

# Capítulo 7. Uso potencial de biofertilizantes para mejorar la disponibilidad de fósforo en Andisoles

Daniel R. Torres-Cuesta\*, Daniel F. Rojas-Tapias\*, Wilfrand F. Bejarano-Herrera\*\*, Germán A. Estrada-Bonilla\*

∴ \*ci Tibaitatá, AGROSAVIA, Colombia  
∴ \*\*ci Obonuco, AGROSAVIA, Colombia

## Resumen

Este capítulo describe la importancia del fósforo (P) como nutriente de los cultivos y su interacción con las diferentes fracciones inorgánicas y orgánicas del suelo. Aunque este elemento puede ser abundante en los suelos, su disponibilidad está restringida a las plantas, debido a que generalmente se encuentra asociado a complejos insolubles. Por lo tanto, la solubilización de formas inorgánicas de fósforo y la mineralización de formas orgánicas que se encuentran insolubles en el suelo (adsorbidas, precipitadas, fijadas) son factores muy importantes para aumentar la disponibilidad del nutriente en los agroecosistemas. En este sentido, los microorganismos del suelo y en especial las bacterias desempeñan un rol determinante en la dinámica del fósforo del suelo y en su posterior disponibilidad para las

plantas. Las bacterias solubilizadoras de fosfato (BSF) en los suelos convierten las formas insolubles de fósforo en solubles mediante diversos mecanismos y permiten su absorción por parte de las plantas, lo que promueve su crecimiento y productividad. Así mismo, en este capítulo se discuten diferentes aspectos inherentes a la dinámica del fósforo en suelos Andisoles, que son representativos del departamento de Nariño (Colombia) y cuyo origen se asocia a cenizas volcánicas y a coloides amorfos, los cuales tienen como principal característica una fuerte fijación del fósforo y, al igual que las BSF, podrían ser una alternativa importante para aumentar la biodisponibilidad de este nutriente en los modelos de agricultura campesina familiar y comunitaria (ACFC) de Nariño.

## Introducción

El fósforo (P) es un elemento esencial para el desarrollo y el crecimiento vegetal. No obstante, su alta reactividad en el suelo hace que entre 75 y 90 % ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) de los fertilizantes fosforados de síntesis química

agregados sea inmovilizado por complejos de metalcationes y por adsorción en la fracción mineral de los suelos (Sharma et al., 2013; Walpola & Yoon, 2012). Las elevadas cantidades de fertilizante sintético

requeridas, por lo tanto, incrementan los costos de producción y promueven la contaminación ambiental (Echeverri Zulua-ga et al., 2010), lo que causa problemas de eutroficación y pérdida de nutrientes por volatilización, lixiviación y escorrentía (Gyaneshwar et al., 2002).

El fósforo del suelo se asocia a diferentes fracciones minerales y orgánicas, con distintos grados de disponibilidad para las plantas. Este nutriente se relaciona con minerales primarios y secundarios (P inorgánico), con materiales orgánicos (fósforo orgánico) y como componente estructural de minerales del suelo (P ocluido) (Condrón & Newman, 2011; Hedley et al., 1982). Su disponibilidad depende de la interacción entre sus diferentes fracciones presentes en el suelo y su regulación mediante procesos fisicoquímicos (adsorción/desorción) y biológicos (mineralización/inmovilización) (Crews & Brookes, 2014; Dahlgren et al., 2004). La distribución total de fósforo está condicionada por factores como tipo de suelo, pH, temperatura, humedad, vegetación, actividad microbiana y fertilización (Rooney & Clipson, 2009). Este elemento es utilizado por las plantas como aniones de ortofosfato, predominantemente  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$  (Arcand & Schneider, 2006), aunque la mayor parte del que está presente en el suelo tiene forma insoluble (Nesme et al., 2018) debido sobre todo a la adsorción química en el suelo y a su interacción con otros elementos metálicos (Rafi et al., 2019). Por esta razón, las plantas solo pueden utilizar una fracción muy baja de fósforo edáfico, con el resultado de que su disponibilidad es un factor restrictivo para el crecimiento vegetal (Lambers & Plaxton, 2015).

La región Andina de Colombia se caracteriza por el predominio de Andisoles, suelos

derivados de ceniza volcánica (Velásquez et al., 2016) que cubren alrededor de 4,5 % ( $\text{Mha Mha}^{-1}$ ) (cerca de 5.200.000 ha) del territorio nacional. Los Andisoles están constituidos por minerales arcillosos amorfos o de bajo orden cristalino (alófanos, imogolita y ferrihidrita), cuya característica particular es la de absorber fuertemente el fósforo mediante la formación de complejos órgano-minerales difíciles de descomponer (Alvarado et al., 2014; Dahlgren et al., 2004). De esta manera, muchos Andisoles contienen altas concentraciones de fósforo total, de las cuales solo una fracción muy baja está disponible para la nutrición vegetal (Borie & Rubio, 2003; Briceño et al., 2004; Chiu et al., 2021; Escudey et al., 2001; Redel et al., 2007).

Diversas tecnologías han sido desarrolladas para mejorar la disponibilidad de fósforo en los suelos y de este modo facilitar su absorción por parte de las plantas. En particular, el uso de microorganismos del suelo tiene un importante potencial para desarrollar sistemas sostenibles y optimizar el uso de fertilizantes fosforados (Delfim et al., 2018). Diferentes grupos de microorganismos, entre ellos las bacterias solubilizadoras de fosfato (BSP), pueden incrementar el fósforo disponible mediante la solubilización de formas inorgánicas de baja solubilidad de este elemento (Adesemoye et al., 2009; Behera et al., 2013; Li et al., 2015; Sharma et al., 2013), mientras que los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) incrementan la absorción de fosfatos solubles por parte de la planta (Peñaranda Rolón et al., 2022; Ramírez Gómez et al., 2008). Así mismo, otros microorganismos son capaces de incrementar la disponibilidad con la degradación enzimática de compuestos orgánicos fosforados.

Los biofertilizantes son definidos por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) como un “producto elaborado con base en una o más cepas de microorganismos benéficos que, al aplicarse al suelo o a las semillas, promueve el crecimiento vegetal o favorece el aprovechamiento de los nutrientes en asociación con la planta o su rizosfera” (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2004). Se consideran una herramienta biotecnológica ambientalmente amigable que permite reducir el uso de fertilizantes de síntesis

química (Dodd & Ruiz-Lozano, 2012; Rafi, 2019). Esta tecnología disminuye los altos costos asociados a los fertilizantes de síntesis, los cuales se han venido encareciendo como consecuencia de los conflictos geopolíticos en zonas productoras y proveedoras de estos insumos y el descenso en el precio de la divisa colombiana. Adicionalmente, se está agotando la fuente fosfatada principal, la roca fosfórica (RF), un recurso natural no renovable (Singh & Sudhakara Reddy, 2011).

## Suelos Andisoles

Colombia es un país con alta presencia de suelos Andisoles en su territorio. Estos suelos de alta fertilidad química, física y microbiológica son una fuente esencial de alimentos, además de ser sustento de importancia para ecosistemas andinos, a los cuales proveen nutrientes y facilidades para regular el ciclo hídrico. Los Andisoles

permiten variedad de cultivos: caña de azúcar, tabaco, papa, té, vegetales, trigo, arroz, entre otros, y son, por tanto, suelos de importancia para el desarrollo del sector agropecuario en Colombia (Interamerican Association for Environmental Defense [AIDA], 2013).

## Distribución geográfica

Los suelos derivados de cenizas volcánicas cubren aproximadamente 0,8 % ( $Mha\ Mha^{-1}$ ) de la superficie terrestre (124 Mha) (Bonatotsky et al., 2021; Leamy, 1984). Según Soil Survey Staff (1999), los Andisoles se distribuyen en las zonas de mayor actividad volcánica a lo largo de la costa occidental del continente americano (cinturón de fuego del Pacífico), y se extienden desde las islas Aleutianas hacia el sur de la península de Kamchatka (Rusia), de un lado a otro de Japón, Filipinas e Indonesia, a través de otras islas del Pacífico, hasta Nueva Zelanda.

El 60 % de los Andisoles se encuentra en países tropicales (Takahashi & Shoji, 2003).

En Colombia cubren alrededor de 5.200.000 ha o 4,5 % ( $Mha\ Mha^{-1}$ ) del área del territorio nacional, y se distribuyen en la región Andina, principalmente en la cordillera Central y con menor extensión en la Occidental y la Oriental, con mayor presencia en paisajes de altiplanicie, montaña, piedemonte y en planicies aluviales (Ávila Pedraza & Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2005). La zona con más cubrimiento es el Eje Cafetero, que incluye los departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda y Quindío y depósitos volcánicos originados de la actividad del complejo Ruiz-Tolima (volcanes Cerro Bravo, Ruiz, Santa Isabel y Tolima) (Nieuwenhuis & Elbersen,

1972, citado por Herrera, 2006). En los departamentos de Tolima, Huila, Cauca, Valle del Cauca y Nariño se encuentran depósitos derivados de cenizas volcánicas transportadas por el viento o el río Magdalena. Según un estudio del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en la sabana de Bogotá se han identificado 52 unidades cartográficas de suelos, de las cuales 42,3 % ( $Mha\ Mha^{-1}$ ) tiene cenizas volcánicas como material parental.

El IGAC (2012) también describió los Andisoles como los suelos más representativos

## Génesis de los Andisoles

En diferentes regiones del mundo, los suelos de cenizas volcánicas muestran patrones similares de intemperismo y desarrollo. Sin embargo, los procesos que gobiernan la formación del suelo son el resultado de condiciones ambientales particulares en un lugar determinado. En general, el intemperismo de los depósitos volcánicos deriva en la formación de suelos Andisoles en ambientes templados y tropicales húmedos (Delmelle et al., 2015; Tsai et al., 2010).

La composición mineralógica de los suelos derivados de cenizas volcánicas se caracteriza por la presencia de minerales de arcilla desarrollados a partir del intemperismo del vidrio volcánico y otros minerales primarios (feldespatos, anfíboles y piroxenos). Esto da lugar a minerales poco cristalinos y no cristalinos, que se diferencian porque se desarrollan bajo diferentes condiciones de acidez y acumulación de materia orgánica (Fisher & Schmincke, 1984). Los de baja cristalinidad se caracterizan por la presencia de alófana, imogolita, ferrihidrita y halloysita, y los no cristalinos por tener complejos de hierro (Fe) y aluminio (Al) y sílice opalina (Herrera, 2006). Los complejos Al/Fe-humus y la sílice opalina

de la región Andina desde el punto de vista de la tipología, ya que integran el 16 % ( $Mha\ Mha^{-1}$ ) (Hapludands, 11 % [ $Mha\ Mha^{-1}$ ], y Melanudands, 5 % [ $Mha\ Mha^{-1}$ ]), en tanto que los molisoles y alfisoles solo abarcan 3 % ( $Mha\ Mha^{-1}$ ) de la región. El 67 % ( $Mha\ Mha^{-1}$ ) restante lo conforman suelos de menor evolución (inceptisoles y entisoles), y entre ellos se destacan los Dystrudepts (55 % [ $Mha\ Mha^{-1}$ ]).

se forman en ambientes ácidos ( $pH \leq 5$ , rango en que los ácidos orgánicos son los principales donadores de protones [ $H^+$ ], lo que disminuye el pH y el aluminio activo soluble), ricos en materia orgánica, mientras que la alófana, la imogolita, la halloysita y la ferrihidrita se forman en ambientes con  $pH > 5$  o  $\leq 7$  y bajo contenido de materia orgánica (Ugolini & Dahlgren, 2003). La alófana predomina en suelos jóvenes y la halloysita en depósitos más antiguos, bajo el mismo material original de cenizas volcánicas y condiciones climáticas (Herrera et al., 2007). La presencia de estos minerales poco cristalinos y no cristalinos con superficies de carga variable y acumulación de materia orgánica les confieren a los Andisoles propiedades morfológicas, físicas y químicas distintivas que rara vez se encuentran en suelos derivados de otros materiales originales (Nanzoyo, 2002).

Malagón Castro (2003) argumenta que los Andisoles de la región Andina sufren procesos de pérdida por erosión y lixiviación, los cuales son compensados parcialmente por efecto del clima con ganancia de materiales orgánicos (contenidos medios y altos de carbono orgánico, 1,5 a  $> 6$  % [g

kg<sup>-1</sup>]), situación que lleva a la aparición de horizontes A úmbricos (ricos en materia orgánica, de color muy oscuro y gran espesor,

con saturación de bases inferior a 50 % de cmol(+) kg<sup>-1</sup> [100 cmol(+) kg<sup>-1</sup>]).

## Propiedades de los Andisoles

Espinoza y Rubiano (2015) sintetizan las propiedades de los Andisoles modales del siguiente modo:

**Físicas:** Tienen una densidad aparente inferior a 0,8 Mg m<sup>-1</sup>, permeabilidad y porosidad elevadas y una estructura característica de microagregados estables que producen grumos, gránulos o bloques subangulares muy finos, con una consistencia particular pegajosa y untuosa al tacto en estado húmedo y de polvo fino en estado seco. Estos suelos tienen una enorme capacidad de retención de humedad, tanto en capacidad de campo como en punto de marchitamiento. Sin embargo, si se someten a una desecación prolongada, pueden reducir considerable e irreversiblemente su capacidad de campo en un 50 % (gH<sub>2</sub>O gSuelo seco<sup>-1</sup>).

**Químicas:** Los Andisoles tienen una alta capacidad de intercambio catiónico y aniónico en función del pH, lo que resulta en una alta capacidad búfer y un elevado número de cargas dependientes del pH. Así mismo, presentan elevados contenidos activos de aluminio y hierro. Son suelos con una reacción desde muy fuertemente ácida en los horizontes superficiales a moderadamente ácida en los profundos (pH: 5,1-6,5).

En cuanto al nitrógeno (N), los Andisoles contienen elevadas cantidades de materia

orgánica, que se acumula y es muy resistente a la descomposición microbial (mineralización), lo que reduce la disponibilidad de nitrógeno mineralizable.

El fósforo disponible es bajo en los Andisoles debido a que los materiales no cristalinos de aluminio y hierro lo retienen con fuerza. Al ser aplicado al suelo en forma de fertilizantes de alta solubilidad, reacciona rápidamente con los minerales de baja y nula cristalinidad y forma componentes insolubles metal-P, productos en los que desempeñan un papel preponderante el aluminio y el hierro activos (Shoji & Takahashi, 2002).

La disponibilidad de potasio (K) en los Andisoles está influenciada por su presencia en la ceniza volcánica y las arcillas. Generalmente, su contenido es bajo en arcillas alofánicas dado que estas no tienen una retención preferencial de este elemento, con lo cual este último se lixivia y su contenido edáfico decrece a medida que avanza el intemperismo (Shoji & Takahashi, 2002). Estos mismos autores señalan que los Andisoles pueden presentar serias deficiencias de micronutrientes como cobre (Cu), zinc (Zn) y cobalto (Co), cuya abundancia y disponibilidad dependen de su contenido en materiales volcánicos y de la tasa de liberación mediante alteración química.

## Fósforo en el suelo

El fósforo es un nutriente indispensable para el crecimiento de las plantas. Representa entre 0,2 y 0,8 % ( $\text{g g}^{-1}$ ) del peso seco de las plantas y se encuentra en ácidos nucleicos, enzimas, coenzimas, nucleótidos y fosfolípidos (Sharma et al., 2013). Su contenido en la litosfera terrestre ronda el 0,12 % ( $\text{kg kg}^{-1}$ ), en tanto que, en suelos superficiales, varía de 0,02 a 0,15 %, con un promedio de 0,06 % ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) (Lindsay, 1979; Zhu et al., 2018; Zou et al., 1992).

El fósforo es un nutriente indispensable en procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas, incluida la fotosíntesis (Rawat et al., 2021), el desarrollo y crecimiento de raíces, el fortalecimiento de tallos, la formación de flores y semillas, y la madurez y calidad de los cultivos (Rawat et al., 2021). También está involucrado en el mecanismo de transferencia de energía en las plantas. La energía liberada durante la respiración o aprovechada en la reacción luminosa de la fotosíntesis se utiliza en la síntesis de adenosín trifosfato (ATP) a partir de adenosín difosfato (ADP) con la formación de un enlace pirofosfato rico en energía (Billah et al., 2019; Shrivastava et al., 2018). Además, desempeña un importante rol en la división y crecimiento celulares (Hutchins et al., 2019; Wyngaard et al., 2016), la fijación de nitrógeno en leguminosas (Sohm et al., 2011), la resistencia de las plantas a enfermedades (Kumar et al., 2016), la transformación de azúcar en almidón, el transporte de rasgos genéticos (Hutchins et al., 2019; Satyaprakash et al., 2017) y la respiración de las plantas (Khan et al., 2010).

A diferencia del nitrógeno, el ciclo completo del fósforo en el medio ambiente puede describirse como "sedimentario", debido a que no hay intercambio con la atmósfera

y no se puede disponer biológicamente de una reserva atmosférica (Rodríguez & Fraga, 1999; Walpola & Yoon, 2012).

En el suelo, el fósforo no existe como forma elemental, sino que se combina con otros elementos para formar fosfatos, debido a que es altamente reactivo, y por lo tanto tiene muchos estados de oxidación, desde -III hasta +V (Ehrlich et al., 2016; Jahnke, 1992). En los sistemas naturales, el fósforo está presente casi exclusivamente como ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ , en la oxidación +V), molécula altamente soluble en agua que al disociarse produce sucesivamente aniones ortofosfato (como el fosfato de hidrógeno,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), fosfato de hidrógeno ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) y oxianión tetraédrico ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), formas fácilmente disponibles de fósforo para los microorganismos del suelo y las raíces de las plantas (Jahnke, 1992).

En todas estas formas, el fósforo inorgánico (Pi) se encuentra en la solución del suelo y cambia de acuerdo con el pH edáfico (Walpola & Yoon, 2012). Por ejemplo, cuando el pH es inferior a 7,0, el ion monovalente  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  es la forma predominante en el suelo; cuando el pH es superior a 7,0, la forma  $\text{HPO}_4^{2-}$  es la dominante, y con un pH de 7,0, los aniones de ortofosfato mantienen su misma cantidad en la solución del suelo (Magabala & Mng'ong'o, 2022). Sin embargo, estas formas iónicas del fósforo, altamente reactivas, interactúan con numerosos componentes inorgánicos y orgánicos del suelo, lo que las vuelve indisponibles para las plantas (Behera et al., 2014) y hace que entre 1 y 5 % ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) del fósforo total se encuentre disuelto en la solución del suelo (Bünemann, 2015; Richardson & Simpson, 2011), mientras que el fósforo restante se halla atrapado en

minerales primarios, precipitados con cationes del suelo, adsorbidos o en formas orgánicamente complejas (Condrón et al. 2005; Kishore et al., 2015; Lindsay, 1979; Pierzynski et al., 2005; Pradhan & Sukla, 2005; Stutter et al., 2012). La baja disponibilidad de los fosfatos, debido a la pobre solubilidad y movilidad del fósforo en el suelo, a menudo afecta el crecimiento de las plantas y las vías metabólicas asociadas y, por lo tanto, es un factor importante que limita el rendimiento vegetal en muchos suelos naturales y agrícolas de todo el mundo (Walpolá & Yoon, 2012). El principal mecanismo de contacto ion/raíz del fósforo con la planta es la difusión, responsable de aproximadamente 95 % ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) del total de este elemento absorbido por la planta, porcentaje que varía según el contenido de arcilla en el suelo (Olsen & Watanabe, 1963). La tasa de difusión del fósforo es

baja, de aproximadamente  $10^{-12}$  a  $10^{-15} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , debido a las fuertes reacciones de este elemento con los componentes del suelo (Schachtman et al., 1998).

Dentro de la planta, el fósforo se moviliza desde la superficie de la raíz, vía simplasto, hasta el xilema, y posteriormente se distribuye al citoplasma de las células o de las vacuolas, contra un gradiente electroquímico, para lo cual requiere energía (Taiz & Zeiger, 2006). En general, la concentración de fósforo inorgánico dentro de las células de las plantas es típicamente 1.000 veces mayor que en solución del suelo (Raghothama, 2000), y el elemento es requerido por 0,3 a 0,5 % ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) de la materia seca de la planta para un buen desarrollo (Taiz & Zeiger, 2006). El fósforo es móvil en la planta y se distribuye con facilidad desde los tejidos más viejos hasta los más jóvenes cuando es escaso (Shen et al., 2011).

## Ciclo del fósforo en el suelo

El fósforo reacciona en condiciones de acidez o alcalinidad del suelo y está presente bajo dos formas que coexisten en equilibrio, como orgánico (Po) (ortofosfato, fosfolípidos y ácidos nucleicos), que puede representar entre 20 y 80 % ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) del contenido total (Shrivastava et al., 2018), y como Pi unido a oxihidróxidos de aluminio/hierro (en suelos ácidos) o a calcio (Ca, en suelo alcalino) (Condrón & Newman, 2011; Hedley et al., 1982). El Pi del suelo puede hallarse como fósforo soluble (en la solución del suelo, como forma intercambiable y adsorbida y como parte de los minerales), y como fósforo ocluido (precipitado con óxidos y oxihidróxidos de hierro, aluminio y calcio) (Shrivastava et al., 2018). Las plantas y los microorganismos absorben

fósforo (sobre todo como ion fosfato) de la solución del suelo, proveniente de las fracciones inorgánica y orgánica. Por lo tanto, el fósforo de la solución del suelo debe reponerse a menudo para satisfacer la demanda de la planta (Frossard et al., 2000).

Zhu et al. (2018) clasifican del siguiente modo las formas de fósforo total, según su disponibilidad:

**Fósforo lábil:** Es el elemento inorgánico disponible para la planta, y está representado por una reserva lábil. Esta última es, por un lado, la porción de fósforo retenida en la fase sólida del suelo por adsorción de las superficies de las partículas organominerales, y, por otro lado, el elemento en solución, que es el de inmediata disponibilidad para la planta. La reserva lábil es

una medida de los iones de fósforo en fase sólida del suelo que pueden intercambiarse rápidamente con iones del mismo elemento en fase de solución, intercambio que se produce conforme los iones se pierden del sistema por la absorción de la planta o por lixiviación (este último fenómeno es poco frecuente en suelos tropicales) (Ebelhar, 2008).

**Fósforo moderadamente lábil:** Forma inorgánica cuya adsorción depende del pH edáfico en las superficies de arcilla, y que da lugar a enlaces de gran estabilidad con óxidos de hierro, hidróxidos de aluminio o manganeso y calcio (Bobadilla Henao & Rincón Vanegas, 2008). En suelos ácidos, las cargas positivas de los coloides aumentan de la misma manera que la adsorción del fosfato (Bai et al., 2017; Beltrán Pineda, 2014). Este fósforo adsorbido se libera lentamente para permitir la absorción por parte de la planta. De igual manera, se encuentra el Po asociado a fosfolípidos y ácidos fúlvicos presentes en la materia

orgánica, que es solubilizado por la biomasa microbiana (Zhu et al., 2018).

**Fósforo no lábil u ocluido:** Forma inorgánica adsorbida fuertemente en arcillas, óxidos y carbonatos. La liberación de fósforo mineral es extremadamente lenta y ocurre cuando el mineral primario se intemperiza y se disuelve en el agua del suelo (Gueçaimburu et al., 2019). La remoción y reposición del fósforo presente en la solución del suelo resulta de una combinación de procesos físicoquímicos (adsorción/desorción y precipitación/disolución) y biológicos/bioquímicos (mineralización/inmovilización) (Bünemann, 2015). El fósforo inorgánico en la fase sólida se encuentra adsorbido o como fosfatos secundarios precipitados. El fenómeno de adsorción/desorción gobierna sobre todo el suministro del elemento cuando está en bajas concentraciones, mientras que la precipitación comienza cuando la solución del suelo se satura con los constituyentes de un mineral de fosfato en particular (Barrow, 2017).

## Precipitación, disolución de minerales fosfatados

166

Los ortofosfatos se precipitan fácilmente con cationes metálicos como  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , para formar minerales de fosfato. La producción de estos últimos depende del pH edáfico, el cual determina la ocurrencia y abundancia de cationes metálicos en la solución del suelo que pueden precipitarse con los ortofosfatos. Por lo tanto, en suelos neutros a alcalinos, los iones ortofosfatos se complejizan como fosfatos de calcio (apatita soluble) (Fink et al., 2016; Hinsinger, 2001; Kruse et al., 2015; Mabagala & Mng'ong'o, 2022) (tabla 15).

En suelos ácidos, por el contrario, los iones ortofosfatos reaccionan y se precipitan como fosfuro de hierro (FeP) y fosfuro

de aluminio (AIP) para formar estrengita, livianita y variscita (Kruse et al., 2015; Mabagala & Mng'ong'o, 2022). El equilibrio entre precipitación y disolución de fósforo gobierna la solubilidad y disponibilidad de los minerales de fosfato junto con el pH, la concentración de ortofosfatos y de cationes metálicos. De esta manera, la disolución de la hidroxiapatita (fosfato de calcio poco soluble) puede incrementarse si se suministran protones o se eliminan los iones ortofosfatos o  $Ca^{2+}$  de la solución del suelo (Mabagala & Mng'ong'o, 2022).

Con un pH del suelo entre 5,0 y 8,0, rango favorable para el crecimiento de los cultivos, los hidrogeniones ( $H^+$ ) están

disponibles en pequeñas concentraciones; por lo tanto, la cantidad de ortofosfatos de las formas  $\text{H}_2\text{PO}_3^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$  son mínimas en

comparación con el fósforo total de los coloides del suelo (Barrow, 2017, 2020).

**Tabla 15.** Tipos de fósforo inorgánico que se pueden encontrar en los suelos.

Tipo de fosfato	Denominación	Composición	Característica
Fosfatos de calcio	Hidroxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}(\text{OH})_2$	Poco soluble
	Oxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaO}$	Poco soluble
	Fluoroapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaFe}_2$	Poco soluble
	Carbonatoapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaCO}_3$	Poco soluble
	Fosfato tricálcico	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	Menor solubilidad
	Fosfato dicálcico	$\text{CaHPO}_4$	Mayor solubilidad
	Fosfato monocálcico	$\text{Ca}(\text{HPO}_4)_2$	Mayor solubilidad
Fosfatos de hierro	Livianita	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Poco soluble
	Estrengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Poco soluble
Fosfato de aluminio	Variscita	$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Poco soluble

Fuente: Elaboración propia con base en Velasco (2021)

## Adsorción/desorción del fósforo inorgánico

En el suelo, las reacciones de adsorción y desorción mantienen el fosfato en equilibrio entre la fracción sólida y la solución del suelo. La sorción y desorción de ortofosfatos varían de acuerdo con su concentración, cristalinidad y área superficial en los coloides del suelo.

La *adsorción de fosfato* describe los procesos que limitan la disponibilidad del fosfato inorgánico del suelo, principalmente por adsorción superficial y precipitación (Del Campillo et al., 1999). Los factores más importantes que determinan la capacidad del suelo de retener fósforo son

la presencia de óxidos e hidróxidos de aluminio y hierro, complejos organometálicos de estos dos elementos, bordes de arcillas de silicato y calcita, y carbonatos (Adegoke et al., 2013; De Bolle, 2013; Gasparatos et al., 2006; Jiang et al., 2015; Kumar et al., 2016).

El pH influye en la proporción de aniones ortofosfatos presentes en la solución del suelo, en la cantidad de cargas eléctricas negativas y positivas, es decir, en el potencial eléctrico de la superficie de los coloides con cargas eléctricas variables. En suelos ácidos, el fósforo puede absorberse

primero en la superficie de minerales arcillosos y oxihidróxidos de hierro y aluminio (gibbsita, hematita, goethita) para formar varios complejos. Con un pH de 4 a 9, los complejos superficiales bidentados protonados y no protonados pueden coexistir, en tanto que en condiciones de suelo ácido predominan los complejos de esfera interna bidentados y protonados (Arai & Sparks, 2007; Fink et al., 2016; Hinsinger, 2001; Luengo et al., 2006).

El proceso de adsorción de fosfatos puede seguir un orden preferencial según la abundancia de los siguientes minerales: arcillas 2:1 < arcillas 1:1 < óxidos cristalinos de hierro y aluminio < óxidos amorfos de estos dos elementos (Fox & Searle, 1978).

La adsorción específica es el proceso de adsorción del fosfato por parte de estos compuestos (óxidos de aluminio y hierro), que también se conocen como *adsorbentes*, mientras que el ion de fosfato adsorbido se denomina *adsorbato*. La adsorción específica de iones puede ocurrir en adsorbentes sin carga e incluso en superficies con carga del mismo signo. Por lo tanto, el fosfato se adsorbe en superficies de minerales de carga variable, como óxidos de aluminio y hierro, e incluso con un pH alcalino, cuando estos óxidos tienen carga negativa (Barrow, 2017; Barrow & Debnath, 2015). La adsorción específica se caracteriza por la formación de complejos de esfera interna (mediante ligando puente con enlace covalente), con una sustitución en la que el ligando entrante o fosfato desplaza al ligando saliente (una molécula de agua o un ion hidroxilo) que estuvo coordinado con el hierro (III) o el aluminio (III).

Los hidróxidos o sesquióxidos amorfos de hierro y aluminio (pobrementemente ordenados) tienen un área de superficie específica (ASE) muy grande ( $800 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ), diez veces

mayor que el ASE de las formas cristalinas, cuyos sitios reactivos corresponden a una alta densidad de grupos hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) superficiales y coordinados de forma sencilla (Schwertmann et al., 1986). El oxígeno de estos grupos hidroxilo, coordinado de manera simple con un ion estructural de hierro (III) o aluminio (III), se protona y desprotona en respuesta al pH de la solución (Kwesi Asomaning, 2020).

Los grupos  $\text{OH}^-$  de coordinación simple en los que se adsorben aniones específicamente absorbibles (como los iones fosfato) (Borggaard et al., 2004) resultan en la formación de un complejo binuclear o superficial para el sistema fosfato-óxido de hierro, donde el ion fosfato ocupa dos sitios superficiales, proceso este que se acompaña de una liberación de grupos hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) y  $\text{H}_2\text{O}$ .

En suelos con un rango de pH entre neutro y calcáreo, el fósforo es retenido por reacciones de precipitación con calcio, lo que genera fosfato dicálcico (Lindsay et al., 1989), aunque también puede ser adsorbido en la superficie de carbonatos de calcio (Larsen, 1967) y minerales arcillosos (Devau et al., 2010). El fosfato dicálcico se puede transformar en formas más estables, como el fosfato octocálcico y la hidroxiapatita (HAP), menos disponibles para las plantas cuando hay pH alcalino (Arai & Sparks, 2007). La acidificación de la rizosfera puede ser una estrategia eficiente para movilizar el fósforo de un suelo calcáreo, pues se ha comprobado que la disolución de HAP aumenta con la disminución del pH del suelo (Wang & Nancollas, 2008).

La *desorción*, como proceso contrario a la adsorción, se refiere a la liberación de fósforo de la fase sólida a la de solución (Stevenson & Cole, 1999). Esta desorción ocurre principalmente mediante reacciones

de intercambio de ligandos, lo cual significa que una disminución en la concentración de iones de fósforo en la solución del suelo, mediante absorción por la planta y aumento en la concentración de aniones competidores, cambia el equilibrio adsorción/desorción en favor de una desorción mejorada (Hinsinger, 2001; Pierzynski et al., 2005). La materia orgánica reduce la

adsorción de fosfato al inhibir la cristalización de los óxidos de hierro y aluminio por la formación de quelatos metálicos (Acevedo-Sandoval et al., 2004; Fontes et al., 1992), o al bloquear los sitios de adsorción a través de ácidos orgánicos de bajo peso molecular (húmicos) y recubrir la superficie de los óxidos (Fontes et al., 1992).

## Mineralización e inmovilización de fósforo orgánico

El Po se encuentra en el suelo en formas estables (fosfonatos e inositol fosfato) y activas (monoésteres de ortofosfato lábiles, polifosfatos orgánicos y diésteres de ortofosfato) (Shrivastava et al., 2018), cuya solubilidad es regulada por procesos como la mineralización y la inmovilización.

La mineralización es un proceso importante en el que se lleva a cabo la transformación de Po en formas inorgánicas solubles gracias a microorganismos del suelo que producen ácidos orgánicos, los cuales inducen una reducción del pH del suelo (acidificación) y liberan iones de fosfato a la solución del suelo, con lo que quedan disponibles para las plantas (Albacete, 2014; Kumar et al., 2018; Satyaprakash et al., 2017; Sharma et al., 2013).

De otra parte, la inmovilización se define como la conversión de elementos por parte de los microorganismos del suelo en compuestos bioquímicos esenciales para el metabolismo microbiano o la biomasa microbiana (Pierzynski et al., 2005). La mineralización del Po en el suelo está estrechamente relacionada con la cantidad relativa de carbono (C) en el sustrato orgánico, que actúa como fuente energética para los microorganismos.

Una alta relación carbono/fósforo (C/P) del sustrato orgánico proporciona alta

energía y estimula el crecimiento de la microbiota del suelo, con lo cual agota el fósforo disponible, mientras que bajas relaciones C/P pueden generar una cantidad excesiva de fósforo soluble disponible (mucho más que la biomasa microbiana necesaria), exceso que queda disponible para la absorción por las plantas, la lixiviación o la escorrentía (Pierzynski et al., 2005; Stevenson & Cole, 1999). Los mecanismos bioquímicos específicos en la conversión de Po a Pi en los suelos ocurren mediante la producción de enzimas extracelulares producidas por las raíces de las plantas (mineralización química) y los microorganismos del suelo (mineralización biológica). La mineralización bioquímica es la liberación de Pi a través de procesos enzimáticos extracelulares impulsados por la deficiencia del nutriente, seguida por la adsorción de la solución del suelo. Por su parte, la mineralización biológica se define como la oxidación microbiana de la materia orgánica promovida por la necesidad de energía, que puede estar asociada con la liberación de Pi antes o después de la absorción microbiana (Bünemann, 2015). La actividad enzimática está relacionada con la cantidad de fósforo biodisponible en los suelos y se incrementa cuando estos se vuelven deficientes en el nutriente, lo que explica por

qué la solubilización de fósforo es un patrón cíclico (Selvi et al., 2017; Yousefi et al., 2011). Las enzimas extracelulares pueden ubicarse en el espacio periplásmico, en la

superficie de las células, en la solución del suelo o estar asociadas a materia orgánica del suelo y minerales arcillosos (Burns et al., 2013).

## Fuentes de fósforo

Existen diferentes fuentes, y las más conocidas y utilizadas desde la puesta en marcha de la revolución verde son las fuentes de alta solubilidad como el fosfato diamónico (DAP con 46 g/100 g de  $P_2O_5$ ), superfosfato triple (TSP con 30 g/100 g de  $P_2O_5$ ), superfosfato simple (SSP con 14 y 18 g/100 g de  $P_2O_5$ ), entre otros. Estas fuentes tienen un alto contenido de fósforo y buscan satisfacer los requisitos de nutrientes del cultivo, aunque gran parte del fósforo aplicado deja de estar disponible por los fenómenos de adsorción y precipitación con hierro, aluminio y calcio en el suelo (Shrivastava et al., 2011). Por otra parte, altas tasas de aplicación de fertilizantes de síntesis química generan impactos negativos en el pH del suelo por alcalinización o acidificación, contaminación de acuíferos por escorrentía, destrucción de macro- y microfauna del suelo, salinización de este, acumulación de metales pesados, y degradación de la estructura del suelo por el incremento en la descomposición de la materia orgánica (Chen et al., 2006). Además, el aumento en los precios de importación de fertilizantes de síntesis química hace que su uso sea cada vez más restringido. Todas estas situaciones evidencian la necesidad de utilizar reservas autóctonas de RF (Odongo et al., 2007; Van-Straaten, 2002), de fertilizantes y fuentes orgánicas como el compost, y de otras fuentes de bajo costo, para

cumplir con los requisitos nutricionales de los cultivos.

La RF se clasifica según el contenido total de  $P_2O_5$  en los minerales: de bajo contenido (12 a 16 g/100 g de  $P_2O_5$ ), de contenido intermedio (17 a 25 g/100 g de  $P_2O_5$ ) y de alto contenido (26 a 35 g/100 g de  $P_2O_5$ ) (Sengul et al., 2006). La disolución de la RF depende de factores edáficos como el pH, la capacidad de intercambio catiónico, la capacidad búfer, la textura, la capacidad de fijación de fósforo, la capacidad de intercambio de calcio y la comunidad microbiana presente en el suelo (Barea et al., 2002; Bolland et al., 2001).

Los fertilizantes orgánicos son fuentes alternativas de fósforo y ayudan a mejorar la fertilidad del suelo, pero debido al bajo nivel de nutrientes y su contenido de humedad, se requiere una gran cantidad de material orgánico para aplicar al suelo (Ibrahim et al., 2008). La liberación de nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo para las plantas se produce lentamente (Sullivan et al., 2002). Los abonos compostados contienen entre 2 y 16 % ( $kg\ kg^{-1}$ ) de fósforo inorgánico lábil con respecto al total y entre 40 y 77 % ( $kg\ kg^{-1}$ ) de fósforo inorgánico de baja labilidad asociado a cationes metálicos (Frossard et al., 2002). Mejorar la disponibilidad de fósforo en los abonos orgánicos es posible con el uso de BSF (Beltrán-Medina et al., 2022).

## Bacterias solubilizadoras de fosfato (BSP)

Los microorganismos cumplen importantes funciones en la dinámica de los ecosistemas, ya que actúan como componentes fundamentales del ciclaje de nutrientes y de los ciclos biogeoquímicos (Leite, 2009). Estos microorganismos son los encargados de mediar los procesos de descomposición, movilización y mineralización de nutrientes, liberación de nutrientes y agua almacenada, y fijación y desnitrificación de nitrógeno. Los microorganismos edáficos adicionalmente tienen la capacidad de solubilizar y mineralizar compuestos fosforados, y por lo tanto de poner el fósforo en disposición a partir de formas complejas inorgánicas u orgánicas (Aipova et al., 2010; Chandler et al., 2008; Miranda Silva et al., 2022). Este fósforo soluble puede ser aprovechado por las plantas para su nutrición.

Los microorganismos solubilizadores de fósforo, bacterias u hongos, desempeñan un papel importante en la liberación de la forma inorgánica y soluble del nutriente. Este grupo de microorganismos se denomina *bacterias u hongos solubilizadores de*

*fosfato*. El mecanismo asociado involucra la liberación de compuestos capaces de disolver los minerales fosfatados mediante liberación de compuestos quelantes catiónicos y bloqueo de los sitios de adsorción de los coloides del suelo (He et al., 2002). Las bacterias son más numerosas que los hongos en suelos rizosféricos, lo que probablemente explica por qué son más efectivas en la solubilización del fósforo (Rafi et al., 2019). De igual manera, durante la descomposición de la materia orgánica, la mineralización enzimática de compuestos orgánicos fosforados resulta en la liberación de fósforo disponible. Las plantas pueden tomar el fósforo disponible en el suelo, siempre y cuando los procesos de solubilización de la forma inorgánica del nutriente (ligada a los minerales) y de mineralización de Po (ligado a la fracción orgánica) excedan al proceso de inmovilización del fósforo (Sharma et al., 2013). Existen varias rutas bioquímicas que permiten la disponibilidad de fósforo en el suelo, y las principales se muestran en la figura 55.

## Solubilización de fósforo inorgánico

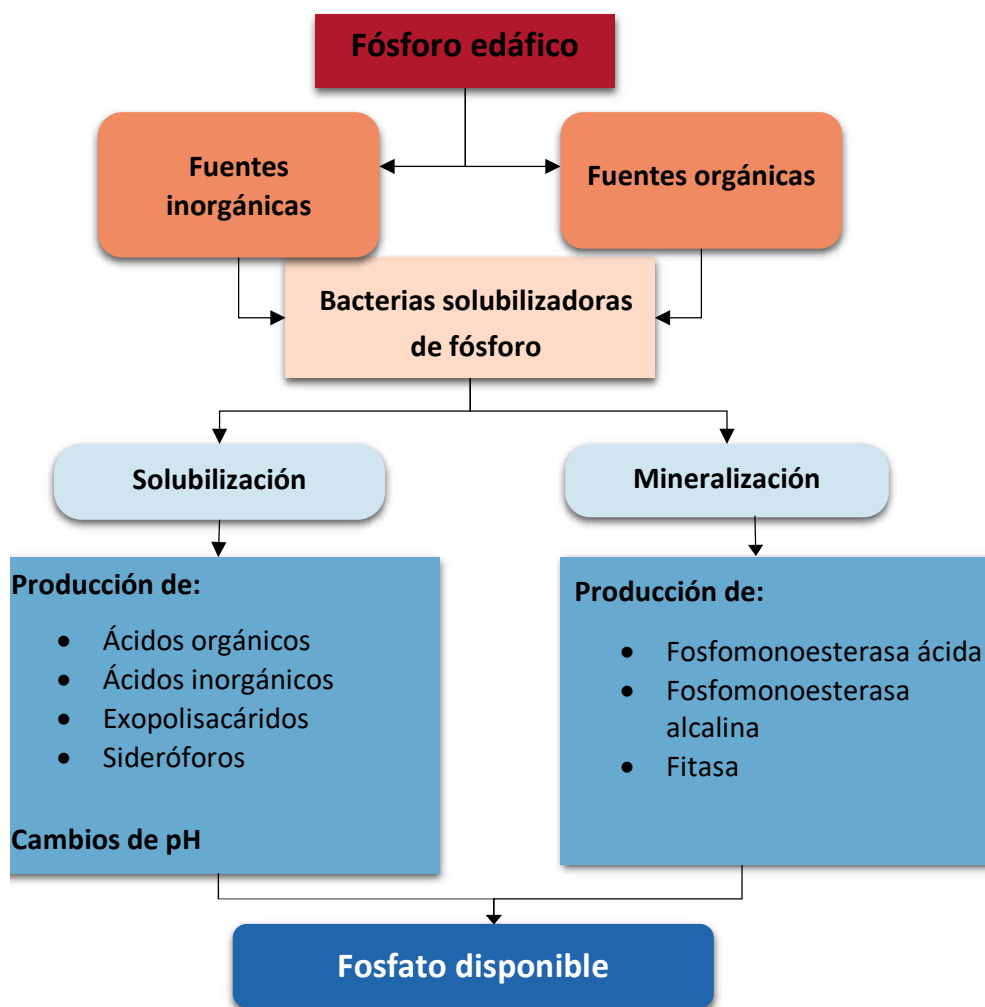
El mecanismo más importante para la solubilización de Pi en el suelo es la secreción bacteriana de ácidos orgánicos (AO) de bajo peso molecular (Tamad et al., 2021). Algunos de los ácidos orgánicos asociados son el cítrico (tricarboxílico), láctico, oxálico, glicólico, 2-cetoglucónico, málico, tartárico, aspártico, acético, fumárico, malónico, isobutírico, gluconato (dicarboxílico), succínico, glutárico, propiónico, butírico, glioxílico y adípico, con el glucónico y el 2-cetoglucónico como los de mayor importancia (Alori et al., 2017; Kalayu, 2019; Zeng et al., 2017).

Las bacterias solubilizadoras de fósforo varían considerablemente en su capacidad para secretar ácidos orgánicos, y en consecuencia en su capacidad de solubilizar fosfatos minerales (Santos-Torres et al., 2021). La secreción microbiana de AO provoca la acidificación del medio circundante, debido a la liberación de protones (H<sup>+</sup>) a la superficie extracelular. Estos protones disuelven el fósforo retenido en forma de fosfatos de calcio, hierro y aluminio, puesto que son agentes quelantes de los cationes (Goldstein, 1995; Illmer & Schinner, 1995;

Son et al., 2006). La asimilación de  $\text{NH}_4^+$  dentro de las células microbianas también libera protones, lo que conduce a la solubilización del fósforo (Sharma et al., 2013; Timofeeva et al., 2022).

Otro mecanismo de las bacterias para solubilizar fósforo es la producción de exopolisacáridos (EPS), producidos en respuesta al estrés y con la capacidad de

unirse a metales en el suelo. La unión con estos metales resulta en la solubilización de fosfatos metálicos. La producción de sideróforos también tiene influencia en la solubilización de fosfatos de hierro en el suelo, ya que son sustancias secretadas por los microorganismos con una alta afinidad por la quelación de este elemento (Prabhu et al., 2019).



**Figura 55.** Principales mecanismos de los bacterias solubilizadoras de fósforo (bsp) para la solubilización de fosfato edáfico.

Fuente: Elaboración propia con base en Rafi et al. (2019)

## Mineralización de fósforo orgánico

El Po del suelo se deriva de la materia orgánica estable o en descomposición (Ohel et al., 2004). Su mineralización bioquímica es un proceso enzimático cuyo resultado es la liberación de Pi (McGill & Cole, 1981). Este proceso biológico involucra dos grupos de enzimas que son sintetizadas por ciertos grupos de microorganismos en respuesta a la limitación de nutrientes o energía (Konietzny & Greiner, 2004). El primer grupo se denomina *fosfomonoesterasas no específicas*, las cuales desfosforilan el enlace fosfoéster o fosfoanhídrido de los compuestos orgánicos para formar fosfato inorgánico (Nannipieri et al., 2011). Según su pH óptimo, estas enzimas pueden ser subdivididas en *fosfomonoesterasas ácidas* y *alcalinas* (Jorquera et al., 2011). Las fosfomonoesterasas ácidas tienden a predominar en suelos ácidos y son producidas por bacterias y plantas, mientras que las alcalinas son más abundantes en suelos neutros y alcalinos y son producidas principalmente por microorganismos (Mukhametzhanova et al., 2012; Rodríguez & Fraga, 1999).

Las *fitasas* son el otro grupo de enzimas producidas por microorganismos para la mineralización de Po. Catalizan la hidrólisis del ácido fítico y liberan formas disponibles de fósforo en el suelo (inositol y ácido ortofosfórico) (Ahmad et al., 2008; Richardson & Simpson, 2011). Este proceso es requerido puesto que las plantas no pueden adquirir fósforo directamente del fitato (Sharma et al., 2013). Los microorganismos degradadores de fitato en la rizosfera median la disponibilidad de fósforo a partir de esta molécula orgánica (Richardson & Simpson, 2011).

### Efecto de la inoculación de bacterias solubilizadoras de fosfato con aplicación de fuentes fosfatadas

Numerosos estudios en condiciones controladas y en campo demuestran que el uso simultáneo de BSF y diferentes fuentes de fósforo incrementa la absorción de este nutriente, así como el crecimiento y producción de biomasa de varios cultivos. En la tabla 16 se presentan algunos ejemplos.

**Tabla 16.** Resultados de estudios realizados con aplicación de fuentes fosfatadas e inoculación de bacterias solubilizadoras de fosfato (BSP) en condiciones de campo y controladas sobre diferentes cultivos

Referencia	Cultivo	Fuente de fósforo	Bacterias solubilizadoras de fosfatos (BSP)	Condiciones del experimento (campo/controladas)	Resultados
Santos-Torres et al. (2021)	Asociación raigrás/trébol rojo	Fosfato diamónico (DAP) y roca fosfórica (RF)	<i>Rhizobium</i> sp. T88 y <i>Herbaspirillum</i> sp. AP21, individuales y coinoculadas	Controladas	Mayor producción de biomasa y valor nutricional con aplicación de DAP 75 % y RF 25 % con la inoculación de bacterias solubilizadoras de fosfato (BSF) individuales o coinoculadas.
Beltrán-Medina et al. (2022)	Maíz	DAP, dosis crecientes (0,25 y 50 %)	<i>Rhizobium</i> sp. B02	Controladas	Mejor tratamiento 50 % DAP + <i>Rhizobium</i> incrementó 17 % rendimiento de grano e influyó en el peso seco de las plantas, el contenido relativo de clorofila, la concentración de fósforo en la planta, el área foliar, la tasa fotosintética y el peso de 1.000 granos.
Estrada-Bonilla et al. (2021)	Caña de azúcar	Superfosfato triple (SPT), Roca fosfórica y compost	<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Azotobacter</i> sp., <i>Rhizobium</i> sp. y <i>Bacillus</i> sp.	Controladas	Mayor acumulación de fósforo, nitrógeno y potasio en brotes de caña con inoculación de BSF, que se correlaciona con mayor disponibilidad de fósforo y con la comunidad bacteriana del suelo.

Referencia	Cultivo	Fuente de fósforo	Bacterias solubilizadoras de fosfatos (BSP)	Condiciones del experimento (campo/controladas)	Resultados
Masuco Lopes et al. (2021)	Caña de azúcar	Compost enriquecido con RF	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> BSPR12 y <i>Bacillus</i> sp. BACBR01	Campo	Incrementos en rendimiento de caña de azúcar de 6 % y de actividad enzimática con aplicación de compost enriquecido con RF, y de 5 % con inoculación con BSP. La adición de RF reduce la aplicación de compost en 50 %.
Romero-Perdomo et al. (2021)	Algodón	DAP y RF	<i>Rhizobium</i> sp. (SP20, N8, N9, G56, G58 y B02)	Controladas	<i>Rhizobium</i> sp. B02 + RF mejoró crecimiento, contenido de fósforo en planta, tasa fotosintética, tasa de transpiración y contenido relativo de clorofila en suelos con baja disponibilidad de fósforo. Además, B02 incrementó el uso eficiente de la RF.
Khan et al. (2022)	Fríjol mungo	Superfosfato simple (SFS) y RF	<i>Bacillus megaterium</i> y <i>B. polymyxa</i>	Campo	Incrementos de 15 % en biomasa fresca y correlaciones significativas positivas entre disponibilidad de fósforo y su adquisición, con la aplicación de RF e inoculación con BSP.
Alamzeb & Inamullah (2022)	Garbanzo	SFS y RF	<i>Rhizobium</i> sp. y otras BSP	Campo	Mayores rendimientos de semilla y absorción de fósforo con aplicación de 100 y 75 % de SFS con inoculación de BSP.

Referencia	Cultivo	Fuente de fósforo	Bacterias solubilizadoras de fosfatos (BSP)	Condiciones del experimento (campo/ controladas)	Resultados
Tahir et al. (2018)	Trigo	Compost enriquecido con RF	<i>Bacillus</i> sp. MWT-14	Campo	Incremento en los rendimientos de grano de 54 a 83 % y mejoras en el contenido de materia orgánica y fósforo en el suelo con aplicación de compost enriquecido con RF e inoculación con <i>Bacillus</i> sp.
Alam et al. (2022)	Trigo	Diferentes dosis DAP (0,25, 50 y 100 kg de fósforo/ha)	Producto comercial de BSP en dosis de 0 y 1,5 kg ha <sup>-1</sup>	Campo	Mayores rendimientos de grano y tasa fotosintética con la aplicación más alta de DAP e inoculación del producto comercial de BSP.
Torres-Cuesta et al. (2023)	Kikuyo	RF, compost y DAP	<i>Herbaspirillum</i> sp. AP21, <i>Azospirillum brasilense</i> D7 y <i>Rhizobium leguminosarum</i> T88	Campo	La inoculación con BSP y la fertilización con RF aumentaron el fósforo lábil del suelo y la actividad de la fosfomonoesterasa ácida, lo que incidió en el incremento del rendimiento y la calidad del pasto, y está relacionado con una mayor disponibilidad de fósforo inorgánico (Pi) en el suelo.

Referencia	Cultivo	Fuente de fósforo	Bacterias solubilizadoras de fosfatos (BSP)	Condiciones del experimento (campo/controladas)	Resultados
Beltrán-Medina et al. (2023)	Maíz	Amida, DAP y cloruro de potasio (KCl)	<i>Rhizobium</i> sp. B02	Campo	Con 50 % del fertilizante de fósforo recomendado, la inoculación de la cepa aumentó la fracción del nutriente inorgánico lábil en 14 % respecto al control. La inoculación mejoró significativamente la longitud de los brotes (28 y 3 %) y el peso seco de los brotes (9,8 y 12 %). Así mismo, aumentó el rendimiento de grano en 696 kg/ha con 50 % de la dosis recomendada de fertilizante fosforado.

Fuente: Elaboración propia

## Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA)

Están presentes en la mayoría de suelos de Colombia y, mediante redes de hifas, pueden llegar a zonas del suelo que la raíz no tiene capacidad de explorar, para buscar fósforo y otros nutrientes que necesita la planta hospedadora (Fernández Casanova, 2022). Dado que actúan dentro de una relación simbiótica, los hongos reciben de la planta azúcares no sintetizados, derivados del proceso fotosintético y de lípidos (Keymer et al., 2017). El ciclo de vida de los HFMA se completa mediante la colonización con sus hospedadores (Sugiura et al., 2019). La zona del suelo influenciada

por las raíces y los hongos micorrícicos se conoce como *micorrizósfera* (Johansson et al., 2004), en donde tienen lugar los exudados de los HFMA y la cual permite el crecimiento de otros microorganismos como las bacterias (Akyol et al., 2019). Los efectos sinérgicos entre planta y HFMA pueden contribuir a estimular el crecimiento vegetal (Cano, 2011). Es relevante mencionar la capacidad de estos hongos de translocar a la planta fuentes de fósforo soluble del suelo (Tisserant et al., 2013), y sus interacciones con especies bacterianas capaces de solubilizar el fósforo.

## Efecto de la inoculación de HFMA

Algunos estudios demuestran potenciales beneficios de los HFMA en el incremento de la absorción de fósforo y el crecimiento y la producción de biomasa de varios cultivos. En la tabla 17 se presentan algunos ejemplos.

**Tabla 17.** Resultados de estudios realizados con hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) e inoculación con bacterias solubilizadoras de fosfato (BSP) en condiciones de campo y controladas sobre diferentes cultivos.

Referencias	Cultivo	Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA)	Condiciones del experimento (campo/controladas)	Resultados
Wilches Ortiz et al. (2022)	Caña	<i>Acaulospora mellea</i> y <i>Rhizophagus irregularis</i>	Campo	La inoculación de <i>R. irregularis</i> mejora el índice de madurez y tiene valores altos en producción de tallos/ha, mientras que la inoculación de <i>A. mellea</i> mejoró contenido de azúcares reductores, conversión en panela y mayor calidad nutricional (fósforo soluble y sólidos totales).
El Maaloum et al. (2020)	Tomate	HFMA, BSP y fosfocompost (PC)	Invernadero	La inoculación tripartita presentó mayor altura del brote, peso seco de brotes y raíces, colonización de raíces y contenido de fósforo disponible, que el control. La coinoculación con HFMA y BSP aumentó en gran medida la actividad de la fosfatasa alcalina y la tasa de colonización de las micorrizas en el suelo.
Liu et al. (2020)	Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> L.)	HFMA y BSP	Invernadero	Fue óptima una dosis de fósforo de 100 mg kg <sup>-1</sup> y la inoculación mixta de HFMA y BSP. Benefició el crecimiento de micorrizas, y el rendimiento y calidad nutricional de la alfalfa por el aumento de la absorción de fósforo.
Masrahi et al. (2023)	Cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> L.)	HFMA y BSP	Campo	La inoculación de HFMA y BSP mejora la tolerancia a la salinidad. La combinación de ambas fuentes mejora el rendimiento por la síntesis de fitohormonas y enzimas (como la ACC desaminasa), reduce el pH edáfico y permite mayor mineralización de fósforo orgánico.

Fuente: Elaboración propia

## Perspectivas

El uso de fuentes nacionales de fósforo (como RF) y de abonos orgánicos (como el compost) es una alternativa para afrontar la problemática actual. Aunque estas fuentes son de baja solubilidad, tienen una alta relevancia debido a la situación actual de Colombia y otros países. Adicionalmente, el uso de herramientas biotecnológicas como los HFMA y las BSP, fuentes alternativas y más económicas, tiene el potencial de mejorar la disponibilidad del fósforo (Adnan et al., 2022; Batool & Iqbal, 2019; Chungopast

et al., 2021; Ramírez et al., 2008). Adicionalmente, con este enfoque se podrían optimizar los fertilizantes fosfatados por la planta, y de este modo disminuir sus altas dosis. No obstante, se necesita más evidencia para demostrar la eficacia de estos microorganismos en la mejora de la fertilidad del suelo y de la productividad de las plantas en diferentes sistemas de cultivo en condiciones de campo (Zaidi et al., 2009).

## Referencias

- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., & Cruz-Chávez, E. (2004). El papel de óxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 485-497. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311096013.pdf>
- Adegoke, H. I., Adekola, F. A., Fatoki, O. S., & Ximba, B. J. (2013). Sorptive interaction of oxyanions with iron oxides: A review. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(1), 7-24. <http://www.pjoes.com/pdf-88948-22807?filename=Sorptive%20Interacción%20of.pdf>
- Adesemoye, A. O., Torbert, H. A., & Kloepper, J. W. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial Ecology*, 58, 921-929. <https://doi.org/10.1007/s00248-009-9531-y>
- Adnan, M., Fahad, S., Saleem, M. H., Ali, B., Mussart, M., Ullah, R., Jr, A., Arif, M., Ahmad, M., Shah W. A., Romman, M., Wahid, F., Wang, D., Saud, S., Liu, K., Harrison, M. T., Wu, C., Danish, S., Datta, R., Muresan, C. C., & Marc, R. A. (2022). Comparative efficacy of phosphorous supplements with phosphate solubilizing bacteria for optimizing wheat yield in calcareous soils. *Scientific Reports*, 12, Article 11997. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16035-3>
- Ahmad, F., Ahmad, I., & Khan, M. S. (2008). Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiological Research*, 163(2), 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.04.001>
- Aipova, R., Aitkeldiyeva, S., Kurmanbayev, A. A., Sadanov, A. K., & Topalova, O. B. (2010). Assessment of biotechnological potential of phosphate solubilizing bacteria isolated from soils of Southern Kazakhstan. *Natural Science*, 2(8). <https://doi.org/10.4236/ns.2010.28105>
- Akyol, T. Y., Niwa, R., Hirakawa, H., Maruyama, H., Sato, T., Suzuki, T., Fukunaga, A., Sato, T., Yoshida, S., Tawarayama, K., Saito, M., Ezawa, T., & Sato, S. (2019). Impact of introduction of arbuscular mycorrhizal fungi on the root microbial community in agricultural fields. *Microbes Environments*, 34(1), 23-32. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME18109>
- Alam, F., Khan, A., Fahad, S., Nawaz, S., Ahmed, N., Arif Ali, M. A., Adnan, M., Dawar, K., Saud, S., Hassan, S., Aown M., Raza, S., Naveed, K., Arif, M., Datta, R., & Danish, S. (2022). Phosphate solubilizing bacteria optimize wheat yield in mineral phosphorus applied alkaline soil. *Journal*

*of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(5), 339-348. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.10.007>

- Alamzeb, M., & Inamullah. (2022). Management of phosphorus sources in combination with rhizobium and phosphate solubilizing bacteria improve nodulation, yield and phosphorus uptake in chickpea. *Gesunde Pflanzen*, 75, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00722-2>
- Albacete, M. G. (2014). *Residuos orgánicos como fuentes de fósforo* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. [https://oa.upm.es/33104/1/MARTA\\_GARCIA\\_ALBACETE.pdf](https://oa.upm.es/33104/1/MARTA_GARCIA_ALBACETE.pdf)
- Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. (2014). Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931-2014: I. Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 75-106. <https://www.redalyc.org/pdf/436/43631007006.pdf>
- Arai, Y., & Sparks, D. (2007). Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: A multiscale approach. *Advances Agronomy*, 94, 135-179. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)94003-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)94003-6)
- Arcand, M., & Schneider, K. D. (2006). Plant- and microbial-based mechanisms to improve the agronomic effectiveness of phosphate rock: A review. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78(4), 791-807. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400013>
- Ávila Pedraza, É. Á., & Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2005). Los suelos de Colombia y sus estadísticas más recientes. *Análisis Geográficos*, (29), 13-21. <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=29015>
- Bai, J., Ye, X., Jia, J., Zhang, G., Zhao, Q., Cui, B., & Liu, X. (2017). Phosphorus sorption-desorption and effects of temperature, pH and salinity on phosphorus sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions. *Chemosphere*, 188, 677-688. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.117>
- Barea, J. M., Toro, M., Orozco, M. O., Campos, E., & Azcón, R. (2002). The application of isotopic (<sup>32</sup>P and <sup>15</sup>N) dilution techniques to evaluate the interactive effect of phosphate-solubilizing rhizobacteria, mycorrhizal fungi and *Rhizobium* to improve the agronomic efficiency of rock phosphate for legume crops. *Nutrient Cycling Agroecosystem*, 63, 35-42. <https://doi.org/10.1023/A:1020589732436>
- Barrow, N. J. (2017). The effects of pH on phosphate uptake from the soil. *Plant and Soil*, 410(1-2), 401-410. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3008-9>
- Barrow, N. J. (2020). Comparing two theories about the nature of soil phosphate. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 679-685. <https://doi.org/10.1111/ejss.13027>
- Barrow, N. J., & Debnath, A. (2015). Effect of phosphate status and pH on sulphate sorption and desorption *European Journal of Soil Science*, 66(2), 286-297. <https://doi.org/10.1111/ejss.12223>
- Batool, S., & Iqbal, A. (2019). Phosphate solubilizing rhizobacteria as alternative of chemical fertilizer for growth and yield of *Triticum aestivum* (var. Galaxy 2013). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(7), 1400-1410. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.05.024>
- Behera, B. C., Singdevsachan, S. K., Mishra, R. R., Dutta, S. K., & Thatoi, H. (2013). Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilizing microorganism in mangrove—A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 3(2), 97-110. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bcab.2013.09.008>

- Beltrán-Medina, J., Romero-Perdomo, F., Molano-Chávez, L., Silva, A. M., & Estrada-Bonilla, G. A. (2022). Differential plant growth promotion under reduced phosphate rates in two genotypes of maize by a rhizobial phosphate-solubilizing strain. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, Article 955473. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.955473>
- Beltrán-Medina, I., Romero-Perdomo, F., Molano-Chávez, L., Gutiérrez, A. Y., Silva, A., & Estrada-Bonilla, G. (2023). Inoculation of phosphate-solubilizing bacteria improves soil phosphorus mobilization and maize productivity. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 126, 21-34. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10268-y>
- Beltrán Pineda, M. E. (2014). La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 15(1), 101-113. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol15\\_num1\\_art:401](https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:401)
- Billah, M., Khan, M., Bano, A., Hassan, T. U., Munir, A., & Gurmani, A. R. (2019). Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: Keys for sustainable agriculture. *Geomicrobiology Journal*, 36(1), 1-13. <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1654043>
- Bobadilla Henao, C., & Rincón Vanegas, S. C. (2008). *Aislamiento y producción de bacterias fosfato solubilizadoras a partir de compost obtenido de residuos de plaza* [Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/8433>
- Bolland, M. D. A., Gilkes, R. J., & Brennan, R. F. (2001). The influence of soil properties on the effectiveness of phosphate rock fertilizers. *Australian Journal of Soil Research*, 39(4), 773-798. <https://doi.org/10.1071/SR00025>
- Bonatotzky, T., Ottner, F., Erlendsson, E., & Gísladóttir, G. (2021). Weathering of tephra and the formation of pedogenic minerals in young andosols, South East Iceland. *Catena*, 198, 105030. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105030>
- Borggaard, O., Szilas, C., Gimsing, A. L., & Rasmussen, L. H. (2004). Estimation of soil phosphate adsorption capacity by means of a pedotransfer function. *Geoderma*, 118(1-2), 55-61. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00183-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00183-6)
- Borie, F., & Rubio, R. (2003). Total and organic phosphorus in Chilean volcanic soils. *Gayana Botánica*, 60(1), 69-78.
- Briceño, M., Escudey, M., Galindo, G., Borchardt, D. B., & Chang, A. (2004). Characterization of chemical phosphorus forms in volcanic soils using  $^{31}\text{P}$ -NMR spectroscopy. *Communications in Soil Science Plant Analysis*, 35(9-10), 1323-1337.
- Bünemann, E. K. (2015). Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 89, 82-98. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.026>
- Burns, R. G., DeForest, J. L., Marxsen, J., Sinsabaugh, R. L., Stromberger, M. E., Wallenstein, M. D., Weintraub, M. N., & Zoppini, A. (2013). Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 216-234. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>
- Cano, M. (2011). Interacción de microorganismos benéficos en plantas: micorrizas, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp.: una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 14(2), 15-31. <https://doi.org/10.31910/rudca.v14.n2.2011.771>
- Chandler, D., Davidson, G., Grant, W. P., Greaves, J., & Tatchell, G. (2008). Microbial biopesticides for integrated crop management: An assessment of environmental and regulatory sustainability. *Trends in Food Science Technology*, 19(5), 275-283. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.12.009>

- Chen, Y., Rekha, P., Arun, A., Shen, F., Lai, W., & Young, C. (2006). Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*, 34(1), 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.12.002>
- Chiu, C. Y., Baillie, I., Jien, S. H., Hallett, L., & Hallett, S. (2021). Sequestration of P fractions in the soils of an incipient ferralite chronosequence on a humid tropical volcanic island. *Botanical Studies*, 62(1), Article 20. <https://doi.org/10.1186/s40529-021-00326-5>
- Chungopast, S., Thongjoo, C., Mominul Islam, A. K. M., & Yeasmin, S. (2021). Efficiency of phosphate-solubilizing bacteria to address phosphorus fixation in Takhli soil series: A case of sugarcane cultivation, Thailand. *Plant and Soil*, 460, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04812-w>
- Condrón, L., & Newman, S. (2011). Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. *Journal of Soils and Sediments*, 11, 830-840. <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0363-2>
- Condrón, L. M., Turner, B. L., & Cade-Menun, B. J. (2005). Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. In J. T. Sims & A. N. Sharpley (Eds.), *Phosphorus: Agriculture and the environment* (pp. 87-121). American Society of Agronomy (ASA). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c4>
- Crews, T. E., & Brookes, P. C. (2014). Changes in soil phosphorus forms through time in perennial versus annual agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 184, 168-181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.022>
- Dahlgren, R. A., Saigusa, M., & Ugolini, F. C. (2004). The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy*, 82, 113-181. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82003-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82003-5)
- De Bolle, S. (2013). *Phosphate saturation and phosphate leaching of acidic sandy soils in Flanders: Analysis and mitigation options* [Doctoral dissertation, Ghent University, Belgium]. <https://core.ac.uk/download/pdf/55814675.pdf>
- Del Campillo, M. C., Van der Zee, S. E. A. T. M., & Torrent, J. (1999). Modelling long-term phosphorus leaching and changes in phosphorus fertility in excessively fertilized acid sandy soils. *European Journal of Soil Science*, 50(3), 391-399. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1999.00244.x>
- Delfim, J., Schoebitz, M., Paulino, L., Hirzel, J., & Zagal, E. (2018). Phosphorus availability in wheat, in volcanic soils inoculated with phosphate-solubilizing *Bacillus thuringiensis*. *Sustainability*, 10(1), 144. <https://doi.org/10.3390/su10010144>
- Delmelle, P., Opfergelt, S., Cornelis, J., Ping, C. L. (2015). Volcanic soils. In H. Sigurdsson (Ed.), *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 1253-1264). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00072-9>
- Devau, N., Le Cadre, E., Hinsinger, P., & Gérard, F. (2010). A mechanistic model for understanding root-induced chemical changes controlling phosphorus availability. *Annals of Botany*, 105(7), 1183-1197. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq098>
- Dodd, I. C., & Ruiz-Lozano, J. M. (2012). Microbial enhancement of crop resource use efficiency. *Current Opinion Biotechnology*, 23(2), 236-242. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.09.005>
- Ebelhar, S. (2008). Labile pool. In W. Chesworth (Ed.), *Encyclopedia of earth sciences series: Encyclopedia of soil science* (pp. 425-426). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9\\_313](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_313)
- Echeverri Zuluaga, J., Restrepo, L. F., & Parra, J. E. (2010). Evaluación comparativa de los parámetros productivos y agronómicos del pasto kikuyo *Pennisetum clandestinum* bajo dos metodologías de fertilización. *Revista Lasallista de Investigación*, 7(2), 94-100. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69519014011.pdf>

- Ehrlich, H. L., Newman, D. K., & Kappler, A. (Eds.). (2016). *Ehrlich's geomicrobiology book* (6<sup>th</sup> edition). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19121>
- El Maaloum, S., Elabed, A., Alaoui-Talibi, Z. E., Meddich, A., Filali-Maltouf, A., Douira A., Ibensouda-Koraichi, S., Amir, S., & El Modafar, C. (2020). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing bacteria consortia associated with phospho-compost on phosphorus solubilization and growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(5), 622-634. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729376>
- Escudey, M., Galindo, G., Föster, J. E., Briceño, M., Díaz, P., & Chang, A. (2001). Chemical forms of phosphorus of volcanic ash derived soils in Chile. *Communications in Soil Science Plant Analysis*, 32(5-6), 601-606. <https://doi.org/10.1081/CSS-100103895>
- Espinoza, J., & Rubiano, Y. (2015). Procesos específicos de formación en Andisoles, alfisoles y ultisoles en Colombia. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 12(Edición especial 2), E85-E97. <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/709/664>
- Estrada-Bonilla, G. A., Durrer, A., & Cardoso, E. (2021). Use of compost and phosphate-solubilizing bacteria affect sugarcane mineral nutrition, phosphorus availability, and the soil bacterial community. *Applied Soil Ecology*, 157, Article 103760. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103760>
- Fernández Casanova, B. R. (2022). *Bacterias solubilizadoras de fosfato que forman biopelículas sobre hifas extrarradicales de hongos formadores de micorrizas y su relación en la nutrición vegetal del fósforo* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83353>
- Fink, J. R., Vasconcellos In da, A., Tiecher, T., & Barrón, V. (2016). Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. *Ciencia e Agrotecnologia*, 40(4), 369-379. <https://doi.org/10.1590/1413-70542016404023016>
- Fisher, R. V., & Schmincke, H. U. (1984). *Pyroclastic rocks*. Springer-Verlag.
- Fontes, M. R., Weed, S. B., & Bowen, L. H. (1992). Association of microcrystalline goethite and humic acid in some oxisols from Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 56(3), 982-990. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030050x>
- Fox, R. L., & Searle, P. G. E. (1978). Phosphate adsorption by soils of the tropics. In J. J. Nicholaides & L. D. Swindale (Eds.), *Diversity of soils in the tropics* (Vol. 34, Chap. 7). <https://doi.org/10.2134/asaspepub34.c7>
- Frossard, E., Condon, L. M., Oberson, A., Sinaj, S., & Fardeau, J. C. (2000). Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *Journal of Environmental Quality*, 29(1), 15-23. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900010003x>
- Frossard, E., Skrabal, P., Sinaj, S., Bangerter, F., & Traore, O. (2002). Forms and exchangeability of inorganic phosphate in composted solid organic wastes. *Nutrient Cycle in Agroecosystems*, 62, 103-113. <https://doi.org/10.1023/A:1015596526088>
- Gasparatos, D., Haidouti, C., Haroulis, A., & Tsousidou, P. (2006). Estimation of phosphorus status of soil Fe-enriched concretions with the acid ammonium oxalate method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37, 2375-2387. [https://www.researchgate.net/publication/216048178\\_Estimation\\_of\\_Phosphorus\\_Status\\_of\\_Soil\\_Fe-Enriched\\_Concretions\\_with\\_the\\_Acid\\_Ammonium\\_Oxalate\\_Method](https://www.researchgate.net/publication/216048178_Estimation_of_Phosphorus_Status_of_Soil_Fe-Enriched_Concretions_with_the_Acid_Ammonium_Oxalate_Method)
- Goldstein, A. (1995). Recent progress in understanding the molecular genetics and biochemistry of calcium phosphate solubilization by gram negative bacteria. *Biological Agriculture & Horticulture*, 12, 185-193. <https://doi.org/10.1080/01448765.1995.9754736>

- Gueçaimburu, J., Vázquez, J. M., Tancredi, F., Reposo, G. P., Rojo, V., Martínez, M., & Introcaso, R. M. (2019). Evolución del fósforo disponible a distintos niveles de compactación por tráfico agrícola en un argiudol típico. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 35(1), 81-89. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000203>.
- Gyaneshwar, P., Naresh Kumar, G., Parekh, L. J., & Poole, P. S. (2002). Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and Soil*, 245, 83-93. <https://doi.org/10.1023/A:1020663916259>
- He, Z. L., Bian, W., & Zhu, J. (2002). Screening and identification of microorganisms capable of utilizing phosphate adsorbed by goethite. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(5-6), 647-663. <https://doi.org/10.1081/CSS-120003057>
- Hedley, M., Steward, J., & Chauhuan, B. (1982). Changes in organic and inorganic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America*, 46, 970-976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>
- Herrera, M. (2006). *Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia: estudio fundamental e implicaciones en ingeniería* [Tesis de doctorado, Universidad de los Andes, Colombia]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/7812/u277084.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Herrera, M., Lizcano, A., & Santamarina, J. C. (2007). Colombian volcanic ash soils. In *Characterisation and engineering of natural soils* (pp. 2385-2409).
- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, 237(2), 173-195. <https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>
- Hutchins, D. A., Qu, P., Fu, F. X., Kling, J. D., Huh, M., & Wang, X. (2019). Distinct responses of the nitrogen-fixing marine cyanobacterium *Trichodesmium* to a thermally variable environment as a function of phosphorus availability. *Frontiers Microbiology*, 10, Article 1282. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01282>
- Ibrahim, M., Hassan, A., Gozeel Iqbal, M., & Valeem, E. E. (2008). Response of wheat growth and yield to various levels of compost and organic manure. *Pakistan Journal of Botany*, 40(5), 2135-2141. [https://www.researchgate.net/publication/222101716\\_Response\\_of\\_wheat\\_growth\\_and\\_yield\\_to\\_various\\_levels\\_of\\_compost\\_and\\_organic\\_manure](https://www.researchgate.net/publication/222101716_Response_of_wheat_growth_and_yield_to_various_levels_of_compost_and_organic_manure)
- Illmer, P., & Schinner, F. (1995). Solubilization of inorganic calcium phosphates—Solubilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(3), 257-263. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)00190-C](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)00190-C)
- Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2004). *Resolución 00375. "Por la cual se dictan las disposiciones sobre Registro y Control de Bioinsumos y Extractos Vegetales de uso agrícola en Colombia"*. [https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion\\_ica\\_0375\\_2004.htm](https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_ica_0375_2004.htm)
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2012). *Levantamiento detallado de suelos en las áreas planas de 14 municipios de la sabana de Bogotá, departamento de Cundinamarca, escala 1:10.000*. <https://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/37174#page=1>
- Interamerican Association for Environmental Defense [AIDA]. (2013). *Suelos Andisoles: importancia y amenazas*. <https://aida-americas.org/es/blog/suelos-Andisoles-importancia-y-amenazas#:~:text=Colombia%20es%20uno%20de%20los,trigo%20y%20arroz%2C%20entre%20otros>
- Jahnke, R. A. (1992). The phosphorus cycle. In S. S. Butcher, R. J. Charlson, G. H. Orians & G. V. Wolfe (Eds.), *International geophysics: Global biochemical cycles* (Vol. 50, pp. 301-315). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(08\)62697-2](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(08)62697-2)

- Jiang, X., Peng, C., Fu, D., Chen, Z., Shen, L., Li, Q., Ouyang, T., & Wang, Y. (2015). Removal of arsenate by ferrihydrite via surface complexation and surface precipitation. *Applied Surface Science*, 353, 1087-1094. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.190>
- Johansson, J., Paul, L. R., & Finlay, R. D. (2004). Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbial Ecology*, 48(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2003.11.012>
- Jorquera, M. A., Crowley, D. E., Marschner, P., Greiner, R., Fernández, M. T., Romero, D., Meneses-Blackburn, D., & De La Luz Mora, M. (2011). Identificación of  $\gamma$ -propeller phytase-encoding genes in culturable *Paenibacillus* and *Bacillus* spp. from the rhizosphere of pasture plants on volcanic soils. *FEMS Microbial Ecology*, 75(1), 163-172. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00995.x>
- Kalayu, G. (2019). Phosphate solubilizing microorganisms: Promising approach as biofertilizers. *International Journal of Agronomy*, 2019, Article 4917256. <https://doi.org/10.1155/2019/4917256>
- Keymer, A., Pimprikar, P., Wewer, V., Huber, C., Brands, M., Bucerius, S. L., Delaux, P. M., Klingl, V., Von Röpenack-Lahaye, Wang, T. L., Eisenreich, W., Dörmann, P. Parniske, M., & Gutjahr, C. (2017). Lipid transfer from plants to arbuscular mycorrhiza fungi. *eLife*, 6, Article e29107. <https://doi.org/10.7554/eLife.29107>
- Khan, I., Zada, S., Rafiq, M., Sajjad, W., Zaman, S., & Hasan, F. (2022). Phosphate solubilizing epilithic and endolithic bacteria isolated from clastic sedimentary rocks, Murree lower Himalaya, Pakistan. *Archives Microbiology*, 204, Article 332. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02946-2>
- Khan, M. S., Zaidi, A., Ahemad, M., Oves, M., & Wani, P. A. (2010). Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi—current perspective. *Archives of Agronomy Soil Science*, 56(1), 73-98. <https://doi.org/10.1080/03650340902806469>
- Kishore, N., Pindi, P. K., & Ram Reddy, S. (2015). Phosphate-solubilizing microorganisms: A critical review. In B. Bahadur, M. Venkat Rajam, L. Sahijram & K. Krishnamurthy (Eds.), *Plant biology and biotechnology* (pp. 307-333). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2286-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2286-6_12)
- Konietzny, U., & Greiner, R. (2004). Bacterial phytase: Potential application, *in vivo* function and regulation of its synthesis. *Brazilian Journal of Microbiology*, 35(1-2), 11-18. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822004000100002>
- Kruse, J., Abraham, M., Amelung, W., Baum, C., Bol, R., Kühn, O., Lewandowski, H., Niederberger, J., Oelmann, Y., Rieger, C., Santner, J., Siebers, M., Siebers, N., Spohn, M., Vestergren, J., Vogts, A., & Leinweber, P. (2015). Innovative methods in soil phosphorus research: A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(1), 43-88. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400327>
- Kumar, R., Kumar, R., Mittal, S., Arora, M., & Babu, J. N. (2016). Role of soil physicochemical characteristics on the present state of arsenic and its adsorption in alluvial soils of two agri-intensive region of Bathinda, Punjab, India. *Journal of Soils and Sediments*, 16, 605-620. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1262-8>
- Kumar, A., Kumar, A., & Patel, H. (2018). Role of microbes in phosphorus availability and acquisition by plants. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(5), 1344-1347. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.705.161>
- Kwesi Asomaning, S. (2020). Processes and factors affecting phosphorus sorption in soils. G. Kyzas & N. Lazaridis (Eds.), *Sorption in 2020s*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90719>
- Lambers, H., & Plaxton, W. C. (2015). Phosphorus: Back to the roots. *Annual Plant Reviews*, 48, 3-22. <https://doi.org/10.1002/9781119312994.apr0516>

- Larsen, S. (1967). Soil phosphorus. *Advances in Agronomy*, 19, 151-210. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60735-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60735-X)
- Leamy, M. (1984). Andisols of the world. In *Congreso Internacional de Suelos Volcánicos, Comunicaciones Universidad de la Laguna, Secretariado de Publicaciones* [Serie informes 13] (pp. 368-387).
- Leite, M. V. (2009). *Fungos filamentosos do lodo de esgoto: Impacto na microbiota fúngica e potencial enzimático* [Dissertação mestrado, Universidade Católica de Pernambuco, Recife]. [http://tede2.unicap.br:8080/bitstream/tede/590/1/dissertacao\\_marcela\\_leite.pdf](http://tede2.unicap.br:8080/bitstream/tede/590/1/dissertacao_marcela_leite.pdf)
- Li, X., Luo, L., Yang, J., Li, B., & Yuan, H. (2015). Mechanisms for solubilization of various insoluble phosphates and activation of immobilized phosphates in different soils by an efficient and salinity-tolerant *Aspergillus niger* Strain An2. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 175, 2755-2768. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1465-2>.
- Lindsay, W. (1979). *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons. [https://www.scirp.org/\(S-351jmbntvnsjt1aadkposzje\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1188214](https://www.scirp.org/(S-351jmbntvnsjt1aadkposzje)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1188214).
- Lindsay, W., Vlek, P. L., & Chien, S. H. (1989). Phosphate minerals. In J. B. Dixon & S. B. Weed (Eds.), *Minerals in soil environment* (Vol. 1, pp. 1089-1130). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c22>.
- Liu, J., Liu, X., Zhang, Q., Li, S., Sun, Y., Lu, W., & Ma, C. (2020). Response of alfalfa growth to arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing bacteria under different phosphorus application levels. *AMB Express*, 10, Article 200. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-01137-w>
- Luengo, C., Brigante, M., Antelo, J., & Avena, M. (2006). Kinetics of phosphate adsorption on goethite: Comparing batch adsorption and ATR-IR measurements. *Journal of Colloid and Interface Science*, 300(2), 511-518. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.04.015>
- Mabagala, F., & Mng'ong'o, M. E. (2022). On the tropical soils; the influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(5), 3635-3641. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.056>
- Malagón Castro, D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos: énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Revista Academia Colombiana Ciencia*, 27(104), 319-341. [https://www.accefyn.com/revista/Vol\\_27/104/319-341.pdf](https://www.accefyn.com/revista/Vol_27/104/319-341.pdf)
- Masrahi, A. S., Alasmari, A., Shahin, M. G., Qumsani, A. T., Oraby, H. F., & Awad-Allah, M. M. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate solubilizing bacteria in improving yield, yield components, and nutrients uptake of barley under salinity soil. *Agriculture*, 13(3), 537. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030537>
- Masuco Lopes, M., Miranda Silva, A. M., Estrada-Bonilla, G. A., Ferraz-Almeida, R., Vilela Vieira, J. L., Otto, R., Vitti, G. C., & Nogueira Cardoso, E. (2021). Improving the fertilizer value of sugarcane wastes through phosphate rock amendment and phosphate-solubilizing bacteria inoculation. *Journal of Cleaner Production*, 298, Article 126821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126821>
- McGill, W. B., & Cole, C. V. (1981). Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma*, 26(4), 267-286. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(81\)90024-0](https://doi.org/10.1016/0016-7061(81)90024-0)
- Miranda Silva, A. M., Estrada-Bonilla, G. A., Masuco Lopes, C., Pereira Matteoli, F., Raposo Cotta, S., Petry Feiler, H., Rodrigues, Y. F., & Nogueira Cardoso, E. J. B. (2022). Does organomineral fertilizer combined with phosphate-solubilizing bacteria in sugarcane modulate soil microbial community and functions? *Microbial Ecology*, 84, 539-555. <https://doi.org/10.1007/s00248-021-01855-z>
- Mukhametzyanova, A. D., Akhmetova, A. I., & Sharipova, M. R. (2012). Microorganisms as phyta-se producers. *Microbiology*, 81, 267-275. <https://doi.org/10.1134/S0026261712030095>

- Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L., & Renella, G. (2011). Role of phosphatase enzymes in soil. In E. Bünnemann, A. Oberson, E. Frossard (Eds.), *Soil biology: Phosphorus in action* (Vol. 26., pp. 215-243). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9_9)
- Nanzyo, M. (2002). Unique properties of volcanic ash soils. *Global Environmental Research*, 6, 99-112.
- Nesme, T., Metson, G. S., & Bennett, E. M. (2018). Global P flows through agricultural trade. *Global Environmental Change*, 50, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.04.004>
- Odongo, N. E., Hyoung-Ho, K., Choi, H. C., Van-Straaten, P., McBride, B. W., & Romney, D. L. (2007). Improving rock phosphate availability through feeding, mixing and processing with composting manure. *Bioresource Technology*, 98(15), 2911-2918. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.10.015>
- Ohel, F., Frossard, E., Fließbach, A., Dubois, D. (2004). Basal organic phosphorus mineralization in soils under different farming systems. *Soil Biology Biochemistry*, 36(4), 667-675. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.12.010>
- Olsen, S. R., & Watanabe, F. S. (1963). Diffusion of phosphorus as related to soil texture and plant uptake. *Soil Science Society of America Journal*, 27(6), 648-653. <https://doi.org/10.2136/sssaj1963.03615995002700060024x>
- Peñaranda Rolón, A. M., Serralde Ordóñez, D. P., & Ramírez Gómez, M. M. (2022). ¿Por qué usar hongos formadores de micorrizas arbusculares en caña de azúcar para panela en Nariño? Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7406214>
- Pierzynski, G. M., McDowell, R. W., & Sims, J. T. (2005). Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils. In J. T. Sims & A. N. Sharpley (Eds.), *Phosphorus: Agriculture and the environment* (Vol. 46, pp. 53-86). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c3>
- Prabhu, N., Borkar, S., & Garg, S. (2019). Phosphate solubilization by microorganisms: Overview, mechanisms, applications and advances. In S. N. Meena & M. M. Naik (Eds.), *Advances in Biological Science Research* (pp. 161-176). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817497-5.00011-2>
- Pradhan, N., & Sukla, L. (2005). Solubilization of inorganic phosphate by fungi isolated from agriculture soil. *African Journal of Biotechnology*, 5(10), 850-854. <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/42884>
- Rafi, M., Krishnaveni, M. S., & Charyulu, P. B. B. N. (2019). Phosphate-solubilizing microorganisms and their emerging role in sustainable agriculture. In *Recent developments in applied microbiology and biochemistry* (pp. 223-233). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816328-3.00017-9>
- Raghothama, K. G. (2000). Phosphate transport and signaling. *Current Opinion in Plant Biology*, 3(3), 182-187. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10837272/>
- Ramírez Gómez, M., Boveda Hoyos, G., Bonilla Buitrago, R., Cabra Julio, L., Peñaranda Rolón, A., López Jiménez, M., Tamayo Vélez, Á., Navas Ríos, G. E., & Díaz Diez, C. A. (2008). *Uso de microorganismos con potencial como biofertilizantes en el cultivo de mora*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12735>
- Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D., & Shankhdhar, S. C. (2021). Phosphate-solubilizing microorganisms: Mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. *Journal of Soil Science Plant Nutrition*, 21, 49-68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>

- Redel, Y., Rubio, R., Rouanet, J., & Borie, F. (2007). Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. *Geoderma*, 139, 388-396. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.02.018>
- Richardson, A., & Simpson, R. (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant Physiology*, 156, 989-996. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>
- Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17(4-5), 319-39. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2)
- Romero-Perdomo, F., Beltrán, I., Mendoza-Labrador, J., Estrada-Bonilla, G., & Bonilla, R. (2021). Phosphorus nutrition and growth of cotton plants inoculated with growth-promoting bacteria under low phosphate availability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2020.618425>
- Rooney, D. C., & Clipson, N. J. W. (2009). Phosphate addition and plant species alters microbial community structure in acidic upland grassland soil. *Microbial Ecology*, 57, 4-13. <https://doi.org/10.1007/s00248-008-9399-2>
- Santos-Torres, M., Romero-Perdomo, F., Mendoza-Labrador, J., Gutiérrez, A. Y., Vargas, C., Castro-Rincón, E., Caro-Quintero, A., Uribe-Vélez, D., & Estrada-Bonilla, G. (2021). Genomic and phenotypic analysis of rock phosphate-solubilizing rhizobacteria. *Rhizosphere*, 17, Article 100290. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100290>
- Satyaprakash, M., Nikitha, T., Reddi, E. U. B., Sadhana, B., & Vani, S. (2017). A review on phosphorous and phosphate solubilising bacteria and their role in plant nutrition. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(4), 2133-2144. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.251>
- Schachtman, D., Reid, R., & Ayling, S. (1998). Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. *Plant Physiology*, 116(2), 447-453. <https://doi.org/10.1104/pp.116.2.447>
- Schwertmann, U., Kodama, H., & Fischer, W. R. (1986). Mutual interactions between organics iron oxides. In P. M. Huang & M. Schnitzer (Eds.), *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes* (Vol. 17, pp. 223-250). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub17.c7>
- Selvi, K. B., Paul, J. J. A., Vijaya, V., & Saraswathi, K. (2017). Analyzing the efficacy of phosphate solubilizing microorganisms by enrichment culture techniques. *Biochemistry and Molecular Biology Journal*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.21767/2471-8084.100029>
- Sengul, H., Ozer, A. K., & Gulaboglu, M. S. (2006). Beneficiation of Mardin-Mazıdađı (Turkey) calcareous phosphate rock using dilute acetic acid solutions. *Chemical Engineering Journal*, 122(3), 135-140. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2006.06.005>
- Sharma, S., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2, Article 587. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
- Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., Zhang, F., & Zhang, F. (2011). Phosphorus dynamics: From soil to plant. *Plant Physiology*, 156(3), 997-1005. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>
- Shoji, S., & Takahashi, T. (2002). Environmental and agricultural significance of volcanic ash soils. *Global Environmental Research*, 6, 113-135. [https://www.researchgate.net/publication/228767895\\_Environmental\\_and\\_agricultural\\_significance\\_of\\_volcanic\\_ash\\_soils](https://www.researchgate.net/publication/228767895_Environmental_and_agricultural_significance_of_volcanic_ash_soils)
- Shrivastava, M., Kale, S., & D'Souza, S. (2011). Rock phosphate enriched post-methanation bio-sludge from kitchen waste based biogas plant as P source for mungbean and its effect

- on rhizosphere phosphatase activity. *European Journal of Soil Biology*, 47(3), 205-212. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.02.002>
- Shrivastava, M., Srivastava, P., & D'Souza, S. F. (2018). Phosphate-solubilizing microbes: Diversity and phosphates solubilization mechanism. In V. Meena (Ed.), *Role of rhizospheric microbes in soil* (pp. 137-165). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0044-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0044-8_5)
- Singh, H., & Sudhakara Reddy, M. (2011). Effect of inoculation with phosphate solubilizing fungus on growth and nutrient uptake of wheat and maize plants fertilized with rock phosphate in alkaline soils. *European Journal of Soil Biology*, 47(1), 30-34. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2010.10.005>
- Sohm, J. A., Webb, E. A., & Capone, D. G. (2011). Emerging patterns of marine nitrogen fixation. *Nature Reviews Microbiology*, 9, 499-508. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2594>
- Soil Survey Staff. (1999). *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys* (2<sup>nd</sup> edition). United States Department of Agriculture (USD). <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/survey/class/taxonomy/>
- Son, H., Park, G., Cha, M., & Heo, M. (2006). Solubilization of insoluble inorganic phosphates by a novel salt- and pH- tolerant *Pantoea agglomerans* R-42 isolated from soybean rhizosphere. *Bioresources Technology*, 97(2), 204-210. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.021>
- Stevenson, F., & Cole, M. (1999). *Cycles of soils: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. John Wiley & Sons.
- Stutter, M. I., Shand, C. A., George, T. S., Blackwell, M. S. A., Bol, R., MacKay, R. L., Richardson, A. E., Condron, L. M., Turner, B. L., & Haygarth, P. M. (2012). Recovering phosphorus from soil: A root solution? *Environmental Science & Technology*, 46(4), 1977-1978. <https://doi.org/10.1021/es2044745>
- Sugiura, Y., Akiyama, R., Tanaka, S., Yano, K., Kameoka, H., Kawaguchi, M., Akiyama, K., & Saito, K. (2019). *Myristate as a carbon and energy source for the asymbiotic growth of the arbuscular mycorrhizal fungus Rhizophagus irregularis*. <https://doi.org/10.1101/731489>
- Sullivan, D. M., Bary, A. I., Thomas, D. R., Fransen, S. C., & Cogger, C. G. (2002). Food waste compost effects on fertilizer nitrogen efficiency, available nitrogen, and tall fescue yield. *Soil Science Society America Journal*, 66(1), 154-161. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1540a>
- Tahir, M., Khalid, U., Ijaz, M., Shah, G. M., Naeem, M. A., Shahid, M., Mahmood, K., Ahmad, N., & Kareem, F. (2018). Combined application of bio-organic phosphate and phosphorus solubilizing bacteria (*Bacillus* strain MWT 14) improve the performance of bread wheat with low fertilizer input under an arid climate. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49(suppl. 1), 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.11.005>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal* (4.<sup>a</sup> Ed.). ArtMed.
- Takahashi, T., & Shoji, S. (2003). Distribution and classification of volcanic ash soils. *Global Environmental Research*, 6, 83-97.
- Tamad, M., Maas, A., Hanudin, E., & Widada, J. (2021). The mechanism of phosphate bacteria in increasing the solubility of phosphorus in Indonesian Andisols. *Journal of Water and Land Development*, 49(IV-VI), 188-194. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137111>
- Timofeeva, A., Galyamova, M., & Sedykh, S. (2022). Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture. *Plants*, 11(16), 2119. <https://doi.org/10.3390/plants11162119>
- Tisserant, E., Malbreil, M., Kuo, A., Kohler, A., Symeonidi, A., Balestrini, R., Charron, P., Duenning, N., Dit Frey, N. F., Gianinazzi-Pearson, V., Gilbert, L. B., Handa, Y., Herr, J. R., Hijri, M., Koul, R., Kawaguchi, M., Krajinski, F., Lammers, P. J., Masclaux, F. ... Martin, F. (2013). Genome of an arbuscular mycorrhizal fungus provides insight into the oldest plant

symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 20117-20122. <https://doi.org/10.1073/pnas.1313452110>

Torres-Cuesta, D., Mora-Motta, D., Chavarro-Bermeo, J. P., Olaya-Montes, A., Vargas-García, C., Bonilla, R., & Estrada-Bonilla, G. (2023). Phosphate-solubilizing bacteria with low-solubility fertilizer improve soil P availability and yield of kikuyu grass. *Microorganisms*, 11(7), Article 1748. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071748>

Tsai, C. C., Chen, Z. S., Kao, C. I., Ottner, F., Kao, S. J., & Zehetner, F. (2010). Pedogenic development of volcanic ash soils along a climosequence in Northern Taiwan. *Geoderma*, 156(1-2), 48-59. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.01.007>

Ugolini, F., & Dahlgren, R. (2003). Soil development in volcanic ash. *Global Environmental Research*, 6(2), 69-81. [https://www.researchgate.net/publication/228548144\\_Soil\\_development\\_in\\_volcanic\\_ash](https://www.researchgate.net/publication/228548144_Soil_development_in_volcanic_ash)

Van-Straaten, P. (2002). *Rocks for crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa*. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF). [http://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/11\\_Rocks\\_for\\_crops.pdf](http://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/11_Rocks_for_crops.pdf)

Velasco, A. I. (2021). *Inoculación de compost con microorganismos solubilizadores de fosfato y su efecto sobre la disponibilidad del fósforo* [Trabajo de grado, Universidad de Almería]. <http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/13510/VELASCO%20SALAS%2C%20ANA-HIS%20ISABEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Velásquez, G., Calabi-Floody, M., Poblete-Grant, P., Rumpel, C., Demanet, R., Condrón, L., & Mora, M. L. (2016). Fertilizer effects on phosphorus fractions and organic matter in Andisols. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(2), 294-309. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000024>

Walpola, B. C., & Yoon, M. H. (2012). Prospectus of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus availability in agricultural soils: A review. *African Journal of Microbiology Research*, 6(37), 6600-6605. <https://doi.org/10.5897/AJMR12.889>

Wang, L., & Nancollas, G. H. (2008). Calcium orthophosphates: Crystallization and dissolution. *Chemical Reviews*, 108(11), 4628-4669. <https://doi.org/10.1021/cr0782574>

Wilches Ortiz, W. A., Ramírez Gómez, M. M., Reyes Méndez, L. M., Pérez Moncada, U. A., Serralde Ordóñez, D. P., & Peñaranda Rolón, A. M. (2022). Hongos formadores de micorrizas arbusculares en caña de azúcar y su relación en calidad y rendimiento de panela. *Centro Azúcar*, 49(3), 78-89. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2223-48612022000300078&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612022000300078&lng=es&tlng=es)

Wyngaard, N., Cabrera, M., Jarosch, K., & Bunemann, E. K. (2016). Phosphorus in the coarse soil fraction is related to soil organic phosphorus mineralization measured by isotopic dilution. *Soil Biology and Biochemistry*, 96, 107-118. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.01.022>

Yousefi, A. A., Khavazi, K., Moezi, A. A., Rejali, F., & Nadiyah, H. A. (2011). Phosphate solubilizing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi impacts on inorganic phosphorus fractions and wheat growth. *World Applied Sciences Journal*, 15, 1310-1318. [https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:nzfpXZ-XtYJ:scholar.google.com/&hl=es&as\\_sdt=0,5](https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:nzfpXZ-XtYJ:scholar.google.com/&hl=es&as_sdt=0,5)

Zaidi, A., Khan, M., Ahemad, M., & Oves, M. (2009). Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria. *Acta Microbiológica et Immunológica Hungarica*, 56(3), 263-284. <https://doi.org/10.1556/amicr.56.2009.3.6>

Zeng, Q., Wu, X., Wang, J., & Ding, X. (2017). Phosphate solubilization and gene expression of phosphate-solubilizing bacterium *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 under different levels of soluble phosphate. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27(4), 844-855. <https://doi.org/10.4014/jmb.1611.11057>

- Zhu, L., Fu, F., & Tang, B. (2018). Coexistence or aggression? Insight into the influence of phosphate on Cr (VI) adsorption onto aluminum-substituted ferrihydrite. *Chemosphere*, 212, 408-417. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.085>
- Zou, X., Binkley, D., & Doxtader, K. G. (1992). A new method for estimating gross phosphorus mineralization and immobilization rates in soils. *Plant and Soil*, 147, 243-250. <https://doi.org/10.1007/BF00029076>