus

mecanismos de asociación y promoción en plantas (Benizri y Baudoin, 2001; Somers et al., 2004).

También, se ha reportado la capacidad de *Azospirillum* para colonizar cientos de cultivos vegetales (Bashan y de-Bashan, 2010). Entre sus principales mecanismos se destacan la fijación biológica de nitrógeno (Cassán y Diaz, 2016) y la producción de reguladores de crecimiento vegetal como auxinas, giberelinas, citoquininas, etileno, ácido abscísico, óxido nítrico y poliaminas (Cassán et al., 2014). Las primeras pruebas de inoculación en campo de las que se tienen registro con este género, iniciaron en 1974 en el estado de Florida, Estados Unidos de América, los mismos que dieron paso a experimentos en países de América Latina (Tien et al., 1979).

De igual forma, en el análisis de las especies microbianas, en el grafo de la Figura 4, el grosor de las flechas representa los pesos de entrada correspondientes: *Azospirillum.brasilense* (10), *Azotobacter chroococcum* (5), *Bacillus subtilis* (4), *Herbaspirillum seropedicae* (3), *Trichoderma harzianum* (3), *Pseudomonas fluorescens* (3). Como se evidencia, *Azospirillum brasiliense* fue la especie más empleada como biofertilizante en los experimentos de las publicaciones estudiadas.

Las primeras cepas de *Azospirillum brasilense* fueron aisladas e identificadas en raíces de gramíneas provenientes de diferentes estados de Brasil como Rio de Janeiro y Brasilia a inicios de los años 70 (Tarrand et al., 1978). Esta especie se distribuye en diferentes zonas geográficas en el mundo y en condiciones tropicales, templadas y frías. En cuanto a las condiciones ambientales, la temperatura óptima para su supervivencia oscila entre los 32 hasta los 36 °C y el pH del suelo debe ser cercano a 7 (Nguyen et al., 2019).

*Azospirillum brasilense* es una bacteria de vida libre, que se caracteriza por ser fijadora biológica de nitrógeno con gran versatilidad de adaptarse a diferentes tipos de suelo y temperaturas ambientales, que, además, cuenta con la capacidad de colonizar el suelo, la rizósfera y tejidos de diversas 113 especies vegetales, optimizando su crecimiento y rendimiento, tanto en condiciones controladas y de campo (Bashan, 2005).

Además, el aislamiento en el campo de estas especies es muy simple, debido a que se encuentran en la superficie de las raíces de diferentes plantas hospederas como : maíz, trigo, arroz y pastos forrajeros (Barbosa et al., 2021). En lo que respecta a la

generación de cultivos puros en el laboratorio no representa un problema, ya que se puede emplear medio NFb para el enriquecimiento y en el mismo con variaciones en la composición y el pH también se puede realizar un aislamiento (Tortora et al., 2019).

En relación a las pruebas de campo realizadas con esta especie en América Latina, el trabajo que recopila esta información generado por (Okon y Labandera, 1994) expone se realizaron a inicios de los años 80. La primera data de 1983 a 1985 en los estados de Paraná y Rio de Janeiro en cultivares de trigo. La segunda prueba (1985-1993) se llevó a cabo en los estados de Puebla y Veracruz en México, para especies endémicas de maíz. Finalmente, desde el año 1986 hasta 1991 se generaron diversas experimentaciones de campo en plantas de trigo en las provincias Argentinas de Buenos Aires, Tucumán y Río negro.

Finalmente, se desarrollaron diversas experimentaciones de campo en plantas de trigo en las provincias argentinas de Buenos Aires, Tucumán y Río Negro, desde el año 1986 hasta 1991. Estos estudios demostraron la capacidad de *Azospirillum brasilense* para mejorar el crecimiento y la productividad de los cultivos, lo que ha impulsado su uso como biofertilizante en la región.

#### **4.3. Evaluación de los efectos de aplicación de biofertilizantes microbianos en variables productivas del cultivo**

Con relación a las variables agrícolas expuestas en cada artículo científico analizado, cabe recalcar que no existió dicha información completa. Por tal motivo, en concordancia con la literatura existente se tomó en cuenta principalmente parámetros morfológicos en la medición de efecto, como: Altura de la planta, diámetro del tallo, longitud de la raíz y biomasa. Estas características se observan en periodos de tiempo cortos, se miden con facilidad y sobre todo permiten predecir el desempeño en el campo de la especie vegetal (Landis y Ritchie, 2010; Rao et al., 2016).

De igual manera, la evaluación de los porcentajes foliares de macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, son de gran importancia para el crecimiento y metabolismo de las plantas. Adicionalmente, los macronutrientes se consumen en mayores cantidades y se encuentran presentes en la materia seca de tejidos vegetales en rangos que oscilan entre 0.2 % y 4 % (Bhattacharya, 2021; Turk et al., 2018).

#### **4.3.1. Análisis de efectos de acuerdo con el incremento entre cultivo control versus tratado**

Para la evaluación general de los efectos extraídos de cada artículo incluidos en la investigación, se calculó el porcentaje de incremento entre el cultivo control y el tratado (inoculado) mediante agentes microbianos. Como era de esperarse, al manipular datos de diferentes fuentes, se extrajo datos con una tendencia heterogénea.

Sin embargo, se resaltan los casos que muestran incrementos de hasta el 100% en contraste con el testigo, así como valores negativos y disimilitudes en cultivos tratados con el mismo biofertilizante microbiano (Tablas 7-14). Así mismo, se puede señalar que los géneros microbianos examinados presentan un comportamiento diferente para cada parámetro de cultivo analizado. Según Chávez et al. (2020) estas inconsistencias se deben a las diferentes características ambientales y edáficas, y los años en los cuales se desarrollaron los experimentos.

##### **4.3.1.1. Aportes de la biofertilización microbiana en los rendimientos de cultivo**

Al analizar los rendimientos de los cultivos tratados con biofertilizantes microbianos, se determinó que existe una influencia positiva en comparación al control. En la mayoría de los casos, existen incrementos desde el 50% hasta el 100%. Conviene destacar que, el empleo de Consorcios aparece ocho veces en la Tabla 10 con una gran diversidad de cultivos vegetales, específicamente, con fréjol (*P. vulgaris*) se logró un incremento de hasta el 100%, versus el control. De igual forma, al tratar este mismo ejemplar vegetal con *Rhizobium* obtuvieron resultados similares. En este sentido, otro cultivo beneficiado es maíz (*Z. mays*) fertilizado con *Azospirillum* y *Herbaspirillum*, alcanzando incrementos de 100% y 80%, respectivamente (Tabla 7).

La planta de fréjol pertenece al grupo de las leguminosas y posee la capacidad de formar relaciones simbióticas mediante nódulos en las raíces con diferentes géneros de *Rhizobium* (Boivin et al., 2020). Como menciona Pastor et al. (2021) en su estudio realizado en España la inoculación de *P. vulgaris* con cepas de *Rhizobium leguminosarum* se alcanzó un rendimiento 3091 kg/ha, mientras el empleo de consorcios 3141 kg/ha, en contraste con el testigo no inoculado con un valor de 2270 kg/ha.

Con respecto a la co-inoculación de *Rhizobium* en leguminosas con géneros bacterianos, como *Azospirillum*, *Bacillus* y *Pseudomonas*, existe un incremento en la nodulación con las raíces del hospedero, por la secreción de sustancias como Lipo-quitooligosacáridos y flavonoides que estimulan las relaciones simbióticas (de Carvalho et al., 2020).

En cuanto, a la inoculación de maíz con *Azospirillum* en el experimento de García et al. (2023) los autores señalan que en los cultivares tratados con biofertilizantes se obtuvo un rendimiento 10187 kg/ha en contraste al control con un resultado de 9338 kg/ha. Existen diversos factores que influyen de forma positiva en el rendimiento de las plantas de maíz aplicadas cepas del género *Azospirillum*.

Entre las más importantes, se encuentran la secreción de reguladores del crecimiento como AIA, la producción de sideróforos que mitigan el efecto de microorganismos patógenos y la reducción del estrés hídrico (Abdel et al., 2020; Di Salvo et al., 2018). Otro factor que tiene un rol importante en la respuesta del maíz a biofertilizantes, es el genotipo del cultivo empleado, así como el número y el estado fisiológico de las células pertenecientes a las cepas bacterianas usadas (García de Salamone et al., 2012).

Adicionalmente, Díaz et al., (2015) señalan que la inoculación del maíz con *Azospirillum* genera una respuesta más fuerte en su rendimiento mediante una rotación de cultivos con trigo (*T. aestivum*) y girasoles (*H. annuus*). Por otro lado, el trabajo desarrollado, también en el campo, por Alves et al., 2021 sustentó que la inoculación de *Herbaspirillum* en cultivos de maíz exhibió un incremento de hasta el 60% en comparación con los cultivos control.

**Tabla 7** Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable rendimiento de cultivo (kg/ha).

<b>Cultivo</b>	<b>Género</b>	<b>Control</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Incremento (%)</b>
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Consortio	1000	2000	<b>100</b>
	<i>Rhizobium</i>	200	400	<b>100</b>
<i>Zea mays</i>	<i>Azospirillum</i>	2000	4000	<b>100</b>
	<i>Herbaspirillum</i>	2500	4500	<b>80</b>
<i>Cenchrus purpureus</i>	<i>Funneliformis</i>	4000	7000	75

<i>Glycine max</i>	Consorcio	1200	2060	72
<i>Zea mays</i>	Consorcio	3860	6570	70
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Azospirillum</i>	7190	12000	67
<i>Glycine max</i>	Consorcio	1348,3	2122,25	57
<i>Cicer arietinum</i>	Consorcio	4000	6000	50
<i>Cucumis melo</i>	Consorcio	2907	3867	33
<i>Zea mays</i>	<i>Azospirillum</i>	6691,06	8639,64	29
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Glomus</i>	3500	4500	29
<i>Zea mays</i>	Consorcio	4300	5520	28
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Azospirillum</i>	3153	3512	11
<i>Pennisetum glaucum</i>	<i>Glomus</i>	1631	1811	11
<i>Glycine max</i>	<i>Bradyrhizobium</i>	2980	3240	9
	<i>Rhizophagus</i>	3111	3364	8
<i>Musa paradisiaca</i>	<i>Beijerinckia</i>	11400	12200	7
<i>Capsicum annuum</i>	<i>Bacillus</i>	1,76	1,85	5
<i>Moringa oleifera</i>	<i>Pseudomonas</i>	7180	7420	3
<i>Solanum tuberosum</i>	Consorcio	2606	2630	1
<i>Glycine max</i>	Consorcio	4094,88	4127,5	1

#### 4.3.1.2. Influencia de la inoculación de biofertilizantes microbianos en la altura de las plantas

En cuanto a la variable agronómica altura, en las plantas que se aplicaron fertilización biológica con diferentes especies de microorganismos, el aumento del tamaño fue favorable en su mayoría, y en ocho de los cuarenta y seis casos existe un porcentaje de incremento entre el 50% y 100%. En particular, el género *Bacillus* fue empleado seis veces en diferentes especímenes vegetales, sin embargo, únicamente con tomate (*S. lycopersicum*) presentó un 100%. En lo que se refiere a soya (*G. max*) alcanzó un 84% mediante la inoculación con *Bradyrhizobium* (Tabla 8).

El crecimiento de las plantas se ve estrechamente influenciado por la presencia de fitohormonas como auxinas, giberelinas y citoquininas (Cisternas et al., 2020). Algunos ejemplares microbianos tienen la capacidad de segregar este tipo de sustancias y entre las más estudiadas se encuentran las auxinas y especialmente el Ácido indol-3-acético (IAA), que es responsable de promover la división mitótica, expansión y diferenciación de células vegetales (Tsavkelova et al., 2006).

En este contexto, ambos géneros, *Bradyrhizobium* y *Bacillus*, tienen la capacidad de segregar Ácido indol-3-acético (IAA) en presencia del precursor L-triptófano. En el caso de *Bacillus*, sintetiza esta auxina en concentraciones 21ug/ml (Idris et al., 2007). Así mismo, con la aplicación de *Bradyrhizobium*, Iturralde et al., (2020) indicaron que se han encontrado 11uM de IAA en cultivos de soya (*G. max*).

**Tabla 8** Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable altura de la planta (cm).

<b>Cultivo</b>	<b>Género</b>	<b>Control</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Incremento (%)</b>
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Bacillus</i>	100	200	<b>100</b>
<i>Glycine max</i>	<i>Bradyrhizobium</i>	18,12	33,28	<b>84</b>
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Consorcio	8,46	14,91	<b>76</b>
<i>Capsicum annuum</i>	<i>Trichoderma</i>	8	13	63
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Penicillium</i>	50	80	60
<i>Allium cepa</i>	Consorcio	13	20	54
<i>Allium cepa</i>	<i>Trichoderma</i>	3,38	5,19	54
<i>Sorghum bicolor</i>	<i>Azospirillum</i>	40	60	50
<i>Carica papaya</i>	<i>Glomus</i>	8,3	12,1	46
<i>Capsicum chinense</i>	<i>Purpureocillium</i>	56,91	80,97	42
<i>Theobroma cacao</i>	<i>Gluconacetobacter</i>	18,31	25,53	39
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Trichoderma</i>	13,26	18,37	39
<i>Glycine max</i>	<i>Streptomyces</i>	45	60	33
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Aspergillus</i>	15	20	33
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Consorcio	30	40	33

<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Trichoderma</i>	150	200	33
<i>Coffea arabica</i>	Consortio	13,4	17,8	33
<i>Capsicum annuum</i>	<i>Bradyrhizobium</i>	8,64	11,43	32
	<i>Pseudomonas</i>	94	123,63	32
	<i>Serratia</i>	10,4	13,3	28
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Glomus</i>	27,5	34,6	26
	<i>Pseudomonas</i>	4	5	25
<i>Carica papaya</i>	<i>Azospirillum</i>	9,2	11,28	23
<i>Musa paradisiaca</i>	<i>Beijerinckia</i>	183	222	21
<i>Capsicum chinense</i>	<i>Bacillus</i>	83	100,6	21
<i>Nicotiana tabacum</i>	<i>Glomus</i>	12,86	15,28	19
<i>Triticum aestivum</i>	<i>Pseudomonas</i>	13,82	16,42	19
<i>Cocos nucifera</i>	<i>Bacillus</i>	30	35	17
<i>Nicotiana tabacum</i>	<i>Azotobacter</i>	12,5	14,5	16
<i>Zea mays</i>	Consortio	61	69,8	14
<i>Zea mays</i>	Consortio	190	217	14
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Bacillus</i>	10,74	12,21	14
<i>Glycine max</i>	Consortio	78,75	88,75	13
<i>Zea mays</i>	<i>Herbaspirillum</i>	47,25	52,5	11
<i>Capsicum chinense</i>	<i>Purpureocillium</i>	11,68	12,92	11
<i>Moringa oleifera</i>	<i>Pseudomonas</i>	160	175	9
<i>Musa acuminata</i>	<i>Pseudomonas</i>	11,58	12,65	9
<i>Glycine max</i>	Consortio	70,2	76,5	9
<i>Capsicum annuum</i>	<i>Bacillus</i>	130,6	142,1	9
<i>Musa paradisiaca</i>	<i>Bacillus</i>	193	206	7
<i>Theobroma cacao</i>	<i>Pseudomonas</i>	41,84	44,1	5
<i>Zea mays</i>	<i>Azospirillum</i>	200	210	5
<i>Oryza sativa</i>	<i>Herbaspirillum</i>	59,3	62,1	5
<i>Zea mays</i>	<i>Serratia</i>	50	52	4
<i>Theobroma cacao</i>	<i>Azospirillum</i>	49,76	51,35	3
<i>Carica papaya</i>	Consortio	26,7	27,1	1

#### 4.3.1.3. Efectos de la aplicación de biofertilizantes en la longitud de la raíz de los cultivos estudiados

En lo que concierne al incremento de la longitud de la raíz en los cultivos inoculados con fertilizantes microbianos, se observó que en mayor proporción se aplicó hongos filamentosos y micorrícicos. Además, solamente en cuatro casos el porcentaje de incremento ronda entre el 50% hasta el 80%, y no existieron valores del 100%. De manera puntual, el género *Azospirillum* permitió el registro del 80% de incremento para tomate riñón (*S. lycopersicum*), y el empleo de Consorcios facilitó un incremento del 67% en soya (*Glycine max*) (Tabla 9).

En cuanto al efecto del crecimiento de las raíces mediante la inoculación de biofertilizantes microbianos pertenecientes al género *Azospirillum*, Masciarelli et al. (2013), sugieren que se relaciona con la producción de sustancias promotoras de crecimiento como IAA por parte de estas bacterias. Las raíces vegetales presentan una gran sensibilidad a esta fitohormona y en consecuencia incrementa su longitud (Sgroy et al., 2009). También, se han reportado cambios en la morfología de raíz y pelos absorbentes, así como el bloqueo de la aparición de raíces laterales (Somers et al., 2005).

En lo que respecta a las plantas de tomate en asociación con *Azospirillum*, Cortés et al., (2014) determinaron que al tratar las semillas con estos ejemplares bacterianos presentaron mayor longitud con respecto al control. No obstante, al empleo de consorcios en soya se reporta que la co-inoculación de bacterias simbióticas, junto con hongos micorrícicos o especies del género *Bacillus*, mejoran el proceso de nodulación y elongación de las raíces (Masciarelli et al., 2014).

**Tabla 9** Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable longitud de la raíz (cm).

Cultivo	Género	Control	Tratamiento	Incremento (%)
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Azospirillum</i>	10	18	<b>80</b>
<i>Glycine max</i>	Consorcio	15	25	<b>67</b>
<i>Ipomoea Batatas</i>	<i>Azotobacter</i>	24,62	37,27	51

<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Pseudomonas</i>	10	15	50
<i>Lactuca sativa</i>	<i>Bacillus</i>	9,4	13,5	44
<i>Allium cepa</i>	<i>Pseudomonas</i>	25	35	40
<i>Euterpe oleracea</i>	<i>Trichoderma</i>	2,2	2,97	35
<i>Capsicum annuum</i>	<i>Burkholderia</i>	22,7	30,08	33
<i>Zea mays</i>	<i>Bradyrhizobium</i>	9,77	12,81	31
<i>Theobroma cacao</i>	<i>Serratia</i>	35	45	29
<i>Stevia rebaudiana</i>	<i>Gluconacetobacter</i>	22,99	29,19	27
<i>Peperomia pellucida</i>	<i>r</i>	10	12	20
<i>Ananas comosus</i>	<i>Consortio</i>	11,2	13,3	19
<i>Dioscorea rotundata</i>	<i>Klebsiella</i>	16,3	18,9	16
<i>Coffea arabica</i>	<i>Azotobacter</i>	18,59	21,47	15
<i>Glycine max</i>	<i>Bacillus</i>	10,2	11,7	15
<i>Capsicum annuum</i>	<i>Consortio</i>	35	40	14
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Streptomyces</i>	35,88	40,85	14
<i>Oryza sativa</i>	<i>Pseudomonas</i>	16,02	17,65	10
<i>Zea mays</i>	<i>Trichoderma</i>	22,5	24,7	10
	<i>Herbaspirillum</i>	18,6	19,8	6
	<i>Aspergillus</i>	47,2	49,4	5
	<i>Streptomyces</i>			

#### 4.3.1.4. Beneficios de la inoculación de agentes microbianos en la biomasa seca total de los cultivos tratados

Mediante el presente estudio, se determinó incrementos en la biomasa seca total al tratar los cultivos con agentes microbianos y, en los 24 experimentos analizados, un total de nueve tienen un porcentaje de incremento en un rango del 50% hasta el 100%. Adicionalmente, el género *Trichoderma* ha sido probado con este parámetro en tres ocasiones con *S. lycopersicum* y *A. cepa*, pero en pimiento (*C. annuum*) se observó el resultado más alto correspondiente al 100%. También se evidenció que el empleo de *Agrobacterium* fue positivo en *P. vulgaris* con 95% (Tabla 10).

El género *Trichoderma* se describe como un hongo filamentoso no virulento y oportunista con capacidad de generar relaciones simbióticas (Molla et al., 2012). Esta especie ha sido reconocida principalmente como un agente de control biológico contra múltiples fitopatógenos, pero también dispone de diversos mecanismos para el crecimiento vegetal (Hermosa et al., 2013). Por ejemplo, el uso de este agente microbiano en cultivos de tomate, incrementó la biomasa seca en un 78,6% en contraste a los ejemplares no tratados (Molla et al., 2012).

Del mismo modo, en el trabajo realizado por Ejaz et al. (2020), el tratamiento de chicharos (*P. sativum*) con *Agrobacterium*, aumentó la biomasa seca total con respecto a las plantas no tratadas. Adicionalmente, *Agrobacterium* segrega exopolisacáridos y polímeros biodegradables que mantienen el potencial hídrico y la compactación del suelo (İpek et al., 2017).

**Tabla 10** Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable biomasa seca total (g).

Cultivo	Género	Control	Tratamiento	Incremento (%)
<i>Capsicum annuum</i>	<i>Trichoderma</i>	0,30	0,60	<b>100</b>
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Agrobacterium</i>	1,17	2,28	<b>95</b>
<i>Ananas comosus</i>	<i>Azotobacter</i>	1,17	1,93	65
<i>Zea mays</i>	Consorcio	885,00	1440,00	63
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Pseudomonas</i>	5,00	8,00	60
<i>Nicotiana tabacum</i>	<i>Azotobacter</i>	0,31	0,49	58
<i>Theobroma cacao</i>	<i>Gluconacetobacter</i>	2,90	4,45	53

<i>Glycine max</i>	Consorcio	26,20	39,90	52
<i>Cocos nucifera</i>	<i>Bacillus</i>	150,00	225,00	50
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Bacillus</i>	0,36	0,50	39
<i>Capsicum chinense</i>	<i>Bacillus</i>	27,30	36,10	32
<i>Lupinus mutabilis</i>	<i>Lysinibacillus</i>	6,28	8,15	30
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Trichoderma</i>	0,26	0,32	23
<i>Coffea arabica</i>	Consorcio	0,26	0,31	19
<i>Theobroma cacao</i>	<i>Pseudomonas</i>	6,71	7,94	18
<i>Carica papaya</i>	Consorcio	3,40	4,00	18
<i>Coriander sativum</i>	<i>Fluviicola</i>	1,04	1,22	17
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Rhizobium</i>	3,79	4,39	16
<i>Allium cepa</i>	<i>Trichoderma</i>	118,00	136,00	15
<i>Oryza sativa</i>	<i>Azotobacter</i>	132,17	149,78	13
<i>Solanum lycopersicum</i>	Consorcio	320,00	350,00	9
<i>Musa acuminata</i>	<i>Pseudomonas</i>	1,43	1,47	3
<i>Stevia rebaudiana</i>	Consorcio	15,88	16,12	2

#### 4.3.1.5. Contribución de la fertilización biológica en la biomasa seca del tallo de los cultivos tratados

Con relación a la biomasa seca del tallo, en siete de los veinte y cinco estudios que analizaron esta variable, se alcanzaron porcentajes de incremento superiores al 50%. Los mejores resultados presentaron dos géneros de hongos, por un lado, *Aspergillus* (100%), de tipo filamentoso inoculado en *P. vulgaris* y por el otro, *Acualospora* (90%), perteneciente a la familia de las micorrizas, en *A. indica* (Tabla 11).

Resultados similares con respecto a la biomasa seca del tallo con el empleo de hongos fueron obtenidos por Galleguillos et al. (2000), en la co-inoculación del género *Sinorhizobium* y *Glomus* en plantas de lechuga (*L. sativa*). De igual forma, la investigación de Abd-Alla et al. (2014) sugiere que en la inoculación combinada de hongos micorrícicos con cepas bacterianas promueven la formación de micorrizas,

estimularon el crecimiento de las hifas fuera de las raíces y, además, estimularon la esporulación. Del mismo modo, con la aplicación de *Acaulospora* en ají (*C. frutescens*) se registró un aumento del 95% en la biomasa del tallo (Boonlue et al., 2012).

**Tabla 11** Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable biomasa seca del tallo (g).

<b>Cultivo</b>	<b>Género</b>	<b>Control</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Incremento (%)</b>
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Aspergillus</i>	0,5	1	<b>100</b>
<i>Azadirachta indica</i>	<i>Acaulospora</i>	0,2	0,38	<b>90</b>
<i>Musa paradisiaca</i>	<i>Bacillus</i>	7,5	12,6	68
<i>Cocos nucifera</i>	<i>Bacillus</i>	75	125	67
<i>Dioscorea rotundata</i>	<i>Bacillus</i>	0,2	0,31	55
<i>Stevia rebaudiana</i>	<i>Rhizophagus</i>	4,72	7,31	55
<i>Agave angustifolia</i>	<i>Glomus</i>	6,52	9,94	52
<i>Glycine max</i>	Consorcio	90	133,25	48
<i>Zea mays</i>	<i>Azospirillum</i>	0,16	0,23	44
	Consorcio	0,86	1,22	42
	Consorcio	120	170	42
	<i>Serratia</i>	0,4	0,55	38
	<i>Aspergillus</i>	0,15	0,2	33
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Pseudomonas</i>	0,15	0,2	33
<i>Oryza sativa</i>	<i>Herbaspirillum</i>	0,33	0,43	30
<i>Capsicum annum</i>	<i>Bradyrhizobium</i>	0,16	0,2	25
<i>Glycine max</i>	<i>Streptomyces</i>	0,65	0,8	23
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Bacillus</i>	0,11	0,13	18

<i>Theobroma cacao</i>	<i>Azospirillum</i>	5,08	5,86	15
<i>Moringa oleifera</i>	<i>Azospirillum</i>	1,58	1,82	15
<i>Zea mays</i>	<i>Herbaspirillum</i>	1,9	2,18	15
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Trichoderma</i>	70	80	14
<i>Stevia rebaudiana</i>	Consortio	6,04	6,39	6
<i>Musa acuminata</i>	<i>Pseudomonas</i>	1,12	1,17	4
<i>Gossypium hirsutum</i>	<i>Azotobacter</i>	115	120	4

#### 4.3.1.6. Porcentaje de nitrógeno foliar en los cultivos inoculados con biofertilizantes microbianos frente al control

La inoculación de especies microbianas en los 23 cultivos estudiados mostró un incremento en el nitrógeno foliar, especialmente en 6 ejemplares vegetales, con un porcentaje de incremento desde el 50% hasta el 75%, y, específicamente, el género *Azotobacter* en *A. comosus* y arroz (*O. sativa*) alcanzaron el 75% y 69%, respectivamente (Tabla 12).

En este sentido, la fijación biológica de nitrógeno de parte de los microorganismos o diazotrofia, es el mecanismo que convierte el nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ) a formas solubles para las plantas como amonio ( $NH_4$ ) y nitrato ( $NO_3$ ) (Singh et al., 2019). En el caso de *Azotobacter*, es un ejemplar bacteriano de vida libre y rápido crecimiento que convierte el nitrógeno atmosférico en amonio (Sumbul et al., 2020).

Con respecto a la tasa de fijación que mantiene *Azotobacter* en este elemento, el estudio de Romero-Perdomo et al., 2017 indica que es 20 kg/ N/ año y se presume que puede reducir hasta en 50% el uso de fertilizantes químicos. Un factor que refuerza la fijación de nitrógeno en estos microorganismos es la presencia de calcio en el suelo (Salantur et al., 2005).

Por ejemplo, en el experimento realizado por Kızılkaya (2008), el cual consistió en evaluar la concentración de nitrógeno foliar mediante la inoculación de *Azotobacter* con trigo (*T. aestivum*), en condiciones de invernadero y campo. Este investigador observó variaciones en las respuestas de los ejemplares bacterianos al encontrarse en

diferentes entornos (invernadero y campo). Estas variaciones pueden atribuirse a que *Azotobacter* es susceptible al pH ácido, concentraciones elevadas de sal y altas temperaturas (Aquilanti et al., 2004).

**Tabla 12** Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable nitrógeno foliar (%).

<b>Cultivo</b>	<b>Género</b>	<b>Control</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Diferencia (%)</b>
<i>Ananas comosus</i>	<i>Azotobacter</i>	0,04	0,1	<b>75</b>
<i>Oryza sativa</i>	<i>Azotobacter</i>	0,089	0,2	<b>69</b>
<i>Glycine max</i>	Consorcio	32	53,0	66
<i>Coffea arabica</i>	Consorcio	1,35	2,1	59
<i>Zea mays</i>	<i>Herbaspirillum</i>	16,26	25,0	54
<i>Oryza sativa</i>	<i>Herbaspirillum</i>	2	3,0	50
<i>Brachiaria mulato</i>	Consorcio	11,2	15,7	40
<i>Capsicum annum</i>	<i>Serratia</i>	6,7	8,7	30
<i>Zea mays</i>	<i>Azospirillum</i>	17,1	20,6	20
<i>Stevia rebaudiana</i>	<i>Rhizophagus</i>	2,5	3,0	20
<i>Euterpe oleracea</i>	<i>Burkholderia</i>	13,31	15,7	18
<i>Theobroma cacao</i>	<i>Gluconacetobacte</i> <i>r</i>	2,27	2,6	12
<i>Cenchrus purpureus</i>	<i>Funneliformis</i>	0,76	0,8	11
<i>Brachiaria Mulato</i>	<i>Trichoderma</i>	1,79	2,0	9
<i>Zea mays</i>	Consorcio	5,43	5,9	9
<i>Carica papaya</i>	Consorcio	2,13	2,3	9
<i>Agave angustifolia</i>	<i>Glomus</i>	1,38	1,5	5
<i>Glycine max</i>	Consorcio	4,3	4,5	4
<i>Medicago sativa</i>	Consorcio	0,041	0,0	2
<i>Pinus pseudostrobus</i>	<i>Cupriavidus</i>	6,3	6,4	2
<i>Lind</i>				
<i>Theobroma cacao</i>	<i>Azospirillum</i>	2	2,0	1
<i>Cicer arietinum</i>	Consorcio	2,69	2,7	1

#### 4.3.1.7. Porcentaje de fósforo foliar en los cultivos inoculados con biofertilizantes microbianos frente al control

Al analizar el fósforo foliar de los veinte y cinco cultivos inoculados con diferentes especies microbianas, los resultados fueron favorables y en cuatro casos, los rangos de los porcentajes de incremento se encuentran entre el 54% hasta el 100%. De esta sección, los valores a resaltar corresponden a *C. nucifera* con *Bacillus* (85%), seguido de *Serratia* (60%) en pimiento (*C. annum*) (Tabla 13).

Cultivo	Género	Control	Inoculado	Diferencia (%)
<i>Canavalia ensiformis</i>	<i>Penicillium</i>	0,5	1	100
<i>Zea mays</i>	<i>Aspergillus</i>	15	28	87
<i>Euterpe oleracea</i>	<i>Burkholderia</i>	2,13	3,69	73
<i>Capsicum chinense</i>	<i>Purpureocillium</i>	0,013	0,02	54
<i>Cocos nucifera</i>	<i>Bacillus</i>	9	13	44
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Azospirillum</i>	0,36	0,51	42
<i>Zea mays</i>	Consorcio	1,14	1,61	41
<i>Zea mays</i>	Consorcio	1,42	1,91	35
<i>Capsicum annum</i>	<i>Bacillus</i>	2,018	2,621	30
<i>Capsicum annum</i>	<i>Serratia</i>	1,7	2,2	29
<i>Agave angustifolia</i>	<i>Glomus</i>	0,14	0,18	29
<i>Stevia rebaudiana</i>	<i>Rhizophagus</i>	0,35	0,45	29
<i>Glycine max</i>	Consorcio	0,43	0,52	21
<i>Theobroma cacao</i>	<i>Azospirillum</i>	0,25	0,3	20
<i>Oryza sativa</i>	<i>Azotobacter</i>	0,031	0,037	19
<i>Glycine max</i>	Consorcio	0,42	0,5	19
<i>Zea mays</i>	<i>Herbaspirillum</i>	4,46	5,2	17
<i>Zea mays</i>	<i>Azospirillum</i>	1,98	2,28	15
<i>Moringa oleifera</i>	<i>Azospirillum</i>	0,27	0,31	15
<i>Cenchrus purpureus</i>	<i>Funneliformis</i>	0,073	0,083	14
<i>Musa paradisiaca</i>	<i>Beijerinckia</i>	0,33	0,37	12
<i>Brachiaria mulato</i>	Consorcio	2,3	2,5	9

<i>Cicer arietinum</i>	Consorcio	0,59	0,62	5
<i>Zea mays</i>	<i>Azotobacter</i>	0,22	0,23	5
<i>Brachiaria Mulato</i>	<i>Trichoderma</i>	0,32	0,33	3

El fósforo es un micronutriente esencial para el desarrollo de una planta y en el suelo existe una concentración entre 400-1200 mg /kg. Sin embargo, de toda esa cantidad menos del 1% se encuentra en forma de ortofosfatos, los cuales puede absorber la planta (Wang et al., 2021). Por lo expuesto previamente, las bacterias solubilizadoras de fósforo convierten la forma insoluble de este elemento, como fosfato dicálcico, en compuestos inorgánicos solubles para la planta (ortofosfatos) (Tandon et al., 2020).

El género *Bacillus* registra una capacidad de solubilización entre 30-35 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> /ha, y en la investigación realizada por Tahir et al. (2018), en el tratamiento de plantas de algodón (*G. herbaceum*) con cepas del género *Bacillus*, se obtuvo un contenido de fósforo foliar igual a 10,3 mg/kg, mientras en las plantas establecidas como control, fue de 9.1 mg/planta. En relación a *Serratia*, ensayos *in-vitro* de solubilización de fosfato tricálcico, revelan que este género consiguió concentraciones de 89,5 mg/L correspondiente a fosfatos solubles, además se hallaron la presencia de diversos ácidos orgánicos como evidencia de actividad de solubilización (Vargas et al., 2020).

**Tabla 13** Diferencia entre control versus cultivo tratado con biofertilizante para la variable fósforo foliar (%).

#### **4.3.1.8. Porcentaje de potasio foliar en los cultivos inoculados con biofertilizantes microbianos frente al control**

En relación con los resultados del potasio foliar en plantas inoculadas con fertilizantes biológicos, hubo un efecto positivo, especialmente para el género *Penicillium* que registró el valor más alto correspondiente al 100% en el depósito de potasio en *C. ensiformis*. De igual forma, *Aspergillus* (87%) en plantas de maíz (*Z. mays*) y *Burkholderia* (73%) en Asaí (*E. oleracea*) (Tabla 14).

El potasio es el tercer macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de los organismos vegetales. Este elemento participa en la activación de múltiples procesos metabólicos como la fotosíntesis, síntesis de proteínas y enzimas (Velázquez et al., 2016). En el suelo, el contenido total de potasio es superior a las 20000 ppm y de este, tan solo

el 2% se encuentra en forma soluble para las plantas (Sharma et al., 2016). Los microorganismos solubilizadores de potasio segregan ácidos orgánicos para transformar este elemento en compuestos asimilables para las plantas (Uroz et al., 2007).

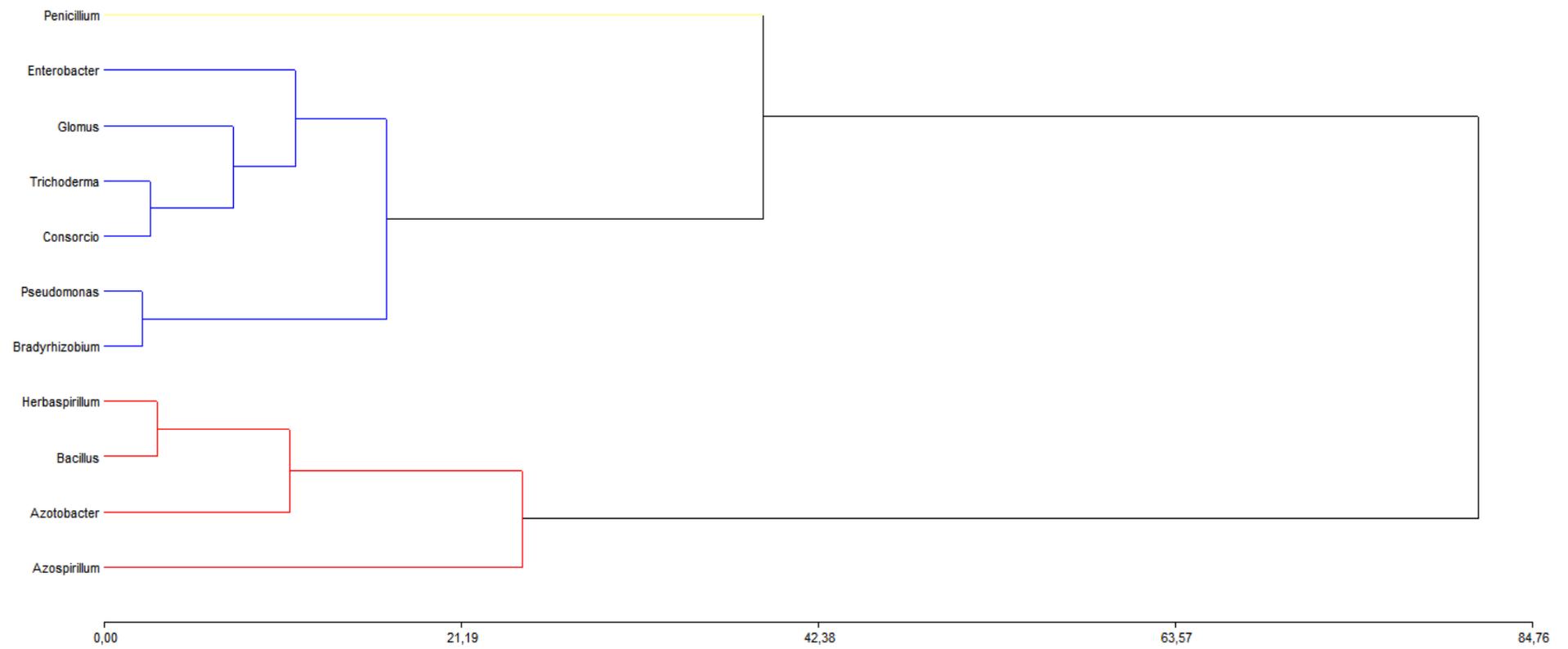
Los estudios de la solubilización de potasio en hongos filamentosos son limitados. Sin embargo, el género con mejor eficiencia en este proceso es *Aspergillus* (Lian et al., 2008). Por ejemplo, en la publicación de Caravaca et al. (2004) la inoculación de *D. pentaphyllum* con ejemplares de *Aspergillus*, mejoró notablemente la cantidad de potasio foliar en un promedio de 18,3 mg/planta, mientras en el control se encontró tan solo 13 mg/planta. Además, (Elgharably y Nafady, 2021) describen que el tratamiento con *Penicillium* en plantas de trigo (*T. aestivum*) aumentó el contenido de potasio foliar consiguiendo 6.15 mg/g en comparación a las plantas testigos 5.20 mg/planta.

**Tabla 14** Diferencia entre control versus tratado (biofertilizante) para la variable potasio foliar (%).

Cultivo	Género	Control	Tratamiento	Incremento (%)
<i>Euterpe oleracea</i>	<i>Burkholderia</i>	52,95	60,47	<b>85</b>
<i>Cocos nucifera</i>	<i>Bacillus</i>	1,26	2,33	<b>60</b>
<i>Glycine max</i>	Consorcio	0,142	0,18	49
<i>Brachiaria mulato</i>	Consorcio	17,3	18,2	27
<i>Capsicum annuum</i>	<i>Serratia</i>	14,9	23,78	14
<i>Capsicum annuum</i>	<i>Bacillus</i>	18,96	20,48	14
<i>Moringa oleífera</i>	<i>Azospirillum</i>	0,65	0,6	12
<i>Cicer arietinum</i>	Consorcio	0,68	0,72	8
<i>Glycine max</i>	Consorcio	1,46	2,18	6
<i>Zea mays</i>	<i>Herbaspirillum</i>	16,68	17,6	6
<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>Azospirillum</i>	1,18	1,35	5
<i>Musa paradisiaca</i>	<i>Beijerinckia</i>	1,39	1,4	4
<i>Brachiaria Mulato</i>	<i>Trichoderma</i>	3,21	3,27	2
<i>Zea mays</i>	Consorcio	0,74	0,77	1

#### **4.4. Clasificación de géneros microbianos mediante análisis de conglomerados jerárquicos en base a sus efectos de aplicación en cultivos vegetales**

Posterior a la comparación individual de los efectos observados por los géneros microbianos aplicados como biofertilizantes en diferentes cultivares vegetales, se evaluó la homogeneidad de las cepas microbianas con base en sus porcentajes de incremento. Por tal motivo, en la Figura 20 se presenta el dendrograma en el que se puede observar que se formaron 3 clusters; el primero conformado por *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus* y *Herbaspirillum*. El segundo por *Bradyrhizobium*, *Pseudomonas*, Consorcios, *Trichoderma*, *Glomus* y *Enterobacter*. Finalmente, el tercero únicamente por *Penicillum*. En resumen, se explica que los individuos pertenecientes a cada uno de los grupos formados tienen impactos similares en las variables evaluadas.



**Figura 20** Dendrograma derivado del análisis de conglomerados a partir de los porcentajes de incremento por genero microbiano.

#### 4.4.1. Análisis Factorial Exploratorio de los efectos ocasionados por la aplicación de biofertilizantes microbianos en cultivos vegetales

Con la finalidad de tener certeza de los agrupamientos obtenidos en el análisis de conglomerados, se procedió a realizar un Análisis Factorial Exploratorio para evidenciar el nivel de relación que existe en las variables agronómicas estudiadas. El resultado preliminar obtenido fue la prueba de KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) con un valor de 0.69. También, en la prueba de esfericidad de Barlett se consiguió un nivel de significancia inferior a 0.05 que avalan los resultados de la matriz de correlaciones (Anexo 5). En conjunto, estos resultados indican que los datos son aptos para aplicar un análisis factorial (Tabla 15).

**Tabla 15** Estadístico de prueba para la idoneidad de los datos para transformarse en componentes principales.

<b>Prueba de KMO y Bartlett</b>		
Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0,691
	Aprox. Chi-cuadrado	75,249
Prueba de esfericidad de Bartlett	GI	28
	Pvalor	0,001

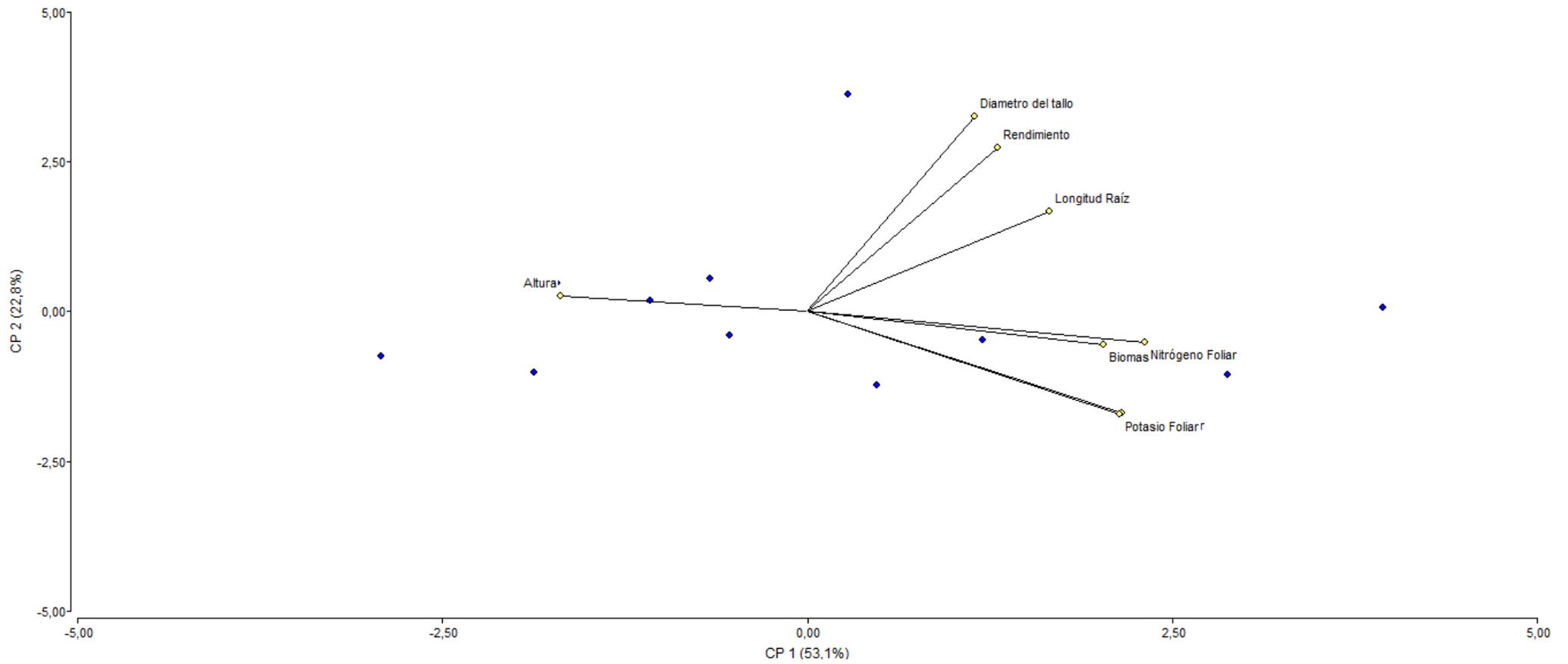
En lo que respecta a la extracción de componentes principales, se evidenciaron tres componentes principales que explican el 75,9 % de la varianza total. El Biplot de componentes principales que se representa en la Figura 21 sobre las variables agronómicas se encuentran en forma de vectores.

Por tal motivo, mientras exista un ángulo menor entre estos, significa una mayor relación entre estas variables. En este caso, las variables que se encuentran estrechamente relacionadas son: potasio foliar con fósforo foliar; biomasa con nitrógeno foliar y, por último, diámetro del tallo con rendimiento. También, existe un efecto espejo al construirse un ángulo de 180° entre la variable nitrógeno foliar y altura de la planta. En este fenómeno se refleja que existe una correlación nula entre dichas variables

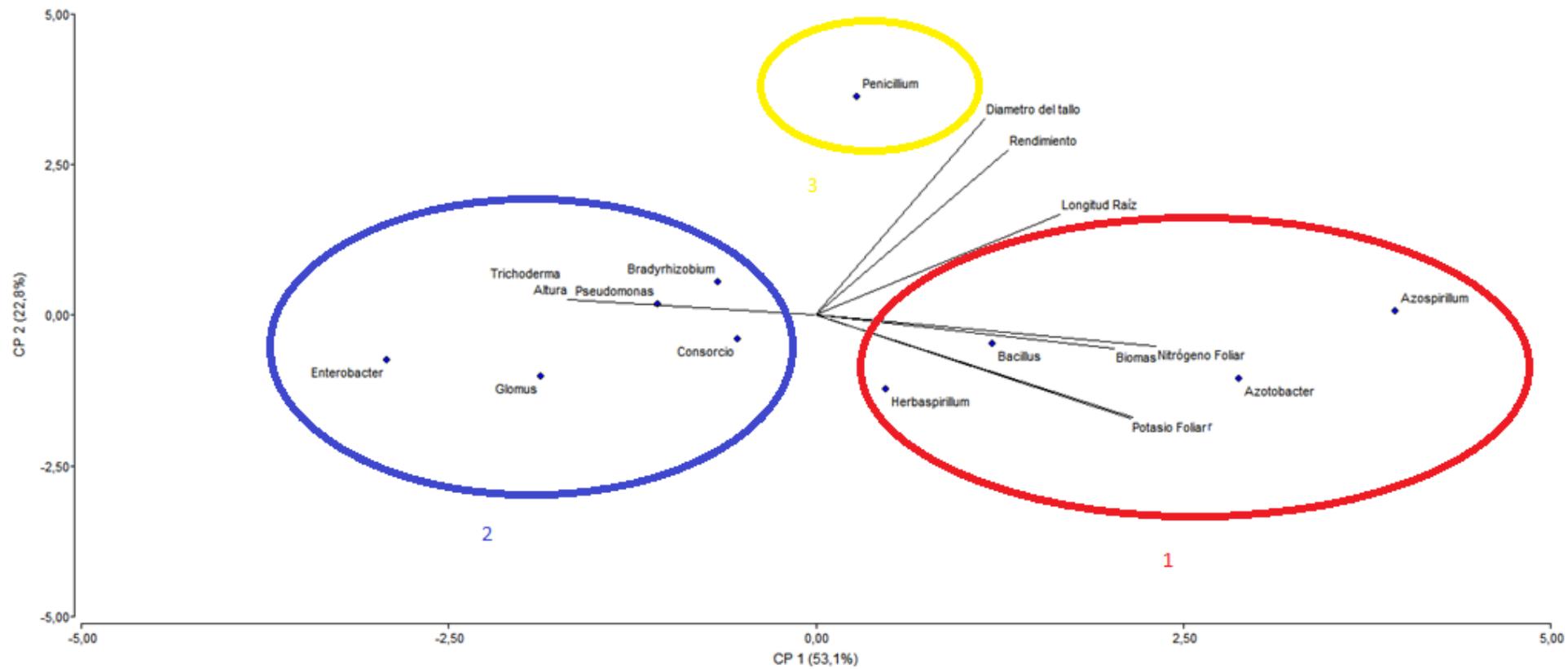
De igual forma, en la Figura 22 corresponde al biplot anterior con cada uno de los géneros microbianos analizados y representados con puntos. En este sentido, los

microorganismos que se encuentran más cercanos a una variable están asociados a esta y le atañe porcentajes de incremento más altos.

De esta manera, se puede verificar la conformación de los clusters mediante análisis conglomerados anterior. El primer grupo estuvo conformado por Consorcios, *Glomus*, *Enterobacter*, *Trichoderma* y *Enterobacter* y caracterizado por la variable altura. Por otra parte, el conglomerado dos estuvo constituido por *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Herbaspirillum* y *Bacillus* relacionados con los porcentajes de macronutrientes foliares NPK y biomasa seca total. Finalmente, *Penicillium* formó un conglomerado individual definido por las variables longitud de la raíz y diámetro del tallo.



**Figura 21** Análisis de Componentes Principales en los efectos generados por el uso de biofertilizantes microbianos.



**Figura 22** Análisis de Componentes Principales de las variables agronómicas con mayor impacto en los géneros microbianos empleados como biofertilizantes.

#### **4.5. Evolución del uso de biofertilizantes microbianos en países de América**

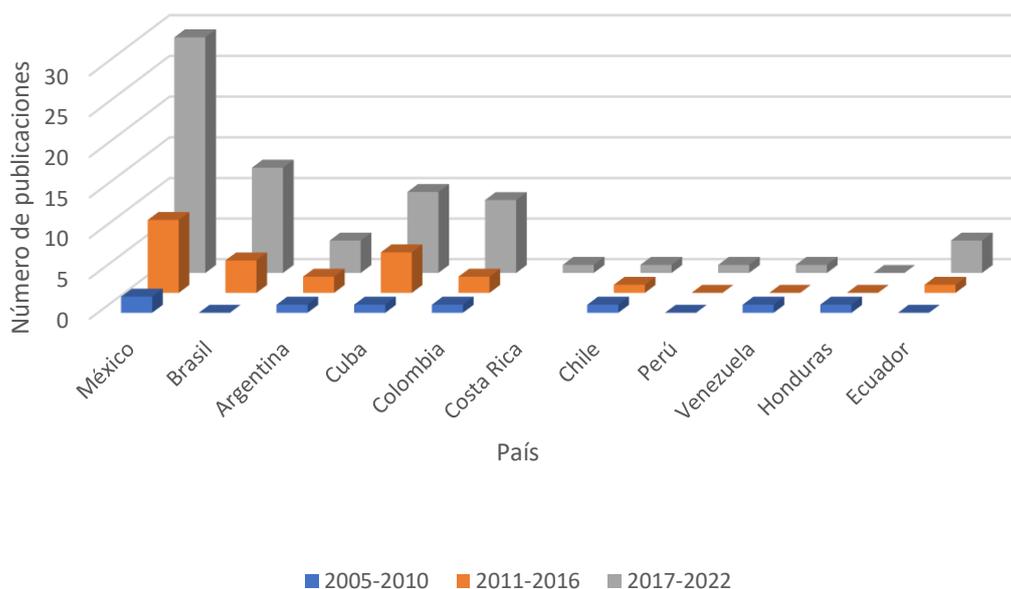
##### **Latina**

En la Figura 23, se muestra la distribución de las publicaciones referentes a biofertilizantes microbianos desde el año 2005 hasta junio de 2022 realizados en países de América Latina. Se determinó que, a partir del año 2010, hay un incremento en las investigaciones publicadas en el área, y en el año 2017 se recopiló un mayor número de artículos científicos. Una tendencia similar se encontró en la revisión sistemática realizada por Restrepo-Correa et al. (2017) y lo atribuye principalmente a la creciente preocupación del cambio climático, y que, cada vez se evidencia su impacto negativo al ambiente.

Por tal motivo, los responsables políticos, centros académicos y agricultores se han concentrado en la búsqueda de tecnologías sostenibles, que garanticen la seguridad alimentaria y sustituyan el uso de fertilizantes químicos, de los cuales, ya se ha demostrado los efectos negativos que generan en el suelo, ecosistemas acuáticos y la capa de ozono (Kumar y Singh, 2015).

De igual forma, se evidenció que los países con mayor producción científica del tema son México, Brasil, Argentina, Cuba y Colombia. Para respaldar este hallazgo, el análisis bibliométrico sobre producción científica a nivel mundial en los años 2000-2019 realizado por Koovalamkadu et al. (2021) menciona que México, Brasil y Argentina son los países que han generado mayor número de artículos en Latinoamérica. Con respecto a Colombia, Zambrano-Moreno et al. (2016) generó un análisis bibliométrico entre los años 2009-2014 y registró un total de 34 trabajos experimentales referentes a inoculaciones microbianas en ese país.

También, en Cuba, Borrego et al., (2015), reportaron que entre los años 2008-2012 en las revistas nacionales existieron un total de 112 publicaciones correspondientes al tratamiento de biofertilizantes en diversos cultivos.



**Figura 23** Tendencia de las publicaciones en países de América Latina desde el año 2005 hasta 2022.

#### 4.5.1. Importancia de los biofertilizantes microbianos en cultivos de interés

Mediante el análisis de redes que se muestra en la Figura 24 se puede observar que los países con mejores cifras en publicaciones, con pesos de salida igual a 41,17,16,12, 5, son México, Brasil, Cuba, Colombia y Argentina, respectivamente. Estos resultados se equiparan con el análisis documental sobre investigación agrícola de Vargas et al. (2004), quienes analizaron un total de 461 artículos, de los cuales el 58,2% pertenecían a dichos países. De igual forma, los cultivos con mayor importancia en el análisis de sus pesos de entrada correspondieron a *Z. mays* (maíz) con 14, *S. lycopersicum* (tomate riñón) con 13, *G. max* (Soya) con 8, *C. annum* (Pimiento) con 6 y *P. vulgaris* (fréjol) con 5.

En particular, América Latina dispone de 576 millones de hectáreas destinadas al suelo agrícola y aporta el 14% de la producción a nivel mundial. Por lo expuesto previamente, América Latina presenta una tasa de crecimiento anual del 1,8% en la agricultura, principalmente por la expansión agrícola del territorio y el aumento de rendimientos en cultivos. En el aspecto económico, el sector agrícola, en América Latina, representa entre el 5% y 18% del PIB (OECD, 2017).

El maíz (*Z. mays*) es un cultivo nativo del sur de México y en América Latina es considerado como alimento esencial en la dieta de sus habitantes, y, en consecuencia, en esta área del continente, se genera el 51% de la producción mundial, con más de 22 millones de toneladas. Sin embargo, de esa cantidad, solo el 21% es destinado para el consumo humano y el porcentaje restante se destina a la producción de balanceado animal, biopesticidas, antifúngicos y biocombustibles (Lim, 2013).

La soya (*G. Max*) es una leguminosa que tiene su origen en Asia y es uno de los alimentos de mayor consumo en esta región por su alto valor nutricional. A pesar de ello, Brasil y Argentina son los mayores productores a nivel mundial, después de Estados Unidos y China. En dichos países de América del Sur, el cultivo de esta especie vegetal inició en 1970 y en el presente se destinan 19,5 millones de hectáreas de suelo agrícola. Hasta la actualidad se han registrado producciones de hasta 100 millones de toneladas, ya que representa una de sus principales fuerzas productivas (Meira et al., 2019).

El tomate (*S. lycopersicum*) es autóctono de Ecuador, Perú y Chile. Con el tiempo se ha expandido a todo el mundo y en América Latina los mayores productores son Brasil y México con 3 y 2 millones de toneladas, respectivamente. Por sus propiedades antioxidantes y organolépticas, forma parte de la base alimenticia de un gran porcentaje de la población (Lim, 2013).

El fréjol (*P. vulgaris*) común es una de las especies vegetales más importantes que componen la dieta en los habitantes de Latino América por su alto contenido proteico y bajo costo. Se presume que se originó en México. Con respecto a la producción mundial, América Latina representa el 30%. Brasil y México han generado 3 y 1 millones de toneladas, respectivamente (Ulloa et al., 2011).



Así mismo, en la Figura 25 se muestra el análisis de redes con la relación de los cultivos mencionados previamente y biofertilizantes microbianos empleados. De estos últimos, se destacaron los Consorcios seguidos de *Azospirillum brasilense*. La mayoría de las aristas representadas por flechas mostraron interacciones de inoculaciones con todas las especies vegetales de interés. De este último, se pueden resaltar casos de aplicación a gran escala en cultivos de interés económico y alimenticio en países de América del Sur y México, así como el desarrollo y fabricación de productos basados en esta especie bacteriana.

En América del Sur existen 106 productos comerciales correspondientes a fertilizantes biológicos elaborados a partir de cepas del género *Azospirillum brasilense* de forma individual o en combinación con *Pseudomonas fluorescens* o *Bradyrhizobium* sp. Estos productos se distribuyen en diferentes países, 90 en Argentina, seguido de 14 en Brasil y por último 2 en Uruguay. Adicionalmente, dichos biofertilizantes microbianos han sido recomendados para cultivos como soya (*G. max*), sorgo (*S. bicolor*), algodón (*G. hirsutum*), maíz (*Z. mays*), avena (*A. sativa*), tabaco (*N. tabacum*), caña de azúcar (*S. officinarum*) y girasoles (*H. annuus*) (Coniglio et al., 2019).

En consecuencia, para el año 2016 en Brasil, se comercializaron 6 millones de dosis con inóculos de *Azospirillum* para aplicarse en 4 millones de hectáreas de cultivo, correspondiente a maíz (*Z. mays*) y soya (*G. max*). En ese mismo año, Uruguay ocupó 200000 hectáreas de maíz (*Z. mays*) con el mismo microorganismo (Coniglio et al., 2019).

En lo que respecta a Argentina, los primeros estudios de *Azospirillum* se realizaron en la década de 1980 en colaboración con instituciones académicas de Brasil e Israel. En el año de 1995 concluyó la fase de bioprospección y como resultado se obtuvieron 64 especies que fueron sometidas a pruebas de campo, con el fin de examinar sus propiedades de promoción vegetal. De estos experimentos se seleccionó la cepa de *Azospirillum brasilense* AZ39 que, actualmente, representa el 60% de los productos comerciales usados en maíz (*Z. mays*) y trigo (*T. aestivum*) en esta región (García et al., 2013).

En Argentina existen un total de 693 productos comerciales considerados como biofertilizantes biológicos, de los cuales 94,8% son de fabricación nacional. De esta cifra, el 49% son destinados a los cultivos de soya (*G. max*), 23% al fréjol (*P. vulgaris*), 9% al

maíz (*Z. mays*) y trigo (*T. aestivum*), y tan solo el 2% para arroz (*O. sativa*) y algodón (*G. hirsutum*) (Bisang et al., 2011).

Por otro lado, en México desde el año 1999, organizaciones de gobierno como el Ministerio de Agricultura, en colaboración con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), realizaron un programa de inoculación con biofertilizantes microbianos a gran escala en 60000 hectáreas de cultivos de maíz (*Z. mays*), trigo (*T. aestivum*) y sorgo (*S. bicolor*) (Dobbelaere et al., 2003).

Al conseguirse resultados favorables en dicho programa, para el año 2000, la demanda de los agricultores alcanzó hasta 1.5 millones de hectáreas de cultivo. Así mismo, en el 2002 la Universidad de Puebla, en trabajo conjunto con el Ministerio de Desarrollo Rural, ejecutaron un proyecto para elaborar biofertilizantes microbianos a base de cepas pertenecientes al género *Azospirillum* (Dobbelaere et al., 2003).



#### 4.6. Importancia de los biofertilizantes en América Latina

La comercialización y el uso de biofertilizantes inició hace 120 años a nivel global, y en el presente existen 150 productos que componen el 5% en el mercado de fertilización agrícola (Verma et al., 2019). La demanda de estos productos se distribuye de la siguiente forma: 79% biofertilizantes compuestos por rizobacterias, 15% hongos micorrícicos y 6% restante en otro tipo de inoculantes (Tabla 16). Adicionalmente, en el año 2017, el mercado de biofertilizantes recaudó su cifra más alta, con 1263.4 millones de dólares, y se estima que para el año 2023 alcanzará los 2304.2 millones de dólares (Owen et al., 2015; POLARIS MARKET RESEARCH, 2021).

**Tabla 16** Principales productos comerciales de biofertilizantes producidos en el continente americano. Adaptado de Maçik et al., 2020.

Nombre comercial	Especie/ Género	Tipo de Biofertilizante	Región
BiAgro 10	<i>Bradyrhizobium japonicum</i>		
Dimargon	<i>Azotobacter chroococcum</i>	Fijadores de nitrógeno	América del Sur
Nodulator XL	<i>Rhizobium leguminosarum</i>		América del Norte
FOSFOSOL	<i>Penicillium janthinellum</i>		
FOSFORINA	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Solubilizadores de fósforo	América del Sur
Liquid PSA	<i>Pseudomonas aurantiaca</i>		
Inogro	Consorcio de 30 microorganismos	Promotores de crecimiento	América del Norte
SumaGrow	Consorcio de 30 microorganismos		

Para el caso de los países de América Latina la agricultura es una de las principales fuerzas productivas, pero todavía domina el uso de fertilizantes de síntesis química, que ocupan 27.2 toneladas por cada mil hectáreas de suelo agrícola cultivado (Reyes y Cortés, 2017). Sin embargo, en la última década, con los diferentes avances científicos, se ha demostrado que los biofertilizantes son una tecnología renovable, amigable con el ambiente e inofensiva con los seres humanos (Herrmann et al., 2015),.

Estos podrían impulsar el desarrollo productivo y económico del sector agrícola en naciones donde se emplean, especialmente aquellas que se encuentran en vías de desarrollo, debido a que se establecería un escenario común anexando al agricultor, el gobierno y la academia (Mishra y Dash, 2014).

Actualmente, en América Latina se proyecta un panorama positivo en la producción y empleo de biofertilizantes basados en especies microbianas nativas, debido a que se han registrado un total de 49 patentes y 122 solicitudes de patente que se distribuyen en diferentes países de la región (Tabla 17) (Barajas, 2017).

**Tabla 17** Distribución de las solicitudes e invenciones de patentes con biofertilizantes en países de América Latina. Adaptado de Barajas, 2017.

<b>País</b>	<b>Número de solicitudes</b>	<b>Número de Patentes</b>
Colombia	32	32
Brasil	36	15
México	37	15
Argentina	5	1
Cuba	12	1

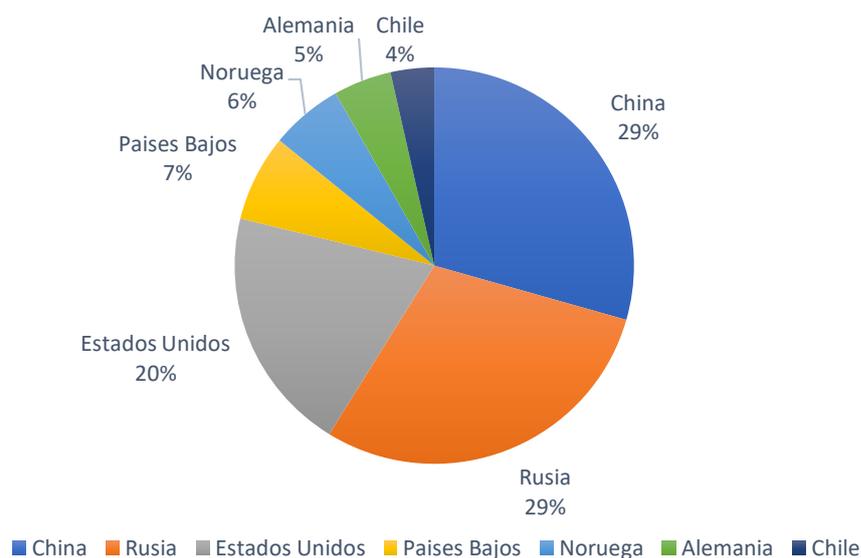
#### **4.6.1. Caso Ecuador**

La agricultura en Ecuador tiene un rol fundamental ya que representa al 10% de la población económicamente activa y genera el 6.9% del PIB nacional (Tabla 5) (Charcopa et al., 2017). No obstante, en toda su historia ha dependido de la importación de fertilizantes químicos, especialmente de urea (30.6%) y cloruro de potasio (20.9%), porque no dispone de la materia prima e infraestructura necesaria para su fabricación y los únicos registros que existen es de elaboración artesanal de fertilizantes orgánicos con residuos animales (Condor et al., 2015).

El origen del 99.5% de los fertilizantes que se comercializan en todo el Ecuador es extranjero y dependen de las relaciones diplomáticas que se mantengan en un determinado periodo de gobernanza. Hasta el año 2020 el volumen principal de importaciones se encontraba distribuido de la siguiente forma: China (208 mil toneladas), Rusia (205 mil), Estados Unidos (142 mil toneladas), con una salida de divisas de 397 millones de dólares (Figura 26) (BCE, 2021).

**Tabla 18** Cantidad de fertilizantes químicos aplicados a los cultivos agrícolas más importantes del Ecuador, en el año 2020. Adaptado de INEC, 2020.

<b>Cultivos permanentes</b>	<b>Ton/ha</b>	<b>Cultivos transitorios</b>	<b>Ton/ha</b>
Banano de exportación	0.250	Zapallo	0.229
Piña	0.186	Maíz duro	0.206
Pera	0.104	Brócoli	0.166
Caña de azúcar	0.102	Arroz	0.125
Tomate de árbol	0.068	Maíz duro seco	0.115
Babaco	0.039	Tomate riñón	0.094
Mora	0.032	Pimiento	0.090
Chirimoya	0.032	Pepinillo	0.088
Limón	0.029	Maíz duro choclo	0.082
Fresas	0.025	Melón	0.073



**Figura 26** Principales países que exportan fertilizantes químicos al Ecuador. Adaptado de BCE, 2021

En este contexto, la sujeción de Ecuador a los precios impuestos por los países exportadores de fertilizantes químicos, desencadena una serie de eventos que repercute, principalmente, en el incremento del costo de comercialización de alimentos de primera necesidad en el consumidor ecuatoriano, llegando hasta un 16,5 % (Condor et al., 2015). Por tal motivo, el gobierno ecuatoriano ha gestionado desde el año 2008 hasta la actualidad múltiples decretos ejecutivos con el fin de regular y subsidiar insumos agrícolas, especialmente la urea (Acosta et al., 2008).

Con los argumentos establecidos previamente, sumada a la crisis mundial por el conflicto Rusia-Ucrania (2022), el precio de la urea en el Ecuador se ha visto afectado, incrementando su costo hasta llegar a 55 dólares por saco (100 libras), en 2022, un valor insostenible para los pequeños agricultores. En este sentido, se está buscando alternativas tecnológicas que permitan reemplazar este tipo de insumos agrícolas, como son los biofertilizantes microbianos. Lastimosamente, en el país no existen programas de aplicación a gran escala y el uso de estos fertilizantes se reduce a ensayos experimentales por instituciones de educación superior y gubernamentales (BCE, 2021; FAO, 2022).

El caso más destacado pertenece al INIAP, que desde el año 2003 realiza un proyecto para la recolección y asilamiento de bacterias del género *Azospirillum* en diferentes provincias productoras de maíz (Yáñez et al., 2015). Como resultado de dicho trabajo, existe el producto comercial Fertibacter-maíz (Figura 27) con el cual se han

realizado diferentes pruebas en plantas de maíz de altura con resultados positivos en sus rendimientos. Como es el caso más exitoso en las provincias de Chimborazo y Tungurahua, en estos experimentos se obtuvieron una media de 0.7 t/ha y 0.8 t/ha respectivamente, en contraste con los testigos con un promedio de 0.3 t/ha (Zambrano et al., 2020).

Este producto es de distribución gratuita y el INIAP cuenta en sus instalaciones con una planta de producción. Por lo tanto, en los últimos años se han destinado diversos eventos y recursos como instructivos didácticos para la difusión en productores de maíz de la zona rural, donde se desconocen los beneficios de su aplicación y por los subsidios del gobierno aún se mantiene el empleo de la urea (MAGAP,2021).



**Figura 27** Biofertilizante de origen ecuatoriano Fertibacter-maíz elaborado por el INIAP. Tomado de Yánez et al., 2015.

De igual forma, la empresa Edifarm se encuentra en la fase de prueba de un biofertilizante microbiano con cepas nativas de *Azospirillum* y *Bacillus*, el mismo que fue aplicado en siete variedades de cultivos de rosas en los cantones de Cayambe, Pedro Moncayo y Salcedo, con resultados positivos en la productividad y economía de las fincas donde se realizaron estas evaluaciones (Vinueza y Villalobos, 2022).

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- En América Latina, se ha investigado ampliamente sobre el uso de biofertilizantes a partir de diversos microorganismos en distintos cultivos agrícolas, tanto en condiciones de laboratorio, invernadero como en campo. La estrategia de inoculación más utilizada ha sido la de emplear consorcios de bacterias simbióticas y no simbióticas, así como de hongos filamentosos y micorrícicos, con el fin de promover la fertilidad del suelo y mejorar la calidad y rendimiento de los cultivos.
- La especie *Azospirillum brasilense* es ampliamente utilizada en la inoculación de cultivos agrícolas, ya sea en forma individual o en estrategias de co-inoculación con otras cepas microbianas. Actualmente, se emplea como base para la fabricación de diversos productos comerciales bajo la denominación de fertilizantes biológicos, debido a su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico y mejorar el crecimiento de las plantas. Esta especie ha demostrado su eficacia en el incremento de los rendimientos agrícolas, y es una de las más estudiadas en el campo de los biofertilizantes microbianos.
- Los efectos de la aplicación de biofertilizantes microbianos varían según la especie vegetal y están influenciados por las condiciones ambientales en las que se llevan a cabo los experimentos. No obstante, los resultados del estudio indican que la inoculación microbiana puede conducir a mejoras notables en el rendimiento y los niveles de macronutrientes a nivel foliar, con aumentos de hasta el 100% y 85%, respectivamente, en comparación con los cultivos que no recibieron dicha inoculación.
- A pesar de que América Latina representa el 14% de la producción agrícola mundial, el uso de biofertilizantes microbianos a gran escala en la región todavía está en desarrollo. Predomina el uso de fertilizantes químicos, como la urea, en la mayoría de los países de la región. Aunque se han realizado avances en la promoción y el uso de biofertilizantes microbianos en algunos países de América Latina, aún queda mucho por hacer para su adopción generalizada en la agricultura de la región. Además, se requiere de mayor inversión en investigación y

desarrollo, así como de políticas y programas de promoción para fomentar el uso de biofertilizantes microbianos.

- Los resultados de la investigación revelan que México (38%), Brasil (16%) y Argentina (10%) son los países que tienen el mayor porcentaje de aporte en la producción científica sobre biofertilizantes microbianos. Esta tendencia se explica en gran medida por la presencia de biofábricas nacionales que producen una amplia variedad de fertilizantes biológicos con cepas endémicas, así como por la existencia de programas gubernamentales que promueven la inoculación de suelos agrícolas, abarcando hasta millones de hectáreas.
- La fabricación y uso de biofertilizantes microbianos en Ecuador es limitado. Hasta la fecha, solo se ha registrado un producto elaborado con cepas microbianas nativas (*Azospirillum*), que pertenece al INIAP y ha sido objeto de varias investigaciones en campo. Además, la producción científica de gran impacto en el país sobre el tema es escasa, como se evidencia en el presente estudio, donde el aporte bibliográfico fue del 5% del total.

## 5.2 Recomendaciones

- Investigar el uso de cepas de *Azospirillum brasilense* en suelos agrícolas de Ecuador.
- Plantear un proyecto integral con el fin de realizar una bioprospección y aislamiento de cepas nativas de *Azospirillum* y probar su efectividad a nivel *in-vitro* e *in-situ*. Con estos resultados a futuro, formular un producto comercial.
- Debido a la heterogeneidad de los datos que se generan en una revisión bibliográfica se recomienda considerar técnicas de minería de datos o machine learning.
- Plantear investigaciones en las que se recolecte, aísle e identifique especies microbianas nativas. Además, probar la capacidad de fijación o absorción de macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio.

- Generar un metaanálisis que recopile y analice datos cuantitativos referentes a las de fijación de nitrógeno de ejemplares bacterianos pertenecientes al género *Azospirillum* en cultivos de interés económico.
- Realizar un análisis económico actual que compare el costo de las dosis de biofertilizantes microbiano versus los fertilizantes de síntesis química para la producción agrícola a gran escala en el contexto de América Latina.
- Producir un documento en el que se recopile y compare las políticas públicas vigentes con respecto al uso de biofertilizantes microbianos en países como México, Argentina y Brasil, frente a las leyes actuales del tema en Ecuador.

## REFERENCIAS

- Abd-Alla, M. H., El-Enany, A.-W. E., Nafady, N. A., Khalaf, D. M., & Morsy, F. M. (2014). Synergistic interaction of *Rhizobium leguminosarum* bv. *Viciae* and arbuscular mycorrhizal fungi as a plant growth promoting biofertilizers for faba bean (*Vicia faba* L.) in alkaline soil. *Microbiological Research*, *169*(1), 49-58.  
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.07.007>
- Abdel Latef, A. A. H., Abu Alhmad, M. F., Kordrostami, M., Abo-Baker, A.-B. A.-E., & Zakir, A. (2020). Inoculation with *Azospirillum lipoferum* or *Azotobacter chroococcum* Reinforces Maize Growth by Improving Physiological Activities Under Saline Conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, *39*(3), 1293-1306.  
<https://doi.org/10.1007/s00344-020-10065-9>
- Acosta, A., Jácome, H., Mayoral, F., & Schuldt, J. (2008). *Análisis de coyuntura económica* (FLACSO). <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/110529-opac>
- Afanador Barajas, L. (2017). *Biofertilizantes: Conceptos, beneficios y aplicación en Colombia*.
- Agarwal, N., & Liu, H. (2009). Blog Clustering and Community Discovery. En N. Agarwal & H. Liu (Eds.), *Modeling and Data Mining in Blogosphere* (pp. 20-33). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-01898-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-01898-5_2)
- Aldás-Jarrín, J. C., Zurita-Vásquez, J. H., Cruz-Tobar, S. E., Villacís-Aldaz, L. A., Pomboza-Tamaquiza, P. P., & León-Gordón, O. A. (2016). Efecto biofertilizante de azolla—Anabaena en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *Journal of the Selva Andina Biosphere*, *4*(2), 109-115.
- Álvarez, A., & Aguilar-Gallegos, N. (2005). *Manual introductorio al análisis de redes sociales. Medidas de centralidad*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4053.7927>
- Alves, G. C., Dos santos, C. L. R., Zilli, J. E., Dos reis junior, F. B., Marriel, I. E., da F. BREDA, F. A., Boddey, R. M., & Reis, V. M. (2021). Agronomic evaluation of *Herbaspirillum*

- seropedicae strain ZAE94 as an inoculant to improve maize yield in Brazil. *Pedosphere*, 31(4), 583-595. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60004-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60004-8)
- An, H., Owens, J., Beres, B., Li, Y., & Hao, X. (2021). Nitrous oxide emissions with enhanced efficiency and conventional urea fertilizers in winter wheat. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 119. <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10118-9>
- Anderson, T. R., Hawkins, E., & Jones, P. D. (2016a). CO<sub>2</sub>, the greenhouse effect and global warming: From the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, 40(3), 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>
- Anderson, T. R., Hawkins, E., & Jones, P. D. (2016b). CO<sub>2</sub>, the greenhouse effect and global warming: From the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, 40(3), 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>
- Anibasa, G. (2012). The Comparative study of the effect of organic manure cow dung and inorganic fertilizer N.P.K on the growth rate of maize (*Zea Mays* L). *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 2, 516-519.
- Aquilanti, L., Favilli, F., & Clementi, F. (2004). Comparison of different strategies for isolation and preliminary identification of *Azotobacter* from soil samples. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(9), 1475-1483. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.04.024>
- Arias, J. (2012, abril). *Algorithms*. Algorithms and More. <https://jariasf.wordpress.com/category/algorithms/>
- Astudillo, A. L., Rodríguez, L. M., Lubo, C. M., López, J. A., Orozco, O. A., Sandoval, J. S., & Arenas, F. (2018). Evaluación de las emisiones de GEI por fertilización del cultivo de caña de azúcar, desde un enfoque en dinámica de sistemas. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 1-17.

- Bahadur, I., Maurya, R., Roy, P., & Kumar, A. (2019). Potassium-Solubilizing Bacteria (KSB): A Microbial Tool for K-Solubility, Cycling, and Availability to Plants. En A. Kumar & V. S. Meena (Eds.), *Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Agricultural Sustainability: From Theory to Practices* (pp. 257-265). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-7553-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-13-7553-8_13)
- Barbier, E. B. (2003). Explaining Agricultural Expansion, Resource Booms and Growth in Latin America. *Environment, Development and Sustainability*, 5(3), 437-458.  
<https://doi.org/10.1023/A:1025781130650>
- Barbosa, J. Z., Hungria, M., Sena, J. V. da S., Poggere, G., dos Reis, A. R., & Corrêa, R. S. (2021). Meta-analysis reveals benefits of co-inoculation of soybean with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. In Brazil. *Applied Soil Ecology*, 163, 103913.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103913>
- Bashan, Y. (2005). *Bacteria / Plant growth-promotion* (pp. 103-115).
- Bashan, Y., & de-Bashan, L. E. (2010). Chapter Two—How the Plant Growth-Promoting Bacterium *Azospirillum* Promotes Plant Growth—A Critical Assessment. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 108, pp. 77-136). Academic Press.  
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08002-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08002-8)
- BCE. (2021, enero). *Cuentas Nacionales Anuales*.  
<https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Administracion/CuentasNacionalesAnuales.html>
- Behera, B. C., Singdevsachan, S. K., Mishra, R. R., Dutta, S. K., & Thatoi, H. N. (2014). Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilising microorganism in mangrove—A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 3(2), 97-110.  
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.09.008>
- Bellenger, J. P., Xu, Y., Zhang, X., Morel, F. M. M., & Kraepiel, A. M. L. (2014). Possible contribution of alternative nitrogenases to nitrogen fixation by asymbiotic N<sub>2</sub>-fixing

- bacteria in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 69, 413-420.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.11.015>
- Benizri, E., & Baudoin, E. (2001). Root Colonization by Inoculated Plant Growth-Promoting Rhizobacteria. *Biocontrol Science and Technology - BIOCONTROL SCI TECHNOL*, 11, 557-574. <https://doi.org/10.1080/09583150120076120>
- Berruti, A., Lumini, E., Balestrini, R., & Bianciotto, V. (2015). Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1559. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559>
- Berthrong, S. T., Yeager, C. M., Gallegos-Graves, L., Steven, B., Eichorst, S. A., Jackson, R. B., & Kuske, C. R. (2014). Nitrogen Fertilization Has a Stronger Effect on Soil Nitrogen-Fixing Bacterial Communities than Elevated Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(10), 3103-3112. <https://doi.org/10.1128/AEM.04034-13>
- Bhattacharya, A. (2021). Effect of Soil Water Deficit on Growth and Development of Plants: A Review. En A. Bhattacharya (Ed.), *Soil Water Deficit and Physiological Issues in Plants* (pp. 393-488). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-6276-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-33-6276-5_5)
- Bianco, S. (2016). Análisis Comparativo de Algoritmos de Minería de Subgrafos Frecuentes. *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software*, 4, 111.  
<https://doi.org/10.18294/relais.2016.111-142>
- Bisang, R., Stubrin, L., & Anlló, G. (2011). *Las empresas de biotecnología en Argentina*.  
<https://repositorio.cepal.org/handle/11362/3841>
- Blanco-Vargas, A., Rodríguez-Gacha, L. M., Sánchez-Castro, N., Garzón-Jaramillo, R., Pedroza-Camacho, L. D., Poutou-Piñales, R. A., Rivera-Hoyos, C. M., Díaz-Ariza, L. A., & Pedroza-Rodríguez, A. M. (2020). Phosphate-solubilizing *Pseudomonas* sp., and *Serratia* sp., co-culture for *Allium cepa* L. growth promotion. *Heliyon*, 6(10), e05218.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05218>

- Bloem, E., Albiñá, A., Elving, J., Hermann, L., Lehmann, L., Sarvi, M., Schaaf, T., Schick, J., Turtola, E., & Ylivainio, K. (2017). Contamination of organic nutrient sources with potentially toxic elements, antibiotics and pathogen microorganisms in relation to P fertilizer potential and treatment options for the production of sustainable fertilizers: A review. *Science of The Total Environment*, 607-608, 225-242.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.274>
- Boivin, S., Ait Lahmidi, N., Sherlock, D., Bonhomme, M., Dijon, D., Heulin-Gotty, K., Le-Queré, A., Pervent, M., Tauzin, M., Carlsson, G., Jensen, E., Journet, E.-P., Lopez-Bellido, R., Seidenglanz, M., Marinkovic, J., Colella, S., Brunel, B., Young, P., & Lepetit, M. (2020). Host-specific competitiveness to form nodules in *Rhizobium leguminosarum* symbiovar *viciae*. *New Phytologist*, 226(2), 555-568. <https://doi.org/10.1111/nph.16392>
- Boonlue, S., Surapat, W., Pukahuta, C., Suwanarit, P., Suwanarit, A., & Morinaga, T. (2012). Diversity and efficiency of arbuscular mycorrhizal fungi in soils from organic chili (*Capsicum frutescens*) farms. *Mycoscience*, 53(1), 10-16.  
<https://doi.org/10.1007/s10267-011-0131-6>
- Borrego, M. D. P., Pérez, M. R. de Z., & Fernández, R. M. R. (2015). La Producción Científica Sobre Biofertilizantes En Cuba En El Período 2008-2012: Un Análisis Bibliométrico De Las Revistas Cubanas. *Cultivos Tropicales*, 36(1), 44-54.
- Botella, J., & Zamora, Á. (2017). El meta-análisis: Una metodología para la investigación en educación. *Educación XXI: revista de la Facultad de Educación*, 20(2), 17-38.  
<https://doi.org/10.5944/educxx1.19030>
- Calabi-Floody, M., Medina, J., Rumpel, C., Condrón, L. M., Hernández, M., Dumont, M., & Mora, M. de la L. (2018). Chapter Three—Smart Fertilizers as a Strategy for Sustainable Agriculture. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 147, pp. 119-157). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.10.003>

- Camelo, M., Vera, S. P., & Bonilla, R. R. (2011). Mecanismos de acción de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 12(2), Art. 2. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol12\\_num2\\_art:227](https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num2_art:227)
- Caravaca, F., Alguacil, M. M., Azcón, R., Díaz, G., & Roldán, A. (2004). Comparing the effectiveness of mycorrhizal inoculation and amendment with sugar beet, rock phosphate and *Aspergillus niger* to enhance field performance of the leguminous shrub *Dorycnium pentaphyllum* L. *Applied Soil Ecology*, 25(2), 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2003.08.002>
- Cassán, F., & Diaz-Zorita, M. (2016). *Azospirillum* sp. in current agriculture: From the laboratory to the field. *Soil Biology and Biochemistry*, 103, 117-130. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.08.020>
- Cassán, F., Vanderleyden, J., & Spaepen, S. (2014). Physiological and Agronomical Aspects of Phytohormone Production by Model Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) Belonging to the Genus *Azospirillum*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33(2), 440-459. <https://doi.org/10.1007/s00344-013-9362-4>
- Charcopa, K. F. S., Ponce, F. Q., Quiñonez, L. M. V., & Villacrés, F. C. (2017). Biofertilizantes una alternativa ecológica para la agricultura frente al cambio climático en el Ecuador. *Dominio de las Ciencias*, 3(4), 75-88.
- Chávez Suárez, L., Álvarez Fonseca, A., & Ramírez Fernández, R. (2012). Apuntes sobre algunos reguladores del crecimiento vegetal que participan en la respuesta de las plantas frente al estrés abiótico. *Cultivos Tropicales*, 33(3), 47-56.
- Chávez-Díaz, I. F., Zelaya Molina, L. X., Cruz Cárdenas, C. I., Rojas Anaya, E., Ruíz Ramírez, S., Santos Villalobos, S. de los, Chávez-Díaz, I. F., Zelaya Molina, L. X., Cruz Cárdenas, C. I., Rojas Anaya, E., Ruíz Ramírez, S., & Santos Villalobos, S. de los. (2020). Consideraciones sobre el uso de biofertilizantes como alternativa agro-biotecnológica sostenible para la

- seguridad alimentaria en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(6), 1423-1436. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2492>
- Chen, Q., & Liu, S. (2019). Identification and Characterization of the Phosphate-Solubilizing Bacterium *Pantoea* sp. S32 in Reclamation Soil in Shanxi, China. *Frontiers in Microbiology*, 10, 2171. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02171>
- Chittora, D., Meena, M., Barupal, T., Swapnil, P., & Sharma, K. (2020). Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 22, 100737. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2020.100737>
- Ciesielczuk, T., Rosik-Dulewska, C., & Wiśniewska, E. (2015). Possibilities of Coffee Spent Ground Use as a Slow Action Organo-mineral Fertilizer. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 17, 422-437.
- Cisternas-Jamet, J., Salvatierra-Martínez, R., Vega-Gálvez, A., Stoll, A., Uribe, E., & Goñi, M. G. (2020). Biochemical composition as a function of fruit maturity stage of bell pepper (*Capsicum annum*) inoculated with *Bacillus amyloliquefaciens*. *Scientia Horticulturae*, 263, 109107. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109107>
- Combes-Meynet, E., Pothier, J. F., Moëgne-Loccoz, Y., & Prigent-Combaret, C. (2011). The *Pseudomonas* secondary metabolite 2,4-diacetylphloroglucinol is a signal inducing rhizoplane expression of *Azospirillum* genes involved in plant-growth promotion. *Molecular Plant-Microbe Interactions: MPMI*, 24(2), 271-284. <https://doi.org/10.1094/MPMI-07-10-0148>
- Condor, F., Cadillo, J., Liger, B., Rosero, G., Ramos, E., & Ramos-Martin, J. (2015). *Vulnerabilidad y dependencia internacional de fertilizantes en el Ecuador*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1006.7922>
- Coniglio, A., Mora, V., Puente, M., & Cassan, F. (2019). *Azospirillum* as Biofertilizer for Sustainable Agriculture: *Azospirillum brasilense* AZ39 as a Model of PGPR and Field Traceability (pp. 45-70). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-17597-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-17597-9_4)

- Cooper, J., Reed, E. Y., Hörtenhuber, S., Lindenthal, T., Løes, A.-K., Mäder, P., Magid, J., Oberson, A., Kolbe, H., & Möller, K. (2018). Phosphorus availability on many organically managed farms in Europe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *110*(2), 227-239. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9894-2>
- Cortés-Jiménez, D., Gómez-Guzmán, A., Iturriaga, G., Suárez, R., Alpírez, G. M., & Escalante, F. M. E. (2014). Microorganisms associated to tomato seedlings growing in saline culture act as osmoprotectant. *Brazilian Journal of Microbiology: [Publication of the Brazilian Society for Microbiology]*, *45*(2), 613-620. <https://doi.org/10.1590/s1517-83822014000200032>
- Couillerot, O., Ramírez-Trujillo, A., Walker, V., von Felten, A., Jansa, J., Maurhofer, M., Défago, G., Prigent-Combaret, C., Comte, G., Caballero-Mellado, J., & Moëgne-Loccoz, Y. (2013). Comparison of prominent Azospirillum strains in Azospirillum–Pseudomonas–Glomus consortia for promotion of maize growth. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *97*(10), 4639-4649. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4249-z>
- Dai, Z., Zhang, X., Tang, C., Muhammad, N., Wu, J., Brookes, P. C., & Xu, J. (2017). Potential role of biochars in decreasing soil acidification—A critical review. *Science of The Total Environment*, *581-582*, 601-611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.169>
- Darch, T., Blackwell, M. S. A., Hawkins, J. M. B., Haygarth, P. M., & Chadwick, D. (2014). A Meta-Analysis of Organic and Inorganic Phosphorus in Organic Fertilizers, Soils, and Water: Implications for Water Quality. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *44*(19), 2172-2202. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.790752>
- Darnhofer, I., Lindenthal, T., Bartel-Kratochvil, R., & Zollitsch, W. (2010). Conventionalisation of organic farming practices: From structural criteria towards an assessment based on organic principles. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *30*(1), 67-81. <https://doi.org/10.1051/agro/2009011>

- de Andrade, F. M., de Assis Pereira, T., Souza, T. P., Guimarães, P. H. S., Martins, A. D., Schwan, R. F., Pasqual, M., & Dória, J. (2019). Beneficial effects of inoculation of growth-promoting bacteria in strawberry. *Microbiological Research*, 223-225, 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.04.005>
- de Carvalho, R. H., da Conceição Jesus, E., Favero, V. O., Stralio, R., & Araújo, A. P. (2020). The Co-inoculation of Rhizobium and Bradyrhizobium Increases the Early Nodulation and Development of Common Beans. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(3), 860-864. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00171-8>
- del Rosario Cappellari, L., Santoro, M. V., Reinoso, H., Travaglia, C., Giordano, W., & Banchio, E. (2015). Anatomical, Morphological, and Phytochemical Effects of Inoculation with Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Peppermint (*Mentha piperita*). *Journal of Chemical Ecology*, 41(2), 149-158. <https://doi.org/10.1007/s10886-015-0549-y>
- Delgado, A., Quemada, M., & Villalobos, F. J. (2016). Fertilizers. En F. J. Villalobos & E. Fereres (Eds.), *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture* (pp. 321-339). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_23)
- Dessureault-Rompré, J., Zeharth, B., Burton, D., Georgallas, A., Sharifi, M., Porter, G., Moreau, G., Leclerc, Y., Arsenault, W., Chow, T., & Grant, C. (2012). Prediction of Soil Nitrogen Supply in Potato Fields using Soil Temperature and Water Content Information. *Soil Science Society of America Journal*, 76, 936-949. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0377>
- Devi, R., Kaur, T., Kour, D., Rana, K. L., Yadav, A., & Yadav, A. N. (2020). Beneficial fungal communities from different habitats and their roles in plant growth promotion and soil health. *Microbial Biosystems*, 5(1), 21-47. <https://doi.org/10.21608/mb.2020.32802.1016>

- Dhir, B. (2017a). Biofertilizers and Biopesticides: Eco-friendly Biological Agents. En R. Kumar, A. K. Sharma, & S. S. Ahluwalia (Eds.), *Advances in Environmental Biotechnology* (pp. 167-188). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4041-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4041-2_10)
- Dhir, B. (2017b). Biofertilizers and Biopesticides: Eco-friendly Biological Agents. En R. Kumar, A. K. Sharma, & S. S. Ahluwalia (Eds.), *Advances in Environmental Biotechnology* (pp. 167-188). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4041-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4041-2_10)
- Di Salvo, L. P., Cellucci, G. C., Carlino, M. E., & García de Salamone, I. E. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria inoculation and nitrogen fertilization increase maize (*Zea mays* L.) grain yield and modified rhizosphere microbial communities. *Applied Soil Ecology*, 126, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.02.010>
- Díaz-Zorita, M., Canigia, M. V. F., Bravo, O. Á., Berger, A., & Satorre, E. H. (2015). Field Evaluation of Extensive Crops Inoculated with *Azospirillum* sp. En F. D. Cassán, Y. Okon, & C. M. Creus (Eds.), *Handbook for Azospirillum: Technical Issues and Protocols* (pp. 435-445). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-06542-7\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06542-7_24)
- Dobbelaere, S., Vanderleyden, J., & Okon, Y. (2003). Plant Growth-Promoting Effects of Diazotrophs in the Rhizosphere. *Critical Reviews in Plant Sciences - CRIT REV PLANT SCI*, 22, 107-149. <https://doi.org/10.1080/713610853>
- Ehrlich, P. R., & Harte, J. (2015). Opinion: To feed the world in 2050 will require a global revolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(48), 14743-14744. <https://doi.org/10.1073/pnas.1519841112>
- Ejaz, S., Batool, S., Anjum, M. A., Naz, S., Qayyum, M. F., Naqqash, T., Shah, K. H., & Ali, S. (2020). Effects of inoculation of root-associative *Azospirillum* and *Agrobacterium* strains on growth, yield and quality of pea (*Pisum sativum* L.) grown under different nitrogen and phosphorus regimes. *Scientia Horticulturae*, 270, 109401. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109401>

- Elgharably, A., & Nafady, N. A. (2021). Inoculation with Arbuscular mycorrhizae, *Penicillium funiculosum* and *Fusarium oxysporum* enhanced wheat growth and nutrient uptake in the saline soil. *Rhizosphere*, *18*, 100345. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100345>
- Emmanuel, O. C., & Babalola, O. O. (2020). Productivity and quality of horticultural crops through co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting bacteria. *Microbiological Research*, *239*, 126569. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126569>
- Epule, T. E. (2019). Chapter 1 - Contribution of Organic Farming Towards Global Food Security: An Overview. En S. Chandran, M. R. Unni, & S. Thomas (Eds.), *Organic Farming* (pp. 1-16). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813272-2.00001-X>
- Estrategias para reducir la acidificación de suelos | Intagri S.C.* (s. f.). Recuperado 12 de diciembre de 2022, de <https://www.intagri.com/articulos/suelos/estrategias-para-reducir-la-acidificacion-de-suelos>
- Fahad, S., Hussain, S., Bano, A., Saud, S., Hassan, S., Shan, D., Khan, F. A., Khan, F., Chen, Y., Wu, C., Tabassum, M. A., Chun, M. X., Afzal, M., Jan, A., Jan, M. T., & Huang, J. (2015). Potential role of phytohormones and plant growth-promoting rhizobacteria in abiotic stresses: Consequences for changing environment. *Environmental Science and Pollution Research International*, *22*(7), 4907-4921. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3754-2>
- FAO. (2022, junio 9). *Biofertilizantes y otras tecnologías disponibles para enfrentar la Crisis de los Fertilizantes en la Región de América Latina y el Caribe | FAO*. <https://www.fao.org/americas/eventos/ver/es/c/1530162/>
- Fuentes-Ramirez, L. E., & Caballero-Mellado, J. (2006). Bacterial Biofertilizers. En Z. A. Siddiqui (Ed.), *PGPR: Biocontrol and Biofertilization* (pp. 143-172). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4152-7\\_5](https://doi.org/10.1007/1-4020-4152-7_5)

- Galleguillos, null, Aguirre, null, Miguel Barea J, null, & Azcón, null. (2000). Growth promoting effect of two *Sinorhizobium meliloti* strains (a wild type and its genetically modified derivative) on a non-legume plant species in specific interaction with two arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Science: An International Journal of Experimental Plant Biology*, 159(1), 57-63. [https://doi.org/10.1016/s0168-9452\(00\)00321-6](https://doi.org/10.1016/s0168-9452(00)00321-6)
- García de Salamone, I. E., Funes, J. M., Di Salvo, L. P., Escobar-Ortega, J. S., D'Auria, F., Ferrando, L., & Fernandez-Scavino, A. (2012). Inoculation of paddy rice with *Azospirillum brasilense* and *Pseudomonas fluorescens*: Impact of plant genotypes on rhizosphere microbial communities and field crop production. *Applied Soil Ecology*, 61, 196-204. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.12.012>
- García, E., Ibarra, E., Pérez, C., & Espinoza, C. (2018). *La nueva era de los fertilizantes*. La nueva era de los fertilizantes. <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1107-la-nueva-era-de-los-fertilizantes>
- García, J. E., Ruiz, M., Maroniche, G. A., Creus, C., Puente, M., Zawoznik, M. S., & Groppa, M. D. (2023). Inoculation with *Azospirillum argentinense* Az19 improves the yield of maize subjected to water deficit at key stages of plant development. *Revista Argentina de Microbiología*. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2023.01.002>
- García, J., Puente, M., Maroniche, G., & Peticari, A. (2013). *Estudio del Azospirillum como tecnología aplicable en los cultivos de trigo y maíz* (pp. 351-366).
- García, P., Ahumada, R., González Márquez, L., & Martínez, I. (2018). *Cambio climático, vulnerabilidad y adaptación* (pp. 17-37).
- Giri, B., Prasad, R., Wu, Q.-S., & Varma, A. (2019). *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment*.
- Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., Schmidt, H.-P., & Gerber, H. (2015). Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 667-678. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0251-4>

- Gómez-Godínez, L. J., Martínez-Romero, E., Banuelos, J., & Arteaga-Garibay, R. I. (2021). Tools and challenges to exploit microbial communities in agriculture. *Current Research in Microbial Sciences*, 2, 100062. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100062>
- González-Estrada, A., Camacho Amador, M., González-Estrada, A., & Camacho Amador, M. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero de la fertilización nitrogenada en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(8), 1733-1745. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.698>
- González-Mancilla, A., Rivera-Cruz, M. del C., Ortiz-García, C. F., Almaraz-Suárez, J. J., Trujillo-Narcía, A., & Cruz-Navarro, G. (2013). Uso de fertilizantes orgánicos para la mejora de propiedades químicas y microbiológicas del suelo y del crecimiento del cítrico Citrange troyer. *Universidad y ciencia*, 29(2), 123-139.
- Guertal, E. A. (2009). Slow-release Nitrogen Fertilizers in Vegetable Production: A Review. *HortTechnology*, 19(1), 16-19. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.19.1.16>
- Guo, S., Wang, P., Wang, X., Zou, M., Liu, C., & Hao, J. (2020). Microalgae as Biofertilizer in Modern Agriculture. En Md. A. Alam, J.-L. Xu, & Z. Wang (Eds.), *Microalgae Biotechnology for Food, Health and High Value Products* (pp. 397-411). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0169-2\\_12](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0169-2_12)
- Guzmán Duchén, D., Montero Torres, J., Guzmán Duchén, D., & Montero Torres, J. (2021). Interacción de bacterias y plantas en la fijación del nitrógeno. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 8(2), 87-101. <https://doi.org/10.53287/uyxf4027gf99e>
- Hermosa, R., Rubio, M. B., Cardoza, R. E., Nicolás, C., Monte, E., & Gutiérrez, S. (2013). The contribution of Trichoderma to balancing the costs of plant growth and defense. *International Microbiology: The Official Journal of the Spanish Society for Microbiology*, 16(2), 69-80. <https://doi.org/10.2436/20.1501.01.181>

- Hernández-León, R., González-Rodríguez, A., & Tapia-Torres, Y. (2022). Phosphorus Recycling, Biocontrol, and Growth Promotion Capabilities of Soil Bacterial Isolates from Mexican Oak Forests: An Alternative to Reduce the Use of Agrochemicals in Maize Cultivation. *Applied Microbiology*, 2(4), Art. 4. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol2040074>
- Herrmann, L., Atieno, M., Brau, L., & Lesueur, D. (2015). Microbial Quality of Commercial Inoculants to Increase BNF and Nutrient Use Efficiency. En *Biological Nitrogen Fixation* (pp. 1031-1040). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119053095.ch101>
- Hesham, A. E.-L., Kaur, T., Devi, R., Kour, D., Prasad, S., Yadav, N., Singh, C., Singh, J., & Yadav, A. N. (2021). Current Trends in Microbial Biotechnology for Agricultural Sustainability: Conclusion and Future Challenges. En A. N. Yadav, J. Singh, C. Singh, & N. Yadav (Eds.), *Current Trends in Microbial Biotechnology for Sustainable Agriculture* (pp. 555-572). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-6949-4\\_22](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6949-4_22)
- Hijbeek, R., ten Berge, H. F. M., Whitmore, A. P., Barkusky, D., Schröder, J. J., & van Ittersum, M. K. (2018). Nitrogen fertiliser replacement values for organic amendments appear to increase with N application rates. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110(1), 105-115. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9875-5>
- Huang, J., Xu, C., Ridoutt, B. G., Wang, X., & Ren, P. (2017). Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. *Journal of Cleaner Production*, 159, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.008>
- Idris, E. E., Iglesias, D. J., Talon, M., & Borriss, R. (2007). Tryptophan-dependent production of indole-3-acetic acid (IAA) affects level of plant growth promotion by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42. *Molecular Plant-Microbe Interactions: MPMI*, 20(6), 619-626. <https://doi.org/10.1094/MPMI-20-6-0619>

- Ihsan, M. Z., Daur, I., Alghabari, F., Alzamanan, S., Rizwan, S., Ahmad, M., Waqas, M., & Shafqat, W. (2019). Heat stress and plant development: Role of sulphur metabolites and management strategies. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 69(4), 332-342. <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1569715>
- INEC. (2020, enero). *Encuesta de Superficie y Producción- Agropecuaria- Continua (BBD)*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-superficie-y-produccion-agropecuaria-continua-bbd/>
- İpek, M., Aras, S., Arıkan, Ş., Eşitken, A., Pırlak, L., Dönmez, M. F., & Turan, M. (2017). Root plant growth promoting rhizobacteria inoculations increase ferric chelate reductase (FC-R) activity and Fe nutrition in pear under calcareous soil conditions. *Scientia Horticulturae*, 219, 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.02.043>
- Iturralde, E. T., Stocco, M. C., Faura, A., Mónaco, C. I., Cordo, C., Pérez-Giménez, J., & Lodeiro, A. R. (2020). Coinoculation of soybean plants with *Bradyrhizobium japonicum* and *Trichoderma harzianum*: Coexistence of both microbes and relief of nitrate inhibition of nodulation. *Biotechnology Reports*, 26, e00461. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00461>
- Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, 31(8), 651-666. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>
- Jang, J. H. (2021). Principal component analysis of hybrid functional and vector data. *Statistics in medicine*, 40(24), 5152-5173. <https://doi.org/10.1002/sim.9117>
- Jansa, J., Smith, F. A., & Smith, S. E. (2008). Are there benefits of simultaneous root colonization by different arbuscular mycorrhizal fungi? *The New Phytologist*, 177(3), 779-789. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02294.x>
- Joshi, H., Shourie, A., & Singh, A. (2020). Chapter 25—Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture. En P. K. Singh, A. Kumar, V. K. Singh, & A. K.

- Shrivastava (Eds.), *Advances in Cyanobacterial Biology* (pp. 385-396). Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819311-2.00025-5>
- Kalayu, G. (2019). Phosphate Solubilizing Microorganisms: Promising Approach as Biofertilizers. *International Journal of Agronomy*, 2019, e4917256.  
<https://doi.org/10.1155/2019/4917256>
- Khan, M., Mobin, M., Zahid, A., & Alamri, S. (2020). *Fertilizers and Their Contaminants in Soils, Surface and Groundwater*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.09888-8>
- Khan, Md. S., Zaidi, A., & Ahmad, E. (2014). Mechanism of Phosphate Solubilization and Physiological Functions of Phosphate-Solubilizing Microorganisms. En M. S. Khan, A. Zaidi, & J. Musarrat (Eds.), *Phosphate Solubilizing Microorganisms: Principles and Application of Microphos Technology* (pp. 31-62). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-08216-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08216-5_2)
- Kızılkaya, R. (2008). Yield response and nitrogen concentrations of spring wheat (*Triticum aestivum*) inoculated with *Azotobacter chroococcum* strains. *Ecological Engineering*, 33(2), 150-156. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.02.011>
- Koovalamkadu Velayudhan, P., Singh, A., & Korekallu Srinivasa, A. (2021). Exploring the global research trends in biofertilizers: A bibliometric approach. *3 Biotech*, 11(6), 304.  
<https://doi.org/10.1007/s13205-021-02794-9>
- Kumar, A., & Department of Biotechnology, G. G. V. (2016). PHOSPHATE SOLUBILIZING BACTERIA IN AGRICULTURE BIOTECHNOLOGY: DIVERSITY, MECHANISM AND THEIR ROLE IN PLANT GROWTH AND CROP YIELD. *International Journal of Advanced Research*, 4(4), 116.
- Kumar, A., Guleria, S., Mehta, P., Walia, A., Chauhan, A., & Shirkot, C. K. (2015). Plant growth-promoting traits of phosphate solubilizing bacteria isolated from *Hippophae rhamnoides* L. (Sea-buckthorn) growing in cold desert Trans-Himalayan Lahul and Spiti

- regions of India. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37(3), 48.  
<https://doi.org/10.1007/s11738-015-1793-z>
- Kumar, A., & Singh, V. (2015). *Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR). A promising approach for disease management* (pp. 195-209).
- Kumar, R., Kumar, R., & Prakash, O. (2019). *The Impact of Chemical Fertilizers on our Environment and Ecosystem* (pp. 69-86).
- Kuraganti, G., Edla, S., & Pallaval, V. B. (2020). Cyanobacteria as Biofertilizers: Current Research, Commercial Aspects, and Future Challenges. En A. N. Yadav, A. A. Rastegari, N. Yadav, & D. Kour (Eds.), *Advances in Plant Microbiome and Sustainable Agriculture: Functional Annotation and Future Challenges* (pp. 259-278). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-15-3204-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3204-7_11)
- Kuz, A., Falco, M., Giandini, R., Kuz, A., Falco, M., & Giandini, R. (2016). Análisis de redes sociales: Un caso práctico. *Computación y Sistemas*, 20(1), 89-106.  
<https://doi.org/10.13053/cys-20-1-2321>
- K.V., P., & Singh, A. (2019). *Realizing the potential of a low-cost technology to enhance crop yields: Evidence from a meta-analysis of biofertilizers in India*.
- Landis, T., & Ritchie, G. (2010). Capítulo 2 Evaluación de la Calidad de la Planta. En *Manual de Viveros para la Producción de Especies Forestales en Contenedor Volumen 7: Manejo de la Planta, Almacenamiento y Plantación*.  
file:///C:/Users/Hp/Downloads/02%20Capitulo%20%20Evaluacion%20de%20la%20Ca  
lidad%20de%20la%20Planta%20Final%20php.pdf
- Lian, B., Wang, B., Pan, M., Liu, C., & Teng, H. H. (2008). Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(1), 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.10.005>

- Lim, T. K. (2013a). *Solanum lycopersicum*. En T. K. Lim (Ed.), *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants: Volume 6, Fruits* (pp. 339-363). Springer Netherlands.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-007-5628-1\\_41](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5628-1_41)
- Lim, T. K. (2013b). *Zea mays*. En T. K. Lim (Ed.), *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants: Volume 5, Fruits* (pp. 416-447). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5653-3\\_21](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5653-3_21)
- Lotze-Campen, H. (2011). Climate Change, Population Growth, and Crop Production: An Overview. En *Crop Adaptation to Climate Change* (pp. 1-11). John Wiley & Sons, Ltd.  
<https://doi.org/10.1002/9780470960929.ch1>
- Maçik, M., Gryta, A., & Fraç, M. (2020). Chapter Two - Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 162, pp. 31-87). Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.001>
- Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A., & Tribedi, P. (2017). Biofertilizers: A potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4), 3315-3335.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-016-8104-0>
- Mahmud, K., Makaju, S., Ibrahim, R., & Missaoui, A. (2020). Current Progress in Nitrogen Fixing Plants and Microbiome Research. *Plants*, 9(1), Art. 1.  
<https://doi.org/10.3390/plants9010097>
- Marschner, P., & Rengel, Z. (2012). Chapter 12—Nutrient Availability in Soils. En P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition)* (pp. 315-330). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00012-1>
- Masciarelli, O., Llanes, A., & Luna, V. (2014). A new PGPR co-inoculated with *Bradyrhizobium japonicum* enhances soybean nodulation. *Microbiological Research*, 169(7), 609-615.  
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.10.001>

- McGrath, J. M., Spargo, J., & Penn, C. J. (2014). Soil Fertility and Plant Nutrition. *Plant Health*, 166-184. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00249-7>
- Meena, H., & Busi, S. (2019). Chapter 13—Use of microbial biofertilizers technology in agro-environmental sustainability. En J. S. Singh (Ed.), *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 199-211). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818258-1.00013-3>
- Meena, O., Maurya, B., & Meena, V. (2013). *Influence of K- solubilizing bacteria on release of potassium from waste mica. 1*, 53-56.
- Meira, S., Rodriguez, B. J., Confalone, A., Fatecha, F. D. A., Fernandes, J. M., Perez, G. O., & Van, D. B. M. (2019, julio 30). *Modelación del cultivo de soja en Latinoamérica*. JRC Publications Repository. <https://doi.org/10.2760/639226>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería-Productores de maíz conocen tecnologías de producción sostenible* (2021). Recuperado 18 de abril de 2023, de <https://www.agricultura.gob.ec/productores-de-maiz-conocen-tecnologias-de-produccion-sostenible/>
- Miransari, M. (2011). Soil microbes and plant fertilization. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 92(5), 875-885. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3521-y>
- Mishra, P., & Dash, D. (2014). Rejuvenation of Biofertilizer for Sustainable Agriculture and Economic Development. *Consilience*, 11, 41-61.
- Mohammadi, G. (2017). Phosphate Biofertilizers as Renewable and Safe Nutrient Suppliers for Cropping Systems: A Review. En V. Kumar, M. Kumar, S. Sharma, & R. Prasad (Eds.), *Probiotics and Plant Health* (pp. 113-130). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-3473-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3473-2_5)
- Mohandas, S., Poovarasan, S., Panneerselvam, P., Saritha, B., Upreti, K. K., Kamal, R., & Sita, T. (2013). Guava (*Psidium guajava* L.) rhizosphere *Glomus mosseae* spores harbor

- actinomycetes with growth promoting and antifungal attributes. *Scientia Horticulturae*, 150, 371-376. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.11.019>
- Molla, A. H., Manjurul Haque, Md., Amdadul Haque, Md., & Ilias, G. N. M. (2012). Trichoderma-Enriched Biofertilizer Enhances Production and Nutritional Quality of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) and Minimizes NPK Fertilizer Use. *Agricultural Research*, 1(3), 265-272. <https://doi.org/10.1007/s40003-012-0025-7>
- Moreno-Reséndez, A., Cantú Brito, J. E., Reyes-Carrillo, J. L., & Contreras-Villarreal, V. (2017). Forage maize nutritional quality according to organic and inorganic fertilization. *Scientia Agropecuaria*, 8(2), 127-135. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.05>
- Mus, F., Crook, M. B., Garcia, K., Garcia Costas, A., Geddes, B. A., Kouri, E. D., Paramasivan, P., Ryu, M.-H., Oldroyd, G. E. D., Poole, P. S., Udvardi, M. K., Voigt, C. A., Ané, J.-M., & Peters, J. W. (2016). Symbiotic Nitrogen Fixation and the Challenges to Its Extension to Nonlegumes. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(13), 3698-3710. <https://doi.org/10.1128/AEM.01055-16>
- Nath Bhowmik, S., & Das, A. (2018). Biofertilizers: A Sustainable Approach for Pulse Production. En R. S. Meena, A. Das, G. S. Yadav, & R. Lal (Eds.), *Legumes for Soil Health and Sustainable Management* (pp. 445-485). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0253-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0253-4_14)
- Nelofer, R., Syed, Q., Nadeem, M., Bashir, F., Mazhar, S., & Hassan, A. (2016). Isolation of Phosphorus-Solubilizing Fungus from Soil to Supplement Biofertilizer. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(6), 2131-2138. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1916-2>
- Nguyen, M. L., Spaepen, S., du Jardin, P., & Delaplace, P. (2019). Biostimulant effects of rhizobacteria on wheat growth and nutrient uptake depend on nitrogen application

- and plant development. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(1), 58-73.  
<https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1485074>
- Ning, C., Gao, P., Wang, B., Lin, W., Jiang, N., & Cai, K. (2017). Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(8), 1819-1831.  
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61476-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61476-4)
- Oberson, A., Frossard, E., Bühlmann, C., Mayer, J., Mäder, P., & Lüscher, A. (2013). Nitrogen fixation and transfer in grass-clover leys under organic and conventional cropping systems. *Plant and Soil*, 371(1), 237-255. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1666-4>
- OECD. (2017). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2017-2026*. Organisation for Economic Co-operation and Development. [https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/ocde-fao-perspectivas-agricolas-2017-2026\\_agr\\_outlook-2017-es](https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/ocde-fao-perspectivas-agricolas-2017-2026_agr_outlook-2017-es)
- Oelofse, M., Jensen, L. S., & Magid, J. (2013). The implications of phasing out conventional nutrient supply in organic agriculture: Denmark as a case. *Organic Agriculture*, 3(1), 41-55. <https://doi.org/10.1007/s13165-013-0045-z>
- Otieno, N., Culhane, J., Brazil, D., Germaine, K., Ryan, D., & Dowling, D. (2012, mayo 21). *Phosphate solubilisation and gluconic acid production by endophytic bacterial strains and ability to promote plant growth in oil seed rape (Brassica napus)*.
- Owen, D., Williams, A. P., Griffith, G. W., & Withers, P. J. A. (2015). Use of commercial bio-inoculants to increase agricultural production through improved phosphorous acquisition. *Applied Soil Ecology*, 86, 41-54.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.09.012>
- Pahalvi, H. N., Rafiya, L., Rashid, S., Nisar, B., & Kamili, A. N. (2021). Chemical Fertilizers and Their Impact on Soil Health. En G. H. Dar, R. A. Bhat, M. A. Mehmood, & K. R. Hakeem (Eds.), *Microbiota and Biofertilizers, Vol 2: Ecofriendly Tools for Reclamation of*

- Degraded Soil Environs* (pp. 1-20). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_1)
- Pal, N. (2020). Eutrophication- An Ecological Menace. *Biotica Research Today*, 2(7), Art. 7.
- Pastor-Bueis, R., Jiménez-Gómez, A., Barquero, M., Mateos, P. F., & González-Andrés, F. (2021). Yield response of common bean to co-inoculation with Rhizobium and Pseudomonas endophytes and microscopic evidence of different colonised spaces inside the nodule. *European Journal of Agronomy*, 122, 126187.  
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126187>
- Patil, H. J., & Solanki, M. K. (2016). Microbial Inoculant: Modern Era of Fertilizers and Pesticides. En D. P. Singh, H. B. Singh, & R. Prabha (Eds.), *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity: Vol. 1: Research Perspectives* (pp. 319-343). Springer India. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2647-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2647-5_19)
- Patíño-Torres, C. O., & Sanclemente-Reyes, O. E. (2014). Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF): Una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible. *Entramado*, 10(2), 288-297.
- Patra, A. K., Adhikari, T., & Bhardwaj, A. K. (2016). Enhancing Crop Productivity in Salt-Affected Environments by Stimulating Soil Biological Processes and Remediation Using Nanotechnology. En J. C. Dagar, P. C. Sharma, D. K. Sharma, & A. K. Singh (Eds.), *Innovative Saline Agriculture* (pp. 83-103). Springer India. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2770-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2770-0_4)
- Pfeiffer, S., Mitter, B., Oswald, A., Schloter-Hai, B., Schloter, M., Declerck, S., & Sessitsch, A. (2017). Rhizosphere microbiomes of potato cultivated in the High Andes show stable and dynamic core microbiomes with different responses to plant development. *FEMS Microbiology Ecology*, 93(2), fiw242. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiw242>
- Pirttilä, A. M., Mohammad Parast Tabas, H., Baruah, N., & Koskimäki, J. J. (2021). Biofertilizers and Biocontrol Agents for Agriculture: How to Identify and Develop New Potent

- Microbial Strains and Traits. *Microorganisms*, 9(4), Art. 4.  
<https://doi.org/10.3390/microorganisms9040817>
- POLARIS MARKET RESEARCH. (2021, enero). *Global Biofertilizers Market Size Report, 2022—2030*. <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/global-biofertilizers-market>
- Poveda, J., & Eugui, D. (2022). Combined use of Trichoderma and beneficial bacteria (mainly Bacillus and Pseudomonas): Development of microbial synergistic bio-inoculants in sustainable agriculture. *Biological Control*, 176, 105100.  
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105100>
- Prajapati, K., Sharma, M. C., & Modi, H. A. (2012). Isolation of two potassium solubilizing fungi from ceramic industry soils. *Life Sci Leaflets*, 5, 71-75.
- Prashar, P., & Shah, S. (2016). Impact of Fertilizers and Pesticides on Soil Microflora in Agriculture. En E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable Agriculture Reviews: Volume 19* (pp. 331-361). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_8)
- Rajawat, M. V. S., Ansari, W. A., Singh, D., & Singh, R. (2019). Potassium Solubilizing Bacteria (KSB). En D. P. Singh & R. Prabha (Eds.), *Microbial Interventions in Agriculture and Environment: Volume 3: Soil and Crop Health Management* (pp. 189-209). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-32-9084-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9084-6_9)
- Rao, N. K. S., Laxman, R. H., & Shivashankara, K. S. (2016). Physiological and Morphological Responses of Horticultural Crops to Abiotic Stresses. En N. K. S. Rao, K. S. Shivashankara, & R. H. Laxman (Eds.), *Abiotic Stress Physiology of Horticultural Crops* (pp. 3-17). Springer India. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2725-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2725-0_1)
- Restrepo-Correa, S. P., Pineda-Meneses, E. C., Ríos-Osorio, L. A., Restrepo-Correa, S. P., Pineda-Meneses, E. C., & Ríos-Osorio, L. A. (2017). Mecanismos de acción de hongos y bacterias empleados como biofertilizantes en suelos agrícolas: Una revisión

- sistemática. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(2), 335-351.  
[https://doi.org/10.21930/rcta.vol18\\_num2\\_art:635](https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num2_art:635)
- Restrepo-Franco, G. M., Marulanda-Moreno, S., Fe-Pérez, Y. de la Osa, A. D. la, Lucia-Baldani, V., & Hernández-Rodríguez, A. (2015). Bacterias solubilizadoras de fosfato y sus potencialidades de uso en la promoción del crecimiento de cultivos de importancia económica. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 46(1), Art. 1.
- Reyes, G. E., & Cortés, J. D. (2017). Intensidad en el uso de fertilizantes en América Latina y el Caribe (2006-2012). *Bioagro*, 29(1), 45-52.
- Rodríguez, O. A. H., Figueroa, C. H. R., Ávila, E. E. D., Barrios, D. L. O., & Prieto, V. M. G. (2017). Plant and livestock waste compost compared with inorganic fertilizer: Nutrient contribution to soil. *Terra Latinoamericana*, 35(4), 321-328.
- Romano-Armada, N., Amoroso, M. J., & Rajal, V. B. (2014). Impacts of Agriculture in Latin America: Problems and Solutions. En A. Alvarez & M. A. Polti (Eds.), *Bioremediation in Latin America: Current Research and Perspectives* (pp. 1-16). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05738-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05738-5_1)
- Romero-Perdomo, F., Abril, J., Camelo, M., Moreno-Galván, A., Pastrana, I., Rojas-Tapias, D., & Bonilla, R. (2017). Azotobacter chroococcum como biofertilizante bacteriano potencialmente útil para el algodón (*Gossypium hirsutum* L.): Efecto en la reducción de la fertilización nitrogenada. *Revista argentina de microbiología*, 49(4), 377-383.  
<https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.04.006>
- Rosa, E. A., & Dietz, T. (2012). Human drivers of national greenhouse-gas emissions. *Nature Climate Change*, 2(8), Art. 8. <https://doi.org/10.1038/nclimate1506>
- Rosenblueth, M., Ormeño-Orrillo, E., López-López, A., Rogel, M. A., Reyes-Hernández, B. J., Martínez-Romero, J. C., Reddy, P. M., & Martínez-Romero, E. (2018). Nitrogen Fixation in Cereals. *Frontiers in Microbiology*, 9.  
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2018.01794>

- Rütting, T., Aronsson, H., & Delin, S. (2018). Efficient use of nitrogen in agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110(1), 1-5. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9900-8>
- Ruytinx, J., Kafle, A., Usman, M., Coninx, L., Zimmermann, S. D., & Garcia, K. (2020). Micronutrient transport in mycorrhizal symbiosis; zinc steals the show. *Fungal Biology Reviews*, 34(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2019.09.001>
- Sahoo, H. R., & Gupta, N. (2014). Phosphate-Solubilizing Fungi: Impact on Growth and Development of Economically Important Plants. En M. S. Khan, A. Zaidi, & J. Musarrat (Eds.), *Phosphate Solubilizing Microorganisms: Principles and Application of Microphos Technology* (pp. 87-111). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-08216-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08216-5_4)
- Sakr, S., & Zomaya, A. Y. (Eds.). (2019). Machine Learning. En *Encyclopedia of Big Data Technologies* (pp. 1133-1133). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-77525-8\\_100205](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77525-8_100205)
- Salantur, A., Öztürk, A., Akten, S., Sahin, F., & Donmez, F. (2005). Effect of Inoculation with Non-indigenous and Indigenous Rhizobacteria of Erzurum (Turkey) Origin on Growth and Yield of Spring Barley. *Plant and Soil*, 275, 147-156. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-8094-z>
- Sallaberry, A., Zaidi, F., & Melançon, G. (2013). Model for generating artificial social networks having community structures with small-world and scale-free properties. *Social Network Analysis and Mining*, 3(3), 597-609. <https://doi.org/10.1007/s13278-013-0105-0>
- Salvatore, S., Bramness, J. G., & Røislien, J. (2016). Exploring functional data analysis and wavelet principal component analysis on ecstasy (MDMA) wastewater data. *BMC Medical Research Methodology*, 16, 81. <https://doi.org/10.1186/s12874-016-0179-2>

- Sanabria, J. (2014). Environmental Biotechnology Research: Challenges and Opportunities in Latin America. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 27(4), 681-694.  
<https://doi.org/10.1007/s10806-014-9502-2>
- Sarma, B. K., Yadav, S. K., Singh, S., & Singh, H. B. (2015). Microbial consortium-mediated plant defense against phytopathogens: Readdressing for enhancing efficacy. *Soil Biology and Biochemistry*, 87, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.04.001>
- Savcı, S. (2012). An Agricultural Pollutant: Chemical Fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3.  
<https://doi.org/10.7763/IJESD.2012.V3.191>
- Schönfeld, M., & Pfeffer, J. (2019). Fruchterman/Reingold (1991): Graph Drawing by Force-Directed Placement. En B. Holzer & C. Stegbauer (Eds.), *Schlüsselwerke der Netzwerkforschung* (pp. 217-220). Springer Fachmedien. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-21742-6\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-658-21742-6_49)
- Schütz, L., Gattinger, A., Meier, M., Müller, A., Boller, T., Mäder, P., & Mathimaran, N. (2018). Improving Crop Yield and Nutrient Use Efficiency via Biofertilization—A Global Meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 8.  
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.02204>
- Sgroy, V., Cassán, F., Masciarelli, O., Del Papa, M. F., Lagares, A., & Luna, V. (2009). Isolation and characterization of endophytic plant growth-promoting (PGPB) or stress homeostasis-regulating (PSHB) bacteria associated to the halophyte *Prosopis strombulifera*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(2), 371-381.  
<https://doi.org/10.1007/s00253-009-2116-3>
- Shaikh, S. S., & Sayyed, R. Z. (2015). Role of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria and Their Formulation in Biocontrol of Plant Diseases. En N. K. Arora (Ed.), *Plant Microbes Symbiosis: Applied Facets* (pp. 337-351). Springer India. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2068-8\\_18](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2068-8_18)

- Shaji, H., Chandran, V., & Mathew, L. (2021). Chapter 13—Organic fertilizers as a route to controlled release of nutrients. En F. B. Lewu, T. Volova, S. Thomas, & R. K.r. (Eds.), *Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture* (pp. 231-245). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819555-0.00013-3>
- Shamseldin, A., Abdelkhalek, A., & Sadowsky, M. J. (2017). Recent changes to the classification of symbiotic, nitrogen-fixing, legume-associating bacteria: A review. *Symbiosis*, *71*(2), 91-109. <https://doi.org/10.1007/s13199-016-0462-3>
- Sharma, A. (2017). A Review on the Effect of Organic and Chemical Fertilizers on Plants. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, *V*, 677-680. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.2103>
- Sharma, A., Shankhdhar, D., & Shankhdhar, S. C. (2016). Potassium-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Potassium Solubilization and Uptake. En V. S. Meena, B. R. Maurya, J. P. Verma, & R. S. Meena (Eds.), *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture* (pp. 203-219). Springer India. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2\\_15](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_15)
- Sharma, N., & Singhvi, R. (2017). Effects of Chemical Fertilizers and Pesticides on Human Health and Environment: A Review. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, *10*(6), 675. <https://doi.org/10.5958/2230-732X.2017.00083.3>
- Sharma, S., Gupta, R., Dugar, G., & Srivastava, A. K. (2012). Impact of Application of Biofertilizers on Soil Structure and Resident Microbial Community Structure and Function. En D. K. Maheshwari (Ed.), *Bacteria in Agrobiolgy: Plant Probiotics* (pp. 65-77). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27515-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27515-9_4)
- Sharon, J. A., Hathwaik, L. T., Glenn, G. M., Imam, S. H., & Lee, C. C. (2016). Isolation of efficient phosphate solubilizing bacteria capable of enhancing tomato plant growth. *Journal of soil science and plant nutrition*, *16*(2), 525-536. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000043>

- Shilev, S. (2013). Soil Rhizobacteria Regulating the Uptake of Nutrients and Undesirable Elements by Plants. En N. K. Arora (Ed.), *Plant Microbe Symbiosis: Fundamentals and Advances* (pp. 147-167). Springer India. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-1287-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-81-322-1287-4_5)
- Singh, M., Singh, D., Gupta, A., Pandey, K. D., Singh, P. K., & Kumar, A. (2019). Chapter Three - Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Application in Biofertilizers and Biocontrol of Phytopathogens. En A. K. Singh, A. Kumar, & P. K. Singh (Eds.), *PGPR Amelioration in Sustainable Agriculture* (pp. 41-66). Woodhead Publishing.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815879-1.00003-3>
- Somers, E., Ptacek, D., Gysegom, P., Srinivasan, M., & Vanderleyden, J. (2005). Azospirillum brasilense produces the auxin-like phenylacetic acid by using the key enzyme for indole-3-acetic acid biosynthesis. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(4), 1803-1810. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.4.1803-1810.2005>
- Somers, E., Vanderleyden, J., & Srinivasan, M. (2004). Rhizosphere bacterial signalling: A love parade beneath our feet. *Critical Reviews in Microbiology*, 30(4), 205-240.  
<https://doi.org/10.1080/10408410490468786>
- Sultan, H., Ahmed, N., Mubashir, M., & Danish, S. (2020). Chemical production of acidified activated carbon and its influences on soil fertility comparative to thermo-pyrolyzed biochar. *Scientific Reports*, 10(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57535-4>
- Sumbul, A., Ansari, R. A., Rizvi, R., & Mahmood, I. (2020). Azotobacter: A potential bio-fertilizer for soil and plant health management. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(12), 3634-3640. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.004>
- Suthar, H., Hingurao, K., Vaghashiya, J., & Parmar, J. (2017). Fermentation: A Process for Biofertilizer Production. En D. G. Panpatte, Y. K. Jhala, R. V. Vyas, & H. N. Shelat (Eds.), *Microorganisms for Green Revolution: Volume 1: Microbes for Sustainable Crop Production* (pp. 229-252). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6241-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6241-4_12)

- Syiem, M. B., Singh, A. K., & Rai, A. N. (2017). N<sub>2</sub>-Fixing Cyanobacterial Systems as Biofertilizer. En J. S. Singh & G. Seneviratne (Eds.), *Agro-Environmental Sustainability: Volume 1: Managing Crop Health* (pp. 43-61). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-49724-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49724-2_3)
- Tahir, M., Khalid, U., Ijaz, M., Shah, G. M., Naeem, M. A., Shahid, M., Mahmood, K., Ahmad, N., & Kareem, F. (2018). Combined application of bio-organic phosphate and phosphorus solubilizing bacteria (*Bacillus* strain MWT 14) improve the performance of bread wheat with low fertilizer input under an arid climate. *Brazilian Journal of Microbiology*, *49*, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.11.005>
- Tandon, A., Fatima, T., Anshu, Shukla, D., Tripathi, P., Srivastava, S., & Singh, P. C. (2020). Phosphate solubilization by *Trichoderma koningiopsis* (NBRI-PR5) under abiotic stress conditions. *Journal of King Saud University - Science*, *32*(1), 791-798.  
<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.02.001>
- Tarrand, J. J., Krieg, N. R., & Döbereiner, J. (1978). A taxonomic study of the *Spirillum lipoferum* group, with descriptions of a new genus, *Azospirillum* gen. Nov. And two species, *Azospirillum lipoferum* (Beijerinck) comb. Nov. And *Azospirillum brasilense* sp. Nov. *Canadian Journal of Microbiology*, *24*(8), 967-980. <https://doi.org/10.1139/m78-160>
- Teutscherova, N., Vazquez, E., Arango, J., Arevalo, A., Benito, M., & Pulleman, M. (2019). Native arbuscular mycorrhizal fungi increase the abundance of ammonia-oxidizing bacteria, but suppress nitrous oxide emissions shortly after urea application. *Geoderma*, *338*, 493-501. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.023>
- Thakur, N. (2017). Organic Farming, Food Quality, and Human Health: A Trisection of Sustainability and a Move from Pesticides to Eco-friendly Biofertilizers. En V. Kumar, M. Kumar, S. Sharma, & R. Prasad (Eds.), *Probiotics in Agroecosystem* (pp. 491-515). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4059-7\\_26](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4059-7_26)

- Thomas, C. L., Acquah, G. E., Whitmore, A. P., McGrath, S. P., & Haefele, S. M. (2019). The Effect of Different Organic Fertilizers on Yield and Soil and Crop Nutrient Concentrations. *Agronomy*, 9(12), Art. 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120776>
- Tian, D., & Niu, S. (2015). A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 10(2), 024019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024019>
- Tien, T. M., Gaskins, M. H., & Hubbell, D. H. (1979). Plant Growth Substances Produced by *Azospirillum brasilense* and Their Effect on the Growth of Pearl Millet (*Pennisetum americanum* L.). *Applied and Environmental Microbiology*, 37(5), 1016-1024.
- Tomer, S., Suyal, D. C., & Goel, R. (2016). Biofertilizers: A Timely Approach for Sustainable Agriculture. En D. K. Choudhary, A. Varma, & N. Tuteja (Eds.), *Plant-Microbe Interaction: An Approach to Sustainable Agriculture* (pp. 375-395). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2854-0\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2854-0_17)
- Tonhauzer, K., Tonhauzer, P., Szemesová, J., & Šiška, B. (2020). Estimation of N<sub>2</sub>O Emissions from Agricultural Soils and Determination of Nitrogen Leakage. *Atmosphere*, 11(6), Art. 6. <https://doi.org/10.3390/atmos11060552>
- Tortora, M. L., Vera, L., Grellet-Naval, N., Dantur, K., Núñez, M. de los Á., Alderete, M., Romero, E. R., Tortora, M. L., Vera, L., Grellet-Naval, N., Dantur, K., Núñez, M. de los Á., Alderete, M., & Romero, E. R. (2019). Aislamiento, caracterización y actividad de cepas de *Azospirillum brasilense* asociadas a la caña de azúcar. *Cultivos Tropicales*, 40(1). [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0258-59362019000100007&lng=es&nrm=iso&tIng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0258-59362019000100007&lng=es&nrm=iso&tIng=es)
- Tsavkelova, E. A., Klimova, S. Yu., Cherdyntseva, T. A., & Netrusov, A. I. (2006). Microbial producers of plant growth stimulators and their practical use: A review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 42(2), 117-126. <https://doi.org/10.1134/S0003683806020013>

- Turk, J., For, Dinh, H., Kaewpradit, W., Jogloy, S., Vorasoot, N., & Patanothai, A. (2018). Turkish Journal of Agriculture and Forestry Nutrient uptake of peanut genotypes with different levels of drought tolerance under midseason drought. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38, 495-505.
- Ucea-Herrera, J. I., Quiroz-Velásquez, J. D. C., & Hernández-Mendoza, J. L. (2020). Impacto de Azospirillum Brasilense, una Rizobacteria que estimula la producción del Ácido Indol-3-Acético como el mecanismo de mejora del crecimiento de las plantas en los cultivos agrícolas. *Revista Boliviana de Química*, 37(1), 34-39.
- Ulloa, J. A., Rosas Ulloa, P., Ramirez Ramirez, J. C., & Ulloa Rangel, B. E. (2011). EL FRIJOL (PHASEOLUS VULGARIS): SU IMPORTANCIA NUTRICIONAL Y COMO FUENTE DE FITOQUIMICOS. <http://fuente.uan.edu.mx/publicaciones/03-08/1.pdf>.  
<http://dspace.uan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/582>
- Uroz, S., Calvaruso, C., Turpault, M. P., Pierrat, J. C., Mustin, C., & Frey-Klett, P. (2007). Effect of the Mycorrhizosphere on the Genotypic and Metabolic Diversity of the Bacterial Communities Involved in Mineral Weathering in a Forest Soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(9), 3019-3027. <https://doi.org/10.1128/AEM.00121-07>
- Urrútia, G., & Bonfill, X. (2010). [PRISMA declaration: A proposal to improve the publication of systematic reviews and meta-analyses]. *Medicina Clinica*, 135(11), 507-511.  
<https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015>
- van Schöll, L., Kuyper, T. W., Smits, M. M., Landeweert, R., Hoffland, E., & Breemen, N. van. (2008). Rock-eating mycorrhizas: Their role in plant nutrition and biogeochemical cycles. *Plant and Soil*, 303(1), 35-47. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9513-0>
- Vandana, U. K., Chopra, A., Bhattacharjee, S., & Mazumder, P. B. (2017). Microbial Biofertilizer: A Potential Tool for Sustainable Agriculture. En D. G. Panpatte, Y. K. Jhala, R. V. Vyas, & H. N. Shelat (Eds.), *Microorganisms for Green Revolution: Volume 1: Microbes for*

- Sustainable Crop Production* (pp. 25-52). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6241-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6241-4_2)
- Vargas, M. A., Dovalina, M. P., & Arenas, J. L. de. (2004). La investigación agrícola en América Latina y el Caribe desde una perspectiva bibliométrica. *Anales de Documentación*, 7, 29-38.
- Vasile, A. J., Popescu, C., Ion, R. A., & Dobre, I. (2015). From conventional to organic in Romanian agriculture – Impact assessment of a land use changing paradigm. *Land Use Policy*, 46, 258-266. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.02.012>
- Velasco-Jiménez, A., Castellanos-Hernández, O., Acevedo-Hernández, G., Aarland, R. C., Rodríguez-Sahagún, A., Velasco-Jiménez, A., Castellanos-Hernández, O., Acevedo-Hernández, G., Aarland, R. C., & Rodríguez-Sahagún, A. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 333-345. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.470>
- Velázquez, E., Silva, L. R., Ramírez-Bahena, M.-H., & Peix, A. (2016). Diversity of Potassium-Solubilizing Microorganisms and Their Interactions with Plants. En V. S. Meena, B. R. Maurya, J. P. Verma, & R. S. Meena (Eds.), *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture* (pp. 99-110). Springer India. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_7)
- Velmourougane, K., Prasanna, R., Saxena, A. K., Singh, S. B., Chawla, G., Kaushik, R., Ramakrishnan, B., & Nain, L. (2017). Modulation of growth media influences aggregation and biofilm formation between *Azotobacter chroococcum* and *Trichoderma viride*. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 53(5), 546-556. <https://doi.org/10.1134/S0003683817050179>
- Verbon, E. H., & Liberman, L. M. (2016). Beneficial Microbes Affect Endogenous Mechanisms Controlling Root Development. *Trends in Plant Science*, 21(3), 218-229. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.01.013>

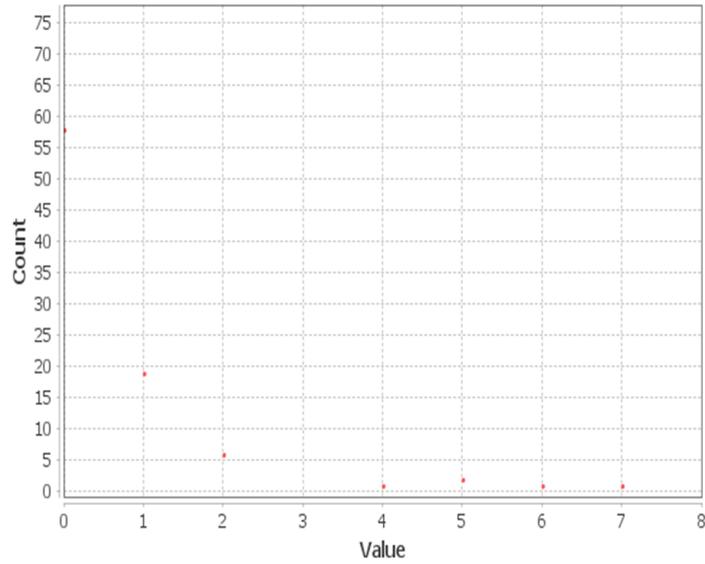
- Verma, M., Mishra, J., & Arora, N. K. (2019). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Diversity and Applications. En R. C. Sobti, N. K. Arora, & R. Kothari (Eds.), *Environmental Biotechnology: For Sustainable Future* (pp. 129-173). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-10-7284-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7284-0_6)
- Vigneron, N., Radhakrishnan, G. V., & Delaux, P.-M. (2018). What have we learnt from studying the evolution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis? *Current Opinion in Plant Biology*, 44, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2018.02.004>
- Vinueza, C., & Villalobos, C. (2022, agosto 23). Edifarm Ecuador | Revitalizar el suelo— Biofertilizantes. *Biofertilizantes un aspecto clave para la producción*.  
<https://www.edifarm.com.ec/revitalizar-el-suelo/>
- Walia, A., Guleria, S., Chauhan, A., & Mehta, P. (2017). Endophytic Bacteria: Role in Phosphate Solubilization. En D. K. Maheshwari & K. Annapurna (Eds.), *Endophytes: Crop Productivity and Protection: Volume 2* (pp. 61-93). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-66544-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66544-3_4)
- Wang, X., Fan, J., Xing, Y., Xu, G., Wang, H., Deng, J., Wang, Y., Zhang, F., Li, P., & Li, Z. (2019a). Chapter Three—The Effects of Mulch and Nitrogen Fertilizer on the Soil Environment of Crop Plants. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 153, pp. 121-173). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.08.003>
- Wang, X., Fan, J., Xing, Y., Xu, G., Wang, H., Deng, J., Wang, Y., Zhang, F., Li, P., & Li, Z. (2019b). Chapter Three—The Effects of Mulch and Nitrogen Fertilizer on the Soil Environment of Crop Plants. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 153, pp. 121-173). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.08.003>
- Wang, Y., Peng, S., Hua, Q., Qiu, C., Wu, P., Liu, X., & Lin, X. (2021). The Long-Term Effects of Using Phosphate-Solubilizing Bacteria and Photosynthetic Bacteria as Biofertilizers on Peanut Yield and Soil Bacteria Community. *Frontiers in Microbiology*, 12.  
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2021.693535>

- Wu, Y., Wu, J., Ma, Y., Lian, Y., Sun, H., Xie, D., Li, Y., Brookes, P. C., & Yao, H. (2019). Dynamic changes in soil chemical properties and microbial community structure in response to different nitrogen fertilizers in an acidified celery soil. *Soil Ecology Letters*, 1(3), 105-113. <https://doi.org/10.1007/s42832-019-0012-z>
- Wuang, S. C., Khin, M. C., Chua, P. Q. D., & Luo, Y. D. (2016). Use of Spirulina biomass produced from treatment of aquaculture wastewater as agricultural fertilizers. *Algal Research*, 15, 59-64. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.02.009>
- Yáñez G., C., Clavijo, F., & Cool Zambrano, C. A. (2015). *Biofertilizante. Fertibacter-maíz*. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/2630>
- Yuan, J., Sha, Z., Hassani, D., Zhao, Z., & Cao, L. (2017). Assessing environmental impacts of organic and inorganic fertilizer on daily and seasonal Greenhouse Gases effluxes in rice field. *Atmospheric Environment*, 155, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.02.007>
- Zambrano Mendoza, J. L., Sangoquiza, C., Yáñez, C., & Cho, J. (2020). *Uso del biofertilizante FertiBacter para Maíz*. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5685>
- Zambrano-Moreno, D. C., Avellaneda-Franco, L., Zambrano, G., & Bonilla-Buitrago, R. R. (2016). Scientometric analysis of Colombian research on bio-inoculants for agricultural production. *Universitas Scientiarum*, 21(1), 63-81. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC21-1.saoc>

## ANEXOS

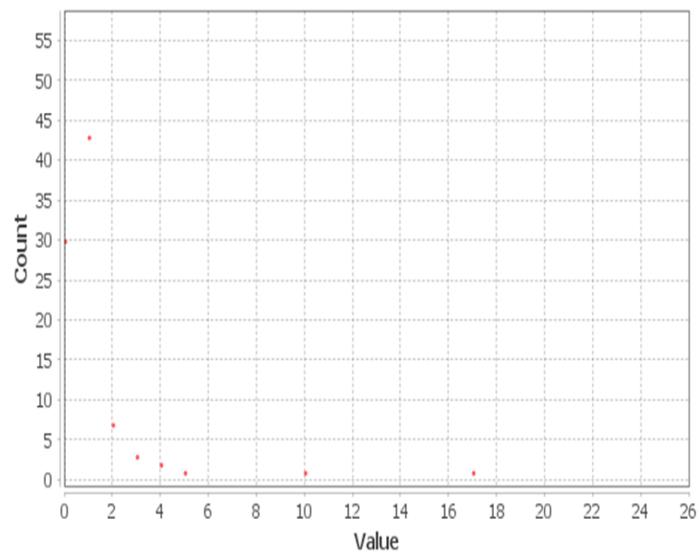
### *Anexo 1 Distribución de los pesos de salida en los géneros microbianos empleados como biofertilizantes*

#### **Out-Degree Distribution**



### *Anexo 2 Distribución de los pesos de salida en los géneros microbianos empleados como biofertilizantes*

#### **In-Degree Distribution**



**Anexo 3** Valor numérico de los pesos de entrada correspondiente a las especies empleadas como biofertilizantes

<b>Especie</b>	<b>Pesos de entrada</b>
<i>A. brasiliense</i>	10
<i>A. chroococcum</i>	5
<i>B. subtilis</i>	4
<i>H. seropedicae</i>	3
<i>T. harzianum</i>	3
<i>P. fluorescens</i>	3
<i>P. lilacinum</i>	2
<i>R. intraradices</i>	2
<i>Streptomyces sp.</i>	2
<i>B. japonicum</i>	2
<i>B. cereus</i>	2
<i>G. intraradices</i>	2
<i>A. larrymoorei</i>	1
<i>A. longula</i>	1
<i>B. indica</i>	1
<i>Burkholderia sp.</i>	1
<i>C. basilensis</i>	1
<i>Enterobacter sp.</i>	1
<i>F. mosseae</i>	1
<i>Fluviicola sp.</i>	1
<i>Gluconacetobacter sp.</i>	1
<i>K. variicola</i>	1
<i>Kocuria sp.</i>	1
<i>L. macroides</i>	1
<i>Pseudomona sp.</i>	1
<i>R. pisi</i>	1
<i>A. niger</i>	1
<i>A. tubingensis</i>	1
<i>Azospirillum sp.</i>	1
<i>Azotobacter sp.</i>	1
<i>Bradyrhizobium sp.</i>	1
<i>P. revicompectum</i>	1
<i>P. waksmanii</i>	1
<i>S. plymuthica</i>	1
<i>Serratia sp.</i>	1

<i>T. asperellum</i>	1
<i>T. atroviride</i>	1
<i>T. ghanense</i>	1
<i>B. licheniformis</i>	1
<i>B. megaterium</i>	1
<i>Bacillus sp.</i>	1
<i>G. claroideum</i>	1
<i>G. cubense</i>	1
<i>G. fasciculatum</i>	1
<i>G. mosseae</i>	1
<i>Glomus sp.</i>	1
<i>P. lini</i>	1
<i>P. luteola</i>	1
<i>P. migulae</i>	1
<i>P. putida</i>	1
<i>P. silesiensis</i>	1
<i>Pseudomonas sp.</i>	1

**Anexo 4** Valor numérico de los pesos de salida correspondiente a los géneros empleados como biofertilizantes

<b>Género</b>	<b>Pesos de salida</b>
<i>Azospirillum</i>	11
<i>Bacillus</i>	9
<i>Pseudomonas</i>	9
<i>Glomus</i>	7
<i>Azotobacter</i>	6
<i>Trichoderma</i>	6
<i>Bradyrhizobium</i>	3
<i>Herbaspirillum</i>	3
<i>Aspergillus</i>	2
<i>Penicillium</i>	2
<i>Purpureocillium</i>	2
<i>Rhizophagus</i>	2
<i>Serratia</i>	2
<i>Streptomyces</i>	2
<i>Acaulospora</i>	1
<i>Agrobacterium</i>	1
<i>Beijerinckia</i>	1
<i>Burkholderia</i>	1
<i>Cupriavidus</i>	1
<i>Enterobacter</i>	1
<i>Fluviicola</i>	1
<i>Funneliformis</i>	1
<i>Gluconacetobacter</i>	1
<i>Klebsiella</i>	1

<i>Kocuria</i>	1
<i>Lysinibacillus</i>	1
<i>Pseudomona</i>	1
<i>Rhizobium</i>	1

**Anexo 5** *Matriz de coeficientes de puntuación para la extracción de componentes principales*

<b>Matriz de coeficiente de puntuación de componente</b>			
	Componente		
	1	2	3
Altura	-0,103	0,236	0,737
Rendimiento	0,164	-0,216	0,526
Diámetro del tallo	0,149	-0,397	0,268
Longitud Raíz	0,183	-0,293	-0,153
Biomasa Seca Total	0,197	0,078	-0,247
Nitrógeno Foliar	0,213	0,204	0,104
Fósforo Foliar	0,216	0,248	0,069
Potasio Foliar	0,188	0,318	-0,056

Método de extracción: análisis de componentes principales.  
Puntuaciones de componente.

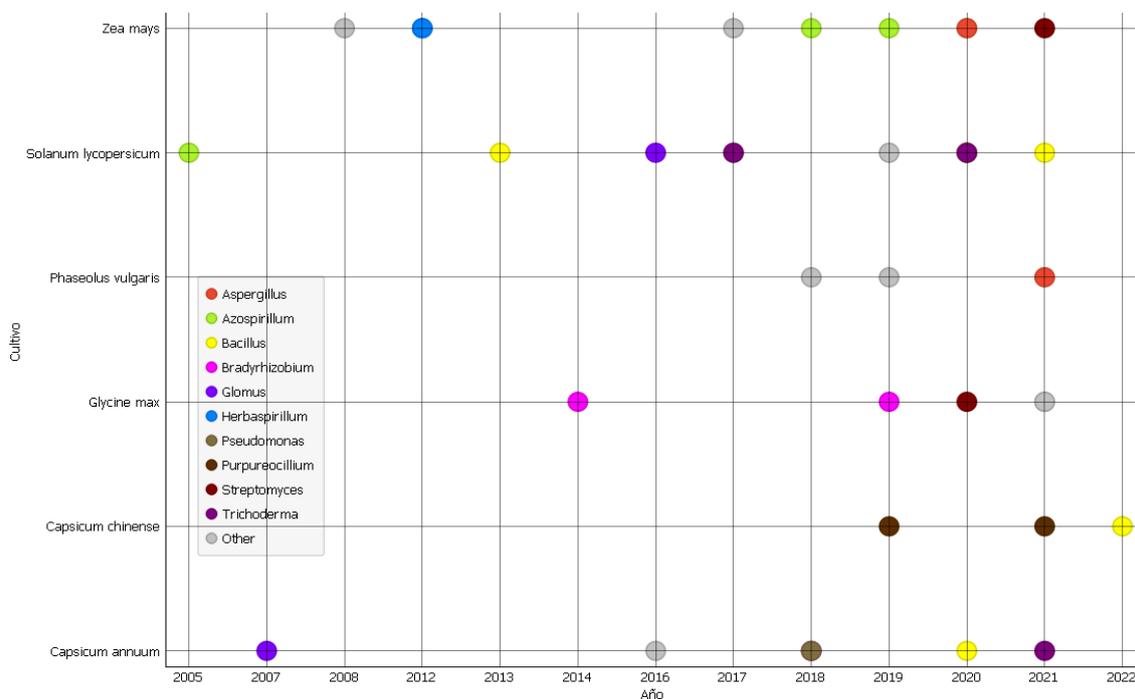
### Anexo 6 Matriz de Componentes principales

	Componente		
	1	2	3
Altura	-0,398	0,424	0,741
Rendimiento	0,633	-0,389	0,529
Diámetro del tallo	0,572	-0,714	0,269
Longitud Raíz	0,705	-0,526	-0,154
Biomasa Seca Total	0,759	0,140	-0,248
Nitrógeno Foliar	0,822	0,367	0,105
Fósforo Foliar	0,831	0,447	0,070
Potasio Foliar	0,724	0,573	-0,056

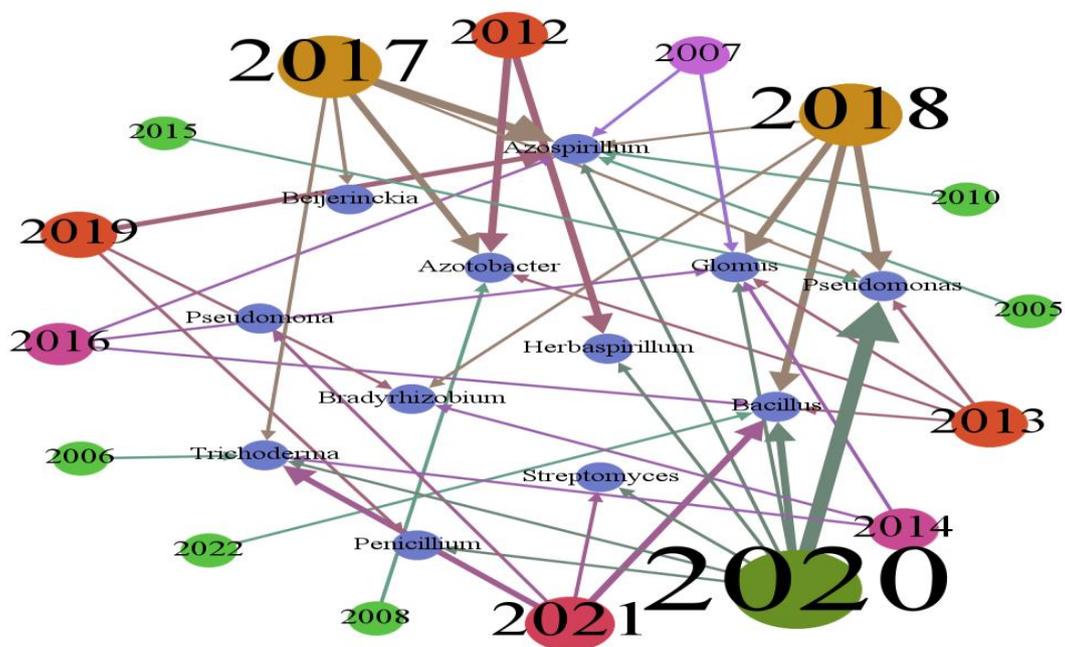
Método de extracción: análisis de componentes principales.

a. 3 componentes extraídos.

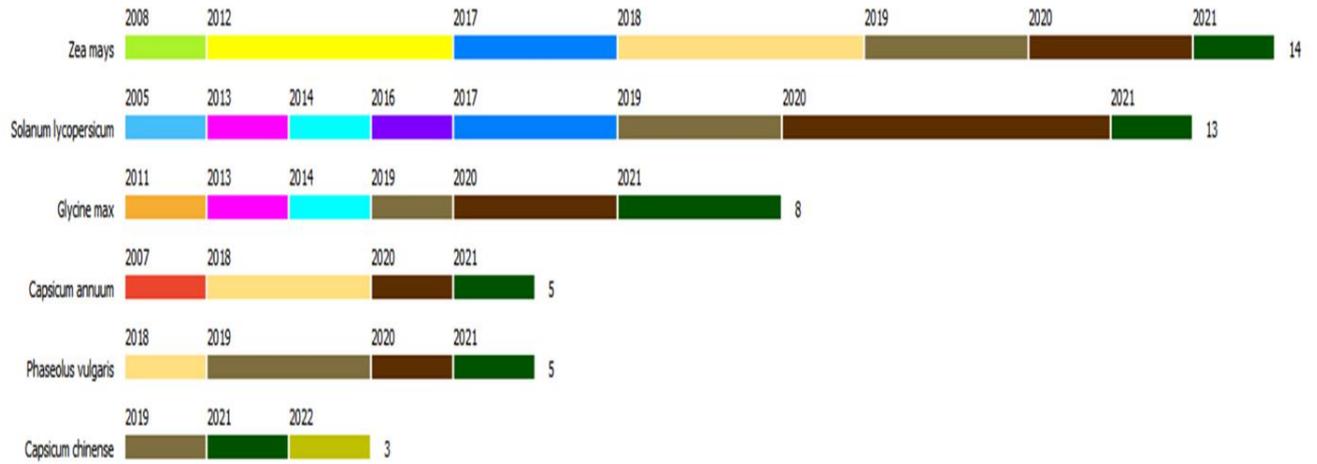
### Anexo 7 Diagrama de puntos de los géneros microbianos usados como biofertilizantes en diferentes especies vegetales



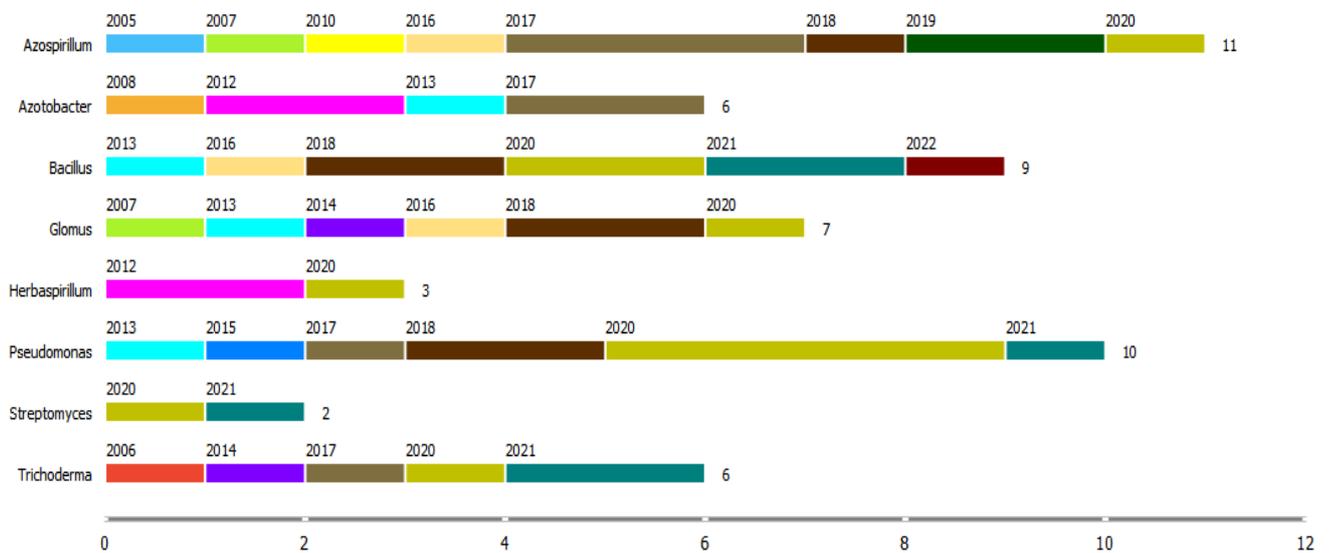
*Anexo 8 Análisis de Redes Sociales Artificiales de los años de publicación de cada genero microbiano usado como biofertilizante*



**Anexo 10** Especies vegetales tratadas con biofertilizantes microbianos ordenadas por su año de publicación



**Anexo 9** Géneros microbianos usados como biofertilizantes ordenados por su año de publicación





## INSTRUCTIVO

### Uso del biofertilizante FertiBacter para Maíz



#### Materiales necesarios:

- Semilla (15 Kg)
- Biofertilizante (500 mL)
- Recipiente



#### Paso 1

- Colocar la semilla en un recipiente.
- Aplicar el biofertilizante sobre la semilla .



#### Paso 2

- Mezclar el producto con la semilla y dejar reposar de 5 a 10 minutos.



#### Paso 3

- Realizar la siembra, de preferencia en las primeras horas de la mañana, el mismo día.