



Ciencia aplicada

Uso de PGPR como una alternativa biofertilizante en procesos de restauración ecológica

Use of PGPR as a biofertilizing alternative in ecological restoration processes

[DOI:10.54104/saywa.v4n5.1587](https://doi.org/10.54104/saywa.v4n5.1587)

“

Palabras clave:

Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), fitopatógenos, restauración ecológica, fitohormonas.

Keywords:

PGPR, phytopathogens, ecological restoration, phytohormones.

Paula Andrea Beltrán Jiménez

Facultad de Ciencias
Universidad Antonio Nariño

pbeltran1@uan.edu.co

Carolina Jaime Rodríguez

Facultad de Ciencias
Universidad Antonio Nariño

cajaime@uan.edu.co

Resumen

El uso de PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) —conjunto de bacterias que habitan en la rizosfera de las plantas y que producen todo tipo de beneficios, mejorando el crecimiento, la disponibilidad y/o la absorción de minerales (nitratos, fosfatos)—, ayudan a la producción de hormonas necesarias en el desarrollo de los vegetales (fitohormonas). Estos microorganismos tienen variadas aplicaciones en agricultura ecológica como biocontroladores, biofertilizantes y bioabonos. Protegen las plantas contra posibles agentes patógenos y mejoran la biodisponibilidad de nutrientes en el suelo para el crecimiento de las plantas. Las experiencias en restauración ecológica de ecosistemas degradados se han enfocado en el uso de micorrizas arbusculares y bacterias a escala de invernadero.

Abstract

The use of PGPR (*plant growth-promoting rhizobacteria*) —which are a group of bacteria that live in the rhizosphere of plants and produce all kinds of benefits, improving growth, availability and/or absorption of minerals (nitrates, phosphates)—, helps in the production of hormones necessary for plant development (phytohormones). These microorganisms have various applications in organic agriculture as bio-controllers, biofertilizers and biofertilizers and protect plants against possible pathogens and improve the bioavailability of nutrients in the soil to promote plant growth. Experiences in ecological restoration of degraded ecosystems have focused on the use of arbuscular mycorrhizae and bacteria at greenhouse scale.

Existe la necesidad de buscar alternativas ecológicas para mejorar la producción vegetal y mantener los nutrientes en el suelo, a través de microorganismos que sirvan de biofertilizantes orgánicos.

Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal

El suelo es esencial para los agricultores como principal sustrato para el crecimiento y nutrición de las plantas. La agricultura tradicional utiliza fertilizantes químicos, basados en reacciones químicas que ayudan a la asimilación de nutrientes, mientras que otras sustancias químicas sirven de plaguicidas. Sin embargo, sus desventajas son amplias al tener características tóxicas para humanos y animales, causando alteraciones en la estructura y función de los ecosistemas (Guerrero, 2013). Por lo tanto, existe la necesidad de buscar alternativas ecológicas para mejorar la producción vegetal y mantener los nutrientes en el suelo, a través del uso de microorganismos que sirvan de biofertilizantes orgánicos. Actualmente se implementan rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) para la producción agrícola sostenible (Carvajal Muñoz & Mera Benavidez, 2010).

La expresión Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) fue acuñada en 1978 (Kloepper y Schroth, 1981) para describir las bacterias que habitan en una zona específica de inte-

racción única entre las raíces de las plantas y microorganismos del suelo llamada rizósfera, las cuales favorecen y mejoran el desarrollo de las plantas con la liberación de metabolitos (Moreno Reséndez *et al.*, 2018). Existen reportes de la actividad de muchos géneros de PGPR asociadas con las células de la raíz, como: *Agrobacterium*, *Arthrobacter*, *Azoarcus*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Caulobacter*, *Chromobacterium*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Klebsiella*, *Micrococcus*, *Pantoea*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* y *Serratia* (Ahemad & Kibret, 2014), las cuales se clasifican en dos grupos:

Extracelular (ePGPR): Se encuentra principalmente entre las células de la corteza de la raíz.

Intracelular (iPGPR): Se presenta generalmente dentro de las estructuras nodulares especializadas de las células de la raíz y poseen potencial para fijar el N₂ atmosférico simbióticamente con las plantas superiores (Shukla, 2019).

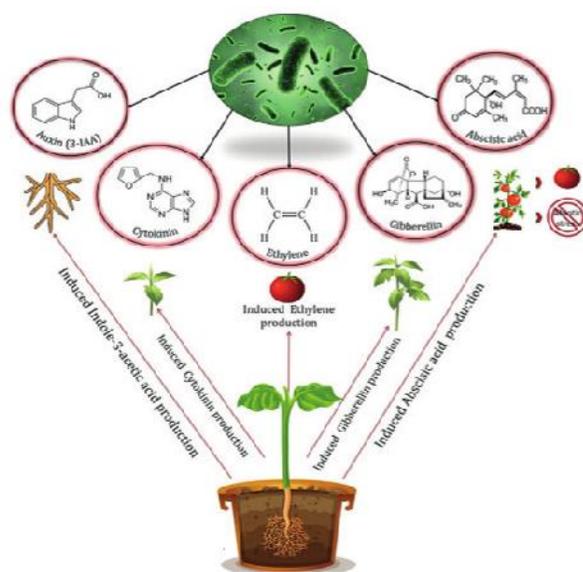
Las PGPR también protegen las plantas contra microorganismos perjudiciales en el suelo llamados fitopatógenos mediante la producción de sideróforos, ácido indol acético (IAA), fitohormonas, etileno (ET) y/o ácido abscísico (ABA) (Dey *et al.*, 2004).

Análisis de diversidad microbiana

La diversidad microbiana del suelo resulta de gran importancia ya que cada tipo de microorganismo posee características propias y únicas que pueden ser aprovechables en la mejora de las plantas, de uso individual o en conjunto. Shukla (2019) hace referencia a la importancia de la diversidad microbiana y el interés creciente por descubrir nuevos microorganismos y caracterizar su función en diferentes áreas de la planta,

que van desde la raíz hasta la región apical de la planta, la superficie del brote (filosfera) y la región interna de las plantas (endófitos). Estos microorganismo aportan de manera saludable y ofrecen ventajas beneficiosas para las planta. El análisis de la diversidad de los microorganismos presentes en el suelo permite conocer los géneros que se podrían explotar aún más en la agricultura mediante manipulaciones genéticas y desempeñarían el papel deseado en la producción agrícola sostenible.

Figura 1. Papel de PGPR en la producción de fitohormonas y su impacto en el desarrollo de las plantas y el estrés abiótico.



Fuente: Elaboración propia.

Mecanismos de acción

Las rizobacterias promotoras del crecimiento en plantas son capaces actuar de manera directa e indirecta, con una serie de mecanismos complejos que interactúan entre sí para estimular su desarrollo. La diferencia principal es que los mecanismos indirectos ocurren fuera de la planta, mientras que los directos ocurren dentro de ella y afectan directamente

a su metabolismo a través de la modificación de la expresión de genes (Singh *et al.*, 2019).

- **Directos:** Involucran varios procesos como la solubilización de fosfato, la fijación de nitrógeno, la producción de sideróforo, HCN, amoníaco, vitaminas y fitohormonas (como auxina, citoquinina y giberelinas) (Figura 1).
- **Indirectos:** Involucran varios procesos que incluyen la actividad ACC desaminasa, producción de antibióticos, enzimas que degradan la pared celular y resistencia sistémica inducida (ISR).

Mecanismos de acción directos

Fijación de nitrógeno

El nitrógeno es uno de los principales nutrientes de las plantas, siendo un factor limitante en el crecimiento y que para ser utilizado este debe ser primero reducido y luego “fijado” (combinado) en la forma de iones amonio (NH_4^+) o nitrato (NO_3^-) por lo que requieren una fuente de energía química (Mayz-Figueroa, 2004). Los microorganismos bacterianos que fijan nitrógeno pueden clasificarse en dos categorías de diazótrofos principales:

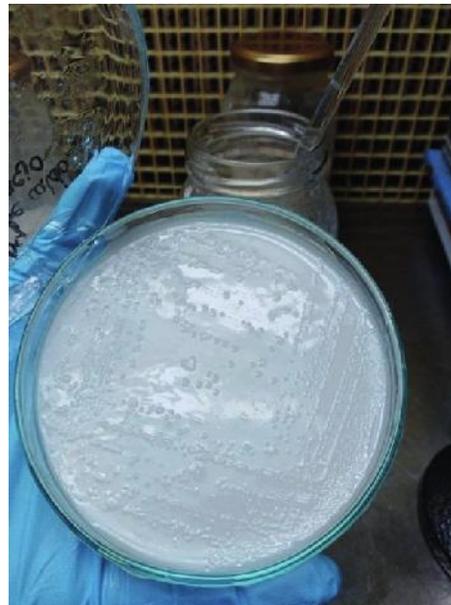
- Bacterias simbióticas asociadas a las leguminosas que infectan la raíz, produciendo nódulos.
- Bacterias asimbióticas que se les conoce como fijadores de nitrógeno de vida libre que se encuentra cerca de los tejidos de la raíz, aunque no la invaden (Figura 2).

Solubilización de fosfato

El fosfato también es un nutriente limitante en las plantas, que se relaciona con el desarrollo de la raíz y del grano en el crecimiento y la floración. En la parte metabólica parti-

cipa en procesos de fotosíntesis, glucólisis, respiración y síntesis de ácidos grasos. Los suelos contienen grandes reservas de fósforo total, tanto orgánico como inorgánico, pero la mayoría del fósforo se encuentra en formas insolubles. Las plantas solo pueden absorber este mineral en dos formas iónicas solubles, la monobásica (H_2PO_4^-) y la dibásica (HPO_4^{2-}) (Corrales Ramírez *et al.*, 2014). Las bacterias PGPR tienen como función solubilizar el fosfato a través de diferentes mecanismos mediante enzimas llamadas fosfatasas poniéndolo a disposición de la planta (Goswami *et al.*, 2014).

Figura 2. Bacteria fijadora de Nitrógeno *Azotobacter* spp. Morfología de colonias en agar Ashby.



Fuente: Elaboración propia.

Producción de fitohormonas

Las hormonas vegetales (fitohormonas) son producidas en la parte interior de las plantas, que ejercen función a nivel celular, cambiando los patrones de crecimiento de los vegetales y permitiendo su control. Las principales fitohormonas son las auxinas, giberelinas y citoquininas (Alcántara *et al.*, 2019).

- **Auxinas:** Tienen como característica principal en la inducción de la formación y elongación de tallos a nivel vegetal, promover la división celular en cultivos, inducir la producción de diferentes raíces adventicias sobre los tejidos de hojas y tallos recién cortados. Las más conocidas se encuentra el ácido 3-indol-acético que es producida de manera natural, aunque también se conocen otro tipo de auxinas que son producidas de manera sintética como el ácido indol-butírico (IBA), el ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) y el ácido α -naftalenacético (NAA) (Jordán & Casaretto, 2006).
- **Giberelinas:** Tiene como función incrementar los porcentajes de germinación de semillas, el crecimiento del tallo, la inducción floral, el desarrollo de polen y el crecimiento del fruto también conocida como ácidos giberélicos. Existen tres tipos de giberelinas: GA1, GA2 y GA3. la más usada es el ácido giberélico (GA3), ya que juega un rol importante en el alargamiento de los segmentos nodales los cuales permite estimular la elongación celular en respuesta a las condiciones de luz y oscuridad. Cuando hay una baja cantidad de giberelinas se puede observar una esterilidad y un bajo desarrollo de los aparatos reproductores vegetales (Bohórquez-Sandoval et al., 2011).
- **Citoquininas:** Son fitohormonas derivadas de purinas, son sintetizadas por microorganismos, principalmente de fitopatógenos los cuales provoca alteraciones importantes en el desarrollo de las plantas. Están relacionadas en promover y mantener la división celular de las plantas y están involucradas en varios procesos de diferenciación incluyendo la formación de los brotes o el crecimiento primario de la raíz (Cerezo, 2011).

Las hormonas vegetales (fitohormonas) son producidas en la parte interior de las plantas, que ejercen función a nivel celular, cambiando los patrones de crecimiento de los vegetales y permitiendo su control.

- **Etileno:** Su función es la de ser mediador y coordinador de las señales internas y externas en respuesta a distintos tipos de estrés tanto bióticos como abióticos, que modulan la dinámica del crecimiento y los programas de desarrollo en las plantas. Está involucrado en procesos como el desarrollo de las plantas tales como germinación de las semillas, desarrollo de pelos radiculares, nodulación, maduración de los frutos, y senescencia celular (Xii, n.d.).

Agentes de control basados en PGPRS

Un crecimiento anormal de las plantas o alguna intervención inadecuada afectan la función de estas, conduciendo a enfermedades infecciosas que se consideran una amenaza en la seguridad alimenticia y alteración en el ecosistema. Con el fin de abordar esta problemática se ha ido implementando fertilizantes químicos para mejorar el rendimiento de las plantas y protegerlos de las plagas, aunque el uso repetido de estos productos químicos contaminan el ecosistema, ocasionando daño en la microbiota benéfica del suelo, dificultando el reciclaje de nutrientes como Nitrógeno, fósforo y

potasio (Carvalho, 2006). Como alternativa, se ha implementado un método de control para los patógenos de las plantas y mejorar la productividad de los cultivos que consiste en el uso de organismos vivos a manera de control biológico. Algunos géneros destacados de hongos son *Trichoderma harzianum* (Benítez et al., 2004), *Paecilomyces lilacinus* (Dai et al., 2020), *Metharizhium spp* (Aw & Hue, 2017) y de bacterias como *Streptomyces pp* (Vurukonda et al., 2018) y *Bacillus thuringiensis* (Palma et al., 2014).

Las rizobacterias promotoras de crecimiento en plantas tienen un potencial uso a nivel agrícola y su uso se puede extender hacia cultivos forestales usados en procesos de restauración ecológica.

El control biológico es sostenible desde una perspectiva ecológica, ya que consiste en un proceso en el que se mantiene la cepa patógena a baja densidad ya sea a través de uno o más microorganismos como los PGPRs, que producen una amplia gama de compuestos secundarios como aleloquímicos que incluyen metabolitos, sideróforos, antibióticos, metabolitos volátiles, enzimas, entre otros (Saraf et al., 2014). El modo de acción de los agentes biocontroladores son:

Antibiosis

Hace referencia a la lisis celular debida a enzimas o metabolitos de múltiples grupos de organismos del suelo competidores de antibió-

ticos por las vías metabólicas secundarias, que actúan a bajas concentraciones. La mayoría de los antibióticos han sido aislados de microorganismos del suelo, aunque también se han encontrado que viven en otras partes de las plantas. Se ha evidenciado que los antibióticos producidos por PGPR ayudan a controlar las infecciones transmitidas por el suelo de trigo, arroz, maíz, garbanzo, cebada, entre otros, alterando la membrana del patógeno ocasionando daño de lípidos y otras macromoléculas (Marín et al., 2005).

Sideróforos

El hierro es un elemento fundamental para el crecimiento y desarrollo de las plantas, también en el éxito o fracaso de microorganismos patógenos o simbióticos para invadir un organismo o para colonizar un ambiente determinado. La escasez de hierro biodisponible limita el crecimiento de patógenos al bloquear procesos clave como la síntesis y esporulación de ácidos nucleicos. La producción de sideróforos por los agentes de control biológico en cantidades suficientes puede limitar la disponibilidad de hierro para el patógeno y es posible que conduzca a la inducción de resistencia del huésped contra el patógeno (Aguado-Santacruz et al., 2012).

Enzimas líticas

Hay bacterias del suelo que producen enzimas líticas capaces de hidrolizar quitina, proteínas, celulosa y hemicelulosa que muestran una preferencia por colonizar y lisar patógenos vegetales la cuales son importantes para el control biológico. Existen varias de enzimas líticas bacterianas como por ejemplo las celulasas, glucanasas, proteasas y quitinasas (Kannoja et al., 2019).

Compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos volátiles pueden aparecer en la atmósfera del suelo por fuentes antro-

pogénicas y biogénicas. Entre los inhibidores volátiles se encuentran el etileno, amoníaco, alcohol alílico, ácido acrílico, trimetilamina, benzaldehído y N, N-dimetiloctilamina. En control biológico de los microbios volátiles o antagonistas tiene importancia a largo plazo de los cultivos contra los patógenos (Chuankun *et al.*, 2004).

Finalmente, las rizobacterias promotoras de crecimiento en plantas tienen un potencial uso a nivel agrícola y su uso se puede extender hacia cultivos forestales usados en procesos de restauración ecológica que contribuyen a mitigación de cambio climático y recuperación de suelos degradados. La problemática descrita en la política Nacional de restauración ecológica (MADS, 2015), incentiva las metas a alcanzar en corto y mediano plazo y es la oportunidad desde las ciencias biológicas y químicas el desarrollo de estrategias ecológicas eficientes para la recuperación de suelos transformados por causas antrópicas y naturales.

Estas estrategias biotecnológicas son los microorganismos promotores de crecimiento en plantas que ayudarían a la conservación de ecosistemas estratégicos de nuestro país, para esto es importante profundizar en las dinámicas de las interacciones microorganismos-suelo-planta, en el conocimiento de la fisiología y ciclos de vida de las plantas, las rutas bioquímicas de asimilación de nutrientes y los procesos de comunicación celular que llevan a cabo estas plantas usadas en la formación de núcleos de regeneración para la restauración ecológica de ecosistemas clave.

Referencias bibliográficas

- Aguado-Santacruz, G. A., Moreno-Gómez, B., Jiménez-Francisco, B., García-Moya, E. y Preciado-Ortiz, R. E. (2012). Impacto de los sideróforos microbianos y fitosideróforos en la asimilación de hierro por las plantas: Una síntesis. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(1), pp. 9-21.
- Ahemad, M. y Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University - Science*, 26 (1), pp. 1-20. Elsevier. Recuperado de: [<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001>].
- Alcántara, J., Geovanna, A., Jonathan, A. y Sánchez, R. (2019). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *Nova*, 32, pp. 109-129.
- Aw, K. M. S., & Hue, S. M. (2017). Mode of infection of metarhizium spp. Fungus and their potential as biological control agents. *Journal of Fungi*. Recuperado de: [<https://doi.org/10.3390/jof3020030>].
- Benítez, T., Rincón, A. M., Limón, M. C. y Codón, A. C. (2004). Biocontrol mechanisms of Trichoderma strains. *International Microbiology*. Recuperado de: [<https://doi.org/10.2436/im.v7i4.9480>].
- Bohorquez-Sandoval, C., Alvarez Herrera, J. y Niño Medina, R. (2011). Giberelinas y 6-Bencilaminopurina en la plantulación de semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) híbrido Adrale RZ F1. *Temas Agrarios*, 16 (2), p. 42. Recuperado de: [<https://doi.org/10.21897/rta.v16i2.690>].
- Carvalho, F. P. (2006). Agriculture, pesticides, food security and food safety. *Environmental Science and Policy*; 9 (7-8), pp. 685-692. Elsevier. Recuperado de: [<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2006.08.002>].
- Cerezo, J. (2011). Tema 11, Citoquininas. *Fisiología Vegetal*, pp. 3-7.
- Chuankun, X., Minghe, M., Leming, Z. y Keqin, Z. (2004). Soil volatile fungistasis and volatile fungistatic compounds. *Soil*

- Biology and Biochemistry, 36 (12). Recuperado de: [<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.020>].
- Corrales Ramírez, Arevalo Galvez, Z. Y. y Moreno Burbano, V. E. (2014). Solubilización de fosfatos: una función microbiana importante en el desarrollo vegetal. *Nova*, 12(21), 67. Recuperado de: [<https://doi.org/10.22490/24629448.997>].
- Dai, Z. B., Wang, X. y Li, G. H. (2020). Secondary Metabolites and Their Bioactivities Produced by *Paecilomyces*. *Molecules* (Basel, Switzerland). Recuperado de: [<https://doi.org/10.3390/molecules25215077>].
- Dey, R., Pal, K. K., Bhatt, D. M. y Chauhan, S. M. (2004). Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 159 (4), pp. 371-394. Recuperado de: [<https://doi.org/10.1016/j.micres.2004.08.004>].
- Goswami, D., Dhandhukia, P., Patel, P. y Thakker, J. N. (2014). Screening of PGPR from saline desert of Kutch: Growth promotion in *Arachis hypogaea* by *Bacillus licheniformis* A2. *Microbiological Research*, 169 (1), pp. 66-75. Recuperado de: [<https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.07.004>].
- Guerrero, R. (2013). Manual técnico. Propiedades Generales de los Fertilizantes. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53, pp. 1689-1699.
- Jordán, M. y Casaretto, J. (2006). *Capítulo XV Hormonas y Reguladores del Crecimiento: Auxinas, Giberelinas y Citocininas*; 15.
- Kannoja, P., Choudhary, K. K., Srivastava, A. K., & Singh, A. K. (2019). PGPR Bioelicitors. In *PGPR Amelioration in Sustainable Agriculture*. Elsevier Inc. Recuperado de: [<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815879-1.00004-5>].
- Kloepper. J. W y Schroth. M. N. 1981. Plant growth-promoting rhizobacteria and plant growth under gnotobiotic conditions. *Phytopathology* 71, pp. 642-644. Recuperado de: [https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1981Articles/Phyto71n06_642.PDF].
- Marín, I., Sanz, J. L. S. M., Amils, R. y Abrusci, C. (2005). *Biotechnología y medioambiente*. 5, pp. 1-16.
- Mayz-Figueroa, J. (2004). Fijación biológica de nitrógeno Biological Nitrogen Fixation. *Revista UDO Agrícola* 4 (1).
- MADS (2015). Plan Nacional de Restauración. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá: MADS.
- Moreno Reséndez, A., García Mendoza, V., Reyes Carrillo, J. L., Vásquez Arroyo, J. y Cano Ríos, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*. Recuperado de: [<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>].
- Palma, L., Muñoz, D., Berry, C., Murillo, J., Caballero, P. y Caballero, P. (2014). *Bacillus thuringiensis* toxins: An overview of their biocidal activity. *Toxins*. Recuperado de: [<https://doi.org/10.3390/toxins6123296>].
- Saraf, M., Pandya, U. y Thakkar, A. (2014). Role of allelochemicals in plant growth promoting rhizobacteria for biocontrol of phytopathogens. *Microbiological Research*, 169 (1), pp. 18-29. Recuperado de: [<https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.08.009>].

Shukla, A. K. (2019). Ecology and Diversity of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Agricultural Landscape. *PGPR Amelioration in Sustainable Agriculture*. Elsevier. Recuperado de: [<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815879-1.00001-x>].

Singh, M., Singh, D., Gupta, A., Pandey, K. D., Singh, P. K. y Kumar, A. (2019). Plant Growth Promoting Rhizobacteria. *PGPR Ameliora-*

tion in Sustainable Agriculture. Ed. Elsevier. Recuperado de: [<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815879-1.00003-3>].

Vurukonda, S. S. K. P., Giovanardi, D y Stefani, E. (2018). Plant growth promoting and biocontrol activity of *streptomyces spp.* As endophytes. *International Journal of Molecular Sciences*. Recuperado de: [<https://doi.org/10.3390/ijms19040952>].