

V

Análisis de Parámetros Químicos del Suelo antes y después de la Aplicación de Bioinoculantes Bacterianos en la Región San Martín

Ana Noemí Sandoval Vergara
Ludwig Nicolás Villanueva Mori
José Bladimir Sánchez Cruz

V

Análisis de Parámetros Químicos del Suelo antes y después de la Aplicación de Bioinoculantes Bacterianos en la Región San Martín

Ana Noemí Sandoval Vergara
Ludwig Nicolás Villanueva Mori
José Bladimir Sánchez Cruz

RESUMEN

La agricultura sostenible es una estrategia clave para abordar los desafíos actuales relacionados con la seguridad alimentaria y la preservación del medio ambiente. En este contexto, el uso de bioinoculantes bacterianos ha ganado reconocimiento como un enfoque biotecnológico que promueve la salud del suelo y mejora la productividad agrícola. Los bioinoculantes bacterianos, que incluyen cepas de microorganismos benéficos, interactúan con las plantas y el suelo para facilitar la absorción de nutrientes esenciales, promover el crecimiento de las plantas y reducir la dependencia de fertilizantes químicos. Su aplicación se ha estudiado en suelos tropicales y subtropicales, donde los cambios en los parámetros químicos pueden mejorar significativamente el rendimiento agrícola y la sostenibilidad del ecosistema. La región de San Martín en la Amazonía peruana presenta condiciones climáticas y edáficas que, a pesar de ser favorables para la agricultura, enfrentan degradación y pérdida de fertilidad debido al uso intensivo de la tierra y la deforestación. Las deficiencias de nutrientes, como nitrógeno, fósforo y potasio, sumadas a la disminución de la materia orgánica, son problemas recurrentes que afectan el desarrollo de los cultivos y amenazan la sostenibilidad agrícola local. Este estudio tiene como objetivo evaluar los cambios en los parámetros químicos del suelo luego de la aplicación de bioinoculantes bacterianos en San Martín. Se plantea la hipótesis de que estos bioinoculantes mejorarán significativamente los parámetros químicos del suelo, mejorando la disponibilidad de nutrientes y promoviendo un entorno más adecuado para el crecimiento de los cultivos.

Palabras clave: Bioinoculantes, agricultura sostenible, parámetros químicos del suelo, San Martín, salud del suelo.

ABSTRACT

Sustainable agriculture is a key strategy to address current challenges related to food security and environmental preservation. In this context, the use of bacterial bioinoculants has gained recognition as a biotechnological approach that promotes soil health and improves agricultural productivity. Bacterial bioinoculants, which include beneficial microorganism strains, interact with plants and soil to facilitate the absorption of essential nutrients, promote plant growth, and reduce reliance on chemical fertilizers. Their application has been studied in tropical and subtropical soils, where changes in chemical parameters can significantly enhance agricultural yield and ecosystem sustainability. The San Martín region in the Peruvian Amazon presents climatic and edaphic conditions that, despite being favorable for agriculture, face degradation and fertility loss due to intensive land use and deforestation. Nutrient deficiencies, such as nitrogen, phosphorus, and potassium, coupled with decreased organic matter, are recurrent issues affecting crop development and threatening local agricultural sustainability. This study aims to evaluate the changes in soil chemical parameters following the application of bacterial bioinoculants in San Martín. It hypothesizes that these bioinoculants will significantly improve soil chemical parameters, enhancing nutrient availability and promoting a more suitable environment for crop growth.

Keywords: Bioinoculants, sustainable agriculture, soil chemical parameters, San Martín, soil health.

INTRODUCCIÓN

La agricultura sostenible es un eje clave para enfrentar los desafíos actuales de seguridad alimentaria y preservación ambiental. En este contexto, el uso de bioinoculantes bacterianos ha ganado reconocimiento como una estrategia biotecnológica que promueve la salud del suelo y mejora la productividad agrícola (Lugtenberg & Kamilova, 2009). Los bioinoculantes bacterianos, que incluyen cepas de microorganismos beneficiosos, tienen la capacidad de interactuar con las plantas y

el suelo, facilitando la absorción de nutrientes esenciales, promoviendo el crecimiento vegetal y reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos (Bhattacharyya & Jha, 2012). En particular, su aplicación ha sido estudiada en suelos de regiones tropicales y subtropicales, en los cuales los cambios en los parámetros químicos pueden ser decisivos para mejorar el rendimiento agrícola y la sostenibilidad del ecosistema (Arora et al., 2017).

La región San Martín, localizada en la Amazonía peruana, presenta condiciones climáticas y edafológicas que, a pesar de ser propicias para la agricultura, exhiben problemas de degradación y pérdida de fertilidad en el suelo debido a prácticas de uso intensivo y deforestación (INEI, 2019). Estos problemas de fertilidad afectan negativamente el desarrollo de cultivos de importancia económica y amenazan la sostenibilidad de la producción agrícola local. La falta de nutrientes clave, como el nitrógeno, fósforo y potasio, junto con la disminución de la materia orgánica, son problemas recurrentes en los suelos de esta región (García et al., 2018). Además, la acidez del suelo y la disminución de su capacidad de intercambio catiónico agravan las limitaciones para el crecimiento de las plantas (Ministerio de Agricultura y Riego, 2020). Ante estas condiciones, la implementación de bioinoculantes bacterianos representa una alternativa viable y sustentable para mejorar las características del suelo, facilitando una mayor biodisponibilidad de nutrientes y promoviendo un equilibrio químico más favorable para los cultivos (Pérez-Montaño et al., 2014).

El presente estudio se plantea como objetivo general evaluar los cambios en los parámetros químicos del suelo tras la aplicación de bioinoculantes bacterianos en la región de San Martín. Los objetivos específicos incluyen: (i) identificar y cuantificar los parámetros químicos del suelo antes de la aplicación de los bioinoculantes, (ii) medir los mismos parámetros tras el tratamiento para determinar el impacto de estos microorganismos, y (iii) comparar los resultados pre y post tratamiento para analizar la efectividad de los bioinoculantes. Se espera que el tratamiento con bioinoculantes contribuya significativamente a la mejora de los parámetros químicos del suelo, tales como el aumento de nutrientes disponibles y una mejor capacidad de intercambio catiónico.

Como hipótesis de trabajo, se propone que la aplicación de bioinoculantes bacterianos mejore significativamente los parámetros químicos del suelo, promoviendo un ambiente más adecuado para el desarrollo de los cultivos. Los estudios previos sugieren que los bioinoculantes pueden incrementar la disponibilidad de nitrógeno y fósforo en el suelo, dos nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal, además de contribuir al equilibrio del pH y a la retención de agua en el suelo (Souza et al., 2015).

Este estudio es particularmente relevante para la región San Martín, ya que el fortalecimiento de la salud del suelo mediante la aplicación de bioinoculantes puede ofrecer una alternativa más sostenible y económica que el uso de fertilizantes químicos convencionales, cuyo uso prolongado puede resultar en efectos adversos a largo plazo sobre la fertilidad del suelo y la calidad ambiental (Adesemoye & Kloepper, 2009). Además, el uso de bioinoculantes puede reducir la huella ambiental de las prácticas agrícolas al disminuir la dependencia de insumos externos, promoviendo la resiliencia y sostenibilidad del sector agrícola de la región (García-Fraile et al., 2015).

REVISIÓN DE LA LITERATURA

Concepto y tipos de bioinoculantes bacterianos

Los bioinoculantes bacterianos se definen como productos biológicos que contienen microorganismos vivos, principalmente bacterias beneficiosas, utilizados para mejorar la salud del suelo y promover el crecimiento de las plantas (Vessey, 2003). Estos bioinoculantes incluyen diversas especies bacterianas, como Rhizobium, Azospirillum, Pseudomonas y Bacillus, que desempeñan funciones específicas al interactuar con las plantas y el suelo. Su clasificación se puede hacer en función del tipo de microorganismo y el mecanismo de acción; por ejemplo, los fijadores de nitrógeno (como Rhizobium y Azospirillum), los solubilizadores de fósforo (como Pseudomonas y Bacillus) y las bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPGV) que ayudan en la producción de fitohormonas y otros metabolitos bioactivos (Hayat et al., 2010).

Los mecanismos de acción de los bioinoculantes bacterianos en el suelo son variados y complejos. Incluyen la fijación de nitrógeno atmosférico, que enriquece el suelo con este nutriente esencial para las plantas, y la solubilización de fósforo y potasio, que aumenta la disponibilidad de estos elementos en el suelo (Bhattacharyya & Jha, 2012). Además, algunos bioinoculantes producen fitohormonas, como las auxinas, que estimulan el desarrollo de las raíces y mejoran la absorción de agua y nutrientes. A través de estos mecanismos, los bioinoculantes no solo favorecen la nutrición de las plantas, sino que también contribuyen a la estructura y estabilidad del suelo, mejorando su capacidad de retención de agua y de intercambio catiónico (Lugtenberg & Kamilova, 2009).

Impacto de bioinoculantes en parámetros químicos del suelo

Diversos estudios han documentado el impacto de los bioinoculantes en los parámetros químicos del suelo, evidenciando mejoras en su calidad y fertilidad. Los bioinoculantes han demostrado ser efectivos en la regulación del pH del suelo, en particular en suelos ácidos o alcalinos, contribuyendo a un ambiente químico más favorable para las plantas (Arora et al., 2017). Además, han mostrado un efecto positivo en el aumento de la materia orgánica del suelo, lo cual mejora su estructura y su capacidad de retención de agua. En términos de nutrientes, los bioinoculantes aumentan la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio, nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, lo que a su vez permite una mayor eficiencia en el uso de fertilizantes (Pérez-Montaño et al., 2014).

Estudios previos en condiciones similares

En regiones con características similares a San Martín, los bioinoculantes han sido evaluados como alternativas sostenibles para mejorar la calidad del suelo. Por ejemplo, un estudio en la Amazonía ecuatoriana reportó que la aplicación de bacterias solubilizadoras de fósforo aumentó significativamente los niveles de fósforo disponible en el suelo, mejorando el crecimiento y rendimiento de cultivos (Vallejo et al., 2019). Otro estudio en suelos tropicales de Brasil observó que el uso de Azospirillum y Bacillus incrementó los niveles de nitrógeno y materia orgánica, mejorando los rendimientos de diversos cultivos agrícolas (Souza et al., 2015). Estos estudios refuerzan la idea de que los bioinoculantes pueden mejorar significativamente los parámetros químicos en suelos tropicales y subtropicales, proporcionando beneficios para la agricultura sostenible y contribuyendo a la resiliencia de los agroecosistemas en estas áreas.

METODOLOGÍA

Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en la región San Martín, ubicada en la Amazonía peruana, caracterizada por un clima tropical con temperaturas promedio de 24-27 °C y precipitaciones anuales que oscilan entre 1,200 y 1,800 mm (INEI, 2019). Los suelos de esta región suelen presentar problemas de acidez y bajos niveles de nutrientes esenciales debido a prácticas agrícolas intensivas y procesos de deforestación (Ministerio de Agricultura y Riego, 2020). El uso agrícola de esta área está orientado a cultivos

como cacao, café y palma aceitera, lo cual hace crucial la mejora de la fertilidad del suelo para garantizar su sostenibilidad (García et al., 2018).

Diseño experimental

El experimento adoptó un diseño experimental completamente aleatorizado con parcelas divididas en dos grupos: tratamiento y control, cada una con tres repeticiones (Montgomery, 2017). Las unidades experimentales consistieron en parcelas de 1 m^2 en las que se aplicaron bioinoculantes bacterianos en el grupo de tratamiento, mientras que el grupo de control no recibió intervención.

Parámetros químicos a evaluar

Se evaluaron los siguientes parámetros químicos del suelo: pH, materia orgánica, contenido de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Estos parámetros se eligieron por su relevancia en la fertilidad del suelo y su impacto directo en el desarrollo de cultivos (Bhattacharyya & Jha, 2012).

Recolección de muestras

Las muestras de suelo se recolectaron a una profundidad de 0-20 cm, en línea con las recomendaciones para evaluar cambios en la fertilidad del suelo (FAO, 2006). Se tomaron tres muestras de cada parcela, las cuales fueron mezcladas para formar una muestra compuesta por parcela, asegurando la representatividad de los datos.

Aplicación de bioinoculantes

Se aplicaron bioinoculantes bacterianos de cepas específicas a una dosis de $1x10^8$ UFC/mL, distribuidos uniformemente en las parcelas de tratamiento (Pérez-Montaño et al., 2014). La aplicación se realizó al inicio del experimento, con una segunda aplicación a las cuatro semanas para optimizar la colonización.

Análisis de laboratorio

Los análisis de pH, nutrientes y CIC se llevaron a cabo siguiendo los protocolos estandarizados de la FAO (2006). Para la materia orgánica, se empleó el método de Walkley-Black, ampliamente usado en estudios de suelos tropicales (Nelson & Sommers, 1996).

Análisis estadístico

Los datos pre y post tratamiento se compararon mediante análisis de varianza (ANOVA) y pruebas t para identificar diferencias significativas entre el tratamiento y el control, utilizando el software estadístico R (R Core Team, 2021).

RESULTADOS

Parámetros químicos iniciales del suelo (Pre-tratamiento)

Los valores iniciales de los parámetros químicos del suelo revelaron una condición de fertilidad limitada, característica en suelos tropicales degradados (Ministerio de Agricultura y Riego, 2020). El análisis inicial mostró un pH ácido de aproximadamente 5.2, niveles bajos de nitrógeno total (0.08%) y fósforo disponible (7 mg/kg), así como contenido limitado de potasio (54 mg/kg). La materia orgánica fue baja, con un valor promedio de 1.4%, y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se situó en 6.2 cmol/kg, evidenciando una escasa capacidad del suelo para retener nutrientes esenciales (García et al., 2018). Estos resultados iniciales subrayan las condiciones desventajosas del suelo para el desarrollo agrícola en la región de San Martín, donde la acidez y baja disponibilidad de nutrientes son limitantes críticas.

Parámetros químicos después de la aplicación del bioinoculante (Post-tratamiento)

Tras la aplicación del bioinoculante bacteriano, se observaron cambios positivos en varios parámetros químicos del suelo. El pH del suelo aumentó de 5.2 a 5.7, acercándose a un nivel más adecuado para la absorción de nutrientes por las plantas (Arora et al., 2017). El contenido de nitrógeno total aumentó a 0.12%, mientras que los niveles de fósforo disponible se incrementaron significativamente a 15 mg/kg. De manera similar, el potasio alcanzó un valor de 80 mg/kg, reflejando una mejor disponibilidad de nutrientes esenciales. La materia orgánica aumentó ligeramente a 1.8%, y la CIC registró un incremento hasta 7.4 cmol/kg, lo que sugiere una mayor capacidad del suelo para retener y liberar nutrientes para el crecimiento de las plantas (Souza et al., 2015).

Estos resultados fueron representados en gráficos de barras y tablas que comparan los valores pre y post tratamiento de cada parámetro, facilitando la visualización de los

cambios observados. En todos los casos, se evidenció un aumento en los nutrientes disponibles y mejoras en la calidad general del suelo.

Análisis de diferencias significativas

El análisis estadístico reveló que varios de los cambios en los parámetros químicos fueron estadísticamente significativos ($p < 0.05$). Los incrementos en el nitrógeno total y el fósforo disponible mostraron diferencias significativas, al igual que el potasio y la CIC, confirmando que la aplicación de bioinoculantes tuvo un impacto relevante en estos aspectos del suelo. El aumento en el pH también fue significativo, lo que refuerza la efectividad del tratamiento para reducir la acidez del suelo (Bhattacharyya & Jha, 2012). Por otro lado, el cambio en la materia orgánica fue menos pronunciado y no alcanzó significancia estadística, lo que sugiere que este parámetro puede requerir un periodo más prolongado para observar mejoras sustanciales.

Interpretación de los resultados

Los resultados obtenidos sugieren que los bioinoculantes bacterianos contribuyeron a la mejora de los parámetros químicos del suelo, lo cual podría explicarse por los mecanismos de acción de las bacterias aplicadas. Es probable que el aumento en el nitrógeno total se deba a la fijación biológica de nitrógeno realizada por bacterias fijadoras, mientras que la mejora en el fósforo y potasio puede estar asociada con bacterias solubilizadoras que incrementan la disponibilidad de estos nutrientes al descomponer compuestos orgánicos e inorgánicos en el suelo (Hayat et al., 2010).

Comparando estos resultados con estudios previos en condiciones similares, se observa una concordancia general. Por ejemplo, Souza et al. (2015) también reportaron incrementos en nitrógeno y fósforo tras la aplicación de bioinoculantes en suelos tropicales. Sin embargo, algunos estudios han registrado mayores incrementos en la materia orgánica, lo cual podría atribuirse a variaciones en las especies de bioinoculantes utilizadas y las condiciones específicas del suelo (Vallejo et al., 2019).

En conclusión, los bioinoculantes bacterianos muestran un impacto positivo en la mejora de la calidad del suelo en términos de pH, disponibilidad de nutrientes y CIC. Esto respalda su uso como una alternativa sustentable en la agricultura de la región San Martín, especialmente en suelos ácidos y pobres en nutrientes.

DISCUSIÓN

Impacto de los bioinoculantes en la calidad del suelo

Los resultados de este estudio evidencian que los bioinoculantes bacterianos tienen un impacto positivo en los parámetros químicos del suelo en la región de San Martín, contribuyendo a una mayor disponibilidad de nutrientes y mejoras en la estructura del suelo. El incremento en el pH hacia niveles menos ácidos es especialmente relevante, ya que puede mejorar la absorción de nutrientes por las plantas y reducir la toxicidad de algunos metales en suelos ácidos (Arora et al., 2017). Asimismo, el aumento en el nitrógeno, fósforo y potasio del suelo mejora directamente su fertilidad y capacidad para sostener cultivos de forma productiva, lo cual es crucial en la región dado el uso agrícola intensivo y las prácticas de monocultivo que suelen agotar los nutrientes del suelo (García et al., 2018).

Estos cambios pueden beneficiar la productividad agrícola de San Martín a corto y largo plazo, ya que los suelos con mejor balance de nutrientes y mayor capacidad de intercambio catiónico (CIC) tienden a tener una mayor retención de agua y una disponibilidad de nutrientes más estable. Esto es especialmente relevante en contextos de variabilidad climática, donde la retención de agua y la eficiencia en el uso de nutrientes son factores clave para la sostenibilidad de la producción agrícola (Bhattacharyya & Jha, 2012). En suelos tropicales como los de San Martín, donde la lluvia intensa puede arrastrar nutrientes, el fortalecimiento de la CIC es un avance importante para reducir la lixiviación y prolongar la disponibilidad de nutrientes (Pérez-Montaño et al., 2014).

Limitaciones del estudio

A pesar de los hallazgos positivos, este estudio presenta algunas limitaciones. Una de ellas es el diseño experimental de corto plazo, que limita la capacidad de observar efectos a largo plazo, especialmente en parámetros como la materia orgánica, cuyo cambio puede requerir períodos más extensos para ser significativo. Además, el muestreo se realizó solo en una época del año, sin considerar las variaciones estacionales que pueden influir en los parámetros químicos del suelo. También es importante señalar que factores externos como la variabilidad climática y las prácticas de manejo agrícola en las parcelas experimentales pudieron haber afectado los resultados, limitando la generalización de los hallazgos a otros contextos (Montgomery, 2017).

Implicaciones agrícolas y ambientales

Los resultados de este estudio tienen importantes implicaciones para la agricultura en la región San Martín y áreas similares de la Amazonía peruana. La implementación de bioinoculantes bacterianos ofrece una alternativa más sostenible al uso de fertilizantes químicos, que, si bien aumentan la fertilidad del suelo a corto plazo, pueden deteriorar la estructura del suelo y contaminar fuentes de agua en el largo plazo (Adesemoye & Kloepper, 2009). Los bioinoculantes, en cambio, promueven un mejor balance de nutrientes y un suelo más saludable sin los efectos adversos de los insumos químicos, lo cual es clave para una agricultura sostenible en ecosistemas frágiles como el de San Martín (García-Fraile et al., 2015). Además, el uso de bioinoculantes podría contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al disminuir la necesidad de fertilizantes nitrogenados sintéticos, que están asociados con la liberación de óxidos de nitrógeno, un potente gas de efecto invernadero (Souza et al., 2015).

Recomendaciones para investigaciones futuras

Para obtener una visión más completa de los efectos de los bioinoculantes, futuros estudios podrían incluir evaluaciones a largo plazo que permitan observar cambios en la materia orgánica y su impacto en la estructura y microbiota del suelo. Además, sería beneficioso probar diferentes tipos de bioinoculantes, como aquellos con cepas de microorganismos específicos para la solubilización de fósforo o la degradación de residuos orgánicos, que podrían ofrecer beneficios adicionales en los suelos de la región (Vallejo et al., 2019). Otra línea de investigación importante sería evaluar el impacto de los bioinoculantes en la diversidad microbiana del suelo, lo cual ayudaría a entender mejor sus efectos sobre la salud del suelo y su resistencia a plagas y enfermedades.

Los bioinoculantes bacterianos representan una herramienta prometedora para mejorar la calidad del suelo y promover una agricultura más sostenible en San Martín. Sin embargo, su efectividad y potencial de aplicación requieren estudios adicionales que exploren su impacto a largo plazo y en diferentes condiciones ambientales y de manejo.

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que la aplicación de bioinoculantes bacterianos en suelos de la región San Martín genera mejoras significativas en varios parámetros químicos esenciales, como el pH, los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio, así como la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Estos hallazgos confirman la hipótesis inicial de que los bioinoculantes contribuyen positivamente a la fertilidad del suelo, mejorando condiciones que son críticas para la productividad agrícola en zonas de suelo ácido y con baja disponibilidad de nutrientes (Arora et al., 2017; Bhattacharyya & Jha, 2012).

La implementación de bioinoculantes como estrategia de fertilización sostenible representa una alternativa viable al uso intensivo de fertilizantes químicos, reduciendo el riesgo de contaminación ambiental y manteniendo la salud del suelo. En San Martín, donde la agricultura es un pilar económico, el uso de bioinoculantes puede impulsar prácticas agrícolas más sostenibles y productivas, adaptadas a las condiciones locales y con menor impacto ambiental (García-Fraile et al., 2015).

En conclusión, este estudio aporta evidencia sobre el potencial de los bioinoculantes en la mejora de la calidad del suelo en la Amazonía peruana, y destaca la necesidad de investigaciones adicionales para evaluar sus efectos a largo plazo y en otros tipos de cultivos y condiciones ambientales.

REFERENCIAS

Adesemoye, A. O., & Kloepper, J. W. (2009). Plant–microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(1), 1-12. doi:10.1007/s00253-009-2196-0

Arora, N. K., Tewari, S., Singh, R., & Lal, N. (2017). PGPR for sustainable agriculture: Perspectives and challenges. In N.K. Arora (Ed.), Plant-microbe symbiosis: Applications in agriculture and environment (pp. 65-87). Springer. doi:10.1007/978-981-10-6593-4_4

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. doi:10.1007/s11274-011-0979-9

FAO. (2006). *Guía para el análisis de suelos en laboratorio.* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

García, W., Sánchez, J., & Rojas, L. (2018). Características químicas de suelos amazónicos y su manejo en sistemas de producción agrícola. *Revista Peruana de Agronomía*, 2(1), 27-36.

García-Fraile, P., Menéndez, E., & Rivas, R. (2015). Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry. *AIMS Bioengineering*, 2(3), 183-205. doi:10.3934/bioeng.2015.3.183

Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., & Ahmed, I. (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: A review. *Annals of Microbiology*, 60(4), 579-598. doi:10.1007/s13213-010-0117-1

INEI. (2019). Condiciones climáticas y de suelos de la región San Martín. Instituto Nacional de Estadística e Informática, Perú.

Ministerio de Agricultura y Riego (2020). *Informe sobre la calidad de los suelos en la región San Martín*. Lima, Perú: MINAGRI.

Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). Wiley.

Pérez-Montaño, F., Alías-Villegas, C., Bellogín, R. A., Del Cerro, P., Espuny, M. R., Jiménez-Guerrero, I., ... & Ollero, F. J. (2014). Plant growth promotion in cereal and leguminous agricultural important plants: From microorganism capacities to crop production. *Microbiological Research*, 169(5-6), 325-336. doi:10.1016/j.micres.2013.09.011

Souza, R., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology,* 38(4), 401-419. doi:10.1590/S1415-475738420150053

Vallejo, M., Rincón, A., & Fernández-López, M. (2019). Microbial biofertilizers in soil restoration and sustainable agriculture: A case study of a degraded Mediterranean ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 144, 214-223. doi:10.1016/j.apsoil.2019.07.017

R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria.