

MICROORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO EN SUELOS

SILVIA JULIANA VARGAS RAMIREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUIMICA
ESPECIALIZACION EN QUIMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2012

MICROORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO EN SUELOS

SILVIA JULIANA VARGAS RAMIREZ

**Monografía presentada como requisito para optar al título de Especialista en
Química Ambiental**

Director:

MARITHZA PARDO

Microbióloga Industrial

Especialista en Química Ambiental

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUIMICA

ESPECIALIZACION EN QUIMICA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2012

DEDICATORIA

A Dios por permitirme culminar una más de mis metas propuestas.

A Mis Padres Humberto y Miryam por darme la oportunidad de seguir formándome tanto personal como profesionalmente.

A todas las personas que forman parte de mi diario vivir y que siempre estuvieron brindándome su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser mi guía, para salir adelante con mis proyectos y metas propuestas.
A mis padres que sin ellos no hubiese sido posible obtener este logro.

A la Universidad Industrial de Santander – UIS por darme la oportunidad de formar parte de esta prestigiosa institución continuando mis estudios y seguirme formando profesionalmente.

A todos los docentes que formaron parte del Programa de estudio, por compartir sus conocimientos y experiencias.

A la Doctora Carolina Guzmán Luna por sus aportes, exigencias, enseñanzas y confianza de permitirme obtener un buen resultado en cuanto a este trabajo de investigación.

A los Microbiólogos Marithza Pardo Casas y Bayron Agualimpia por su tiempo, disponibilidad, apoyo y aportes para el proceso de desarrollo de esta investigación.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 15 |
| 2. OBJETIVOS | 16 |
| 2.1 GENERAL | 16 |
| 2.2 ESPECIFICOS | 16 |
| 3. REFERENTE TEORICO | 17 |
| 3.1 CONCEPTOS BÁSICOS DEL SUELO | 17 |
| 3.2 PROPIEDADES BIOLÓGICAS DEL SUELO | 17 |
| 3.3 ESTRUCTURA | 18 |
| 3.3.1 Textura | 18 |
| 3.4 PERFILES DEL SUELO (<i>Guía para la descripción de suelos- FAO</i>) Figura#1. | 18 |
| 3.4.1 Horizonte O | 18 |
| 3.4.2 Horizonte A | 18 |
| 3.4.3 Horizonte E. | 19 |
| 3.4.4 Horizonte B | 19 |
| 3.4.5 Horizonte C | 19 |
| 3.5 POROSIDAD | 20 |
| 3.6 COLOR | 21 |
| 3.7 TEMPERATURA | 22 |
| 4. FÓSFORO | 23 |
| 4.1 IMPORTANCIA DEL FÓSFORO EN EL SUELO | 23 |
| 4.2 CICLO DEL FÓSFORO | 26 |
| 4.3 FORMAS DEL FÓSFORO EN EL SUELO | 27 |
| 4.3.1 Orgánico | 27 |

| | |
|---|----|
| 4.3.2 Inorgánico | 27 |
| 4.4 ENZIMAS | 28 |
| 4.4.1 Fosfatas. | 30 |
| 4.4.2 Condiciones para producción de fosfatasas. | 32 |
| 4.5 MECANISMOS DE TRANSFORMACIÓN DE FÓSFORO | 33 |
| 4.5.1 Solubilización | 33 |
| 4.5.2 Producción de ácidos orgánicos | 34 |
| 4.5.3 Mineralización. | 35 |
| 4.5.4 Inmovilización | 35 |
| 4.5.5 Oxido-reducción. | 35 |
| 4.6 MICROORGANISMOS ASOCIADOS AL SUELO | 35 |
| 5. GENEROS BACTERIANOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO | 37 |
| 5.1 MICROORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO | 37 |
| 6. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS PARA UN EFECTIVO PROCESO DE SOLUBILIZACIÓN | 41 |
| 7. MECANISMOS BACTERIANOS DE SOLUBILIZACIÓN | 49 |
| 7.1 PRODUCCIÓN DE ÁCIDOS ORGÁNICOS | 49 |
| 7.2 PRODUCCIÓN DE ENZIMAS FOSFATASAS | 53 |
| 8. GENERO BACTERIANO CON MAYOR POTENCIAL PARA SOLUBILIZAR FOSFATO | 56 |
| 9. CONCLUSIONES | 58 |
| BIBLIOGRAFIA | 60 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1: Horizontes del Suelo | 20 |
| Figura 2: División del fósforo en el suelo | 23 |
| Figura 3: Equilibrio del fósforo en el suelo. | 24 |
| Figura 4: Ciclo del fósforo | 26 |
| Figura 5: Clasificación de enzimas | 30 |
| Figura 6: Degradación de Fitina | 31 |
| Figura 7: Reacción catalizada por la enzima fosfatasa | 32 |
| Figura 8: Solubilización de compuestos inorgánicos del fósforo, para la producción de ácidos orgánicos | 33 |
| Figura 9: Diagrama esquemático de movilización del fósforo en el suelo e inmovilización por bacterias | 34 |
| Figura 10. Rangos de pH asociados a la solubilización de fósforo por bacterias | 41 |
| Figura 11: Depósitos económicos y potencialmente económicos de fosfatos en el mundo. | 48 |
| Figura 12: Proceso cualitativo para la determinación de fosfato insoluble | 56 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1: Clasificación de la porosidad del suelo | 20 |
| Tabla 2: Clasificación de los espacios porosos | 21 |
| Tabla 3: Formas de fosfato inorgánico | 28 |
| Tabla 4: Principales microorganismos solubilizadores de fosfato según las condiciones fisicoquímicas del suelo. | 42 |
| Tabla 5: Respuesta aplicación de fósforo en suelos de clima medio en Colombia- (Cultivo de caña panelera) | 45 |
| Tabla 6: Producción mundial de roca fosfórica en el año 1999. | 47 |
| Tabla 7. Cepas de microorganismos productores de ácidos orgánicos | 50 |
| Tabla 8: Ácidos orgánicos y sus rutas biosintéticas en Bacterias Solubilizadoras de Fosfato (BSP). | 53 |

GLOSARIO

ALFISOL: Suelo virgen, suelo con arroz y con ex arrocera en descanso con pastura natural.

EDAFOGÉNICO: Cambios que ocurren en el proceso de formación del suelo, a partir del material original que permite caracterizar el perfil del suelo.

ENTISOL: Suelo virgen de bajo uso citrícola con muestras tomadas en el líneo o zona denominada de plantación.

GLEIZACIÓN: Reducción del hierro por anaerobiosis durante la formación de suelo, con o sin eliminación del hierro así reducido del horizonte en cuestión.

SOLUM: Zona del suelo más activa biológicamente en donde crecen raíces y plantas.

VERTISOL: Suelo virgen y pastura implantada con *Setaria* sp.

RESÚMEN

TITULO: MICROORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO EN SUELOS*

AUTOR: SILVIA JULIANA VARGAS RAMIREZ**

PALABRAS CLAVES: Solubilización, fosfato, ácidos orgánicos, microorganismos solubilizadores, suelos.

DESCRIPCION:

Los microorganismos forman gran parte del suelo y a su vez son indispensables, para completar procesos de transformación de elementos necesarios en la naturaleza. La función que los microorganismos cumplen en procesos como la solubilización de fosfato en suelos, hace parte esencial del desarrollo de las plantas. El fósforo, en su forma orgánica e inorgánica, ayuda que los microorganismos utilicen diferentes mecanismos de transformación como: mineralización, producción de ácidos orgánicos y producción de enzimas fosfatasas, los cuales permiten incrementar la disponibilidad de este elemento para que las plantas lo puedan tomar fácilmente.

El uso frecuente de fertilizantes inmoviliza y disminuye la disponibilidad del fósforo en suelos. Por tal motivo, profundizar acerca del proceso de solubilización de fosfato en suelos, microorganismos que intervienen en este proceso de solubilización como son: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Burkholderia*, *Paracoccus*, *Corynebacterium*, *Moraxella*, *Alcaligenes*, *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Agrobacterium*, *Micrococcus*, *Aerobacter*, *Flavobacterium*, *Mesorhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Xanthomonas* y *Erwinia*, la disponibilidad del fósforo y aplicabilidad de la roca fosfórica de forma directa a nivel mundial, conociendo sus concentraciones (ppm), permiten tener alternativas más amigables con la naturaleza, reduciendo la contaminación ambiental, aumentando la productividad y dejando de un lado el uso de fertilizantes químicos.

Teniendo en cuenta que la problemática existente a nivel mundial por parte del hombre, es la falta de conciencia ambiental; como propósito, se requiere ir cambiando día a día, para permitir no solo liberar la atmósfera de agentes contaminantes, como son los fertilizantes químicos, sino contribuir para el logro de una producción más limpia. De tal forma, que se de uso a los recursos naturales propios del suelo con la ayuda de organismos vivos, que se destacan por cumplir dicha función como es la solubilización de fosfato en suelos, permitiendo la transformación y fácil obtención de este importante elemento para el desarrollo de las plantas.

* Monografía

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director: Marithza Pardo. Microbióloga Industrial

ABSTRACT

TITLE: PHOSPHATE SOLUBILIZING MICROORGANISMS IN SOILS^{*}

AUTHOR: VARGAS SILVIA RAMIREZ JULIANA^{**}

KEYWORDS: Solubilization, phosphate, organic acids, solubilizers microorganisms, soils.

DESCRIPTION:

Microorganisms form a huge part of the ground, and at the same time are crucial, for complete transformation of elements in nature. The role that microorganisms play in processes such as solubilization of phosphate in land makes an essential part of plant development. Phosphorus, as organic and inorganic, it helps the microorganisms that use different mechanisms of transformation as: mineralization, organic acid production and production of phosphatase enzymes, which allows increase the availability of this element to the plants can easily take.

Frequent use of immobilized fertilizer and reduces the availability of phosphorus in land. For that reason further on the process for solubilization of phosphate in land, microorganisms involved in the process of solubilization that: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Burkholderia*, *Paracoccus*, *Corynebacterium*, *Moraxella*, *Alcaligenes*, *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Agrobacterium*, *Micrococcus*, *Aerobacter*, *Flavobacterium*, *Mesorhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Xanthomonas* y *Erwinia*, phosphorus availability and applicability of phosphate rock directly worldwide, knowing their concentrations allow alternatives to be nature friendly, reducing pollution, increasing productivity and leaving aside the use of chemical fertilizers.

Given that the existing problems in the world by man, is the lack of environmental awareness, purpose, is required to be changing day by day to allow the atmosphere not only free of contaminants, such as chemical fertilizers, but contribute to achieving cleaner production. Thus, to be of use to the natural resources of soil with the help of living organisms, which stand to fulfill this role as is the solubilization of phosphate in soils, enabling easy transformation and obtain this important element plant development.

* Monograph

** Faculty of Sciences. School of Chemistry. Director: Marithza Pardo. Industrial microbiologist

INTRODUCCIÓN

Un aspecto importante para mantener un alto rendimiento en cultivos y producción, es la nutrición de las plantas. Los microorganismos que forman parte de la rizosfera juegan un rol muy importante, pues son benéficos en el desarrollo de las plantas y fertilidad del suelo, puesto que intervienen en la toma de nutrientes, controles biológicos contra patógenos y muchas veces sin ellos no se podrían completar los ciclos biogeoquímicos (Kohler *et al*, 2006).

La concentración de fósforo, en algunos suelos es alta, pero esto no quiere decir que se encuentre disponible para microorganismo y plantas, debido a la alta fijación del fósforo y la baja solubilización de compuestos fosforados. En muchos casos, la poca disponibilidad de fósforo se debe a que la composición del suelo contiene aniones de fósforo, los cuales son adsorbidos por los minerales allí presentes, comúnmente: óxidos de aluminio, hierro, carbonatos de calcio, silicatos de aluminio o también pueden variar de acuerdo al pH (Gupta, 2002). Para esto, los microorganismos han demostrado sus habilidades en desarrollar estrategias que permitan aumentar la toma del fósforo en forma inorgánica, por medio del uso de enzimas fosfatasas o producción de ácidos orgánicos, permitiendo que el fósforo se encuentre disponible para que las plantas lo tomen por medio de sus raíces.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La disponibilidad de nutrientes para las plantas es un factor clave para mejorar su rendimiento en cuanto a producción de floración y frutos, pero se debe tener en cuenta que siempre debe existir un equilibrio de aporte nutricional, para que ellas puedan llevar a cabo estos procesos.

Uno de los elementos indispensable en el suelo es el fósforo, ya que gracias a él se llevan a cabo procesos químicos y de desarrollo en los seres vivos; este se puede encontrar en la estructura del ADN de los organismos, formando parte de los componentes orgánicos, minerales y sistemas biológicos. A su vez, se considera que juega un rol muy importante en el metabolismo de los seres vivos, puesto que se encarga de transferir una molécula de ADP, la cual es originada de una molécula de ATP (molécula rica en energía).

La importancia de estudiar el fósforo, aparte de ser un elemento esencial en la composición de los suelos, se enfoca en problemáticas como su baja disponibilidad, dificultando la obtención para las plantas, así como el impacto económico y ambiental negativos que genera. De esta manera, se requieren estudios que profundicen acerca de los géneros bacterianos con mayor potencial para realizar procesos de solubilización, conociendo así mismo el mecanismo empleado para este proceso, contando con parámetros rápidos y eficaces.

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Determinar mediante revisión bibliográfica el género bacteriano con mayor capacidad para solubilización de fosfato.

2.2 ESPECIFICOS

- Revisar los diferentes tipos de suelo en los cuales predominan los microorganismos solubilizadores de fosfato
- Identificar los principales géneros bacterianos solubilizadores de fosfatos en suelos.
- Consultar sobre los diferentes mecanismos bacterianos de solubilización de fosfato.
- Seleccionar el género bacteriano con mayor capacidad solubilizadora, teniendo en cuenta parámetros como: rangos de pH y producción de ácidos orgánicos

3. REFERENTE TEORICO

3.1 CONCEPTOS BÁSICOS DEL SUELO

El suelo se define como “capa superior de la superficie sólida del planeta, formada por meteorización de las rocas, en la que están o pueden estar enraizadas las plantas y que constituye un medio ecológico particular para ciertos tipos de seres vivos”; por otra parte, se define como “mezcla más o menos suelta de pequeños fragmentos de roca y materiales de origen orgánico, junto con líquidos y gases en proporción variable de sus respectivos componentes, con una determinada capacidad productiva”. Para los propósitos de este estudio, debemos tener en cuenta que el suelo posee los elementos indispensables para el desarrollo de las plantas, obteniendo de este los nutrientes, minerales y agua para su sustento (Donoso, 1981). A su vez, existe una clasificación en cuanto a sus propiedades químicas, biológicas y físicas; viéndose las propiedades químicas y biológicas como producto de las propiedades físicas, ya que determinan totalmente su capacidad productiva.

3.2 PROPIEDADES BIOLÓGICAS DEL SUELO

El suelo es caracterizado por ser el soporte de la flora, la fauna y dar origen a numerosas formas de vida, creando así los ciclos biogeoquímicos. Su composición también se ve influenciada por factores existentes como lo son: la humedad, disponibilidad de nutrientes, temperatura, pH, aireación, la intervención del hombre en él y la diversidad de poblaciones microbianas. Esto permite la formación de redes tróficas y ofrece a los organismos su fácil adaptación (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO). Sus propiedades biológicas como la actividad microbiana y enzimática, la biomasa, la presencia de diversas formas de vida y la materia orgánica, constituyen un papel muy

importante ya que desempeñan la función de indicadores de la calidad funcional de un tipo de suelo. La intromisión del hombre influye mucho en el momento de valorar la calidad productiva del suelo, ya que todas estas intervenciones, de una u otra forma, van a influir sobre las propiedades biológicas, originando una serie de cambios en la materia orgánica debido a los diferentes procesos de explotación agrícola.

3.3 ESTRUCTURA

3.3.1 Textura. Se refiere la cantidad constituyente de limo, arena y arcilla dependiendo de las partículas que lo formen: Limo (0,002 – 0,02 mm), arena (0,02 – 2 mm) y arcilla (menor a 0,002mm)

3.4 PERFILES DEL SUELO (*Guía para la descripción de suelos- FAO*) Figura#1.

3.4.1 Horizonte O. Compuesto por materia orgánica, se encuentran saturado gran cantidad de veces, debido a que los residuos orgánicos (musgos, líquenes, hojas, tallos), no han cumplido su proceso de descomposición completamente o por su drenaje de forma artificial. Lo más común en estos horizontes es que se encuentren en la superficie de un suelo mineral o por debajo de la superficie, cabe resaltar que no se debe confundir cuando se realizan lavados del material orgánico y este pasa a un subsuelo mineral ya no sería característico de este horizonte; igualmente sus fracciones con menores del volumen del material orgánico y menos de la mitad de su peso.

3.4.2 Horizonte A. Lo encontramos por debajo del horizonte O ó en la superficie. No poseen estructuras originales de la roca madre. Las intervenciones humanas o con maquinarias le confieren propiedades como acumulación de materia orgánica

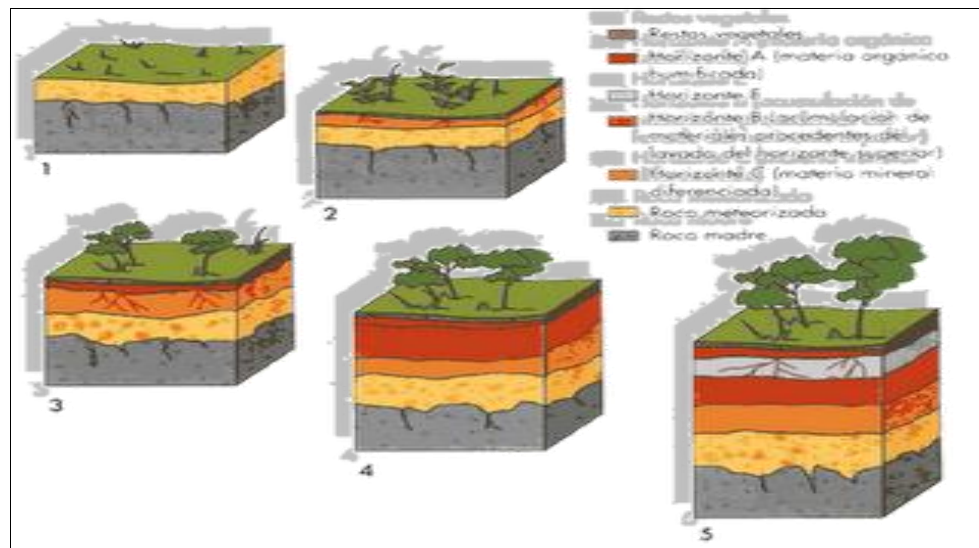
humificadas, también la presencia de colores claros permite que sea identificado como horizonte A.

3.4.3 Horizonte E. Escasea de la estructura original de la roca. Tiene pérdidas de la combinación de algunos componentes como el aluminio, hierro o arcilla, lo que lo hace tener un color más claro debido conjuntamente al poco contenido de materia orgánica que lo conforma. Se encuentra ubicado cerca de la superficie del suelo, encima del horizonte B pero debajo del horizonte A y O, caracterizándose por su grosor en la textura, alto color de pureza, menor intensidad o combinación de las propiedades anteriormente mencionadas.

3.4.4 Horizonte B. Ubicado sub-superficialmente, aunque cuando ocurren procesos de erosión en otros horizontes este queda expuesto en la superficie, no hay que clasificar un horizonte B cuando se forman películas de arcilla sobre las rocas o gleización o cambios edafogenicos. Lo encontramos ubicado debajo del horizonte O, A o E, con carencia de estructura de roca.

3.4.5 Horizonte C. Lo conforman la roca que no ha sido consolidada, sedimentos, materiales geológicos y las capas que contienen acumulaciones de yeso, sílice, carbonatos o sales. Se reconoce porque si los materiales disponibles no satisfacen las necesidades de los horizontes A, O, o E, será determinado horizonte C; su material puede tener una similitud al que dio origen al solum.

Figura 1: Horizontes del Suelo



Fuente: <http://grenbuk.blogspot.com/2010/11/horizontes-del-suelo.html>

3.5 POROSIDAD

Es conocida como los espacios porosos que hay en el suelo, que se encuentra ocupado por agua o aire. Existe un cálculo para determinar la porosidad del suelo, teniendo en cuenta que hay que conocer la densidad real del suelo y la densidad aparente.

$$Porosidad = 100 * \frac{DensidadReal - DensidadAparente}{DensidadReal}$$

Tabla 1: Clasificación de la porosidad del suelo

| | | % |
|---|----------|-------|
| 1 | Muy baja | < 2 |
| 2 | Baja | 2-5 |
| 3 | Media | 5-15 |
| 4 | Alta | 15-40 |
| 5 | Muy alta | > 40 |

Fuente: <http://es.scribd.com/doc/20886047/66/MOTEADOS> - FAO

Tabla 2: Clasificación de los espacios porosos

| | | |
|---|--------------|---|
| I | Intersticial | Controlado por el tejido o arreglo de las partículas del suelo, también conocido como espacios texturales. Se pueden subdividir en espacios simples de empaquetamiento, que se refieren a los espacios entre partículas de arena, y los espacios compuestos que resultan del empaquetamiento de los agregados (peds) no acomodados. Son de forma predominantemente irregular e interconectados, difíciles de cuantificar en el campo. |
| B | Vesicular | Espacios discontinuos de forma esférica o elipsoidal (cámaras) de origen sedimentario o formado por compresión del aire; por ejemplo: burbujas de gas en costras humedecidas después de una fuerte lluvia. Su importancia es relativa en conexión con el crecimiento de las plantas. |
| V | Cavidades | Espacios mayormente irregulares equidimensionales de origen animal, o como resultado de labranza o alteración de otros espacios. Discontinuos o interconectados. Pueden ser cuantificados en casos específicos. |
| C | Canales | Espacios alargados de origen animal o vegetal, son en su mayoría de forma tubular y continua, variando fuertemente en su diámetro. Cuando son más anchos que pocos centímetros (madrigueras), se describen de forma más adecuada en la sección de actividad biológica. |
| P | Planos | La mayoría de planos son espacios extra-pedales, relacionados con superficies de acomodamiento de los agregados (peds) o patrones de agrietamiento. No son persistentes y varían en tamaño, forma y cantidad, dependiendo de la condición de humedad del suelo. Los espacios planares se pueden describir usando el ancho y frecuencia. |

Fuente: <http://es.scribd.com/doc/20886047/66/MOTEADOS> - FAO

36 COLOR

Destacado como una de las más importantes propiedades físicas que permite conocer el tipo de suelo. Sin embargo, esta característica la confieren según el estado de hidratación u oxidación al que se encuentren los compuestos que están en el suelo como: hierro y magnesio.

Los colores azules y grisáceos indican una deficiente aireación y mal drenaje, porque no se realiza el proceso de oxidación completamente en los metales. Colores cafés y rojizos indican buen drenaje y un proceso de oxidación completo. Los suelos “moteados o manchados” son indicadores de recibir oxígeno discontinuamente y un drenaje imperfecto. Finalmente, el color café o negro se debe a la cantidad de materia orgánica presente cuando no hay procesos eficientes de descomposición; los colores se pronuncian un poco más fuertes y su color se va “aclarando” cuando la materia orgánica se descompone de forma completa, ejemplo: Las capas superficiales en los bosques.

3.7 TEMPERATURA

La temperatura tiene gran influencia sobre los procesos biológicos y físico-químicos. Cuando hay bajas temperaturas en los suelos, se disminuye la disponibilidad de los nutrientes en el suelo, para que las plantas los puedan tomar, ocasionando atrasos en cuanto a crecimiento de raíces y germinación. Sin embargo, a altas temperaturas altas también se verían afectadas las plantas, pues se incrementaría la muerte en ellas, por tanto en este caso se realizaría un proceso de evaporación en el agua.

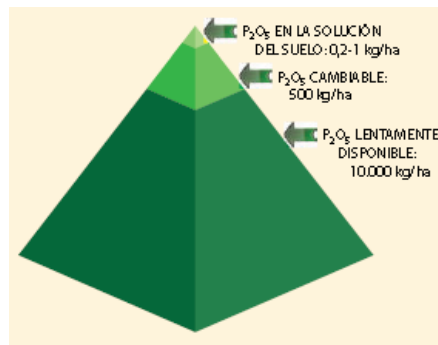
4. FÓSFORO

4.1 IMPORTANCIA DEL FÓSFORO EN EL SUELO

El fósforo es un importante elemento nutricional para los seres vivos, formando parte esencial de las moléculas orgánicas para el desarrollo de los mismos. Es constituyente de los ácidos nucleicos, porta características energéticas e influencia el proceso de los ciclos bioquímicos, permitiendo procesos de respiración, fotosíntesis en plantas ayudando a la activación de intermediarios energéticos. Los ésteres de fosfato actúan en general como portadores energéticos en varias rutas metabólicas y como precursores de los ácidos nucleicos, mientras que los fosfolípidos juegan un papel importante en la integridad y función de las membranas celulares (Calderón-Vásquez *et al.*, 2009; Maathuis, 2009; Sánchez, 2007).

Este elemento lo podemos encontrar de cuatros formas en el suelo en la solución del suelo (asimilable), fijado como arcillo húmico (cambiable o lábil), formando parte de la materia orgánica (precipitado como fosfato cálcico y adsorbido en geles de aluminio y hierro) y finalmente formando parte de la roca madre (no asimilable).
Figura 2.

Figura 2: División del fósforo en el suelo



El fósforo se encuentra entre niveles de 400 – 1200 mg·kg¹ y sus concentraciones como fósforo soluble en el suelo son muy bajas más o menos entre 1ppm. Las mayores reservas de fósforo son: minerales formados durante la geología, rocas o elementos primarios como: Apatitas, oxyapatitas e hidroxapatitas, entre otros. Siendo estas formas insolubles dispuestas en el suelo, cabe resaltar que cuando las condiciones son apropiadas y hay un proceso de transformación, los microorganismos y las plantas aprovechan esta forma ya solubilizado para tomarlo.

Aun así, aunque este elemento no esté disponible en gran cantidad, siempre va a mantener un equilibrio en relación con el suelo, viendo que por la intervención de diferentes mecanismos complejos las plantas pueden llegar a asimilarlo, como se muestra en la figura 3.

Figura 3: Equilibrio del fósforo en el suelo.



Igualmente existe una relación entre el fósforo y la superficie de óxidos hidratados de Mn, Fe y Al, los cuales son poco solubles y asimilables, estas características son propias de los suelos ferralíticos donde se lleva a cabo la acumulación de

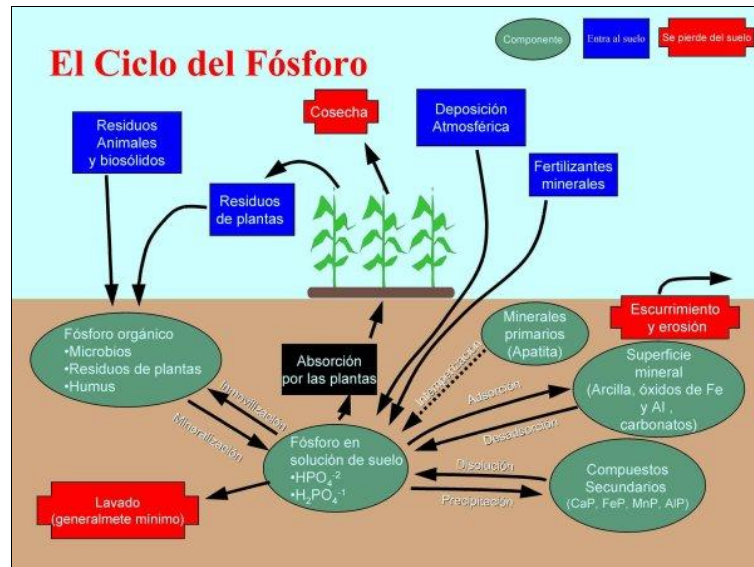
óxidos hidratados e hidróxidos de Fe y la hidratación, demostrando un alto nivel de capacidad para la fijación del fósforo en el suelo (Rodríguez & Fraga, 1999).

Las mayores reservas del fósforo, se encuentran principalmente en los suelos agrícolas debido a la aplicación constante de fertilizantes de fósforo en el suelo; esto no quiere decir que el fosfato que es aportado al suelo se encuentre inmediatamente disponible para las plantas, puesto que este sufre un cambio el cual queda rápidamente inmovilizado, la mayoría de las veces, después de su aplicación y por lo tanto las plantas pierden la oportunidad de tomarlo (Peix *et al.*, 2001). Para que los procesos de precipitación y fijación del fósforo se realicen, debe existir una relación entre factores como el tipo de suelo y pH.

Por razones como las anteriormente nombradas, los suelos tienen su propia caracterización, por ejemplo: En los suelos ácidos, el fósforo es fijado por óxidos libres e hidróxidos de aluminio y hierro, en comparación con los suelos alcalinos que la fijación es realizada por el calcio, causando baja eficiencia de los fertilizantes solubles en fósforo. Según Lindsay, el superfosfato contiene una cantidad suficiente de calcio precipitado a la mitad de su propio estado, en la forma de fosfato dicálcico o fosfato dicálcico dihidratado (Rodríguez *et al.*, 1999).

4.2 CICLO DEL FÓSFORO

Figura 4: Ciclo del fósforo



Fuente:

[http://www.ipni.net/ppiweb/mexnca.nsf/\\$webindex/0D2745E9793640FD06256AAE00136ECB?opendocument&navigator=home+page](http://www.ipni.net/ppiweb/mexnca.nsf/$webindex/0D2745E9793640FD06256AAE00136ECB?opendocument&navigator=home+page) - IPNI

El fósforo es el único elemento que no se puede obtener de la atmósfera, este se caracteriza por no formar compuestos volátiles, que de una u otra forma le permitiría pasar de los océanos a la atmósfera y volver al suelo. Este elemento lo encuentran los seres vivos en forma de fosfato, en los procesos de meteorización de las rocas fosfatadas, de allí pasa al suelo, lo toman las plantas y los animales lo obtienen cuando se alimentan de ellas; cuando estos seres vivos excretan este elemento vuelve al suelo y los microorganismos son los encargados de descomponerlo y los cadáveres para liberarlo en forma de ortofosfatos (H_3PO_4), para que las plantas lo tomen directamente.

Estos fosfatos no quedan solo en el suelo, la mayoría de veces son impulsados por las corrientes de agua (Mar), donde los organismos vivos que hacen parte de

este medio (Peces, aves marinas, algas) dan lugar de este elemento en el fondo formándose así mismo rocas fosfatadas. Una de las maneras en que pueda volver a salir a la superficie, es con la ayuda de movimientos orogénicos; la otra manera es cuando las aves marina toman su alimento (peces), una vez produciendo guano que cae al suelo y los microorganismos realizan su descomposición o también es comúnmente usado como abono en la agricultura por poseer características como liberación de grandes cantidades de fosfatos. IPNI (Internacional Plan Nutrition Institute).

4.3 FORMAS DEL FÓSFORO EN EL SUELO

4.3.1 Orgánico. No se encuentra disponible inmediatamente, aunque se puede encontrar entre un 3 a un 85%, cuando ya ha adquirido un proceso de transformación. Este se obtiene de los restos animales y vegetales que se hallan en el suelo y los cuales por procesos de descomposición bacteriana empiezan a liberar compuestos fosfatados, pasando así a formas disponibles entre el 15-85% del fósforo total del suelo. La mayoría de estos compuestos se destacan por tener muy bajo peso molecular (Arzuaga, 2005). Siendo que este tipo de fósforo debe ser absorbido sobre las arcillas, lo que permitiría adquirir contenidos superiores de fósforo orgánicos en suelos arcillosos en comparación con suelos arenosos o fangos. Las principales formas de fosfatos orgánicos dispuestas son: fosfato de inositol, los fosfolípidos y los ácidos nucleicos, siendo estas de origen microbiano.

4.3.2 Inorgánico. Esta es la forma insoluble no asimilable para las plantas presentes como compuestos de Ca, Fe, Mn, y Al, dificultando un poco su proceso de solubilización.

El ión fosfato, además puede ser directamente absorbido por los coloides que se encuentran en el suelos y formar enlaces que le permitan tener gran estabilidad con los hidróxidos de Ca, Fe, Mn y Al que forman parte de los coloides del suelo.

(Martínez, 2004). La cantidad de estos compuestos en el suelo primordialmente van a depender del pH, origen del suelo y cantidad de materia orgánica disponible. Se encuentra formando minerales, que sin embargo por medio de la meteorización pueden llegar a liberar fosfatos, pero de forma muy lenta.

Formas de fosfato inorgánico, presentando menor solubilidad que los compuestos fosfatados orgánicos. Tabla 3.

Tabla 3: Formas de fosfato inorgánico

| | Denominación | Composición | Características |
|---------------------------|---------------------|--|-------------------|
| Fosfatos de calcio | hidroxiapatita | $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{Ca}(\text{OH})_2$ | mayor abundancia |
| | oxiapatita | $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{CaO}$ | |
| | fluorapatita | $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{CaF}_2$ | mayor abundancia |
| | carbonatoapatita | $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{CaCO}_3$ | |
| | fosfato tricálcico | $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ | |
| | fosfato bicálcico | CaHPO_4 | mayor solubilidad |
| | fosfato monocálcico | $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ | mayor solubilidad |
| Fosfatos de hierro | vivianita | $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ | |
| | estrengita | $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | |
| Fosfatos de Al | variscita | $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | |

Fuente: Adaptado de Tsai & Rosetto, 1992

4.4 ENZIMAS

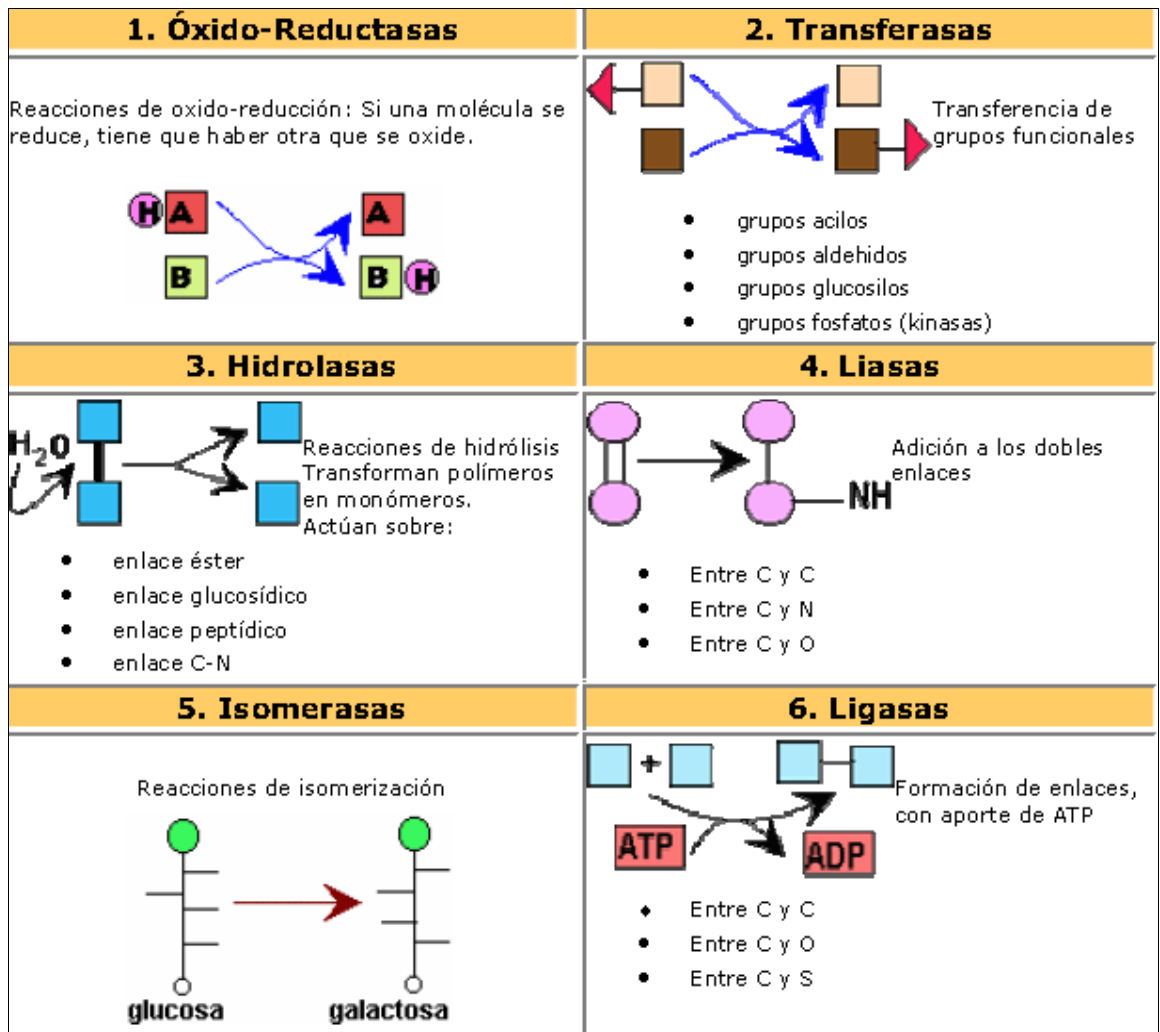
En el suelo existe cantidad de compuestos que necesitan de la actividad de los microorganismos para pasar de formas compuestas a simples y permitir de una u otra forma, su transformación para que las plantas u otros organismos vivos allí presentes los puedan tomar fácilmente. Los organismos de origen animal (bacterias, hongos, protozoarios) y vegetal (raíces, residuos, plantas) (Gianfrenda & Bollag, 1996), contienen componentes intracelulares y extracelulares que

ofrecen una actividad enzimática, realizando actividades asociadas entre factores bióticos y abióticos. Su funcionamiento en el suelo y en los ecosistemas no sería posibles si no existiera un proceso enzimático que ayudará a transformar los elementos que están en formas inorgánicas e insolubles no disponibles para los organismos vivos que forman parte de este medio.

Las enzimas se destacan por llevar a cabo las transformaciones bioquímicas donde ocurren procesos de descomposición, desdoblamiento, mineralización, entre otros (Acosta *et al.*, 2007); Estos procesos son de gran influencia en los suelos, ya que permiten mostrar indicadores en cuanto medidas de actividad microbiana, productividad, indicadores de potencial en cuanto a presencia de contaminantes como: fertilizantes químicos, metales o realizar comparaciones de efectos de desempeño entre microorganismos en estudios.

Los enzimas se han agrupado según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, 1979) y la Unión Internacional de Bioquímica, principalmente en seis clases: Oxidorreductasas, Hidrolasas, Liasas, Transferasas e Isomerasas (Cuadro 1). Estas designaciones dependen de los sustratos sobre los cuales ejercen (Raisman & González, 2004). Figura 5.

Figura 5: Clasificación de enzimas



Fuente: <http://enfenix.webcindario.com/biologia/molecula/enzimas.html>. (Raisman & González, 2004)

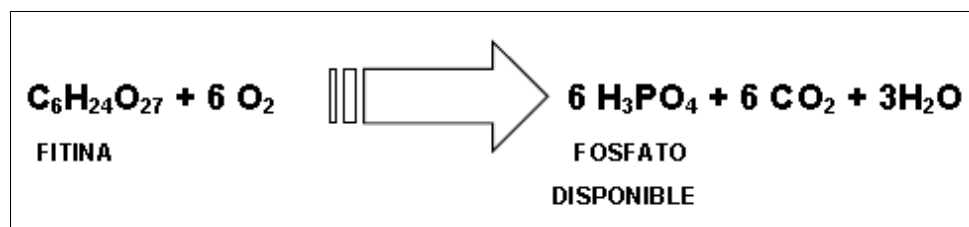
4.4.1 Fosfatas. Las enzimas fosfatasas son las encargadas de verificar reacciones de hidrólisis, a partir de polímeros para la obtención de monómeros, son producidas por lo microorganismos intracelularmente. Cuando hay bajos niveles de fósforo en el suelo estas van a ser liberadas, destacándose por ser resistentes a procesos de desnaturalización térmica, proteólisis y deshidratación, durante largos periodos de tiempo, mientras haya presencia de coloides y arcillas. Su actividad va aumentar en la rizósfera, dependiendo de la edad de la planta, aporte

atributivo por parte de la población microbiana en las raíces (Tarafdar & JungK, 1987 citados por Yoshioka, 2005).

Teniendo en cuenta lo dicho por la Comisión de Enzimas de la Unión Internacional de Bioquímica, todos los tipos de enzimas fueron clasificados según el compuesto y tipo de enlace sobre el cual actúen. Por ejemplo, Las enzimas fosfatasas van actuar sobre enlaces tipo Ester, los cuales se dividen en diesterfosfato hidrolasas, trifisfato monoester hidrolasas, monoesterfosfato, triesterfosfato hidrolasas hidrolasa, difosfato monoester hidrolasas (García *et al.*, 2003).

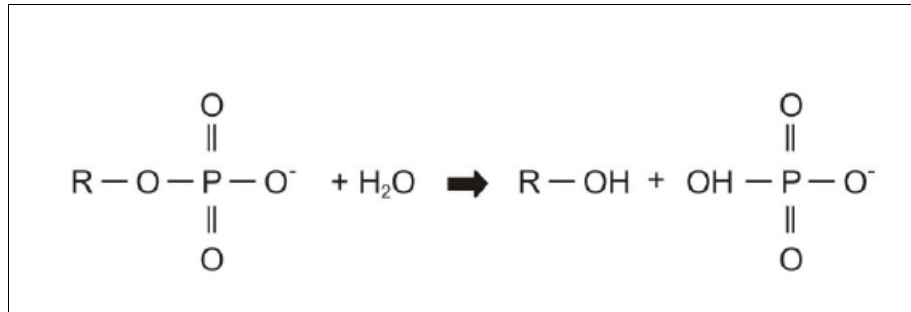
Existe una división dentro del grupo de las monoesterfosfato hidrolasas: Fosfatasas ácidas como fosfomonoesterasa ácida y *fosfatasas alcalinas como fosfomonoesterasa alcalina*, siendo estas enzimas inespecíficas encargadas de catalizar la hidrólisis del fósforo orgánico del enlace éster (C-O-P), permitiendo disponibilidad del fósforo inorgánico y así mismo pueda ser asimilable (H_2PO_4 , HPO_4^{2-}) (Figura 6). (Begonia., 2004). Tienen una diferencia y es que la fosfatasas (Figura 7) alcalina presenta un pH de a 10 en comparación de la fosfatasa ácida que su pH es de 4 a 6.5, pero puede actuar y encontrarse simultáneamente en el suelo, se pueden ver afectadas por factores como: cantidad disponibilidad de fósforo, Contenido de materia orgánica y pH (Acosta *et al.*, 2007).

Figura 6: Degradación de Fitina



Fuente: Alexander, 1987

Figura 7: Reacción catalizada por la enzima fosfatasa



Fuente: Pant & Warman, 2000

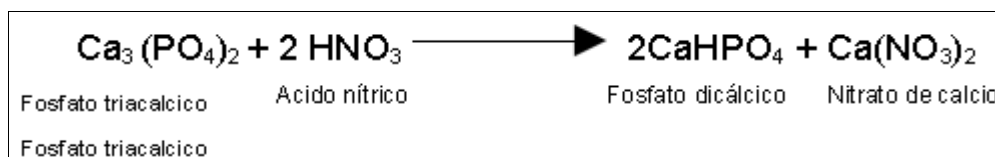
4.4.2 Condiciones para producción de fosfatasas. Para que exista producción y actividad de las enzimas fosfatasas, se debe tener en cuenta una serie de factores que van conjuntamente relacionados para poder actuar, entre ellos están: Velocidad del proceso de mineralización del fósforo en forma orgánica con relación al pH del suelo; ya que si se observan pH muy altos o muy bajos, estos cambios bruscos van a producir la desnaturalización de la enzima y conllevar a su inactivación. Igualmente estos cambios pueden perturbar el carácter iónico de los grupos carboxilo y amino en la superficie proteica, afectando así mismo las propiedades de la enzima.

Para su producción deben estar disponibles varias fuentes de fosfato y fósforo orgánico en el suelo como: humus, coloides, residuos vegetales, estiércol o materia orgánica. Cabe resaltar que su síntesis se da de acuerdo a la liberación al medio exterior y esta va a depender de la disponibilidad de fósforo que exista en ese, y aunque el fósforo en forma soluble contribuye a la producción enzimática, su adición al suelo puede llegar a disminuir en gran parte su actividad (Gómez, 2004).

4.5 MECANISMOS DE TRANSFORMACIÓN DE FÓSFORO

4.5.1 Solubilización. Es el proceso esencial en el cual los microorganismos son intermediarios para que las plantas puedan llevar a cabo sus procesos de fotosíntesis, ya que por medio de este proceso las plantas pueden asimilar los compuestos inorgánicos insolubles, que se encuentran dispuestos en el suelo. La producción de ácidos orgánicos como el ácido sulfúrico y el ácido nítrico, son el principal medio para la solubilización mediante el proceso conocido como quelación (Figura 8)

Figura 8: Solubilización de compuestos inorgánicos del fósforo, para la producción de ácidos orgánicos

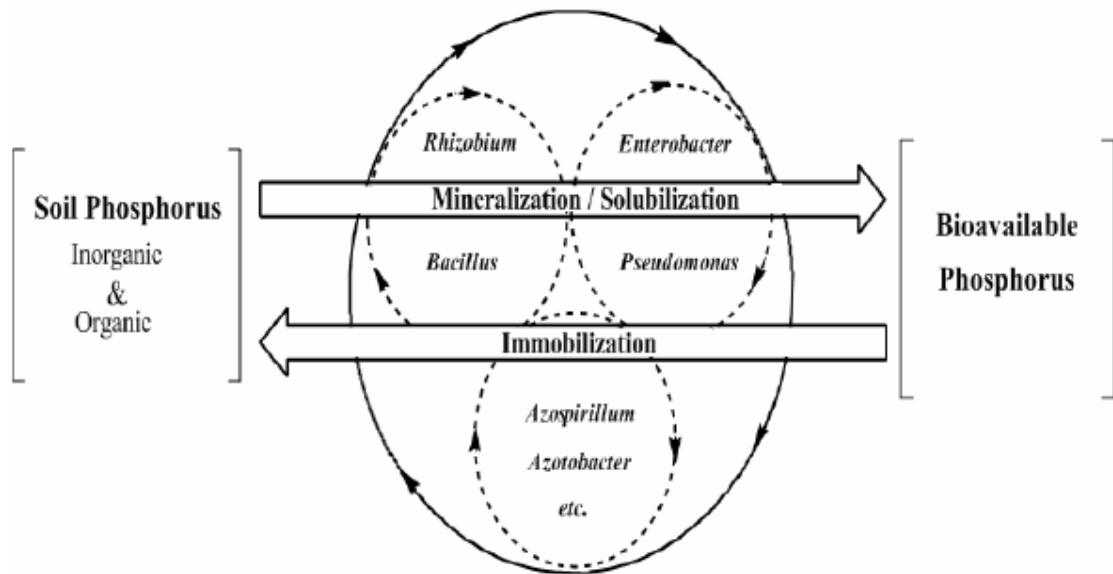


Fuente: Alexander, 1987

Hay dos formas en que se produce la solubilización: mediante la quelación de compuestos fosfatos insolubles, o por medio de la acción de los microorganismos con la producción de ácidos orgánicos. Los procesos de solubilización se ven favorecidos por niveles bajos de pH, alto contenido de materia orgánica, bajo contenido de calcio y la cantidad de fósforo disponible en el suelo (Guerrero, 1996),

Relación con los exudados de las raíces con los ligandos orgánicos (Figura 9), que pueden llegar alterar la concentración del fósforo en la solución del suelo (Hinsinger, 2001).

Figura 9: Diagrama esquemático de movilización del fósforo en el suelo e inmovilización por bacterias



4.5.2 Producción de ácidos orgánicos. La producción de ácidos orgánicos se da cuando los microorganismos realizan los procesos de solubilización del fósforo, los cuales actúan sobre compuestos de fosfato inorgánico insoluble: fosfato dicálcico, fosfato tricálcico, roca fosfórica e hidroxiapatita. Por la descomposición de la materia orgánica se producen ácidos orgánicos de bajo peso molecular como: ácido cítrico, oxálico, succínico, láctico, acético, isovalérico, isobutírico. El tipo y la cantidad de ácido que se produzca van a depender de los tipos de microorganismos que intervengan en este proceso de solubilización. La presencia de los ácidos orgánicos causan un descenso de pH aproximadamente a 2, sin embargo con estos valores se puede llevar a cabo el proceso de solubilización. Sin embargo estudios realizados, resaltan que la producción de ácidos orgánicos forman complejos solubles con iones de metales como: Al^{3+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , los cuales se encuentran asociados al fósforo soluble, reduciendo su adsorción y permitiendo que este quede en forma disponible (Rashid *et al.*, 2004).

4.5.3 Mineralización. Son procesos de cambio en los compuestos de forma orgánica a forma inorgánica, realizada por la descomposición que realizan los microorganismos. Estos procesos de mineralización se ven beneficiados por altas temperaturas, acidez en valores neutros que ayuden a la liberación del fósforo y aumento en el pH. Este proceso se basa en tener una relación directamente con el sustrato, teniendo en cuenta que depende de la cantidad de fósforo orgánico que haya disponible, a mayor cantidad de sustrato el proceso de mineralización va a ser más rápido y eficiente.

4.5.4 Inmovilización. Se basa en la absorción de un nutriente que se encuentra en forma disponible por parte de los microorganismos y estos se encargan de convertirlo en un elemento orgánico no disponible.

4.5.5 Oxido-reducción. Esta reacción es esencial para las plantas, para poder tomar los nutrientes asimilables que se encuentran como reserva orgánica (Humus) en el suelo. Esta reacción la realizan los microorganismos utilizando el fosfito y transformándolo en fosfato en el interior de la célula.

4.6 MICROORGANISMOS ASOCIADOS AL SUELO

Las bacterias, hongos, microalgas y protozoos son los microorganismos y componentes más importantes del suelo, debido al rol que desempeñan en la transformación de productos y facilitando la disponibilidad de los nutrientes para que las plantas puedan llevar a cabo sus diferentes procesos de desarrollo. Estos beneficios para los productos que de ellas se obtienen, y más específicamente en procesos de explotación agrícola.

Según Alexander (1997) en estudios realizados, determinan que la rizosfera es la fracción de suelo donde se encuentra mayor actividad microbiana, debido a la existencia de una gran cantidad de población Heterotrófica. Los estudios muestran

comparaciones con las poblaciones existentes en los suelos donde no hay raíces, siendo esto un punto clave para el desarrollo de los ecosistemas, y viendo las diferentes interacciones que permiten el incremento de disponibilidad de nutrientes minerales para las plantas.

Kleupfel (1993), Kennedy (1995), Barea (1998) y Bowen (1999) Resaltan acerca de las principales funciones para procesos de transformación, en asociaciones entre microorganismos y raíz son:

- Suministro directo de nutrientes por medio de la fijación de nitrógeno.
- Transformación de compuestos inorgánicos a formas orgánicas, que la planta si puede fácilmente asimilar por medio de procesos de mineralización.
- Solubilización de compuestos inorgánicos (fosfato tricálcico o fosfato monocálcico facilitando) procesos de absorción por las plantas.
- Cambios químicos en compuestos inorgánicos debido a procesos de oxidación y reducción. Ejemplo, oxidación del azufre mineral a sulfato. Oxidación del nitrógeno amoniacal a nitrato.
- Mejoramiento de la asimilación de agua, nutrientes, capacidad de desarrollo, debido al aumento radicular en la planta.
- Control de fitopatógenos.
- Reacciones de antagónicas.
- Propiedades físicas del suelo mejoradas.

5. GENEROS BACTERIANOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO

5.1 MICROORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FOSFATO

Naturalmente, se observa que la solubilización de fosfato por parte de los microorganismos ocurre en la rizosfera, siendo las bacterias más efectivas en procesos de solubilización de fosfato en comparación con los hongos (Alam *et al.*, 2002), constituyendo las bacterias un 1 a 50%, mientras que los hongos solubilizadores solo el 0.1 a 0.5% de la población (Chen *et al.*, 2006).

La literatura reporta entre los principales microorganismos que intervienen en la obtención de fósforo a las cepas bacterianas: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium* y *Enterobacter* y hongos como *Penicillium* y *Aspergillus*, destacándose por demostrar mayor potencial solubilizador de fosfato. Entre ellas se resaltan las especies de bacterias más importantes: *B. megaterium*, *B. circulans*, *B. subtilis*, *B. polymyxa*, *B. sircalmous*, *Pseudomonas striatay* *Enterobacter* (Whitelaw, 2000), constituyendo continuamente el 30% de la población de microorganismos que forman la rizosfera, (Rodas, 2006).

H. Rodriguez y R. Fraga en el año 1999, reportan la existencia de 12 géneros de bacterias con la capacidad de solubilizar fosfato, encontrándose entre ellos: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Burkholderia*, *Achromobacter*, *Agrobacterium*, *Micrococcus*, *Aerobacter*, *Flavobacterium*, *Mesorhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum* y *Erwinia*, beneficiando en gran parte al proceso de solubilización de fosfato, encontrándose la mayor parte en la rizosfera y en el suelo.

Aún así, en estudios realizados por (Kumar) en el año 2001, dice que se han aislado de distintos suelos bacterias solubilizadoras de fosfato pertenecientes a los géneros de: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Agrobacterium*, *Burkholderia*,

Achromobacter, *Micrococcus*, *Aerobacter*, *Flavobacterium* y *Erwinia*, de igual forma como lo reportan (H. Rodríguez & R. Fraga). Estos microorganismos se desarrollan en medios de cultivos con apatita, materiales insolubles, fosfato tricálcio, utilizándolas como única fuente de carbono de igual manera solubilizan gran parte de estos elementos y los liberan en una cantidad superior a su demanda nutricional común. Algunas especies de estos géneros nombrados anteriormente, han sido empleados como biofertilizantes debido a su potencial de solubilización de fosfato, entre ellos están: *Pseudomonas striata*, *Rhizobium leguminosarium*, *Rhizobium loti*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus polymyxa*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus pulvifaciens*, *Bacillus circulans*.

Cabe resaltar que se han encontrado datos de algunos estudios, los cuales exponen que los géneros bacterianos como: *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Rhizobium* se caracterizan por tener mayor potencial de solubilización de fosfato. Igualmente, muchas bacterias solubilizadoras de fósforo que forman parte del suelo, no se encuentran disponibles lo suficientemente para luchar con las bacterias que ya están una vez establecidas en diferentes partes de la rizosfera. Por esta razón, es indispensable inocularlas con un mayor grado de concentración, para que puedan realizar una eficiente y alta solubilización del fósforo. Principalmente se referencia el género bacteriano *Pseudomonas*, debido a los efectos favorables que presenta cuando se inocula en suelos. Estos efectos benéficos trabajan sobre las plantas en sus procesos de segregación de reguladores de crecimiento como: Citoquininas, giberelinas, auxinas, aumenta su producción, mejora su nutrición mineral, sus procesos de germinación, empleo de agua y desarrollo de raíces.

Hanke el año 2005 reporta que *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Aerobacter* son géneros eficientes movilizadores de fosfato en la rizosfera, teniendo en cuenta sus condiciones físicas y la composición orgánica que presentan en los abonos orgánicos fermentados, constituyendo así un 10% de la población bacteriana que activamente realiza estos procesos de solubilización. Hiraishi y Morishima en el

año 1990 reporta que bacterias como *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Pseudomonas comamonas*, *Flavobacterium cytophaga*, *Moraxella*, *Xanthomonas*, *Paracoccus*, *Bacillus*, *Corynebacterium* y otro grupo de bacterias Gram. positivas, se recalcan por acumularse en polifosfato de lodos activados.

Primordialmente, se debe tener en cuenta que sin la presencia y acción de estos microorganismos, no sería factible llevar a cabo procesos que son fundamentales en la naturaleza como: procesos de solubilización de fósforo, producción de antibióticos y fijación de nitrógeno. Esto conlleva a poder obtener beneficios ambientales, económicos, que permiten aumentar los rendimientos de producción y crecimiento de las plantas, disminución de emisiones del gas producido por efecto invernadero y reducción de costos en fertilizantes. Lo resalta (Mohammad Y) en su estudio realizado en 2009, donde concluye que los géneros de bacterias que realizan estos procesos benéfico son: *Azospirillum sp*, *Pseudomonas sp*, *Bacillus sp*, *Azotobacter sp*, *Acetobacter sp*. Teniendo en cuenta los estudios realizados y sus revisiones, se generaliza principalmente que las cepas de bacterianas solubilizadores de fosfato potenciales son: *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Enterobacter*, *Bacillus megaterium*, *B. subtilis*, *B. polymyxa*, *B. circulans*, *B. striata* (Whitelaw, 2000).

Muchos géneros bacterianos tienen la capacidad solubilizadora de fosfato en forma inorgánica, pero en particular existe un interés común entre (Halder & Chakrabartty, 1993; Surange & Kumar, 1993) los cuales realizaron comparaciones entre los diferentes géneros bacterianos con otras habilidades. Claro ejemplo fue la fijación de nitrógeno atmosférico; entre ellos se destacaron principalmente *Azospirillum lipoferum* o *Azotobacter chroococcum*, que además de fijar el nitrógeno, mostraron la habilidad de promover el crecimiento vegetal por medio de la solubilización de fosfatos inorgánicos.

Además de las bacterias fijadoras de nitrógeno en asociaciones simbióticas con leguminosas, los géneros *Bradyrhizobium* y *Rhizobium* demostraron también tener capacidad de solubilizar fósforo inorgánico (Kumar *et al.*, 1993).

6. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS PARA UN EFECTIVO PROCESO DE SOLUBILIZACIÓN

Los microorganismos solubilizadores de fosfato se caracterizan por ser aerobios, pero cabe resaltar que también existen algunos microorganismos mesófilos, heterótrofos y facultativos con esta capacidad de solubilización de fosfato. Novo en el 2003 resalta que este proceso de asimilación de fósforo por parte de las plantas se encuentra influenciado por los niveles de pH en el suelo, pues a valores entre 6.5 a 7 se considera benéfico para la ocurrencia de este proceso, en comparación de suelos muy ácidos, ya que este proceso de fijación de fosfato sería menor. En la Fig 10 se observa la relación que existe entre los diferentes rangos de pH que se asocian al proceso de solubilización por bacterias.

Figura 10. Rangos de pH asociados a la solubilización de fósforo por bacterias



Teniendo en cuenta investigaciones realizadas acerca del proceso de solubilización de fosfato, se ha podido conocer que los factores como pH, temperatura, tipo de suelo, concentración de fósforo disponible y tipo de cultivo, entre otros, inciden para que este proceso pueda ocurrir de forma eficiente. Tabla 4.

Tabla 4: Principales microorganismos solubilizadores de fosfato según las condiciones fisicoquímicas del suelo.

| Cultivo/ Especie (órgano) | pH | Tipo de suelo | T° - C | Contenido de P | Concentración de Fósforo (ppm) | Microorganismos Solubilizadores de Fosfato |
|--|---------------|--|---------------|---------------------------|---|---|
| Trigo (toda la parte aérea) | 5.5 – 7.0 | Arcillosos | 11 – 18 °C | 0.3 – 0.5 | 35 -50 ppm | <i>Pseudomonas fluorescens,</i> <i>Pseudomonas aeruginosa,</i> <i>Bacillus polymyxa,</i> <i>Bradhyrhizobium sp,</i> <i>Mesorhizobium mediterraneum.</i> |
| Maíz (hoja madura) | 6.6. – 7.4 | Arcillosos – ricos en materia orgánica | 25 – 30 °C | 2.7 – 3.5 | 35 – 50 ppm | <i>Pseudomonas fluorescens,</i> <i>Pseudomonas aeruginosa,</i> <i>Bacillus polymyxa,</i> <i>Bradhyrhizobium sp,</i> <i>Mesorhizobium mediterraneum</i> |
| Remolacha (hoja madura) | 5.5 – 6.5 | Arcillosos – arenosos | 13 – 16 °C | 4 – 6 | 35 – 50 ppm | <i>Pseudomonas fluorescens,</i> <i>Pseudomonas aeruginosa,</i> <i>Bacillus polymyxa,</i> <i>Bradhyrhizobium sp,</i> <i>Mesorhizobium mediterraneum</i> |
| Tomate (hoja madura) | 5.8 – 6.8 | Arcillosos – ricos en | 15 – 29 °C | 4 – 5.5 | 35 – 50 ppm | <i>Pseudomonas fluorescens,</i> <i>Pseudomonas aeruginosa,</i> <i>Bacillus polymyxa,</i> <i>Bradhyrhizobium sp,</i> |

| | | | | | | |
|--------------------------|-----------|------------------|------------|-----------|-------------|--|
| | | materia orgánica | | | | <i>Mesorhizobium mediterraneum</i> |
| Algodón (hoja madura) | 6.2 – 7.2 | Arcillosos | 27 – 30 °C | 3.6 – 7 | 35 – 50 ppm | <i>Pseudomonas fluorescens, Pseudomonas aeruginosa, Bacillus polymyxa, Bradhyrhizobium sp, Mesorhizobium mediterraneum</i> |
| Alfalfa (hoja madura) | > 6.5 | Arcillosos | 28 – 30 °C | 3.5 - 5 | 35 – 50 ppm | <i>Pseudomonas fluorescens, Pseudomonas aeruginosa, Bacillus polymyxa, Bradhyrhizobium sp, Mesorhizobium mediterraneum</i> |
| Manzana (hoja madura) | 4.5 – 9.0 | Arenosos | 15 – 25 °C | 2.2 – 2.8 | 20 – 30 ppm | <i>Rhizobacter, Flavobacterium, Micrococcus, Pseudomonas putida, Pseudomonas fluorescens, Bacillus, Rhizobium.</i> |
| Naranja (hoja madura) | 5.5 - 7.0 | Arenosos | 13 – 30 °C | 2.4 – 3.5 | 20 – 30 ppm | <i>Rhizobacter, Flavobacterium, Micrococcus, Pseudomonas putida, Pseudomonas fluorescens, Bacillus, Rhizobium.</i> |

Fuente: Dakora & Phillips, 2002 – Fernández *et al*, 2005 – FAO.

De igual manera, la presencia de materia orgánica y el hecho de usar suelos dedicados a la agricultura con posibles adiciones de fertilización fosfatada, hacen que la solubilización de fosfato incida sobre los microorganismos, para que estos accionen. Sin embargo, se ha considerado que los suelos de tipo arcilloso retienen mayor cantidad de fósforo en comparación con los suelos tipo arenoso.

En Colombia hay una característica significativa en cuanto a disponibilidad de fósforo se refiere, puesto que en cultivos que se dan en temperaturas medias, los valores de fósforo asimilable son bajos, entre esos encontramos: 50% en cultivos de caña, 76% Plátano y presentando altas concentraciones de fósforo asimilable solo un 10% en cultivos de piña. Es entonces un claro ejemplo para resaltar que los cultivos en clima o temperaturas medias sufren en gran parte de deficiencia de fósforo asimilable.

De igual forma, el contenido de fósforo total en zonas productoras de caña panelera. Por lo general los valores de fósforo total tienden a ser mayores de 1000ppm, en comparación al fósforo asimilable, el cual se encuentra alrededor de los 10ppm siendo este un bajo contenido (Bray & kurtz, 1945). En Nariño se indica que la deficiencia de fósforo en cultivos de caña panelera se presentan en un 78%, al igual sus reservas de fósforo y su concentración de fósforo orgánico son: 535ppm y 67ppm, respectivamente. Considerándose muy bajas en comparación a las concentraciones que se pueden presentar en suelos de piso frío (835ppm P-total y 99ppm P- orgánico), siendo la erosión en suelos, una de las principales causas de deficiencia en reservas de fósforo total y orgánico para suelos de climas medios.

Hoy día en Colombia se ha tenido la oportunidad de realizar varios experimentos que han servido como base para determinar las fuentes, dosis y épocas para la aplicación del fósforo en cultivos de caña panelera. Se ha demostrado que suelos

con contenidos menos de 10ppm, arrojan respuestas positivas con respecto a producción de panela, véase tabla 5.

Tabla 5: Respuesta aplicación de fósforo en suelos de clima medio en Colombia- (Cultivo de caña panelera)

| Localidad-departamento | P(ppm) Bray II | Rendimientos Sin P (CPH) | Mejor dosis de P ₂ O ₅ (kg/ha) | Rendimiento en CPH |
|---------------------------|-------------------|-----------------------------|---|-----------------------|
| Cocorná-Antioquia | 1,5 | 69 | 300 | 136 |
| Barbosa-Santander | 2,1 | 126 | 200 | 173 |
| Barbosa-Santander | 2,1 | 76 | 50 | 108 |
| Amagá-Antioquia | 2,3 | 91 | 75 | 113 |
| Cocorná-Antioquia | 2,8 | 96 | 150 | 152 |
| Barbosa-Antioquia | 2,8 | 112 | 150 | 193 |
| Bolívar-Antioquia | 3,0 | 155 | 135 | 211 |
| Bolívar-Antioquia | 3,0 | 64 | 150 | 130 |
| Barbosa-Antioquia | 3,2 | 119 | 150 | 198 |
| Amagá-Antioquia | 3,2 | 166 | 150 | 162 |
| Barbosa-Santander | 3,4 | 50 | 50 | 81 |
| Guepsa-Santander | 3,9 | 50 | 200 | 71 |
| Vélez-Santander | 4,4 | 64 | 200 | 141 |
| Guepsa-Santander | 6,3 | 87 | 100 | 69 |
| San Benito-Santander | 6,8 | 113 | 200 | 79 |
| Vegachí-Antioquia | 9,0 | 27 | 135 | 100 |
| Puente Nacional-Santander | 9,3 | 96 | 100 | 131 |
| Guepsa-Santander | 9,7 | 68 | 50 | 86 |
| Venecia-Antioquia | 10,0 | 106 | 135 | 125 |
| Rango | 1,5-10,0 | 50-156 | 50-300 | 69-198 |
| Promedio | 4,6 | 61,7 | 141 | 129,8 |
| San Benito-Santander | 13,6 | 65 | 100 | 72 |
| Vegachí-Antioquia | 18,0 | 196 | 150 | 191 |
| Vélez-Santander | 24,8 | 109 | 100 | 131 |
| Rango | 13,6 -24,8 | 65-196 | 100-150 | 72-191 |
| Promedio | 18,8 | 123 | 116,6 | 144,6 |

CPH = Cargas de panela por hectárea. Valor estimado en base a Brix-tone-ladas de caña por hectárea y porcentaje de extracción.

Fuente: Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible - FAO Capítulo 1.

Navarro Q, Rey P en el 2009 resaltan la problemática que se ven también en los cultivos de palma, debido a enfermedades en los cultivos los cuales tienen repercusiones en cuanto a la producción de cultivos y la muerte de un gran número de palmas por hectárea. En cuanto a problemas nutricionales se enfatiza sobre la deficiencia de fertilización con abonos químicos, presentándose como productos de mala calidad, ya que no contribuyen al aporte de microelementos y

materia orgánica necesaria para los suelos. Como consecuencias se obtiene la pérdida de fertilidad en los suelos, un aumento en la conductividad y salinidad las cuales ayudan a la aparición de enfermedades en los cultivos (Zaragoza, 2009).

Fertilizantes fosfatados solubles en agua son la solución para recuperar los niveles de fósforo que no están disponibles en los suelos trópicos y subtropicales en África, América Latina y Asia, ya que por lo general los suelos son tipo ácidos y se caracterizan por tener baja fertilidad natural. Al igual la productividad de los cultivos es de bajo rendimiento, y están sujetas a la degradación de las tierras a causa de prácticas agrícolas de forma inadecuada, como la deforestación y sobrepastoreo que no permite la fijación de fósforo y nitrógeno. Una de las soluciones es la aplicación del fósforo para mejorar sus niveles en el suelo y obtener altos rendimientos de producción en el desarrollo de las plantas y mejorar su degradación. (Utilización de las Rocas Fosfóricas para una Agricultura Sostenible- FAO).

Es importante saber que el fosfato es el elemento de interés en las rocas, cuanto mayor sea su contenido en forma de apatita, mayor es su potencial económico. La literatura ha reportado que la mayor producción de roca fosfórica a nivel mundial se encuentra en países de África, Marruecos, China y Estados Unidos, viendo que a pesar de conformarse por factores como hierro, aluminio, cloruros y carbonatos, estos no van a tener su misma utilidad cuando la roca sea de uso directo en comparación a que si es usado como fertilizante (Gremillion & McClellan, 1975; McClellan & Gremillion, 1980; Van Kauwenbergh & Hellums, 1995). Sin embargo, se puede decir que a nivel mundial no existe una base completa y confiable acerca del consumo y producción de la roca fosfórica para la aplicación de forma directa; aunque se pueden encontrar pero sus valores pueden ser variables, asegurando que solamente es utilizada en suelos ácidos cercanos a minas.

Para el año 1999 se presentaron datos confiables acerca de los cuatro productores mundiales de roca fosfórica, destacándose entre ellos: China, Marruecos, Estados Unidos de América y la Federación Rusa. (Tabla 6).

Tabla 6: Producción mundial de roca fosfórica en el año 1999.

| | Producción (1 000 toneladas) | Total mundial % |
|-------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| Estados Unidos de América | 40 867 | 28,1 |
| China | 30 754 | 21,1 |
| Marruecos y Sahara Occidental | 21 986 | 15,1 |
| Federación Rusa | 11 219 | 7,7 |
| Subtotal | 104 826 | 72,0 |
| Túnez | 8 006 | 5,5 |
| Jordania | 6 014 | 4,1 |
| Brasil | 4 301 | 2,9 |
| Israel | 4 128 | 2,8 |
| Sudáfrica | 2 941 | 2,0 |
| Siria | 2 084 | 1,4 |
| Senegal | 1 879 | 1,3 |
| Togo | 1 715 | 1,2 |
| Subtotal | 135 894 | 93,4 |
| India | 1 623 | 1,1 |
| Angelia | 1 093 | 0,8 |
| Egipto | 1 018 | 0,7 |
| México | 955 | 0,7 |
| Kazakistán | 900 | 0,6 |
| Finlandia | 734 | 0,5 |
| Vietnam | 710 | 0,5 |
| Islas Christmas | 683 | 0,5 |
| Islas Naurú | 604 | 0,4 |
| Irak | 415 | 0,3 |
| Venezuela | 366 | 0,3 |
| Canadá | 350 | 0,3 |
| Australia | 145 | 0,1 |
| Uzbekistán | 139 | <0,1 |
| Zimbabwe | 124 | <0,1 |
| Corea del Norte | 70 | <0,1 |
| Sri Lanka | 30 | <0,1 |
| Perú | 15 | <0,1 |
| Colombia | 4 | <0,1 |
| Total Mundial | 145 472 | 100,0 |

Fuente: Mew, 2000

Al igual que países como China, Egipto, Jordania, Israel, Perú, entre otros continúa aplicándola de forma directa y se espera, que siga siendo producida y utilizada por países como India, Colombia, Venezuela, Sri Lanka.

Figura 11: Depósitos económicos y potencialmente económicos de fosfatos en el mundo.



Fuente: U.S. Bureau of Mines. 2001.

Mapa con los depósitos de roca fosfórica que se encuentran actualmente en explotación, que han sido explotados y los que se encuentran con potencial para realizar futuras explotaciones. (Figura 11)

7. MECANISMOS BACTERIANOS DE SOLUBILIZACIÓN

7.1 PRODUCCIÓN DE ÁCIDOS ORGÁNICOS

Existen diversos mecanismos de solubilización de compuestos de fósforo en forma inorgánica: producción de ácidos orgánicos, que ocurren mientras se da la descomposición de residuos orgánicos(Bar-Yosef *et al.*, 1999); Por medio de la asimilación de NH_4^+ de los microorganismos, ocurre la excreción de protones(Illmer *et al.*, 1995; Whitelaw, 2000); formación de complejos entre cationes que precipitan el fósforo de manera inorgánica y aniones orgánicos(citrato, oxalato) y desorción de iones de fósforo inorgánico de adsorción por aniones orgánicos, los cuales los producen los microorganismos solubilizadores de fosfato (Osorio,2008).

Estudios realizados por Kim *et al.*, en el año 1997 hallaron que el mecanismo primordial en el proceso de solubilización de hidroxiapatita, fue la producción de acidez, en condiciones in vitro por la bacteria *Enterobacter agglomerans*. Sin embargo, se percataron de obtener un resultado en cuanto a la producción de ácidos al mismo pH (4.0 – 4.1) producido por la bacteria y utilizaron para el estudio ácido como: ácido oxálico, ácido cítrico, ácido clorhídrico y ácido láctico. En el resultado obtenido no notaron mucha diferencia en cuanto a la solubilización del fosfato inorgánico realizada por los ácidos oxálico, clorhídrico y cítrico y la solubilización por parte de la bacteria, pero aun así se obtuvo que el ácido láctico contiene una menor capacidad para solubilizar la roca fosfórica (Hidroxiapatita).

Se ha relacionado la producción de ácidos orgánicos como: ácido cítrico, ácido oxálico, ácido glucónico, ácido tartárico, ácido aspártico y ácido láctico, con la solubilización de fosfato inorgánico por medio de la acción de los microorganismos (Tabla 7), la mayoría de estos se producen por medio del procesos de la

fermentación de sustratos carbonados (glucosa) o el proceso de respiración oxidativa (Prescott *et al.* 1999; Atlas & Bartha 2001). Lynch y Whipps en el año 1990 admiten que las reacciones que se forman por el proceso de solubilización de fosfato suceden en la rizósfera, donde se liberan los compuestos carbonados y donde las raíces pueden tomar el fósforo solubilizado. Asimismo, descubren que el carbono total que se fija por el proceso de fotosíntesis, puede ser liberado hasta en un 40% en la rizósfera, siendo los organismos heterótrofos los beneficiados ya que usan estos sustratos carbonados para producir los ácidos orgánicos.

Rodríguez *et al.*, en el año 1999 se enfocan en que el mecanismo más importantes para llevar a cabo el proceso de solubilización de fosfato mineral es la producción de enzimas fosfatasa ácida y ácidos orgánicos. Estos ácidos son sintetizados por medio de los microorganismos, que forman parte del suelo, pero destacando que los ácidos glucónico y 2-cetoglucónico, se consideran como uno de los ácidos más frecuentes e identificados en cepas bacterianas en los procesos de solubilización de fosfato.

Tabla 7. Cepas de microorganismos productores de ácidos orgánicos

| Ácido Orgánico | Cepas |
|------------------------|---|
| Ácido Glucónico | <i>Pseudomonas sp, Erwinia herbicola, Pseudomonas cepacia, Burkholderia cepacia</i> |
| 2- Ácido Cetoglucónico | <i>Rhizobium leguminosarum, Rhizobium meliloti, Bacillus firmus</i> |

Los ácidos láctico, isovalérico, butírico, glicólico, oxálico, malónico, succínico, son otros ácidos producidos por la bacteria *Bacillus*, potente género solubilizador de fosfato. Sin embargo, existen otros ácidos orgánicos como: Sulfhídrico,

carbónicos, nítrico y sustancias quelantes, los cuales son tomados como otros mecanismos posibles para llevar a cabo la solubilización de fosfato, teniendo en cuenta que su eficacia y la ayuda para la liberación del fósforo al suelo, va ser menos en comparación con la producción de ácidos orgánicos. Reportes por Hilda y Fraga en el año 1999 determinan que la actividad de solubilización de fosfato se encuentra determinada por la capacidad que tienen los microorganismos de liberar sustancias, en este caso, hace referencia a la producción de ácidos orgánicos por medio de sus grupos carboxilo e hidroxilo y el proceso de quelación al catión que se encuentra unido al fosfato, convirtiéndolo así a una forma soluble. Permitiendo la obtención del fósforo por parte de las plantas.

Es importante conocer que existen varios mecanismos y factores que influyen para que el proceso de solubilización de fósforo se lleve a cabo. Fankem en el año 2006 profundiza acerca de un efecto combinado entre la influencia de la producción de ácidos orgánicos sobre el pH del suelo. Otro mecanismo es el complejo de cationes, el cual se ve favorecido según la estructura del ácido orgánico producido, la cual se va a encontrar controlada por las condiciones nutricionales y fisiológicas del cultivo microbiano. Determinando en general la producción de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, está en gran parte relacionada con las bacterias solubilizadoras de fosfato. Esta característica que tienen los ácidos orgánicos de tener bajo peso molecular es proveniente del metabolismo de compuestos que tienen alto peso molecular, entre ellos están: Lípidos, carbohidratos, péptidos, siendo estos importantes en los ciclos biológicos y ecosistemas (Baziramakenga *et al.*, 1995).

A su vez Andrews en el año 1990, informa acerca de los factores influyentes en el proceso de solubilización de fosfato para la producción de ácidos orgánicos, los cuales, son el tipo de suelo y su pH. Teniendo en cuenta estos factores, suceden dos mecanismos: El primero es un intercambio del ácido, donde los H⁺ que provienen del citrato, son intercambiados por el fósforo que se encuentran en la

superficie de $\text{Al}(\text{OH})_3$ o $\text{Fe}(\text{OH})_3$ de sus cristales, reduciéndolos y siendo liberados al fósforo. El segundo mecanismo es la concentración de los ácidos orgánicos producidos por las bacterias solubilizadoras de fosfato, formando complejos con iones de metales, los cuales provienen de la roca fosfórica (Singh y Amberger, 1998).

Illmer y Schinner en el año 1995, indican que el principio que determina la solubilización del fosfato es la concentración de H^+ , los cuales son producidos de la asimilación del NH_4^+ y la respiración, pero se enfatizan en que la producción de ácidos orgánicos no son determinantes para que este proceso se realice. Igualmente, en estos procesos Toro *et al*, en el año 1997, describen que existen relaciones entre los microorganismos, que dan lugar a interacciones que auxilian las necesidades de la plantas y ayudan aumentar sus niveles de producción. Un ejemplo importante es el sinergismo que ocurre entre los microorganismos solubilizadores de fosfato, con las micorrizas. Cualquier tipo de bacteria que realice procesos de acidificación (disolver fosfatos de calcio), demuestra un mínimo nivel de actividad como microorganismos solubilizador de fosfato (Tabla 8).

Tabla 8: Ácidos orgánicos y sus rutas biosintéticas en Bacterias Solubilizadoras de Fosfato (BSP).

| Ácido | Fórmula | Ruta biosintética | Bacteria que lo produce | Referencia |
|-----------------|---|---|--|---|
| Acético | CH ₃ CO ₂ H | Oxidación incompleta de azúcares (fermentación acética) | <i>Acetobacter aceti</i> , <i>Gluconobacter oxydans</i> y <i>Pseudomonas fluorescens</i> | Singh y Amberger (1998a) |
| Láctico | CH ₃ CHOHCH ₂ CO ₂ H | (Glicólisis) Fermentación láctica primaria | <i>Bacillus liqueniformis</i> y <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> | Bano y Musarrat (2003) |
| Oxálico | HO ₂ CCO ₂ H | Ácidos tricarbóxicos | <i>Pseudomonas fluorescens</i> | Singh y Amberger (1998a) |
| Cítrico | HO ₂ CCH ₂ COHCO ₂ HCHO ₂ CO ₂ H | Ácidos tricarbóxicos | <i>Erwinia herbicola</i> y <i>Yarrowia lipolytica</i> | Goldstein (1995); Vassileva et al. (2000) |
| Butírico | CH ₃ (CH ₂) ₂ CO ₂ H | Oxidación anaerobia del piruvato | <i>Bacillus liqueniformis</i> y <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> | Wan y Wong (2004) |
| Succínico | HO ₂ CCH ₂ CH ₂ CO ₂ H | Ciclo del glioxilato y ácidos tricarbóxicos | <i>Pseudomonas putida</i> y <i>Pseudomonas fluorescens</i> | Liu et al. (1992) |
| Málico | HO ₂ CCHOHCH ₂ CO ₂ H | Ácidos tricarbóxicos | <i>Bacillus megaterium</i> | Singh y Amberger (1998b) |
| Glucónico | HO ₂ C(CHOH) ₄ CH ₂ OH | Oxidación directa de la glucosa | <i>Erwinia herbicola</i> , <i>Pseudomonas cepacia</i> y <i>Burkholderia cepacia</i> | Goldstein y Liu (1987) |
| Fumárico | HO ₂ CCOCH ₂ CO ₂ H | Ácidos tricarbóxicos | <i>Pseudomonas aeruginosa</i> | Harrison et al. (1972) |
| 2-Cetoglucónico | HO ₂ CO(CHOH) ₄ CH ₂ OH | Oxidación directa de la glucosa | <i>Rhizobium leguminosarum</i> , <i>Rhizobium meliloti</i> y <i>Bacillus firmus</i> | Anderson et al. (1985) |

Fuente: (Toro et al., 1997).

Los ácidos orgánicos presentes en el suelo, son indispensables por ser fuente de fósforo para las plantas y permitir su crecimiento vegetal, por esto Sarapatka B y Kraskova M. en el año 1997, corroboran que se necesita que ocurra un proceso de hidrolización del fosfato inorgánico y mineralización de los compuestos orgánicos por medio de la presencia de enzimas fosfatasa, que son producidas por microorganismos presentes en diferentes tipo de suelo.

7.2 PRODUCCIÓN DE ENZIMAS FOSFATASAS

Rodas, 2006 aporta que las bacterias deben realizar la hidrolización de compuestos fosfatados para dejar dispuesto el fósforo en forma inorgánica para las plantas. Debido a esto, la razón por la cual las bacterias producen una serie de

enzimas en este caso las que intervienen son las fosfatasas ácidas, que debido a su producción cambian el pH del suelo y permiten que este fósforo producido de forma inorgánico, se libere por medio de un intercambio protónico y lo sustituya por iones de calcio.

En el año 1992 por Liu se identificaron bases genéticas y metabólicas definiendo relaciones eficientes para el proceso de solubilización de fosfato de calcio, además esta no es la única solución, pues Liu *et al.* proponen que el resultado de la acidificación del espacio periplásmico es la solubilización, debido a que ocurre un proceso de oxidación no fosfolítica (oxidación directa de la glucosa), por intervención de la quinoproteína glucosa deshidrogenasa. Illmer y Shinner, 1992 demuestran en varias ocasiones la importancia que tiene en estos procesos el uso de minerales específicos. Por ejemplo se requiere de una mínima concentración de K, para llevar a cabo un proceso óptimo de solubilización de fosfato, destacando que si existen concentraciones de Na y Mg, pues esto sería de gran ayuda para los hongos en estos procesos, pero no para las bacterias del género *Pseudomonas*.

Los suelos contienen variaciones de pH de valores ácidos a neutros y es aquí donde la enzima fosfatasa ácida desempeña su primordial papel, influyendo la mayor parte en la rizosfera. Entre las bacterias que presentan un alto nivel por presentar la enzima fosfatasa se encuentran: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Serratia*, *Rhizobium*, *Enterobacter*, *Proteus*, *Citrobacter* y *Klebsiella* (Abd-Alla MH, 1994). Esta intervención por parte de la enzima fosfatasa también es conocida como mineralización bioquímica del fósforo, aseguran (Seeling y Zasoski, 1993). De igual manera, este proceso a parte de catalizar la reacción de hidrolización del fósforo inorgánico a partir del fósforo orgánico, puede darse sin necesidad que exista actividad biológica, puesto que el fósforo lo pueden tomar los microorganismos, cuando existan variables en los factores como la humedad o cambios fisiológicos entre otros.

La producción de estas enzimas casi siempre resulta de las asociaciones entre las comunidades microbianas existentes o también por las raíces, conociéndose como habilidad para que las plantas puedan tomar eficazmente el fósforo. Su actividad enzimática es benéfica con relación al carbono orgánico, lo cual determina que a mayor profundidad en el suelo y poca presencia de comunidad microbiana, causaría una baja actividad enzimática, pero al igual (Li *et al*, 1997), confirman que existen factores negativos que alteran o inhiben la actividad de la enzima como la presencia de elementos como el hierro, el molibdeno y la especie de la planta que allí se encuentre.

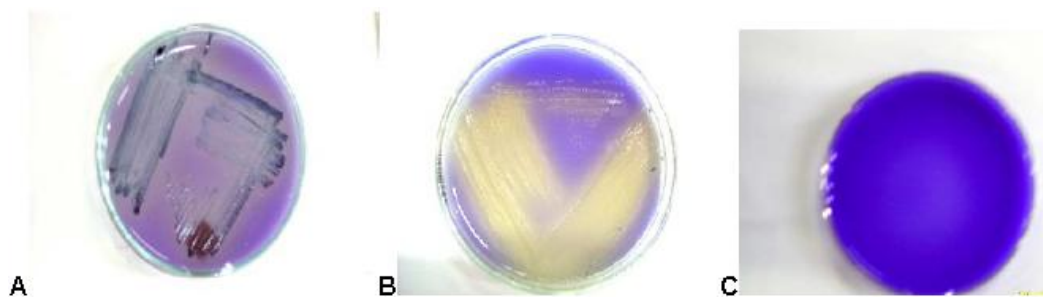
Harrison en el año 1987 analiza, que al existir un aumento de la comunidad microbiana del suelo y carbono orgánico, aumenta la actividad de la enzima fosfatasa ácida. Los valores máximos encontrados en cuanto a actividad enzimática, fósforo orgánico y fósforo total, se encuentran en vertisoles y alfisoles en relación a los entisoles. De hecho, se confirma que las fosfatasas ácidas se caracterizan por ser enzimas adaptativas, ya que dependen de la disposición del fósforo del suelo y de las plantas. Finalmente en este estudio se establece que el uso de fertilizantes con compuestos fosforados influye en el aumento de las reservas del fósforo orgánico, fósforo total y actividad de las enzimas fosfatasas ácidas.

8. GENERO BACTERIANO CON MAYOR POTENCIAL PARA SOLUBILIZAR FOSFATO

Según P. Vázquez y col. en el año 2000, realiza una comparación entre microorganismos solubilizadores de fosfato, resaltando que las cepas de *Bacillus* aislados de la rizósfera de trigo, obtienen una concentración de 112-157 mg/l en comparación de las cepas de *Pseudomonas sp.* presentando una concentración de 0.5-0.55 mg/l de fosfato solubilizado, permitiendo conocer que las cepas de *Bacillus* tienen mayor potencial de solubilización de fosfato. De la misma manera se resalta que la ayuda para esta solubilización de fosfato se debe a la producción de ácidos orgánicos como: Ácido succínico, isovalérico, acético y láctico.

Gyaneshwar *et al.* en el año 1998 asegura que mas importante el tipo de ácido orgánico producido por los microorganismos que la cantidad, durante el proceso de solubilización. Como se observa en la figura 12. Proceso cualitativo, por el cual, se quería comprobar el proceso de solubilización de fosfato insoluble (Fosfato tricálcico).

Figura 12: Proceso cualitativo para la determinación de fosfato insoluble



Fuente: Drouillon & Merckx, 2003

Fotos con resultados de solubilización de fosfato: solubilización de fosfato sin excreción de ácido (A), solubilización con excreción de ácido (B) y control negativo (C) (Drouillon y Merckx, 2003).

9. CONCLUSIONES

Gracias a los estudios realizados por varios autores, se comprueba que las cepas bacterianas que intervienen comúnmente en el proceso de solubilización de fosfato son: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium* y *Enterobacter*, constituyendo el 30% de la población de microorganismos que forman parte de la rizosfera.

Entre los mecanismos más empleados por parte de los microorganismos, para llevar a cabo procesos de solubilización de fosfato se encuentran: La producción de ácidos orgánicos y la liberación de enzimas fosfatasas, siendo la producción de ácidos orgánicos, más comúnmente usado en comparación con las enzimas.

Según la bibliografía revisada, se determina que el género con mayor capacidad solubilizadora de fosfato es *Pseudomonas*, por utilizar varios mecanismos de solubilización como lo son: la producción de ácidos orgánicos, entre ellos: ácido glucónico, ácido acético, ácido oxálico, ácido succínico, ácido fumárico y por presentar altos niveles de enzima fosfatasa.

Factores como el clima, tipo de suelo y los cultivos, tienen gran influencia en la cantidad de microorganismos con capacidad solubilizadora de fosfato, más que por las mismas características químicas o físicas del suelo donde esté ocurriendo el proceso de solubilización.

Teniendo en cuenta que uno de los mecanismos de solubilización más común es la producción de ácidos orgánicos, especialmente: ácido oxálico, ácido cítrico, ácido 2-cetoglucónico, ácido glucónico, facilitando a las plantas su absorción; no obstante, se necesita seguir indagando estos mecanismos de solubilización de fosfato mineral, para poder llegar a comprender detenidamente su función y desarrollo dentro del ciclo del fósforo.

Las bacterias rizosféricas se caracterizan por predominar en suelos tipo arenosos, ayudando a la ocurrencia del proceso de solubilización en suelos; pero cabe destacar que la concentración de fósforo en suelos arenosos es baja (20-30ppm) en comparación de los suelos arcillosos (30-50ppm).

El pH es uno de los factores que más incide en los procesos de solubilización, puesto que a niveles entre 6.5 -7 ayuda a que este proceso ocurra de forma eficiente y a niveles de pH ácidos, el proceso de fijación de fósforo va ser más lento.

En Colombia, existe una particularidad en los cultivos a temperaturas medias como: caña y plátano pues presentan un 50% y 76% de fósforo asimilable respectivamente, comparándolos con cultivos que se dan a temperaturas altas, viendo que la cantidad de fósforo total es de 832ppm y fósforo orgánico 99ppm.

BIBLIOGRAFIA

1. ABD-ALLA, M.H. 1993. Use of Organic Phosphorus by *Rhizobium leguminosarum* biovar viceae Phosphatases. Biol Fertil Soils. 18:216-218.
2. ACOSTA, V. CRUZ, L., SOTOMAYOR, D., PEREZ, L. 2007. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. Science Applied Soil ecology pp 35-45.
3. ALAM S., S. KHALIL, N. AYUB AND M. RASHID. 2002. In *vitro* solubilization of inorganic phosphate by phosphate solubilizing microorganism (PSM) from maize rhizosphere. Intl. J. Agric. Biol. 4:454-458.
4. ALEXANDER, M. 1987. Introduction of Soil Microbiology. New Cork. Ed. Wiley and Sons. P 83-88.
5. ANDREWS, G. F. 1990. Large-scale bioprocessing of solids. Biotechnol. Prog. 6: 225-230.
6. ARZUAGA, S.; FERNANDEZ, C.; DALURZO, H. y VAZQUEZ, S. Fosforo total, fosforo orgánico y fosfatasa acida en Entisoles, Alfisoles y Vertisoles de corrientes con diferentes usos agrícolas. En: Comunicaciones científicas y tecnológicas. [En línea]. (2005). [consultado 8 oct. 2010]. Disponible en <http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2005/5-Agrarias/A-066.pdf>.
7. ATLAS Y BARTHA, 2001. Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental, Cuarta Edición.

8. BAREA, J.M, OLIVARES, J. 1998. Manejo de las propiedades biológicas del suelo. In: Agricultura Sostenible (Ed. R. M. Jiménez Díaz, J. Lamo de Espinosa) pp. 173-193. Editorial Mundi Prensa Madrid.
9. BAR-YOSEF, B., ROGERS, J., WOLFRAM, J., RICHMAN, E. 1999. *Pseudomonas cepacia*- mediated rock phosphate solubilization in kaolinite and montmorillonite suspensions. Soil Science Society of America Journal, 63:1703-1708.
10. BAZIRAMAKENGA, R., R. R. SIMARD, AND G. D. LEROUX. 1995. Determination of organic acids in soil extracts by ion chromatography. Soil Biol. Biochem. 27: 349-356.
11. BEGONIA, M, BEGONIA, G; MILLER, G, GILLARD, D y YOUNG, C. 2004. Phosphatase Activity and Populations of Microorganisms from Cadmium – and Lead Contaminated Soils. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 73:1025-1032.
12. BOWEN, G.D, ROVIRA, A.D. 1999. The rhizosphere and its management to improve plant growth. Adv Agron 66:1-102.
13. BRAY, R. H. Y KURTZ, L. T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. Soil Sci. 59: 39-45.
14. CALDERÓN VÁSQUEZ, C.; ALATORRE COBOS, F.; SIMPSON WILLIAMSON, J. and HERRERA ESTRELLA, L. 2009. Maize under phosphate limitation. In: J.L. Bennetzen and S.C. Hake (eds.). Handbook of Maize: Its Biology. 381-404 pp.
15. Cuaderno de Campo, <http://grenbuk.blogspot.com/2010/11/horizontes-del-suelo.html>, Consultado 04.30.12.

16. CHEN, Y. P., P. D. REKHA, A. B. ARUNSHEN, W. A. LAI and C. C. YOUNG. 2006. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Appl. Soil Ecol.* 34:33-41.
17. DAKORA, F.D.; PHILLIPS, A.D. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant Soil* 2002, 245, 25–47.
18. DONOSO, C *Ecología Forestal: El bosque y su medio Ambiente.* 1 edición. Valdivia: Universidad Austral de Chile. 1981. p. 185-207.
19. DROUILLON, M. MERCKX, R. 2003. The Role of Citric Acid as a Phosphorus Mobilization Mechanism in Highly P-Fixing Soils. *Gayana Bot.* 60(1): 55-62.
20. FANKEM, H., D. NWAGA, A. DEUBEL, L. DIENG, W. MERBACH AND F. X. ETOA. 2006. Occurrence and functioning of phosphate solubilizing microorganisms from oil palm tree (*Elaeis guineensis*) rhizosphere in Cameroon. *African J. Biotech.* 5:2450-2460.
21. FERNÁNDEZ, L.A, ZALBA, P, GÓMEZ M.A, SAGARDOY, M.A. 2005. Bacterias Solubilizadoras de Fosfato Inorgánico Aisladas de Suelos de la Región Sojera. Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur.
22. GARCÍA, C.; GIL, S. F.; y HERNANDEZ, T. Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. 1 edición. Madrid: Mundi-Prensa. 2003. p. 371
23. GIANFRENDA, L Y BOLLAG, J. 1996. Influence of Natural and Antropogenic Factors on Enzyme Activity in soil. In: *Soil Biochemistry.* Volumen 9. USA. 123-193 p.

24. GÓMEZ, Y. 2004. Actividad de las fosfatasa acidas y alcalinas (extracelulares e intracelulares) en hongos de la rizosfera de *Arachis hypogaea* (*Papilionaceae*). Rev. Biol. Trop. 52(1): 287.295.
25. GUERRERO E. Micorriza: fundamentos biológicos y estado del arte. En: Guerrero E. Editor. Micorrizas Recurso biológico del suelo. Bogotá: Fondo FEN; 1996. p. 346.
26. Guía para la descripción de suelos- FAO, Interpretación genética y sistemática – clasificación de suelos, Designación de los horizontes del suelo Cuarta Edición, Proyecto FAO- SWALIM, Nairobi, Kenya-Universidad Mayor de San Simón, Bolivia, 2009, Capítulo 5, <Consultado 4 Julio de 2012> <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/a0541s/a0541s00.pdf>.
27. GUPTA, U. 2002. Boron and its role in crop production. Boca Raton: CRC Press, p. 237.
28. GYANESHWAR, P. KUMAR, N. And PAREKH L,J. 1998. Effect of Buffering on the Phosphate Solubilising Ability of Microorganisms. World J. Microbiol. Biotechnol. 14, 699-673.
29. GREMILLION, L.R. Y MCCLELLAN, G.H. 1975. Importance of chemical and mineralogical data in evaluating apatitic phosphate ores. Society of Mining Engineers of AIME. *Transactions*. Vol. 270.
30. HANKE, F. (2005). Microbiología del suelo. EN: Memorias Seminario Microbiología y bioquímica de los Abonos Orgánicos fermentados (A.O.F.) Suelo y Rumen. Fundación Universitaria Juan de Castellanos. Tunja, Colombia. Pp. 13 -23.

31. HARRISON, A.F, 1987, Soil organic phosphorus. A review of world literature, CAB international, Oxon, UK, 257pp.
32. HINSINGER, P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil* 237:173-195.
33. ILLMER, P. and F. SCHINNER. 1992. Solubilization of inorganic phosphates by microorganisms isolated from forest soil. *Soil Biol. Biochem.* 24: 389-395.
34. ILLMER, P and SCHINNER, F. 1995. Solubilization of Inorganic Calcium Phosphate Solubilization Mechanisms. *Soil Biol. Biochem.*, 27: 257-63.
35. IPNI (International Plant Nutrition Institute); [http://www.ipni.net/ppiweb/mexnca.nsf/\\$webindex/0D2745E9793640FD06256AAE00136ECB?opendocument&navigator=home+page](http://www.ipni.net/ppiweb/mexnca.nsf/$webindex/0D2745E9793640FD06256AAE00136ECB?opendocument&navigator=home+page), Consultado 2012.04.30.
36. KENNEDY, A.C, SMITH, K.L. 1995. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils. *Plant soil* 170:75-86.
37. KIM, K.Y, McDONALD, G. A and JORDAN, D. 1997. Solubilization of Hydroxyapatite by *Enterobacter agglomerans* and Cloned *Escherichia coli* in Culture Medium. *Biol. Fertil. Soils* 24: 347-352.
38. KOHLER J., F. CARAVACA, L. CARRASCO, A. ROLDÁN. 2006. Contribution of *Pseudomonas mendocina* and *Glomus intraradices* to aggregate stabilization and promotion of biological fertility in rhizosphere soil of lettuce plants under field conditions. *Soil Use Manage.* 22, 298-304.
39. KUMAR, V; RB RISHI KUMAR & N NARULA. 2001. Establishment of phosphate-solubilizing strains of *Azotobacter chroococcum* in the rhizosphere

- and their effect on wheat cultivars under green house conditions. *Microbiol. Res.* 156:87-93.
40. KLUEPFEL, D.A. 1993. The behavior and tracking of bacteria in the rhizosphere. *Annual Review of Phytopathology* 31: 441-472.
41. LI M., OSAKI M., HONMA M. AND T. TADANO, 1997, Purification and characterization of phytase induced in tomato roots under phosphorus deficient conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 43: 179-190.
42. LIU, T. S., L. Y. LEE, C. Y. TAI, C. H. HUNG, Y. S. CHANG, J. H. WOLFRAM, R. ROGERS, AND A. H. GOLDSTEIN.1992. Cloning of an *Erwinia herbicola* gene necessary for gluconic acid production and enhanced mineral phosphate solubilization in *Escherichia coli* HB101: nucleotide sequence and probable involvement in biosynthesis of the coenzyme pyrroloquinoline quinone. *J. Bacteriol.* 174: 5814-5819.
43. LYNCH J.M. & WHIPS J.M. 1990. Substrate flow in the rhizosphere. *Plant Soil* 129, 1-10.
44. MARTINEZ-TOLEDO, M; T. de la RUBIA, J; MORENO y J. GONZÁLEZ-LÓPEZ. Root exudates of *Zea mays* and production of auxins, gibberellins and cytokinins by *Azotobacter chroococcum*. En: *Plant Soil* [en línea]. (2004).[consultado 1 nov. 2010]. Disponible en <http://.usal.es/profesores/pfmg/sefin/MI/tema04MI.html>.
45. MAATHUIS, F. J. M. 2009. Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Sciences*, 12: 250-258.

46. MEW, M. 2000. Phosphate rock. *In: Metals and mineral annual review*, pp. 110–122. Londres, The Mining Journal Ltd.
47. MCCLELLAN, G.H. Y GREMILLION, L.R. 1980. Evaluation of phosphatic raw materials. *In: F.E. Khasawneh, ed. The role of phosphorus in agriculture*, pp. 43–80. Madison, Estados Unidos de América, ASA-SSSA..
48. NAVARRO Q, REY P. 2009. Evaluación de la solubilización de fosfatos y la producción de ácido indolacético (aia) en microorganismos rizosféricos de cultivos de palma aceitera (*elaeis guineensisjacq*) de la región de puerto wilches, Santander. Universidad de Santander – UDES.
49. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO) <Consultado 5 julio de 2012>
http://www.fao.org/ag/ca/Training_Materials/CD27-Spanish/sf/soil_fertility.pdf.
50. OSORIO, N.W. 2008. Effectiveness of microbial solubilization of phosphate in enhancing plant phosphate uptake in tropical soils and assessment of the mechanisms of solubilization. Ph.D. Disertation. University of Hawaii, Honolulu, 392 p.
51. PANT, H y WARMAN, P. 2000. Enzimatic Hydrolysis of Soil Organic Phosphorus by Immobilized Phosphatases. *Biol, Fertil, Soils*. 30:306-311.
52. PEIX, A., A. RIVAS-BOYERO, P.F. MATEOS, C. RODRÍGUEZ-BARRUECO, E. MARTÍNEZ-MOLINA AND E. VELÁZQUEZ. 2001. Growth promotion of chickpea and barley by a phosphate solubilizing strain of *Mesorhizobium mediterraneum* under growth chamber conditions. *Soil Biol Biochem* 33:103-110.

53. PRESCOTT, H. K. Microbiología Cuarta edición 1999 McGraw-Hill Interamericana.
54. RAISMAN, C. Y GONZÁLEZ, A. 2004 Hipertextos de áreas de biología: mecanismos de acción de los enzimas. Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Agroindustria.
55. RASHID, M; KHALIL, S; AYUB, N; ALAM, S, LATIF, F. 2004. Organic Acids Production and Phosphate Solubilization bu Phosphate Solubilizing Microorganism (PSM) Under in vitro Conditions. Pakistan Journal of Biological Sciences 7(2):187-196.
56. RODAS, A. (2006). La Agricultura y Microorganismos. Revista electrónica Engormix. [Versión Electrónica], 13-27.
57. RODRÍGUEZ H., FRAGA R. 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion, Biotechnology Advances 17 (1999) 319–339, Havana, Cuba.
58. SANCHEZ, Ch. A. 2007. Phosphorus. In: Barker, A. V. and Pilbean, D. J. (Editors). Manual of plant nutrition. 51-90 pp.
59. SARAPATKA B, KRASKOVA M. Interactions between phosphatase activity and soil characteristics from some locations in the Czech Republic. Rostlinna-Vyroba-UZPI 1997;43:415–9.
60. SEELING B. AND R.J. ZASOSKI, 1993, Microbial effects in maintaining organic and inorganic solution phosphorus concentrations in a grassland topsoil. Plant Soil 148: 277-284.

61. SINGH, C. P. and AMBERGER. A, 1998a. Organic acids and phosphorus solubilization in straw composted with rock phosphate. *Bioresour. Technol.* 63: 13-16.
62. TORO, M., R. AZCON, AND J. M. BAREA. 1997. Improvement of arbuscular mycorrhiza development by inoculation of soil with phosphate-solubilizing rhizobacteria to improve rock phosphate bioavailability (32P) and nutrient cycling. *Appl. Environ. Microbiol.* 63: 4408-4412.
63. TSAI, S y ROSSETTO, R, 1992. Transformacoes Microbianas do Fósforo in *Microbiología de solo*. Sociedade de Ciencia do Solo. Campinas, Brasil.
64. U.S. BUREAU OF MINES. 2001. *Mineral commodity summaries (1981–2001), phosphate rock*. Washington, DC, U.S. Department of the Interior.
65. Utilización de las Rocas Fosfóricas para una Agricultura Sostenible- FAO/ Boletín FAO, Fertilizantes y Nutricion Vegetal < Consultado 4 Julio de 2012> <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/y5053s/y5053s00.pdf>.
66. VAN KAUWENBERGH, S.J. Y HELLUMS, D.T. 1995. Direct application phosphate rock: a contemporary snapshot. *Phos. Pot.*, 200: 27–37.
67. VAZQUEZ. P, HOLGUIN. G, PUENTE. M.E, LOPEZ-CORTES. A, BASHAN.Y, 2000, Phosphate-solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of mangroves in a semiarid coastal lagoon.
68. WHITE LAW, M. A. 2000. Growth promotion of plants inoculated with phosphate solubilizing fungi. *Adv. Agron.* 69:99-151.

69. YOSHIOKA, I. 2005. Actividad de fosfatasas ácida y alcalina en un suelo cultivado con plátano *Musa AAB*: en tres sistemas de manejo. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Palmira. 99 p.
70. YOSHIOKA, I.C., BOLAÑOS, B. M. M.; SÁNCHEZ, M.; MELGAREJO, L.M. 2005. Actividad de fosfatasas en suelo rizosférico de plátano (*Musa AAB*) estimada mediante dos metodologías. En: Resúmenes XXVI Congreso ASCOLFI. Bogotá, octubre 5 -7 de 2005. pág: 4.
71. ZARAGOZA, T.; TERUEL, G. 2009. Control de "P.C." en palma Africana. Noticias Sephu. No. 30. España.