



Universidad de Jaén

Facultad de Ciencias Experimentales

# USO DE RIZOBACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL COMO ANTIMICROBIANOS

Autor: Francisco Miravete Martos

Grado: Biología

Departamento: Ciencias de la Salud

Fecha: 03/07/2024





Universidad de Jaén



## Trabajo Fin de Grado

### **Uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal como antimicrobianos**



**Firma:**

**Alumno/a: Francisco Miravete Martos**

**Jaén, Julio de 2024**

## **ÍNDICE:**

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 RESUMEN .....</b>                                                      | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Abstract.....</b>                                                    | <b>2</b>  |
| <b>2- INTRODUCCIÓN.....</b>                                                 | <b>3</b>  |
| <b>2.1-Rizosfera.....</b>                                                   | <b>3</b>  |
| <b>2.2 Mecanismos de las rizobacterias para el crecimiento vegetal.....</b> | <b>4</b>  |
| <b>2.2.1 Mecanismos Directos .....</b>                                      | <b>5</b>  |
| <b>2.2.2 Mecanismos indirectos.....</b>                                     | <b>12</b> |
| <b>3 OBJETIVOS.....</b>                                                     | <b>17</b> |
| <b>3.1 Objetivo general.....</b>                                            | <b>17</b> |
| <b>3.2 Objetivo específico.....</b>                                         | <b>17</b> |
| <b>4 METODOLOGÍA.....</b>                                                   | <b>18</b> |
| <b>5 RESULTADOS.....</b>                                                    | <b>20</b> |
| <b>6 DISCUSIÓN.....</b>                                                     | <b>27</b> |
| <b>7 CONCLUSIÓN.....</b>                                                    | <b>28</b> |
| <b>8 AGRADECIMIENTOS.....</b>                                               | <b>29</b> |
| <b>9 BIBLIOGRAFÍA.....</b>                                                  | <b>30</b> |
| <b>9.1 Referencias de tablas.....</b>                                       | <b>30</b> |

## **1. RESUMEN.**

**Introducción:** La región del suelo cercana a las raíces de las plantas es la rizosfera. Gracias a la abundancia de nutrientes es un lugar óptimo para el crecimiento de vida microbiana, estas rizobacterias realizan varias funciones en la planta, se realiza una revisión bibliográfica de los mecanismos de las rizobacterias.

**Objetivos:** Analizar el uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal como agentes antimicrobianos.

Observación de los tipos de antimicrobianos producidos por rizobacterias que promueven el crecimiento vegetal, y cómo actúan sobre diversos patógenos.

**Metodología:** Se realiza una revisión bibliográfica en distintas bases de datos como Scielo PubMed y Google Scholar y aplicando los criterios de selección, se eligen 13 artículos.

**Resultados:** Se realiza la clasificación de rizobacterias que actúan como antimicrobianos, según el tipo de compuesto que libere, el cual tiene un mecanismo de acción específico y ataca patógenos concretos. Resultados prácticos de rizobacterias en la agricultura y las distintas ventajas y desventajas del uso de estas como biofertilizantes se incluyen.

**Conclusión:** Se observan claros aspectos favorables en la planta gracias a la inclusión de las rizobacterias, tales como protección frente a patógenos y mayor crecimiento vegetal. Sin embargo, aún siguen presentando ciertos aspectos de controversia en sectores de la agricultura como biofertilizante, dado el desconocimiento de las mismas y su menor contenido en nutrientes.

**Palabras clave:** rizobacterias, crecimiento vegetal, antimicrobianos.

## 1. ABSTRACT.

**Introduction:** The soil region close to plant roots is known as the rhizosphere. Due to its abundance of nutrients, it is an optimal place for the growth of microbial life. These rhizobacteria perform various functions in the plant. A bibliographic review of the mechanisms of rhizobacteria is conducted.

**Objectives:** Analyze the use of plant growth-promoting rhizobacteria as antimicrobial agents.

Observe the types of antimicrobials produced by rhizobacteria that promote plant growth and how they act on various pathogens.

**Methodology:** After a bibliographic review in databases such as Scielo, PubMed and Google Scholar, and, and applying the selection criteria, 13 articles were chosen.

**Results:** The classification of rhizobacteria that act as antimicrobials is carried out according to the type of compound they release, which has a specific mechanism of action and targets specific pathogens. Practical results of rhizobacteria in agriculture and the different advantages and disadvantages of using them as biofertilizers.

**Conclusion:** Clear favorable aspects are observed in the plant due to the inclusion of rhizobacteria, such as protection against pathogens and increased plant growth. However, certain aspects of controversy still exist in sectors of agriculture regarding their use as biofertilizers, due to a lack of knowledge about them and their lower nutrient content.

**Keywords:** rhizobacteria, plant growth, antimicrobials.

## **2. INTRODUCCIÓN.**

### **2.1 Rizosfera**

La rizosfera, es un término que fue propuesto por el fisiólogo vegetal Lorenz Hiltner para describir la zona del suelo próxima a las raíces de las plantas con alta actividad microbiana (Hiltner, 1904). Actualmente, se entiende por rizosfera el espacio del suelo afectado por la raíz en términos físicos, químicos y biológicos, incluyendo los tejidos vegetales con microorganismos (Lugtenberg & Kamilova, 2009). Aunque la rizosfera puede experimentar cambios en los niveles de oxígeno (Højberg & Sørensen, 1993), agua (Ishikawa & Bledsoe, 2000), y pH (Schaller, 1987), su alto contenido de nutrientes la convierte en un hábitat ideal para los microbios. Se calcula que aproximadamente el 40-60% del carbono absorbido por las plantas durante la fotosíntesis es liberado al medio ambiente a través de exudados radiculares (Uren, 2007). Estos exudados pueden incluir nutrientes que se pueden asimilar fácilmente, tales como carbohidratos, compuestos orgánicos ácidos, aminoácidos y vitaminas (Uren, 2007). La presencia de estos nutrientes cerca de las raíces promueve la diversidad de organismos como protozoos, hongos, bacterias, nematodos y oomicetos (Lugtenberg & Kamilova, 2009; Bais et al., 2006; Huang et al., 2014). Las bacterias rizosféricas (rizobacterias) pueden alcanzar densidades de hasta  $10^{11}$  por gramo de ese suelo, resultando 2-3 órdenes de magnitud más que en un suelo no rizosférico (Molina et al., 2000; Egamberdieva et al., 2008).

Aunque se hayan identificado hasta 30,000 especies de bacterias diferentes en una muestra rizosférica (Mendes et al., 2001), factores de dicha especie, como el genotipo de la planta, su estado fisiológico y la composición de sus exudados radiculares, influyen en la disminución de diversidad bacteriana en la rizosfera, ejerciendo diferentes presiones selectivas.

## 2.2 Mecanismos de las rizobacterias para el crecimiento vegetal:

Las rizobacterias pueden ser clasificadas como perjudiciales, beneficiosas, o neutrales dependiendo del efecto que causan en la salud de la planta (Somers, Vanderleyden, & Srinivasan, 2004; Berendsen, Pieterse, & Bakker, 2012). En medio de esta variedad, algunas de las especies bacterianas conocidas por promover el crecimiento de plantas pertenecen a géneros como *Bacillus*, *Azospirillum*, *Serratia* o *Pseudomonas*, englobando distintas especies bacterianas reconocidas como (PGPR en inglés o RPCV, rizobacterias promotoras del crecimiento). Estos microorganismos juegan un papel determinante en las plantas, en los estímulos del crecimiento y la productividad, favoreciendo a diversas especies con importancia en la agricultura. De esta manera, las rizobacterias pueden realizar su tarea de estimular el crecimiento a través de diferentes mecanismos, ya sea directa o indirectamente, que engloban:

- 1) Mejorando el estado nutricional de la planta con la adición de distintos tipos de nutrientes esenciales como ejemplo la fijación de nitrógeno o la solubilidad de fosfato;
- 2) Generando hormonas vegetales como auxinas, etileno, ácido abscísico y citoquininas;
- 3) Competencia por los nutrientes y el hábitat con organismos que atacan a las plantas.;
- 4) Activación en las plantas de respuestas defensivas sistémicas contra patógenos;
- 5) Creación de enzimas líticas que combaten hongos fitopatógenos, nematodos e insectos;
- 6) Fabricación de sustancias con propiedades antibióticas (como bacteriocinas, compuestos volátiles, poliquétidos, o péptidos de síntesis no ribosomal) (Lugtenberg & Kamilova, 2009; Berg, 2009; Mousa & Raizada, 2015).

En general, se considera que las bacterias PGPR deben colonizar la rizosfera de manera eficaz y en cantidades altas para ejercer efectos beneficiosos en las plantas (Lugtenberg & Kamilova, 2009; Bull, Weller, & Thomashow, 1991; Haas & Défago, 2005).

## 2.2.1 Mecanismos Directos.

### -Fijación de Nitrógeno Biológica (FBN)

El nitrógeno es un nutriente de carácter esencial tanto para el crecimiento como la productividad de las plantas, ya que se encuentra en componentes que son fundamentales como clorofila, proteínas, aminoácidos, hormonas, vitaminas, nucleótidos, ácidos nucleicos y los alcaloides (Ahemad & Kibret, 2014). Los microorganismos que participan en la FBN poseen enzimas nitrogenasas, que convierten el nitrógeno atmosférico en amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), una forma que las plantas pueden asimilar. La concentración de oxígeno en el entorno influye en la actividad de estas enzimas, y para adaptarse, los microorganismos han desarrollado mecanismos como protección de carácter respiratorio, ajustes conformacionales, así como compartimentalización celular (Mayz Figueroa, 2004).

A pesar de que el 78% de la atmósfera está compuesto por nitrógeno gaseoso ( $\text{N}_2$ ), las plantas no pueden aprovecharlo de forma directa. Las bacterias que fijan nitrógeno se dividen en no simbióticas, como cianobacterias, *Azotobacter*, *Azococcus*, *Azospirillum*, (Bhattacharyya & Jha, 2012), *Paraburkholderia* y *Gluconoacetobacter diazotrophicus* (Perin et al., 2006) o simbióticas, como las del género *Frankia* y la familia denominada *Rhizobiaceae* (Ahemad & Kibret, 2014).

### -Solubilización de Fosfatos

El fósforo (P) ocupa el segundo lugar en importancia como un importante nutriente para el crecimiento y actividad de las plantas. Juega un rol fundamental en la captación, retención y utilización de energía, siendo vital para la transducción de señales y otros aspectos como la división celular, la respiración, la fotosíntesis y la biosíntesis de las macromoléculas (Razaq et al., 2017). El fósforo no se encuentra en la atmósfera como es el caso del nitrógeno, obteniéndose principalmente de los minerales del suelo, los cuales son escasos. Generalmente, los niveles de fósforo en el suelo son bajos, variando de 0.001 a 1 mg por litro (Brady & Weil, 2002), lo que disminuye la accesibilidad a las plantas.

Podemos encontrar contenido de fósforo en el suelo de tres formas distintas: compuestos inorgánicos vinculados con hierro, aluminio, calcio y manganeso;

compuestos orgánicos que pueden ser fosfoproteínas, ácido fítico, fosfonatos, fitina, humus, azúcar-fosfato, fosfolípidos, nucleótidos, e inositol; así como compuestos ligados a organismos vivos (Yadav & Verma, 2012). No obstante, solo puede ser asimilado el fósforo por las plantas en las formas de fosfato monobásico y dibásico (Lugtenberg & Kamilova, 2009).

Distintas bacterias del género *Rizobacterias* pueden disolver fosfatos procedentes de compuestos inorgánicos y orgánicos a través de diferentes métodos. Se ha expuesto la presencia de enzimas tales como fosfatasas no especificadas, fosfonatasas y C-P liasas y fitasas (Lugtenberg & Kamilova, 2009; Molina Romero et al., 2015), quienes liberan en el suelo fósforo de compuestos orgánicos. Otro mecanismo ampliamente investigado es la producción de ácidos de carácter orgánico como 2-cetoglucónico o el ácido glucurónico por las rizobacterias para absorber el fósforo del suelo mediante sus grupos carboxilo e hidroxilo. Dependiendo de los exudados de la raíz la variación en la cantidad de estos ácidos producidos (Ahemad y Kibret, 2014; Molina-Romero et al., 2015; Oteino et al., 2015). Las bacterias del suelo que solubilizan fosfatos proporcionan una opción en lugar de los fertilizantes químicos de fosfato, aumentando en las plantas la cantidad de fósforo disponible (Khan et al., 2007).

### **-Solubilización del Potasio**

Es importante el macroelemento potasio para el crecimiento de las plantas y su falta puede impactar la producción de los cultivos (Parmar & Sindhu, 2013; Gouda et al., 2018). El potasio posee un papel fundamental como fotosíntesis al regular tanto apertura y el cierre de los estomas, así como la asimilación de dióxido de carbono. Igualmente participa en la creación de proteínas, la activación enzimática, traslado de azúcares, sostenimiento de la turgencia celular, absorción de nitrógeno y descenso en respiración, todos ellos necesarios para el desarrollo y aumento de las plantas (Ahmad & Zargar, 2017). La carencia de potasio conduce a los vegetales a raíces que cuentan con poco desarrollo, un menor aumento del tamaño y crecimiento así como producción de las semillas, provocando así un notable descenso del rendimiento (Bhagyalakhmi et al., 2017). La escasez del potasio no es tan frecuente como la de

fósforo o nitrógeno , pero la inadecuada lixiviación, aplicación, erosión del suelo y escorrentía representan serias dificultades (Ahmad & Zargar, 2017).

Últimamente, se descubren bacterias del suelo que pueden solubilizar minerales como el potasio, lo que ayuda a preservar los recursos y mejorar el rendimiento (Parmar & Sindhu, 2013). Asimismo, se comprueba que las bacterias del suelo incrementan la presencia de potasio en el suelo y la captación de este elemento por plantas como es el caso del maíz (Abou el Seoud & Abdel Megeed, 2012), trigo (Singh et al., 2010) y tabaco (Zhang & Kong, 2014) . La solubilización de potasio se lleva a cabo principalmente a través de la generación de ácidos de carácter orgánico como el tartárico, oxálico, 2-cetoglucónico, glucónico, cítrico, málico, láctico, succínico, propiónico, malónico, glicólico, fumárico y la liberación de los protones (Saiyad et al., 2015). *Arthrobacter*, *Acidithiobacillus*, *Aminobacter*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Cladosporium*, *Burkholderia*, *Sphingomonas* y *Paenibacillus* han sido identificadas como microorganismos capaces de solubilizar el potasio (Etesami et al., 2017).

### **-Síntesis de Fitohormonas**

En concentraciones bajas (<1 mM), las fitohormonas controlan la actividad genética ligada al crecimiento y la maduración vegetal. Estas sustancias químicas pueden ser producidas en distintas áreas de la planta y su efecto cambia dependiendo de las condiciones del entorno que alteren la actividad de los genes, teniendo un gran impacto en el crecimiento y rendimiento de los vegetales (Gouda et al., 2018). La producción de estas fitohormonas por parte de algunas rizobacterias es uno de los mecanismos más investigados para fomentar el crecimiento de las plantas. Casos como *Klebsiella* en el cultivo de maíz, *B. amyloliquefaciens* en la agricultura de papa, *Azospirillum* y *Lysinibacillus*, *Bacillus* y *Rahnella* en cultivos de *Eucalyptus nitens* han sido documentados por varios autores. Las rizobacterias tienen la capacidad de afectar a diferentes grupos hormonales como auxinas, giberelinas, citocininas, ácido abscísico, ácido jasmónico y etileno (Egamberdieva et al., 2017). Este tipo de fitohormonas impactan en el funcionamiento de los vegetales al incrementar en las raíces la longitud, la velocidad de respiración de estas así como el movimiento de protones en la membrana de las raíces, obteniendo como resultado la mejor absorbancia de minerales que son solubles y de nutrientes (Fibach-Paldi et al., 2011).

Identificamos cinco categorías principales de fitohormonas.

1) Auxinas (AIA): Son esenciales para las plantas y afectan diversos aspectos del desarrollo como el fototropismo, formación de raíces adventicias, dominancia apical, elongación y división celular (Asgher et al., 2014). El ácido indol-3-acético es una auxina destacada sintetizada por las rizobacterias (Ali, 2015). Las auxinas que se liberan por estos microorganismos tiene mayor impacto en el sistema de raíces al incrementar su longitud, el peso, cantidad de ramificaciones y área de interacción con el suelo. Estas modificaciones benefician la nutrición y desarrollo de la planta al incrementar la habilidad de investigar el suelo de las raíces y facilitar el intercambio de nutrientes.

También se ha encontrado que esta auxina es fundamental para la comunicación y el intercambio de señales entre plantas y microorganismos (Raheem et al., 2018). Se ha comprobado que las rizobacterias pueden emplear la fitohormona para gestionar y soportar el estrés abiótico. (Egamberdieva et al., 2017) conducted this study.

En la rizosfera se produce L-triptófano, el cual las rizobacterias utilizan para crear AIA mediante la vía del IPyA. Este camino lleva a la síntesis de hormonas por diversos géneros, como *Bradyrhizobium*, *Rhizobium*, y *Azospirillum* (Kang et al., 2017).

2) Giberelinas: Las fitohormonas llamadas giberelinas regulan el crecimiento vegetal a través de una variedad de procesos metabólicos, como la floración, la formación de frutos, la elongación del tallo, la germinación de semillas y la altura del vegetal (Kang et al., 2017). Estas fitohormonas trabajan juntas para producir respuestas importantes que ayudan en el estrés mejorando su resistencia (Egamberdieva et al., 2017). Además, se encuentra evidencia de que, en diversas condiciones de estrés abiótico, las giberelinas mejoran el crecimiento de las plantas (Ahmad, 2010). Además, realizan una efectiva captación de iones en las plantas, lo que da una mejoría en el desarrollo y mantiene el metabolismo en condiciones de estrés y normales (Iqbal & Ashraf, 2013).

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) producen g  
Página 8  
que mejoran el crecimiento así como el rendimiento de las plantas (Desai, 2013).  
evidencia de que distintas especies de RPCV productoras de giberelinas, tienen la capacidad de provocar la germinación de semillas, como *Bacillus pumilus*,

*Azotobacter spp*, *B. licheniformis*, *R. phaseoli*, *Pseudomonas spp* y *Rhizobium meliloti*, (Molina-Romero et al., 2015).

Las giberelinas son fitohormonas que controlan el crecimiento de las plantas mediante diversos procesos metabólicos, como la floración, la fructificación, la elongación del tallo, la germinación de semillas y la altitud del vegetal (Kang et al., 2017). Estas sustancias químicas de las plantas colaboran en conjunto y contribuyen a aumentar la resistencia al estrés generando respuestas significativas (Egamberdieva et al., 2017). También se demuestra que las giberelinas pueden beneficiar el crecimiento y la evolución de las plantas en diferentes situaciones de estrés abiótico (Ahmad, 2010). También, incrementan la captación eficaz de iones en las plantas, favoreciendo su desarrollo y manteniendo su metabolismo en situaciones de estrés y condiciones normales (Iqbal y Ashraf, 2013).

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal generan giberelinas que benefician el desarrollo y la producción de los vegetales (Desai, 2017). Se demuestra además que varios tipos de estas rizobacterias generan giberelinas, como *Azotobacter spp*, *R. phaseoli*, *B. licheniformis*, *Leifsonia xyli*, *Pseudomonas spp.*, *Herbaspirillum seropedicae*, y *Bacillus pumilus*, pueden llevar a la germinación (Molina Romero et al., 2015).

3) Etileno; Esta fitohormona desempeña un papel crucial como mediando y coordinando las señales tanto internas como externas que influyen en el crecimiento y programación del desarrollo de las plantas (Santner & Estelle, 2009). Además, es fundamental en la señalización que facilita algunas interacciones entre plantas y bacterias, como la formación de nódulos en la simbiosis entre rizobios y leguminosas (Penmetsa & Cook, 1997), así como en el modelo de estudio de *Arabidopsis* con *Pseudomonas sp.*, o en la defensa contra patógenos.

El etileno es importante para regular el desarrollo y progreso de las plantas, actuando tanto transmisor de señales internas como externas (Santner & Estelle, 2009). También es esencial en la comunicación que ayuda en ciertas relaciones entre plantas y bacterias, como en la creación de nódulos en la asociación simbiótica entre plantas y leguminosas (Penmetsa & Cook, 1997), y en la investigación de *Arabidopsis* con *Pseudomonas sp.*, o en la protección contra enfermedades.

4) Citocininas; Es otro grupo clave de fitohormonas, proviniendo en gran medida de la adenina, donde la posición denominada N6 es sustituida por un compuesto isoprenoide, como la zeatina, o una cadena como la cinetina, que es lateral aromática. Esta hormona pueden ayudar en diferentes procesos como lo son la diferenciación celular y su división, el aumento de las zonas de las raíces mediante el desarrollo de raíces adventicias, la formación de hojas prevenir la senescencia (Liu et al., 2013).

En los primeros años de la década de los 70, (Phillips & Torrey, 1972) descubrieron una sustancia igual a las citocininas en la filtración de cultivos de *Bradyrhizobium japonicum* y *Rhizobium leguminosarum*. Finalmente se reveló que se trataba de zeatina. Se presenta el descubierto más de treinta compuestos de las citocininas que estimulan el desarrollo en plantas gracias a microorganismos que se asocian a ellas, como la zeatina, la isopenteniladenina y la dihidroxizeatina, entre otros. Además, se han registrado muchas especies que generan esta hormona vegetal. Incluidos en esta lista están *Azospirillum brasilense*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bacillus licheniformis*, *Paenibacillus polymyxa*, y *Rhizobium leguminosarum* (Maheshwari et al., 2015).

5) Ácido abscísico (ABA): Es una hormona vegetal crucial en las respuestas de los vegetales tanto al estrés abiótico como biótico, teniendo un papel significativo en su fisiología (Cohen et al., 2015; Egamberdieva et al., 2017; Zhou et al., 2017). El ácido abscísico se incluye en fenómenos como la separación o abscisión de órganos y el letargo de las semillas. También se ha comprobado que el ABA controla la expresión de genes vinculados a la resistencia al estrés en situaciones de estrés causadas por factores no biológicos. Esto aumenta la capacidad de respuesta ajustada de los vegetales (Sah et al., 2016; Shahzad et al., 2017). El ácido abscísico funciona como un desodorante en momentos de sequía al provocar el cierre de los estomas para disminuir la pérdida mediante la transpiración del agua (Cohen et al., 2015).

Comparado con otras fitohormonas, hay menos investigación sobre las rizobacterias que generan ABA y su metabolismo. No obstante, ciertas especies como *Arthrobacter koreensis*, *B. licheniformis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, y *Azospirillum brasilense* han mostrado la capacidad de generar dicho compuesto vegetal (Egamberdieva et al., 2017; Shahzad et al., 2017).

De estos, los primeros cuatro juegan un papel importante en la fitoestimulación debido a las rizobacterias, según (Tahir & Aqeel, 2013; Sarma & Saikia, 2014) donde indican que el aspecto más se realiza más hincapié de las RPCV es la fitoestimulación. Este proceso se basa principalmente en la alteración de la dicifil red de hormonas o similares que afectan de forma directa el desarrollo de los vegetales o inducen en la raíces su proliferación. Como ejemplo, varias variedades de *Azospirillum* generan hormonas como auxinas, giberelinas y citocininas, lo cual estimula el crecimiento de las raíces y, por ende, aumenta considerablemente las producciones agrícolas (Rives et al., 2007).

### **-Síntesis de Exopolisacáridos y Biopelículas**

Muchas rizobacterias pueden producir exopolisacáridos (EPS) y crear las biopelículas en las raíces (Mohammed, 2018). Así, las bacterias que se encuentran en las comunidades producen complicadas formaciones de células microbianas que se unen a las raíces, rodeadas de una sustancia polimérica (biopelículas) fuera de la célula (Upadhyay et al., 2011; Gupta et al., 2017). Estas películas biológicas brindan una protección importante a las plantas contra el estrés del entorno, al facilitar una mayor adherencia a las superficies, mejorar la agrupación del suelo en la rizosfera y aumentar la disponibilidad tanto de nutrientes como agua. Igualmente, el aumento de la densidad microbiana en las biopelículas ayuda a promover el crecimiento óptimo de las plantas (Kasim et al., 2016; Mohammed, 2018). Las rizobacterias generan exopolisacáridos que también funcionan como compuestos de señalización que estimulan las respuestas de resistencia ante las infecciones de agentes p

Página 11

Algunos exopolisacáridos se combinan con diversos cationes como el i

contribuyendo a aliviar el estrés por salinidad al disminuir la cantidad del ion sodio disponible para los vegetales (Gupta et al., 2017). Diversas rizobacterias son reconocidas por su capacidad de segregar exopolisacáridos, algunos ejemplos son *Bacillus drentensis*, *Azotobacter vinelandii*, *Rhizobium leguminosarum*, *Enterobacter cloacae*, *Xanthomonas sp.* y *Rhizobium sp.* (Mahmood et al., 2016; Gouda et al., 2018). El uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal que producen EPS es una estrategia que promete abordar el estrés causado por la falta de agua y exceso

de salinidad, ayudando a garantizar la seguridad de los alimentos (Naseem et al., 2018).

## **2.2.2 Mecanismos indirectos.**

### **-Controladores del estrés.**

El estrés se caracteriza como cualquier elemento que cause un impacto adverso en el crecimiento de los vegetales (Foyer et al., 2016). Siendo seres inmóviles, los vegetales a menudo se ven expuestos a varios tipos de tensiones, como: elevadas temperaturas, bajas temperaturas, salinidad, falta de agua, enfermedades causadas por patógenos y radiación ultravioleta. Generalmente, estos elementos resultan impredecibles y pueden tener un impacto considerable en la producción de la agricultura (Gouda et al., 2018). Con el cambio del clima que encontramos en la actualidad, estas dificultades presentan retos para la sustentabilidad y la agricultura. A continuación se explora el rol de RPCV en el estrés y su gestión.

### **-ACC desaminasa .**

El ET o etileno juega un papel importante en el desarrollo y envejecimiento de flores, hojas y las frutas. Esta fitohormona se genera de manera interna y en cantidades adecuadas es fundamental para provocar modificaciones físicas en los vegetales. Su modo de funcionamiento es una molécula de señalización que estimula la transcripción a nivel genético, influyendo en el crecimiento de los órganos, la reproducción y la duración de vida de las plantas. No obstante, ante situaciones estresantes como la salinidad, la sequía, la presencia de metales pesados y la infección patogénica, se observa un incremento notable en los niveles de etileno. Lo que resulta en la caída de hojas, la detención del crecimiento celular, el envejecimiento y otros factores que impactan de forma negativa en el crecimiento de los vegetales (Stearns et al., 2012; Vacheron et al., 2012). Por esta razón, se buscan opciones para disminuir la tensión causado en los vegetales por variaciones del ambiente inesperadas. El ACC es el compuesto responsable de iniciar la producción del etileno en los vegetales. Las bacterias en la rizosfera que producen ACC desaminasa ayudan a las plantas a crecer y desarrollarse en situaciones de estrés al convertir un precursor en alfa-cetobutirato y amoníaco, que sirven como nutrientes. También, en ciertas

leguminosas se puede incrementar la cantidad de nódulos, generar modificaciones en la estructura de las raíces y favorecer el crecimiento de raíces secundarias (Cedeño-García et al., 2018). En la actualidad se han encontrado cepas bacterianas que poseen ACC desaminasa en diferentes géneros como *Rhodococcus*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Pseudomonas* *etioibium*, *Alcaligenes*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Achromobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Mesorhizobium*, y *Methylobacterium* (Sinor. , 2015; Patil et al., 2016).

#### **- Osmoprotectores.**

Bajo condiciones de falta de agua, muchas bacterias en la rizosfera generan moléculas de protección osmótica (osmoprotectores) tales como trehalosa, ácido glutámico, prolina, prolina betaína, GB, ectoína, etc.) para sobrevivir dentro de las células. El fluido ayuda a mantener el desarrollo de las plantas en situaciones difíciles. *Bacillus polymyxa*, *Pseudomonas jeckii*, *Pseudomonas xanthus*, *Azospirillum* y *Arthrobacter nitroguaiiae* contribuyen a la tolerancia de las plantas al estrés hídrico al aumentar los niveles de prolina y azúcares solubles.

*Bacterias como, Klebsiella variicola, Bacillus subtilis, Raoultella planticola y Pseudomonas fluorescens* han mostrado ser capaces de aumentar la producción y almacenamiento de colina, un precursor del metabolismo del GB, lo que resulta en una mayor cantidad de la sustancia mencionada y mejora la humedad y materia seca presente en hojas. (Vurukonda & Colleagues, 2016) .

#### **-Proteínas de impacto o choque térmico.**

Las temperaturas que superan los 40°C constituyen un desafío significativo que impacta la proliferación de la producción agrícola a nivel global (Ali et al., 2011). Esto promueve la pérdida de forma y acumulación de proteínas y podría provocar inconvenientes graves para las plantas. Las bacterias presentes en la rizosfera, como *Bacillus subtilis*, pueden provocar resistencia al calor en las plantas al producir proteínas con un peso nivel molecular que es alto (9–90 kDa) las cuales se conocen como proteínas de impacto o choque térmico (HSP: proteína de choque térmico). La función más importante de las proteínas HSP es preservar otras proteínas dañadas por el calor (Palacio-Rodríguez et al., 2016). Las HSP contienen chaperonas

moleculares como GroEL, DnaK, GroES, junto con proteasas, ClpA, ClpB, proteínas de impacto térmico pequeñas (sHSP) y ClpX. Las chaperonas moleculares ayudan en el repliegamiento correcto de proteínas desnaturalizadas, mientras que las proteasas descomponen proteínas irreversiblemente dañadas. La función de estas proteínas de asistencia es fundamental para la sobrevivencia de las células durante el estrés por temperatura y su recuperación a continuación (Grover et al., 2011).

#### **-Resistencia sistémica inducida (ISR).**

Ciertas bacterias presentes en la rizosfera promueven la protección de las plantas a largo plazo mediante la activación de un proceso denominado ISR (resistencia sistémica inducida) (Lucas et al., 2013). La contestación provoca que la totalidad de la planta se alarme y se active en zonas lejanas o no dañadas (Chaturvedi y Paul Khurana, 2018). El impuesto sobre la renta se fundamenta en la señalización del etileno y ácido jasmónico en las plantas para sincronizar de manera sistemática la activación y potenciar las habilidades de defensa (Sunar et al., 2015). En las interacciones con las plantas, las bacterias de la rizosfera liberan varias sustancias lo que provoca la activación del ISR como flagelos, lipopolisacáridos, ácido salicílico, sideróforos y lipopéptidos cíclicos, (Poupin et al., 2013; Molina-Romero et al., 2015).

#### **-Antibióticos.**

Numerosas bacterias presentes en la rizosfera producen moléculas que cuentan con la propiedad de impedir o disminuir el desarrollo de algunos patógenos de plantas mediante acciones como detener la formación de la pared celular, desestabilizar las estructuras de las membranas celulares o bloquear la traducción de los patógenos vegetales (Beneduzi et al., 2012). La fabricación de los antibióticos es una de las formas más investigadas de control biológico de bacterias en la rizosfera, que incluye diversos tipos como anfizina, DAPG, ovomicina-A, pirozoide, tensina, oligomicina A, carnosamina A, anfoternosamina y *Flavobacterium* (Odoh, 2017). La *Burkholderia* se encuentra dentro de las bacterias de la rizosfera que producen antibióticos (Tenorio-Salgado et al., 2013), así como *Streptomyces* según (Rajesh y Prakash, 2011).

### **-Síntesis de sideróforos.**

Es indispensable el hierro para la mayoría de organismos y cumple roles vitales en la síntesis del ADN, la respiración y la eliminación de los radicales libres (Rajkumar et al., 2010). La presencia de hierro es crucial para que los microorganismos puedan colonizar un entorno determinado. Para abordar esta situación, numerosas bacterias en la rizosfera liberan sustancias que tienen un peso molecular bajo (0,5-1,0 kDa) conocidas como sideróforos, que se comportan como quelantes al unir el hierro con otros metales y transformarlo en óxido de hierro(II), forma más soluble y disponible para absorber nutrientes (Stearns et al., 2012). Debido a la escasa cantidad de Fe<sup>3</sup> disponible en el suelo, la bacteria promotora del crecimiento de plantas que produce sideróforos logra una ventaja competitiva al colonizar las raíces, competir por nichos y prevenir el crecimiento de hongos dañinos para las plantas (Sunar et al. 2015).

### **-Compuestos orgánicos volátiles (VOCs).**

Los COV son una variedad de moléculas que tienen bajo peso a nivel molecular (300 g/mol), que incluyen aldehídos, indoles, alcoholes, cetonas, derivados de ácidos grasos, terpenos y jasmonatos (Farag et al., 2013). Recientemente, se han informado alrededor de 846 COV diferentes producidos por 350 especies bacterianas, de las cuales la acetoína y el 2,3-butanodiol son los más representativos (Tahir et al., 2017). Se demuestra que varios géneros de bacterias rizosféricas, como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Stenotrophomonas* y *Serratia*, producen compuestos de carácter orgánico que son volátiles y afectan en el desarrollo de plantas de forma positiva (Gouda et al., 2018).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general:**

Revisión bibliográfica del uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para resumir los efectos antimicrobianos que poseen.

#### **3.2 Objetivo específico:**

- Identificar las principales especies de PGPR con efectos antimicrobianos.
- Evaluar las aplicaciones prácticas de las PGPR en la agricultura.

## **4. METODOLOGÍA**

A continuación, se detalla la metodología empleada en cada etapa del proceso.

### **4.1 Definición del Alcance.**

El tema se limitó a artículos científicos publicados entre 2010 y 2024 para incluir estudios recientes y pertinentes. Los efectos antibacterianos y antifúngicos de las PGPR fueron el tema principal de la investigación.

### **4.2 Encontrar y seleccionar literatura.**

#### *4.2.1 Recursos de Información.*

La búsqueda de artículos relevantes se realizó con las siguientes bases de datos científicas:

-PubMed.

-Scopus.

-Google Scholar.

#### *4.2.2 Criterios de búsqueda.*

Se establecieron los siguientes criterios para garantizar la relevancia y calidad de los estudios incluidos:

Inclusión: Artículos en inglés o español , gratuitos, estudios experimentales y estudios de revisión que aborden las propiedades antimicrobianas de las PGPR.

#### *4.2.3 Enfoques de Búsqueda.*

Para realizar la búsqueda en diferentes bases de datos se utilizaron palabras clave que incluyen "PGPR", "RPCV" "rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal", "actividad antimicrobiana", "actividad antibacteriana".

### **4.3 Selección y Evaluación de Artículos.**

#### *4.3.1 Revisar los títulos y los resúmenes*

Al principio, para determinar qué estudios correspondían con los criterios de inclusión, se llevaron a cabo revisiones de los títulos y resúmenes de los artículos encontrados. Esta revisión preliminar ayudó en gran medida a eliminar artículos irrelevantes y enfocarse en los que podrían tener mayor afinidad al tema seleccionado.

#### *4.3.2 Evaluación exhaustiva de artículos*

Los artículos preseleccionados fueron evaluados en su totalidad para asegurarse de que eran relevantes y de alta calidad.

#### *4.4 Análisis y Síntesis de Datos*

##### *4.4.1 Extracción de datos*

Se obtuvieron los datos pertinentes de cada artículo seleccionado, que incluían lo siguiente:

- Información sobre las diferentes especies de PGPR investigadas.
- Detalles sobre los mecanismos antimicrobianos.

Los hallazgos y conclusiones del estudio.

-Propuestas de aplicaciones prácticas.

##### *4.4.2 Organización de datos*

Los datos extraídos se organizaron en categorías para facilitar el análisis. Se crearon tablas para comparar investigaciones y sintetizar datos sobre :

- efectos antibacterianos.
- efectos antiparasitarios.
- Los mecanismos para actuar.
- Aplicaciones reales.

##### *4.4.3 Análisis crítico*

También se realizó un análisis crítico de la literatura para evaluar la consistencia de los hallazgos entre varios estudios. Se determinaron las áreas de consenso y las áreas de controversia.

Se encontraron un total de 1150 artículos, de los cuales, tras un procedimiento exhaustivo de selección descrito anteriormente, fueron excluidos inicialmente 1105 artículos, de los cuales al realizar una evaluación profundizando en la información que contenían se acabaron seleccionando 13 artículos para la realización de este estudio.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Mecanismos de Producción de Compuestos Antimicrobianos

Es común que las rizobacterias generen y liberen compuestos volátiles que contribuyen al control biológico de patógenos de plantas. Entre estos, el ácido cianhídrico (HCN) es uno de los más estudiados, dado su amplio espectro de actividad antibiótica, especialmente al inhibir enzimas como la citocromo-c oxidasa (Haas & Défago, 2005; Gross & Loper, 2009). Un estudio de Bakker y Schippers (1987) reveló que aproximadamente la mitad de las bacterias rizosféricas del género *Pseudomonas* tienen la capacidad de producir HCN, lo que subraya su importancia en la rizosfera. Si bien inicialmente se asoció la producción de HCN con bacterias como *Pseudomonas protegens* CHA0 en el control de patógenos como *Thielaviopsis basicola* (Voisard et al., 1989), investigaciones posteriores han demostrado que no solo las *Pseudomonas*, sino también otras bacterias, pueden generar este compuesto, lo que destaca el papel crucial de la cianogénesis en las propiedades de biocontrol de estas bacterias (Gross & Loper, 2009; Zdor, 2015). Los poliquétidos (PQs) y los péptidos de síntesis no ribosomal (PSNRs) son los principales compuestos secundarios producidos por bacterias PGPR que poseen propiedades antibióticas. Estos metabolitos secundarios bacterianos, en términos generales, son sustancias que no son esenciales para el crecimiento bacteriano, pero que desempeñan un papel crucial en la supervivencia y la competencia bacteriana en su entorno específico. Por lo general, la síntesis de estos compuestos ocurre durante la fase estacionaria de crecimiento, y su producción implica un alto costo energético. Por lo tanto, su síntesis está estrictamente regulada y es altamente sensible a diferentes condiciones ambientales, como la temperatura, la oxigenación y la disponibilidad de nutrientes particulares (Liu et al., 2013; Matilla et al., 2016).

A continuación se detalla en una tabla los diversos tipos de antimicrobianos que liberan las rizobacterias, los mecanismos de acción que presentan y su repercusión en las plantas, así como los patógenos objetivo

Tabla 2: Ejemplos de antimicrobianos producidos por rizobacterias, así como sus tipos, mecanismos de acción, efectos en plantas y patógenos objetivo.

| Tipo de Antimicrobiano     | Rizobacteria Productora        | Mecanismo de Acción                                  | Efectos en Plantas                                                               | Patógenos Objetivo                                  | Referencias                       |
|----------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Antibióticos               | <i>Pseudomonas fluorescens</i> | Inhibición de la síntesis de proteínas y ADN         | Mejora del crecimiento vegetal y protección contra enfermedades                  | <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Phytophthora spp</i> | Glick, B. R. (2012)               |
| Sideróforos                | <i>Pseudomonas putida</i>      | Secuestro de hierro, impidiendo su uso por patógenos | Incremento en la disponibilidad de hierro para la planta, reducción de patógenos | <i>Ralstonia solanacearum</i>                       | Compant, S., et al. (2005)        |
| Cianuro de Hidrógeno (HCN) | <i>Pseudomonas aeruginosa</i>  | Inhibición de la respiración celular en patógenos    | Protección contra enfermedades radiculares                                       | <i>Gaeumannomyces graminis</i>                      | Haas, D., & Défago, G. (2005)     |
| Lipopeptidos               | <i>Bacillus subtilis</i>       | Disrupción de la membrana celular de patógenos       | Mejora de la resistencia sistémica inducida en plantas                           | <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Botrytis cinerea</i> | Raaijmakers, J. M., et al. (2006) |

|                    |                          |                                                       |                                                        |                                                             |                                       |
|--------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Aminopirrolnitrina | Burkholderia cepacia     | Inhibición de la síntesis de ácidos grasos            | Protección contra una variedad de hongos fitopatógenos | <i>Pythium ultimum</i> ,<br><i>Sclerotinia sclerotiorum</i> | Beneduzi, A., et al. (2012)           |
| Fenazina           | Pseudomonas chlororaphis | Generación de especies reactivas de oxígeno           | Reducción de la colonización de patógenos en raíces    | <i>Verticillium dahliae</i> ,<br><i>Erwinia carotovora</i>  | Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009) |
| Glucanasa          | Serratia marcescens      | Degradación de glucanos en la pared celular de hongos | Protección contra enfermedades causadas por hongos     | <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>                             | Whipps, J. M. (2001)                  |
| Quitinasa          | Bacillus cereus          | Degradación de quitina en la pared celular de hongos  | Mejora de la resistencia contra hongos patógenos       | <i>Trichoderma spp</i> ,<br><i>Fusarium spp</i>             | Chowdhury, S. P., et al. (2015)       |
| Pirrolnitrina      | Pseudomonas fluorescens  | Inhibición de la síntesis de ADN y proteínas          | Protección contra hongos fitopatógenos                 | <i>Rhizoctonia solani</i> ,<br><i>Verticillium spp</i>      | Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009) |

## 5.2 Estudios de Caso y Ejemplos Prácticos

Según estudios realizados, se pueden observar diversos mecanismos de acción que han sido mencionados anteriormente, cuyos efectos han sido probados en distintos tipos de cultivos mediante la inserción de diferentes tipos de rizobacterias:

### -Trigo (*Triticum aestivum*):

En cultivos de trigo, la aplicación de *Pseudomonas fluorescens* ha demostrado reducir la necesidad de fungicidas para controlar enfermedades como la roya y el tizón. Los estudios han mostrado que el trigo tratado con esta RPCV tiene menores incidencias de enfermedades y mayor rendimiento de grano (Choudhary & Johri, 2009).

### -Tomate (*Solanum lycopersicum*):

En la producción de tomate, el uso de *Bacillus subtilis* ha permitido reducir significativamente la aplicación de fungicidas para controlar enfermedades fúngicas como la fusariosis. Los tomates tratados no solo presentan menos enfermedades sino también un aumento en la calidad del fruto (Martínez-Viveros et al., 2020).

### -Arroz (*Oryza sativa*):

Investigaciones en cultivos de arroz han mostrado que *Azospirillum brasilense* puede reducir la incidencia de enfermedades bacterianas y fúngicas, disminuyendo la necesidad de pesticidas. Este enfoque ha resultado en plantas más saludables y un mayor rendimiento del cultivo (Bhattacharyya & Jha, 2012).

Tabla 1. Rizobacterias beneficiosas para el desarrollo de las plantas, sus impactos positivos y las variedades agrícolas en las que se han analizado. Parray et al. (2016).

| <b>RPCV</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Efecto</b>                                                                        | <b>Cultivos</b>                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Azospirillum spp.</i> , <i>Azotobacter spp.</i> , <i>Bacillus spp.</i> , <i>Burkholderia spp.</i> , <i>Gluconacetobacter spp.</i> , <i>Herbaspirillum spp.</i>                                                                                                                           | Biofertilización (Fijan N <sub>2</sub> )                                             | Maíz, arroz, trigo, sorgo, caña de azúcar                                         |
| <i>Bacillus spp.</i> , <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Streptomyces spp.</i> , <i>Paenibacillus spp.</i> , <i>Enterobacter spp.</i> , <i>Azospirillum spp.</i>                                                                                                                                 | Biocontrol (enfermedades, patógenos e insectos)                                      | Tomate, tabaco, pepino, pimiento morrón, maní, alfalfa, garbanzo, frijol, ciruelo |
| <i>Methylobacterium spp.</i> , <i>Bacillus spp.</i> , <i>Alcaligenes spp.</i> , <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Variovorax spp.</i> , <i>Enterobacter spp.</i> , <i>Azospirillum spp.</i> , <i>Rhizobium spp.</i> , <i>Klebsiella spp.</i>                                                     | Elongación, crecimiento                                                              | Nabo, clavel, canola, soya, frijol, maíz, judías, chícharos                       |
| <i>Aeromonas spp.</i> , <i>Agrobacterium spp.</i> , <i>Alcaligenes spp.</i> , <i>Azospirillum spp.</i> , <i>Bradyrhizobium spp.</i> , <i>Comamonas spp.</i> , <i>Enterobacter spp.</i> , <i>Rhizobium spp.</i> , <i>Paenibacillus spp.</i> , <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Bacillus spp.</i> | Productoras de fitohormonas (ácido-3-indol-acético (AIA), citoquininas, giberelinas) | Arroz, lechuga, trigo, soya, rábano, colza, aliso                                 |

### 5.3 Ventajas y desventajas del uso de biofertilizantes como RPCV:

La aplicación de biofertilizantes que contienen bacterias rizosféricas ha mejorado significativamente la productividad agrícola (Armenta-Bojórquez et al., 2010). . Esto se debe a que alrededor del 80% de estas bacterias que producen auxinas pueden producir o inducir reguladores de crecimiento. La auxina más importante en términos cuantitativos es el ácido indol acético (AIA), que promueve el crecimiento del sistema radicular y la absorción de nutrientes (Grageda-Cabrera et al., 2012).

Los fungicidas y pesticidas químicos pueden afectar negativamente la microbiota del suelo, reduciendo su biodiversidad y alterando las funciones del ecosistema del suelo. Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, al contrario, promueven un microbioma del suelo más saludable y diverso, lo que mejora la fertilidad y la estructura del suelo a largo plazo (Lugtenberg & Kamilova, 2009).

Se ha realizado una lista de los beneficios y desventajas del uso de biofertilizantes, que se exponen a continuación. Mishra y Dash (2014):

### **Beneficios:**

- La salud de las plantas mejora porque el suministro de nutrientes está más equilibrado.
  - Fortalecen la actividad biológica del suelo, lo que mejora la movilización de nutrientes y la descomposición de sustancias nocivas.
  - Mejoran la estructura del suelo y fomentan un desarrollo de raíces más saludable
  - Aumentan el contenido de materia orgánica (MO) en el suelo, mejorando la capacidad de intercambio catiónico, la retención de humedad, la formación de agregados y resistiendo los cambios bruscos en la acidez, la alcalinidad, la sal, los pesticidas y los metales pesados peligrosos.
  - Liberan nutrientes lentamente, contribuyendo a la reserva residual de fósforo y nitrógeno orgánicos del suelo, reduciendo la pérdida de fósforo por lixiviación y fijación, y también pueden proporcionar micronutrientes.
  - Fomentan el crecimiento de microorganismos beneficiosos.
- Ayudan a combatir enfermedades y parásitos propagados por organismos nativos terrestres.

**Desventajas:**

- Requieren una gran cantidad de fertilizante para satisfacer las necesidades nutricionales de los cultivos porque contienen menos nutrientes que los fertilizantes sintéticos.
- La deficiencia nutricional, como resultado de la liberación de nutrientes demasiado lenta para satisfacer las necesidades de las plantas
- Es posible que los fertilizantes orgánicos no contengan suficientes macroelementos primarios para impulsar el crecimiento de los cultivos.

Entre otras cosas el uso de biofertilizantes ha sido complicado o demorado en muchos países, especialmente en las zonas rurales. Esto se debe principalmente a la idiosincrasia de los habitantes, quienes muestran una resistencia fundamental a utilizar bacterias como microorganismos beneficiosos porque las bacterias todavía están relacionadas con enfermedades humanas y animales en estas áreas. (Grageda-Cabrera et al., 2012).

## 6. DISCUSIÓN

En este estudio se realiza un análisis del uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) como agentes antimicrobianos. Los resultados de este estudio confirman que las RPCV desempeñan un papel crucial en la protección contra patógenos con diversos mecanismos que se han mencionado entre ellos el mecanismo de producción de compuestos antimicrobianos. Se observa cómo los distintos tipos de compuestos antimicrobianos presentan diferentes mecanismos de acción que actúan sobre los patógenos evitando su proliferación, reduciendo así la dependencia de fungicidas y pesticidas químicos, y representa una innovación significativa y sostenible en la agricultura moderna, Esta disminución no solo reduce los efectos ambientales perjudiciales del uso excesivo de productos químicos, sino que también promueve un microbioma más diverso y saludable en el suelo (Molina-Romero et al., 2015). Por lo tanto, la aplicación de RPCV puede mejorar de forma significativa la sostenibilidad agrícola a largo plazo dado que ofrece una alternativa ecológica y más económica a los métodos de control de plagas y enfermedades convencionales (Calvo, Nelson & Kloepper, 2010).

Además se puede observar en los casos prácticos como mejoran el crecimiento y la productividad de las plantas, como se observa en los resultados obtenidos de los cultivos de tomate, mejorando la calidad del fruto; cultivos de trigo, mejorando el rendimiento del grano y cultivos de arroz, mejorando el rendimiento del cultivo.

Pese a las grandes ventajas del uso de rizobacterias en plantas, también se ha observado otros factores en contra, como la liberación lenta de nutrientes que se realiza en la planta, acción negativa en la agricultura dada una mayor explotación de los cultivos y mayor rendimiento necesario, haciendo que usen fertilizantes químicos, además se observa la falta de conocimiento en ciertos sectores de la población sobre las RPCV, lo que les lleva a seguir utilizando métodos tradicionales, así como el mayor uso de fertilizante ante una deficiencia nutricional.

## 7. CONCLUSIÓN

El uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal como antimicrobianos (RPCR) llevan a una serie de conclusiones que se exponen a continuación:

- En la agricultura moderna es una innovación importante y sostenible.
- En este estudio de revisión bibliográfica se puede confirmar que las RPCR mejoran el crecimiento y la productividad de las plantas, además de protegerlas contra patógenos.
- Las RPCR reducen la dependencia de las plantaciones del uso de pesticidas y fungicidas químicos.
- Si el número de estudios acerca del uso de estas rizobacterias aumentase, se puede refinar el sistema utilizado en agricultura para que sea más factible su uso y los beneficios sean mayores que los posibles problemas que pueda tener.
- Es importante dar a conocer estos métodos como alternativa para que más agricultores obtengan más información de estos métodos para su integración en los cultivos

## **8. AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría agradecer a mi familia por su apoyo, también a mi tutora del Trabajo de Fin de Grado, por sus consejos y ayuda que me ha brindado a la hora de realizarlo.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. Ahemad, M., & Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University - Science*, 26(1), 1-20.
2. Ahmad, F., Ahmad, I., & Khan, M. S. (2010). Indole acetic acid production by the indigenous isolates of *Azotobacter* and fluorescent *Pseudomonas* in the presence and absence of tryptophan. *Turkish Journal of Biology*, 29(1), 29-34.
3. Ahmad, M., & Zargar, M. Y. (2017). Role of potassium in alleviating abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition*, 40(17), 2419-2435.
4. Ali, B. (2015). Bacterial auxin signaling: Comparative study of growth induction in *Arabidopsis thaliana* and *Triticum aestivum*. *Turkish Journal of Botany*, 39, 1-9.
5. Ali, S. S. (2015). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(1), 23-37.
6. Angulo, J., Machado, W., & Kiba, D. (2014). Plant growth promoting rhizobacteria in *Eucalyptus nitens*: Insights into growth promotion mechanisms and host interactions. *Forest Ecology and Management*, 326, 135-145.
7. Armenta-Bojórquez, A. D., García-Gutierrez, C., Camacho-Báez, J. R., Apodaca-Sánchez, M. Á., Gerardo-Montoya, L. y Nava-Pérez, E. (2010). Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Ra Ximhai*, 6(1), 51-56.
8. Asgher, M., Khan, M. I. R., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2014). Minimising toxicity of cadmium in plants-role of plant growth regulators. *Protoplasma*, 252, 399-413.
9. Bais, H. P., Weir, T. L., Perry, L. G., Gilroy, S., & Vivanco, J. M. (2006). The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology*, 57, 233-266.
10. Bakker, A. W., & Schippers, B. (1987). Microbial cyanide production in the rhizosphere in relation to potato yield reduction and *Pseudomonas* spp-mediated plant growth-stimulation. *Soil Biology and Biochemistry*, 19, 451-457.
11. Bakhshandeh, S., Pirdashti, H., Ladan Moghadam, A. R., & Movahedi Naeini, S. A. (2014). Response of some bacterial isolates for potassium solubilization. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 7(1), 130-137.
12. Barnawal, D., Bharti, N., Maji, D., Chanotiya, C. S., & Kalra, A. (2017). ACC deaminase-containing plant growth-promoting rhizobacteria protect the common bean

(*Phaseolus vulgaris* L.) against the toxic effects of ethylene under soil salinity stress. *Plant and Soil*, 415(1-2), 143-155.

13. Beneduzzi, A., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists of soil-borne plant pathogens. *Journal of Plant Interactions*, 7(2), 91-108.

14. Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. J., & Bakker, P. A. H. M. (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 17, 478-486.

15. Berg, G. (2009). Plant-microbe interactions promoting plant growth and health: Perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 14, 11-18.

16. Bhagyalakshmi, N., Shashidhar, G., & Rajeshwari, C. (2017). Potassium solubilizing bacteria for sustainable agriculture: A review. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 11(1), 145-159.

17. Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), 1327-1350.

18. Brady, N. C., & Weil, R. R. (2002). *The Nature and Properties of Soils* (13th ed.). Pearson Education.

19. Bull, C. T., Weller, D. M., & Thomashow, L. S. (1991). Relationship between root colonization and suppression of *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* by *Pseudomonas fluorescens* strain 2-79. *Phytopathology*, 81, 954-959.

20. Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2010). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1-2), 3-41.

21. Carcaño-Montiel, M. G., Bravo-López, M., Ruiz-Valdiviezo, V. M., & Martínez-Suárez, C. (2006). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y su uso en la agricultura. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(4), 1-10.

22. Cedeño-García, G. A., Serrato, J. A., Moreno-Sarmiento, N., & Rivera-Méndez, W. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en el cultivo de frijol: efectos de la inoculación en la arquitectura radical. *Agronomía Mesoamericana*, 29(1), 7-23.

23. Chaturvedi, H., & Paul Khurana, S. M. (2018). Role of plant growth promoting rhizobacteria in sustainable agriculture. In *Microbial Biotechnology* (pp. 125-156).

24. Cohen, A. C., Bottini, R., & Piccoli, P. (2015). Role of abscisic acid producing PGPR in sustainable agriculture. In D. K. Maheshwari (Ed.), *Bacterial Metabolites in*

Sustainable Agroecosystem. *Sustainable Development and Biodiversity* (Vol. 12, pp. 259-282)..

25. Cohen, S., Montalbini, P., & Argamasilla, R. (2015). Absciscic acid signaling in plants. *Journal of Plant Physiology*, 176, 25-31.

26. Damam, M., Kaladhar, D. S., Reddy, P. S., & Damodharam, T. (2016). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Current and future prospects for development of sustainable agriculture. *Microbial Biotechnology*, 2(1), 78-84.

27. Desai, A. J. (2017). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Mechanism and application in sustainable agriculture. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(4), 2272-2285.

28. Doornbos, L., Van Loon, L., & Bakker, P. A. H. M. (2012). Impact of root exudates and plant defense signaling on bacterial communities in the rhizosphere. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 227-243.

29. Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Alqarawi, A. A., Abd\_Allah, E. F., & Hashem, A. (2017). Phytohormones and beneficial microbes: Essential components for plants to balance stress and fitness. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2104.

30. Etesami, H., Emami, S., & Alikhani, H. A. (2017). Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects—A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(4), 897-911.

31. Farag, M. A., Zhang, H., & Ryu, C. M. (2013). Dynamic chemical communication between plants and bacteria through airborne signals: induced resistance by bacterial volatiles. *Journal of Chemical Ecology*, 39(7), 1007-1018.

32. Fibach-Paldi, S., Burdman, S., & Okon, Y. (2011). Key physiological properties contributing to rhizosphere adaptation and plant growth promotion of *Azospirillum brasilense*. *FEMS Microbiology Letters*, 326(2), 99-108.

33. Foyer, C. H., Lam, H. M., Nguyen, H. T., Siddique, K. H. M., Varshney, R. K., Colmer, T. D., ... & Tuberosa, R. (2016). Neglecting legumes has compromised human health and sustainable food production. *Nature Plants*, 2(8), 1-10.

34. García-Salamanca, A., Molina-Henares, M. A., van Dillewijn, P., Solano, J., Pizarro-Tobías, P., Roca, A., et al. (2013). Bacterial diversity in the rhizosphere of maize and the surrounding carbonate-rich bulk soil. *Microbial Biotechnology*, 6, 36-44.

35. Grageda-Cabrera, O. A., Díaz-Franco, A., Peña-Cabriaes, J. J. y Vera-Nuñez, J. A. (2012). Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(6), 1261-1274.

36. Gross, H., & Loper, J. E. (2009). Genomics of secondary metabolite production by *Pseudomonas* spp. *Natural Product Reports*, 26, 1408-1446.
37. Haas, D., & Défago, G. (2005). Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. *Nature Reviews Microbiology*, 3, 307-319.
38. Hiltner, L. (1904). Über neuere Erfahrungen und Problem auf dem Gebiete der Bodenbakteriologie unter besonderden berucksichtigungund Brache. *Arb Dtsch Landwirtsch Gesellschaft*, 98, 59-78.
39. Hojberg, O., & Sorensen, J. (1993). Microgradients of microbial oxygen consumption in a barley rhizosphere model system. *Applied Environmental Microbiology*, 59, 431-437.
40. Huang, X. F., Chaparro, J. M., Reardon, K. F., Zhang, R., Shen, Q., & Vivanco, J. M. (2014). Rhizosphere interactions: Root exudates, microbes, and microbial communities. *Botany*, 92, 267-275.
41. Ishikawa, C. M., & Bledsoe, C. S. (2000). Seasonal and diurnal patterns of soil water potential in the rhizosphere of blue oaks: Evidence for hydraulic lift. *Oecologia*, 125, 459-465.
42. Kang, S. M., Radhakrishnan, R., & Lee, I. J. (2017). *Bacillus amyloliquefaciens* subsp. *plantarum* as a novel plant probiotic: A review. *Microbiological Research*, 210, 84-90.
43. Kasim, W. A., Osman, M. E., Omar, M. N., El-Daim, I. A. A., Bejai, S., & Meijer, J. (2016). Control of drought stress in wheat using plant-growth-promoting bacteria. *Journal of Plant Growth Regulation*, 35(3), 830-844.
44. Khan, A. L., Waqas, M., & Lee, I. J. (2017). Plant growth-promoting rhizobacteria: Strategies to improve abiotic stresses under sustainable agriculture. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 1-16.
45. Li, P., Chen, F., & Cai, H. (2014). Phytohormones and microbe interactions: A review. *Plant Science*, 211, 109-115.
46. Liu, F., Xing, S., Ma, H., Du, Z., & Ma, B. (2013). Cytokinin-producing, plant growth-promoting rhizobacteria that confer resistance to drought stress in *Platycladus orientalis*. *Plant and Soil*, 370(1-2), 187-199.
47. Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63, 541-556.
48. Mahmood, A., Turgay, O. C., Farooq, M., & Hayat, R. (2016). Seed biopriming with plant growth promoting rhizobacteria: A review. *FEMS Microbiology Ecology*, 92(8).

49. Marilley, L., Hartwig, U. A., & Aragno, M. (1999). Influence of an elevated atmospheric CO<sub>2</sub> content on soil and rhizosphere bacterial communities beneath *Lolium perenne* and *Trifolium repens* under field conditions. *Microbial Ecology*, 38, 39-49.
50. Matilla, M. A., & Krell, T. (2017). Bacterias rizosféricas como fuente de antibióticos. *Alianzas y Tendencias BUAP*, 2(1), 14-21.
51. Matilla, M. A., Nogellova, V., Morel, B., Krell, T., & Salmond, G. P. (2016). Biosynthesis of the acetyl-CoA carboxylase-inhibiting antibiotic, andrimid in *Serratia* is regulated by Hfq and the LysR-type transcriptional regulator, AdmX. *Environmental Microbiology*, 18, 3635-3650.
52. Mendes, R., Kruijt, M., de Bruijn, I., Dekkers, E., van der Voort, M., Schneider, J. H., et al. (2001). Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. *Science*, 332, 1097-1100.
53. Mishra, P., & Dash, D. (2014). Rejuvenation of Biofertiliser for Sustainable Agriculture Economic Development Consilience. *Journal of Sustainable Development*, 11(1), 41-61.
54. Molina, L. A., Ramos, C., Duque, E., Ronchel, M. C., & García, J. M. (2000). Survival of *Pseudomonas putida* KT2440 in soil and in the rhizosphere of plants under greenhouse and environmental conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 315-321.
55. Molina-Romero, D., Baez, A., Quintero-Hernández, V., Castañeda-Lucio, M., Fuentes-Ramírez, L. E., Bustillos-Cristales, M. R., & Munive, J. A. (2015). Plant growth-promoting rhizobacteria: A review of their effects on the growth of maize under water stress conditions. *Microbiological Research*, 181, 34-42.
56. Mohammed, M. H. (2018). Biofilm formation and EPS production enhance the survival of plant growth promoting rhizobacteria in saline soil. *Rhizosphere*, 6, 55-60.
57. Mousa, W. K., & Raizada, M. N. (2015). Biodiversity of genes encoding anti-microbial traits within plants associated microbes. *Frontiers in Plant Science*, 6, 231.
58. Naseem, H., Ahsan, M., & Khan, N. (2018). The role of some important PGPR in sustainable agriculture. *Environment and Sustainability*, 5(1), 50-62.
59. Oteino, N., Lally, R. D., Kiwanuka, S., Lloyd, A., Ryan, D., Germaine, K. J., & Dowling, D. N. (2015). Plant growth promotion induced by phosphate solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolates. *Frontiers in Microbiology*, 6, 745.

60. Palacio-Rodríguez, R., Solano, J., Rodríguez, A., Hernández, Y., & Chávez, M. (2016). Plant growth-promoting rhizobacteria as potential agents to improve plant responses to heat stress. *Applied Soil Ecology*, 107, 327-333.
61. Parmar, P., & Sindhu, S. S. (2013). Potassium solubilization by rhizosphere bacteria: Influence of nutritional and environmental conditions. *Journal of Microbiology Research*, 3(1), 25-31.
62. Patil, V. D., Patil, S. S., & Apte, S. N. (2016). Characterization of ACC deaminase producing rhizobacteria and their potential for growth promotion in wheat under saline conditions. *International Journal of Agriculture Sciences*, 8(58), 3188-3194.
63. Penmetsa, R. V., & Cook, D. R. (1997). A legume ethylene-insensitive mutant hyperinfected by its rhizobial symbiont. *Science*, 275(5299), 527-530.
64. Pereira, S. I. A., Castro, P. M. L., & Rodrigues, M. A. (2016). Effects of plant growth promoting rhizobacteria on the growth of eucalyptus under drought stress. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(7), 2045-2054.
65. Poupin, M. J., Timmermann, T., Vega, A., Zuñiga, A., & González, B. (2013). Effects of the plant growth-promoting bacterium Burkholderia phytofirmans PsJN throughout the life cycle of Arabidopsis thaliana. *PLoS One*, 8(11), e69435.
66. Raheem, A., Imran, Q., & Hasan, U. (2018). Auxin producing plant growth promoting rhizobacteria: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 41(15), 2016-2023.
67. Rajesh, R. S., & Prakash, S. (2011). Antifungal activity of bacterial endophytes from Capsicum annuum against Colletotrichum capsici. *Indian Journal of Microbiology*, 51(4), 345-349.
68. Rajkumar, M., Ma, Y., & Freitas, H. (2010). Improvement of Ni phytostabilization by inoculation of Ni resistant Bacillus megaterium SR28C and plant growth promoting Bacillus methylotrophicus RC1. *Chemosphere*, 78(4), 364-368.
69. Razaq, M., Zhang, P., Shen, H., & Salahuddin. (2017). Influence of nitrogen and phosphorous on the growth and root morphology of Acer mono. *PloS One*, 12(2), e0171321.
70. Rives, N., Acebo, Y., & Hernández, A. (2007). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal en el cultivo del arroz (Oryza sativa L.). Perspectivas de su uso en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 28(2), 29-38.
71. Rodríguez-Sahagún, A., Velasco-Jiménez, A., Castellanos-Hernández, G., & Clarenc Aarland, R. (2020). Bacterias rizosféricas con

beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana: organo científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.*, 38(2), 333–345.

72. Sah, S. K., Reddy, K. R., & Li, J. (2016). Absciscic acid and abiotic stress tolerance in crop plants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 571.

73. Santner, A., & Estelle, M. (2009). The ubiquitin-proteasome system regulates plant hormone signaling. *The Plant Journal*, 61(6), 1029-1040.

74. Sarma, R. K., & Saikia, R. (2014). Alleviation of drought stress in mung bean by strain *Pseudomonas aeruginosa* GGRJ21. *Plant and Soil*, 377(1-2), 111-126.

75. Schaller, G. (1987). pH changes in the rhizosphere in relation to the pH-buffering of soils. *Plant and Soil*, 97, 439-444.

76. Shahzad, R., Waqas, M., & Khan, A. L. (2017). PGPR effect on growth, photosynthesis and adaptation of *Zea mays* under stress conditions. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 13-21.

77. Singh, R., Paul, S., & Pandey, R. (2010). Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(4), 327-346.

78. Somers, E., Vanderleyden, J., & Srinivasan, M. (2004). Rhizosphere bacterial signalling: A love parade beneath our feet. *Critical Reviews in Microbiology*, 30, 205-240.

79. Stearns, J. C., Woody, O. Z., McConkey, B. J., & Glick, B. R. (2012). Effects of bacterial ACC deaminase on plant growth promoting bacteria on the root transcriptome of *Brachypodium distachyon*. *Canadian Journal of Microbiology*, 58(4), 538-548.

80. Sunar, K., Kumar, R., Tewari, S., & Prakash, A. (2015). Evaluation of plant growth promoting and biocontrol activities of *Pseudomonas fluorescens* against phytopathogens causing disease in *Vigna radiata* L. *Indian Journal of Experimental Biology*, 53, 38-45.

81. Tahir, M., & Aqeel, S. M. (2013). Plant Growth promoting rhizobacteria (PGPR): A budding complement of synthetic fertilizers for improving crop production. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 11(1), 1-7.

82. Tenorio-Salgado, S., Tinoco, R., Vazquez-Duhalt, R., & Caballero-M. (2013). Biotransformation of phenolic compounds by the non-pathogenic *Burkholderia cepacia* strain 2a. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(18), 7939-7949.

83. Upadhyay, A., Srivastava, S., & Rajwar, A. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Current and future prospects for development of sustainable agriculture. *Microbial Biotechnology*, 2(1), 78-84.
84. Uren, N. C. (2007). Types, amounts and possible functions of compounds released into rhizosphere by soil-grown plants. In Pinton, R., Varanini, Z., & Nannipieri, P. (Eds.), *The Rhizosphere: Biochemistry and Organic Substances at the Soil-Plant Interface*. CRC Press.(pp. 1-21).
85. Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M. L., Touraine, B., Moënne-Loccoz, Y., Muller, D., et al. (2013). Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Frontiers in Plant Science*, 4, 356.
86. Voisard, C., Keel, C., Haas, D., & Défago, G. (1989). Cyanide production by *Pseudomonas fluorescens* helps suppress black root rot of tobacco under gnotobiotic conditions. *EMBO Journal*, 8, 351-358.
87. Vurukonda, S. S., Vardharajula, S., Shrivastava, M., & SkZ, A. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 184, 13-24.
88. Yadav, B. K., & Verma, J. P. (2012). Phosphate solubilization and mobilization in soil through microorganisms under arid ecosystems. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 6(2), 207-219.
89. Zdor, R. E. (2015). Bacterial cyanogenesis: Impact on biotic interactions. *Journal of Applied Microbiology*, 118, 267-274.
90. Zhang, H., & Kong, W. (2014). Effects of potassium application on yield and quality of tobacco. *Journal of Agricultural Science*, 6(3), 38-44.
91. Zhou, C., Li, F., Xie, Y., Zhu, L., Xiao, X., Ma, Z., & Wang, J. (2017). Involvement of abscisic acid in microbe-induced saline-alkaline resistance in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 12, 1-4.
92. Zhou, X., Zhang, Z., & Han, X. (2017). Absciscic acid regulates root growth and leaf transpiration under water deficit conditions in maize. *Journal of Plant Physiology*, 218, 18-26.

## 9.1 Tablas

### Tabla 1:

Parray, J. A., Jan, S., Kamili, A. N., Qadri, R. A., Egamberdieva, D. & Ahmad, P. (2016). Current Perspectives on Plant Growth-Promoting Rhizobacteria. *Journal of Plant Growth Regulation*, 35(3), 877- 902.

### Tabla 2:

-Beneduzi, A., Ambrosini, A., & Passaglia, L.M.P. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genetics and Molecular Biology*, 35(4), 1044-1051.

-Chowdhury, S.P., Hartmann, A., Gao, X., & Borriss, R. (2015). Biocontrol mechanism by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 associated with the root: A review. *Frontiers in Microbiology*, 6, 780.

-Compant, S., Duffy, B., Nowak, J., Clément, C., & Barka, E.A. (2005). Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: Principles, mechanisms of action, and future prospects. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(9), 4951-4959.

-Glick, B.R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*,.

-Haas, D., & Défago, G. (2005). Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. *Nature Reviews Microbiology*, 3, 307-319.

-Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63, 541-556.

-Raaijmakers, J.M., de Bruijn, I., & de Kock, M.J.D. (2006). Cyclic lipopeptide production by plant-associated *Pseudomonas* species: Diversity, activity, biosynthesis, and regulation. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 19(7), 699-710.

-Whipps, J.M. (2001). Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*, 52 (Supplement 1), 487-511.