

3. LOS MICROORGANISMOS DEL SUELO

Fernando Munévar M. *

El suelo está constituido por componentes inertes y vivos. A pesar de que la parte viva del suelo, incluyendo varios pequeños animales y los microorganismos, constituye menos del uno por ciento del volumen total, las múltiples y únicas funciones que cumplen los microorganismos del suelo hacen que esta pequeña fracción sea indudablemente esencial para la fertilidad y la producción de cultivos.

La población de microorganismos del suelo es muy amplia y heterogénea. En igual forma, los procesos y transformaciones que realizan los microorganismos en el suelo son muy variados. En este artículo se presentan, solamente en forma muy rápida, algunos aspectos sobre los microorganismos del suelo y sus funciones, para destacar el papel de la fase viva del suelo en su fertilidad y en la producción de cosechas.

3.1. PRINCIPALES GRUPOS DE MICROORGANISMOS DEL SUELO.

Los microorganismos de mayor importancia en el suelo han sido tradicionalmente divididos en cinco grupos : bacterias, actinomicetos, hongos, algas y

* Ingeniero Agrónomo M.S. Programa de Suelos. Instituto Colombiano Agropecuario. Tibaitatá Apartado Aéreo 151123 Bogotá, Colombia.

protozoarios ; pero algunos autores incluyen como un sexto grupo los virus. El grupo de los actinomicetos no tiene validez taxonómica, ya que pertenece a la misma clase de las bacterias, pero por tener ciertas características particulares con respecto al resto de las bacterias ha sido considerado aparte, especialmente por los microbiólogos de suelos.

Los microorganismos en general, y en particular los que habitan el suelo, pueden agruparse siguiendo otros criterios, como sus hábitos nutricionales, las condiciones ambientales requeridas para su crecimiento, y otros. Aunque aquí no se pretende tratar ampliamente este tema, si es conveniente mencionar los tipos de microorganismos que existen, de acuerdo con su nutrición y los requerimientos de oxígeno libre que tienen para sus procesos metabólicos.

Todo organismo requiere de un substrato del cual pueda tomar el carbono que necesita para formar el material celular que posteriormente sintetiza. Este substrato se denomina la Fuente de Carbono. Entre los microorganismos hay algunos grupos que pueden tomar el carbono del CO_2 (dióxido de carbono) atmosférico ; para otros la fuente de carbono es una sustancia orgánica y aún existen algunos grupos de microorganismos que pueden utilizar tanto carbono orgánico como inorgánico. Esta es una diferencia de los microorganismos, tomados como un grupo, con las plantas y animales superiores.

Los procesos de síntesis requieren energía. La forma de energía que utiliza un microorganismo para formar enlaces ricos, para luego ser utilizados en sus procesos

de síntesis de material celular, se denomina fuente de energía. Algunos microorganismos pueden tomar la energía de la luz solar (fototrofos), otros de enlace químico (quimiotrofos) de compuestos inorgánicos (quimio-litotrofos) o de compuestos orgánicos (quimioorgánotrofos) (Doetsch y Cook, 1973).

En los procesos de síntesis también se requiere una fuente de electrones (poder reductor). Los organismos cuya fuente de energía y electrones son diferentes a un compuesto orgánico se denominan autotrofos y aquellos que utilizan compuestos orgánicos para derivar de ellos la energía y el poder reductor se denominan heterotrofos. De aquí se desprende que la categoría autotrofo o heterotrofo, a la cual pertenezca un microorganismo del suelo tiene importantes implicaciones ecológicas.

Algunos microorganismos requieren la presencia de oxígeno libre para su crecimiento y se denominan aeróbicos; otros, los anaeróbicos, pueden crecer sin oxígeno libre en el medio. Algunos facultativos pueden crecer bajo ambas condiciones.

3.1.1. Bacterias.

Las bacterias son el grupo de microorganismos más numeroso en la mayoría de los suelos. Son organismos unicelulares cuyas células tienen dimensiones entre 0,5 y 2,0 micras de diámetro por una longitud que puede estar entre 1,0 y 8,0 micras. Las células bacteriales son de tipo procariótico: sus funciones metabólicas están asociadas principalmente con membranas pues no poseen orgánulos especializados para las distintas funciones. No poseen

mitocondrias, membrana nuclear ni retículo endoplasmático (Gray y Williams, 1971).

Las bacterias constituyen el grupo de organismos que posee mayor diversidad en cuanto a patrones nutricionales. Las hay autotróficas y heterotróficas, algunas utilizan fuentes inorgánicas de carbono y otras utilizan fuentes orgánicas, algunas son aeróbicas, otras anaeróbicas y también hay facultativas.

La población de bacterias en el suelo se estima que varía 10^5 y 10^{12} por gramo de suelo. En condiciones promedio esta población estaría entre 10^7 y 10^9 . En general, el número de bacterias en el suelo es superior al de los otros grupos de microorganismos juntos (Alexander, 1971).

En la población de bacterias del suelo se encuentran grupos capaces de vivir en condiciones muy variadas de temperatura y acidez. En general, bajo condiciones de suelo ácido la población de bacterias tiende a disminuir con respecto a otros grupos como los hongos, los cuales toleran más fácilmente esta condición.

La abundancia de las bacterias y su capacidad para crecer en tan diversos ambientes y a partir de tan variados substratos, las hace el grupo más importante de microorganismos en el suelo, en cuanto a las funciones que desempeñan. Funciones tan específicas como la fijación de nitrógeno

atmosférico (Na) en simbiosis con las plantas, y las transformaciones de formas inorgánicas de nitrógeno son realizadas casi exclusivamente por bacterias.

3.1.2. Hongos.

Los hongos siguen a las bacterias y a los actinomicetos en orden de abundancia en el suelo. En promedio la población de hongos varía alrededor de 10^4 por gramo de suelo (Alexander, 1971).

Las células de los hongos son de tipo eucariótico : poseen membrana nuclear, retículo endoplasmático y mitocondrias. La mayoría de los hongos forman estructuras filamentosas con un diámetro comprendido entre 3,0 y 50 micras. Los hongos no poseen clorofila, tienen una nutrición heterotrófica y en general son aeróbicos (Gray y Williams, 1971). En suelos ácidos los hongos tienden a ser más abundantes que otros grupos de microorganismos ; esto parece deberse no a que sus condiciones óptimas de crecimiento de encuentren a un pH bajo, sino a la falta de competencia especialmente por bacterias, bajo estas condiciones.

Los hongos ejercen funciones muy variadas en el suelo. Una función muy particular, es la formación de asociaciones simbióticas con las raíces de muchas plantas (micorrizas) las cuales tienen gran importancia ecológica y agrícola.

3.1.3. Actinomicetos.

Los actinomicetos son el segundo grupo de microorganismos del suelo en cuanto a abundancia. En promedio la población de actinomicetos varía alrededor de 10^5 por gramo de suelo. Taxonómicamente los actinomicetos pertenecen a la misma clase de las bacterias pero poseen algunas características particulares que permiten, desde otros puntos de vista, considerarlos por separado. Las células de los actinomicetos son procarióticas y forman estructuras ramificadas similares a las de los hongos; sin embargo, el diámetro de estos filamentos, 0,5 - 2,0 micras, es notoriamente inferior al de los hongos.

La mayoría de los actinomicetos son heterotróficos. Hay unos pocos autotróficos que utilizan fuentes químicas y energía. La mayoría de los actinomicetos crecen solamente en condiciones aeróbicas (Gray y Williams, 1971), por lo cual, la población de actinomicetos en suelos poco aireados es baja.

Las condiciones de pH inferior a 5,0 son en general desfavorables para los actinomicetos; en suelos alcalinos la población relativa de estos es alta.

Dentro de este grupo de organismos se encuentran varias especies resistentes o que prefieren altas temperaturas para su crecimiento. Este tipo de actinomicetos es especialmente importante en la formación de compost,

proceso en el cual se alcanzan altas temperaturas (Poincelot, 1974).

3.1.4. Algas.

Las algas constituyen un grupo de organismos de variada apariencia. Hay tipos unicelulares, otros que forman asociaciones de células, así como también existen grupos con estructura filamentosa (Gray y Williams, 1971). Son organismos fotosintéticos que poseen diversos tipos de pigmentos que les permiten realizar esta función. De acuerdo con los pigmentos que posean se pueden agrupar en varias categorías: verde-azuladas, verdes, rojas, etc. (Clark, 1957).

Las algas verde-azuladas poseen células procarióticas, tienen un metabolismo fototrófico, su fuente de carbono es el CO_2 y derivan el poder reductor de sustancias inorgánicas. La mayoría son aeróbicas y se encuentran en ambientes muy variados, aún en condiciones bajo las cuales no crecen plantas superiores (Echlin, 1966). En general, en los suelos agrícolas son menos abundantes que las bacterias y los actinomicetos.

Uno de los principales papeles de las algas verde-azuladas en el suelo es la fijación de nitrógeno atmosférico en forma no simbiótica. Esta fijación puede ocurrir bajo diferentes condiciones incluyendo suelos salinos (Echlin, 1966) y zonas desérticas. El proceso parece tener especial importancia en cultivos de arroz bajo inundación.

Las algas, como otros microorganismos, producen sustancias que son agentes cementantes de los agregados de suelo, con lo cual favorecen el desarrollo de la estructura, aumentan la capacidad de retención de humedad y la resistencia a la erosión.

Las algas diferentes a las verde-azuladas poseen células eucarióticas. Hay una gran variedad de ellos que se encuentran en los suelos, aunque en números relativamente bajos en comparación con otros grupos de microorganismos. Exceptuando la fijación de N_2 , este grupo de algas cumple similares funciones en el suelo a las algas verde-azuladas.

3.1.5. Protozoarios.

Los protozoarios son organismos unicelulares pertenecientes al reino animal. La mayoría poseen un tamaño solo ligeramente mayor que el de las bacterias. En relación con las poblaciones de otros microorganismos puede afirmarse que los protozoarios son el grupo menos numeroso en el suelo. Sus funciones no están claramente establecidas. Muchos protozoarios se alimentan de células bacteriales, por lo cual se piensa que tienen un importante papel en el equilibrio biológico en el suelo. Por esta misma razón se ha observado que las condiciones que favorecen el desarrollo de las bacterias en el suelo también favorecen la abundancia de protozoarios (Alexander, 1961 ; Clark, 1957).

3.2. PAPEL DE LOS MICROORGANISMOS DEL SUELO.

3.2.1. Transformaciones de Nitrógeno.

El Nitrógeno del suelo se encuentra presente en diferentes formas química ; en general la mayor parte se encuentra formando compuestos orgánicos (materia orgánica del suelo). Solo del 5 al 10 por ciento del nitrógeno total se encuentra en formas inorgánicas : Amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) o nitrato (NO_2^-). Casi todo el NO_3^- y NO_2^- se encuentran en la solución del suelo, mientras que la forma catiónica se encuentra bien sea como intercambiable o como amonio fijado (en la estructura de ciertos minerales) (Bremner, 1967).

El nitrógeno, bajo las diferentes formas en que se encuentra en el suelo, es el elemento más susceptible de transformación por acción de los microorganismos. Estas diversas transformaciones ocurren simultáneamente y en diverso sentido, dando lugar a la formación del ciclo del Nitrógeno en el cual, unas transformaciones significan aportes para el suelo, otras significan pérdidas y otras simplemente cambio del nitrógeno de un estado a otro, dentro del sistema suelo.

3.2.1.1. Mineralización e Inmovilización. El proceso microbiológico por el cual el nitrógeno del suelo es convertido de una forma orgánica a formas inorgánicas se denomina mineraliza-

ción y ocurre simultáneamente con el proceso opuesto o sea la conversión de nitrógeno inorgánico en orgánico (inmovilización). En los suelos que no reciben aplicaciones de fertilizante nitrogenado, la mineralización y la fijación biológica de nitrógeno son las únicas fuentes de alguna importancia de nitrógeno disponible para las plantas.

Debido a que el primer producto inorgánico de la mineralización que se puede reconocer fácilmente es el amonio NH_4^+ , al referirse a la mineralización, generalmente se está indicando una transformación a nitrógeno amoniacal. Por esta razón algunos denominan este proceso como amonificación.

En el proceso de inmovilización del nitrógeno, los microorganismos del suelo toman las formas inorgánicas de este nutriente que requiere para incorporarlo al material celular que sintetizan. No solamente el nitrógeno amoniacal es inmovilizado; los microorganismos también pueden tomar nitrógeno en forma de nitrato (NO_3^-) y transformarlo a nitrógeno orgánico.

Como ya se mencionó, estos dos procesos (mineralización e inmovilización) ocurren simultáneamente y las condiciones particulares de cada suelo determinan cuál de ellos predomina sobre el otro. En general un alto contenido de fuentes de ^{Nitro}carbono de

fácil disponibilidad para los microorganismos, determina una amplia inmovilización y como consecuencia este proceso predominará sobre la mineralización, dando como resultado neto una disminución del nitrógeno disponible para las plantas. Esto se ha comprobado para suelos colombianos, como se observa en la Figura 4.

Se piensa que la relación Carbono : Nitrógeno (C/N) de un residuo orgánico que se aplica al suelo puede ser un criterio que indique qué tipo de cambio ocurrirá con respecto al nitrógeno del suelo al descomponerse dicho residuo. Cuando la relación Carbono: Nitrógeno es alta (alto carbono disponible y/o poco Nitrógeno) habrá una tendencia a causar inmovilización neta, mientras que cuando la relación sea estrecha habrá tendencia a mineralización neta. Por ejemplo, se ha observado que residuos de maíz (relación Carbono : Nitrógeno alta) pueden causar inmovilización neta de nitrógeno, mientras que residuos de alfalfa (relación Carbono : Nitrógeno baja) en el mismo suelo pueden producir una mineralización neta superior a la del suelo sin ningún tratamiento (Bartholomew, 1965).

En los procesos de mineralización e inmovilización de nitrógeno participan gran número de especies heterotróficas de bacterias, hongos y actinomicetos.

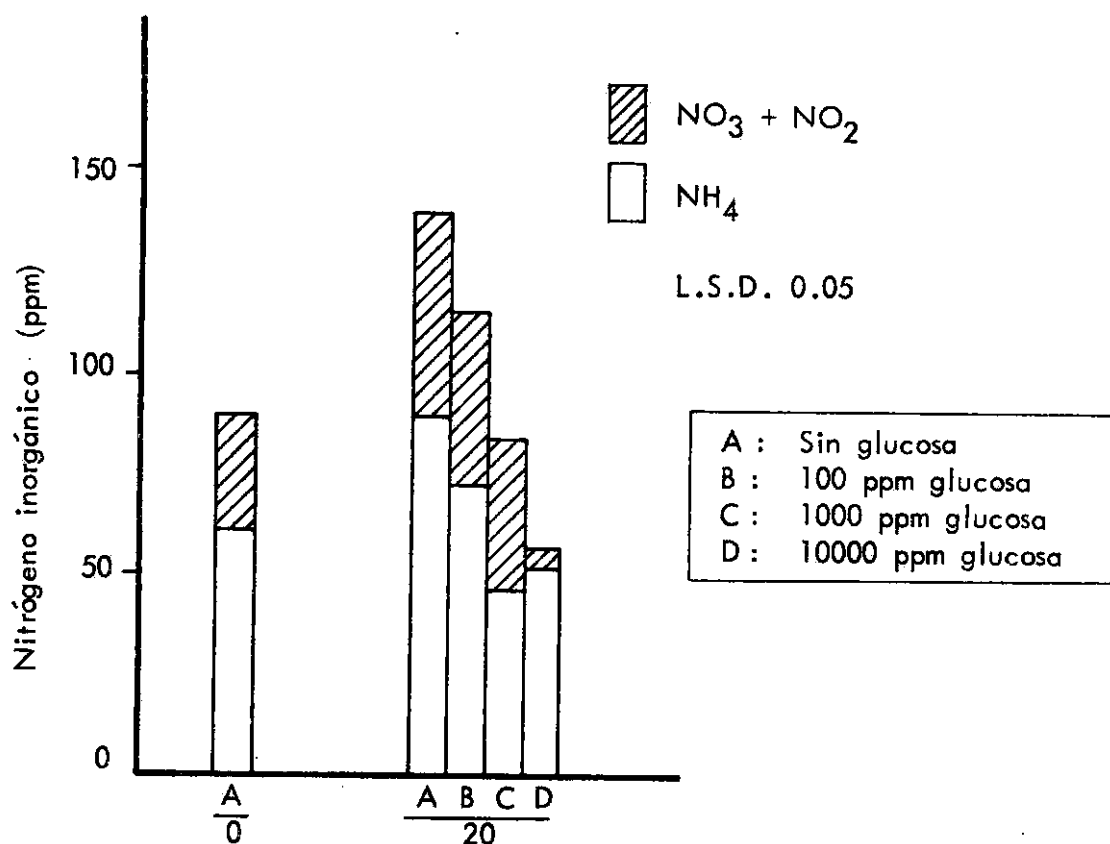


FIGURA 4. Cambio en el contenido de nitrógeno inorgánico de un suelo de la serie Tibaitatá incubado con distintas cantidades de carbono disponible aplicado como glucosa (Munévar, 1974).

Dentro de la mineralización de nitrógeno puede mencionarse la transformación de la urea en el suelo ya sea que esta provenga de la descomposición de residuos orgánicos o que haya sido aplicado como fertilizante sintético. La molécula de urea es transformada a nitrógeno amoniacal por la acción de los microorganismos que sintetizan la enzima ureasa. Como puede concluirse, se requiere de esta acción microbiana para que el nitrógeno de la úrea sea aprovechable por las plantas. En algunos casos pueden presentarse condiciones que limiten este proceso de transformación.

Varios factores afectan la rata a la cual se lleva a cabo el proceso de mineralización de nitrógeno en el suelo. Los más importantes son la temperatura, la humedad y la aireación, el pH del suelo, el tipo de coloides inorgánicos predominantes y el suministros de nutrimentos inorgánicos. Aunque estos factores tienen una influencia marcada en la rata de mineralización de nitrógeno, aunque se llegue a condiciones extremas, esta no se suprime totalmente. Esto se debe a que la población de microorganismos que intervienen en este proceso es muy heterogénea y dentro de ella se encuentran organismos resistentes a una gran gama de condiciones (Alexander, 1971).

La temperatura afecta la rata de mineralización ya que los diversos pasos en la transformación de compuestos orgánicos de nitrógeno a nitrógeno amoniacal son catalizados por enzimas sensibles a la temperatura. Aunque puede ocurrir mineralización aún a temperaturas cercanas a 2 °C, la rata se aumenta al aumentar la temperatura hasta un óptimo cercano a los 40° C (Alexander, 1971).

La conversión de nitrógeno orgánico a amoniacal es llevada a cabo por organismos tanto aeróbicos como anaeróbicos, luego puede ocurrir independientemente del grado de humedad y

aireación del suelo. El punto óptimo puede estar entre 50 y 75% de la capacidad de retención de humedad, pero la amonificación ocurre a ratas razonables aún en condiciones de completa anaerobiosis. La diferencia entre el proceso de mineralización bajo condiciones aeróbicas y bajo condiciones anaeróbicas está en los productos finales. Debido a que la conversión de NH_4^+ en NO_2^- y NO_3^- es un proceso aeróbico, bajo condiciones anaeróbicas el producto final será solamente NH_4^+ , mientras que bajo condiciones aeróbicas se formará tanto amonio (NH_4^+) como nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-).

Como en todos los procesos biológicos, el pH afecta la mineralización de N. En general ocurre mineralización dentro de un rango amplio de pH, pero esta es más rápida cerca de la neutralidad. Sin embargo, a valores de pH cercanos y superiores a 7,0 hay tendencia a la volatilización como amoníaco (NH_3), especialmente si el contenido de calcio es alto, por lo cual, a pesar de que se favorezca la mineralización bajo estas condiciones, es posible que no se aumente la disponibilidad de nitrógeno para las plantas.

El nivel al cual se encuentran ciertos nutrimentos en el suelo puede ser limitante no solo para las plantas sino para los

microorganismos y por ende pueden limitar la tasa de mineralización. Tal es el caso del P en suelos con alta capacidad de fijación de fosfatos, como algunos suelos volcánicos de Colombia, en los cuales se observó que las aplicaciones de fósforo aumentan el nitrógeno mineralizado (Figura 5).

Tradicionalmente se ha afirmado que la tasa de producción de nitrógeno inorgánico está estrechamente relacionada con el contenido de nitrógeno total del suelo, en el sentido de que los suelos ricos en nitrógeno total liberan más nitrógeno inorgánico que suelos con bajo nitrógeno, en un intervalo de tiempo dado. Sin embargo, esto no se cumple para todos los suelos, como es el caso de aquellos en los cuales el material de arcilla predominante es amorfo (como alófana) donde se presentan contenidos de N total de los más altos en suelos agrícolas y la mineralización es de las más lentas. Esto permite pensar que en casos como este, un alto contenido de N total significa que el proceso de mineralización a tasas tan bajas ha determinado acumulación de la materia orgánica. Como lo indica la Figura 5, en suelos volcánicos de Colombia se ha encontrado que al aplicar N inorgánico se favorece la mineralización del N del suelo y que el efecto del N agregado parece estimular el efecto ya anotado del P (Munévar, 1974).

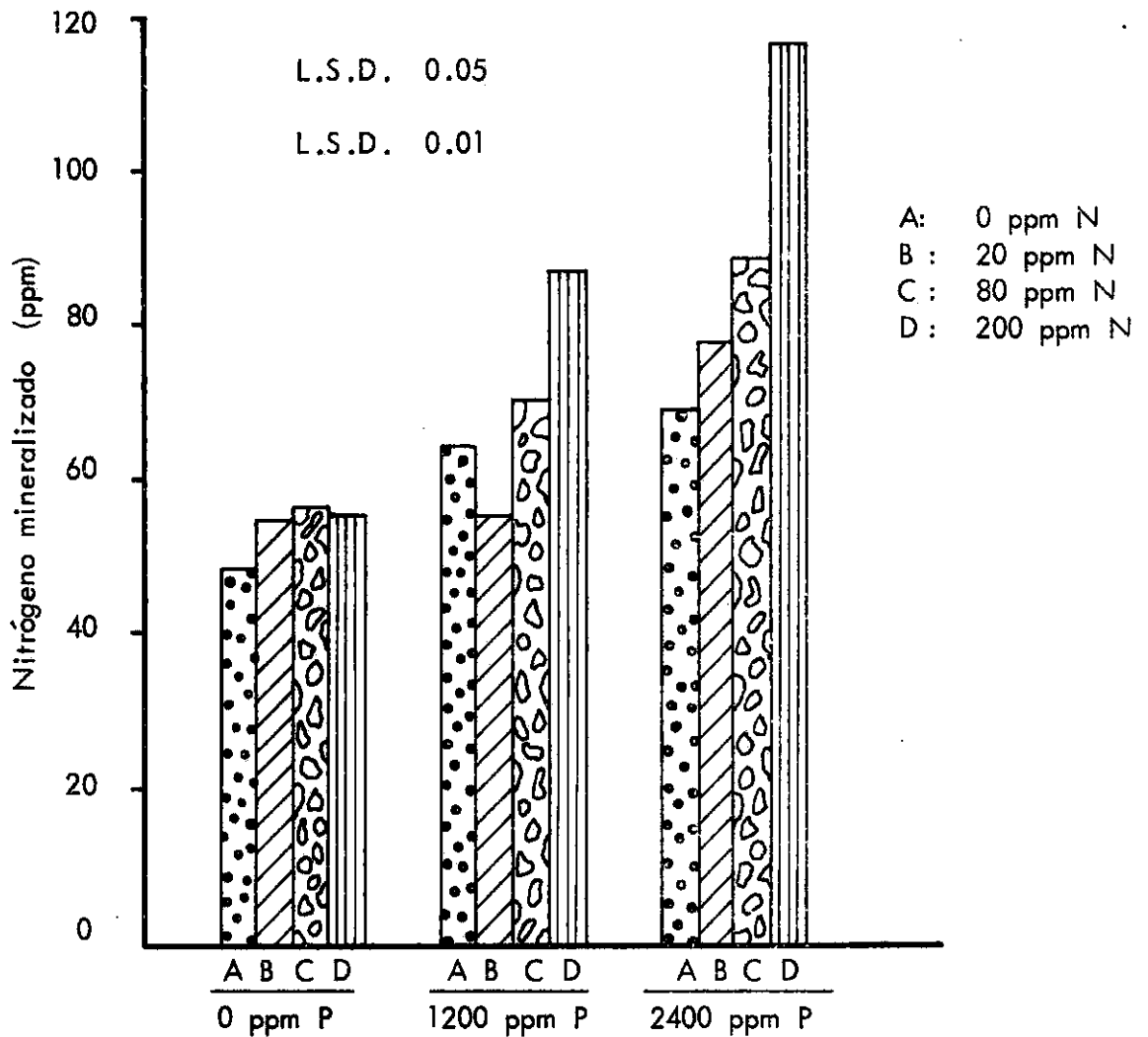


FIGURA 5. Nitrógeno mineralizado después de 30 días de incubación del suelo San Jorge (Dystrandep) con los tratamientos indicados (Munévar, 1974).

3.2.1.2. Nitritificación. Es el proceso por el cual el N es transformado por la acción de los microorganismos, de la forma amoniacal (NH_4^+) a nitritos (NO_2^-) y posteriormente a nitratos (NO_3^-). El proceso es de gran importancia agrícola pues, aunque algunas plantas pueden tomar nitrógeno amoniacal,

para muchas la forma más disponible es la de nitrato. En algunas plantas como el tabaco, altas concentraciones de NH_4^+ son tóxicas. Por otra parte, el hecho de que la forma inorgánica de N que predomine en un momento dado en el suelo sea la aniónica o la catiónica, tiene importantes implicaciones en el movimiento del N en el suelo y su lavado.

Los organismos más importantes que participan en la nitrificación son bacterias autotroficas. En el primer paso (conversión de NH_4^+ en NO_2^-) las bacterias del género Nitrosomonas son las más importantes. El género Nitrobacter es el responsable de la conversión de NO_2^- en NO_3^- .

El proceso de nitrificación se realiza bajo condiciones aeróbicas. La transformación de NO_2^- a NO_3^- generalmente ocurre a ratas más altas que la conversión NH_4^+ a NO_2^- . Por esta razón es poco frecuente que el NO_2^- se acumule en el suelo.

El pH y la temperatura son dos de los factores más importantes que influyen en la rata de nitrificación. El pH óptimo para el crecimiento de Nitrosomonas se considera que está comprendido entre 5,0 y 10,0. La temperatura óptima para la nitrificación está entre 30 y 35°C (Myers, 1975).

Se ha encontrado que muchos pesticidas son potentes inhibidores de la nitrificación. Muchos de los productos fumigantes de uso general en desinfección del suelo inhiben la nitrificación (Mc Cants, Skogley y Woltz, 1959).

3.2.1.3. Denitrificación. Es el proceso microbiológico por el cual el nitrógeno en forma de NO_3^- o NO_2^- es reducido en formas gaseosas, principalmente N_2 y N_2O . En esta forma el nitrógeno se pierde al pasar del suelo a la atmósfera.

Hasta hace algunos años la denitrificación se consideraba únicamente como un proceso perjudicial pues significa la pérdida de N del suelo al pasar a una forma no utilizable por las plantas. Sin embargo, ahora se considera que también tienen un efecto benéfico desde el punto de vista de la calidad del ambiente. La denitrificación reduce los riesgos de altas concentraciones de nitratos en los suelos y en otros ambientes como aguas subterráneas, las cuales son perjudiciales para la salud humana y animal.

La denitrificación ocurre bajo condiciones anaeróbicas y es llevada a cabo por organismos anaeróbicos facultativos. Otro requisito para que se lleve a cabo este proceso es la presencia de fuentes de energía disponible.

El proceso de denitrificación se lleva a cabo a una mayor rata bajo condiciones de pH cercano a la neutralidad o ligeramente alcalino. Generalmente la rata de denitrificación es baja si el pH es inferior a 6,0.

3.2.1.4. Fijación Biológica de Nitrógeno (N_2). Este proceso consiste en la conversión de nitrógeno elemental, es decir el gas N_2 de la atmósfera a una forma combinada, por la acción de un microorganismo (Alexander, 1961).

La fijación de N_2 se lleva a cabo por microorganismos en vida libre o por asociaciones simbióticas de plantas y microorganismos. Algunos autores consideran que ciertos sistemas de fijación de N_2 serían una modalidad intermedia entre las antes mencionadas, tal como puede verse en la siguiente clasificación de los sistemas que fijan N_2 .

- .1. Sistemas Biológicos que Fijan N_2 (Epstein, 1972).
- A. Asociaciones simbióticas.
 - i. Nódulos de las raíces.
 - a) Leguminosas con bacterias del género Rhizobium
 - b) No - leguminosas (Alnus, Ceanotus, Casuarina)
con organismos probablemente del género Streptomyces.

c) No - leguminosas (plantas tropicales del orden Cycadales) con algas verde-azuladas.

2. Nódulos de las hojas.

a) Angiospermas no leguminosas (árboles tropicales: Psychotria, Ardisia etc.) con bacterias.

b) Angiospermas no leguminosas (especies herbáceas de habitats tropicales húmedos : Gunnera spp) con algas verde-azuladas.

B. Asociaciones menos íntimas.

1. Bacterias (Beijerinckia) en la superficie de las hojas de árboles (filosfera) de los bosques húmedos tropicales.

2. Bacterias en la filosfera de bosques templados.

3. Algas verde-azuladas asociadas con helechos, hepáticas y hongos.

C. Vida libre.

1. Algas verde azuladas : Nostoc, etc.

2. Actinomicetos : Nocardia

3. Bacterias

- a) Aeróbicas : Azotobacter vinelandii
Beijerinckia indica, etc.
- b) Facultativas : Aerobacter aerogens, etc.
- c) Anaeróbicas :
 - (1) No fotosintéticas : Clostridium pasteurianum, etc.
 - (2) Fotosintéticas : Rhodospirillum rubrum, etc.

La fijación por la asociación de Rhizobium con leguminosas es indudablemente el sistema de mayor importancia. Posiblemente le sigue en importancia la asociación simbiótica entre no-leguminosas y organismos que posiblemente pertenecen al género Streptomyces, los cuales también forman nódulos. El número de especies de plantas leguminosas que forman nódulos se estima entre 10.000 y 14.000 (Alexander, 1961; Epstein, 1972), mientras que existen cerca de 200 especies de no-leguminosas noduladoras (Stewart, 1967).

Las algas verde-azuladas (cianofitas) son tal vez el grupo de microorganismos fotosintéticos más importantes en cuanto a fijación de N_2 . Algunas fijan N_2 simbióticamente y otras en condiciones de vida libre (Epstein, 1972).

Recientemente se ha despertado gran interés por las

bacterias que fijan N_2 en la zona circundante a las raíces (rizosfera) de algunas plantas, especialmente gramíneas tropicales (Dobereiner y Day, 1974).

.2. Fijación simbiótica de Nitrógeno en Plantas Leguminosas.

En esta asociación simbiótica los microorganismos que participan son bacterias del género Rhizobium. Estas bacterias pueden crecer en vida libre en el suelo o en medio artificial, pero solamente cuando están viviendo en asociación con la planta son capaces de fijar N_2 ; aunque ya hay algunas evidencias que indican que al menos parte del proceso se puede llevar a cabo en condición de vida libre. De la asociación del Rhizobium con la raíz de la planta se forma un nódulo (transformación del tejido de la raíz), hecho que es condición previa a la fijación. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la presencia de nódulos en la raíz de una planta leguminosa no indica necesariamente que está ocurriendo fijación de nitrógeno. Algunos razas o cepas de Rhizobium pueden causar la formación de nódulos (son infectivas) pero no fijan nitrógeno (no son efectivas). Los nódulos que contienen cepas efectivas de Rhizobium tienen una coloración interna roja debido a la presencia de hemoglobina.

Existen varias especies de Rhizobium las cuales difieren

en cuanto a las especies de leguminosas que les sirven de hospederos, ya que no todas las especies pueden nodular cualquier leguminosa. Por ejemplo, el Rhizobium de la soya (Glycine max) no puede nodular el trébol (Trifolium spp) o viceversa (Gray y Williams, 1971).

Las distintas especies de leguminosas se han dividido en los llamados grupos de inoculación cruzada los cuales se pueden definir como un número de especies de leguminosas dentro de las cuales cualquiera forma nódulos al inocularse con Rhizobium proveniente de nódulos de cualquier otra especie del grupo. Las bacterias que causan nodulación en un grupo dado de inoculación cruzada se ubican en la misma especie de Rhizobium (Gray y Williams, 1971). En esta forma se han establecido las especies de Rhizobium que figuran en la Tabla 6.

TABLA 6. Especies de Rhizobium y sus hospederos *

| Espece | Leguminosas en las cuales forma nódulos |
|-------------------------|--|
| <u>R. trifolli</u> | <u>Trifolium</u> spp. |
| <u>R. meliloti</u> | <u>Medicago</u> spp., <u>Melilotus</u> spp. |
| <u>R. leguminosarum</u> | <u>Pisum</u> , <u>Vicia</u> , <u>Lens</u> , <u>Cicer</u> |
| <u>R. japonicum</u> | <u>Glycine max</u> |
| <u>R. phaseoli</u> | <u>Phaseolus vulgaris</u> |
| <u>R. lupini</u> | <u>Lupinus</u> |
| R. "Cowpea" | <u>Vigna</u> , <u>Desmodium</u> , <u>Centrosema</u> y muchas otras |

* Tomada de Graham, 1973.

En la práctica se presentan problemas en la definición de los grupos de inoculación cruzada y las especies de Rhizobium ya que se han encontrado numerosas excepciones a esta clasificación.

La capacidad del Rhizobium para causar nodulación y posteriormente fijar nitrógeno depende de factores asociados al suelo, la planta, el microorganismo y la interacción entre ellos.

Las diferentes razas o cepas de una misma especie de Rhizobium varían en su capacidad de causar nodulación y fijar N_2 con hospederos de su grupo. Un caso conocido de este tipo de especificidad es el que se presenta en soya, donde se ha encontrado que diferentes cepas se comportan en forma diferente en las variedades de planta.

Los factores ambientales en muchos casos determinan en qué grado ocurre la nodulación y la fijación de nitrógeno. Algunas especies y/o razas de Rhizobium son susceptibles a la temperatura y su capacidad para fijar nitrógeno puede disminuir a temperaturas cercanas a $30^{\circ}C$ aún en el caso de que sean eficientes a $25^{\circ}C$ (Graham, 1973). Esto puede tener gran importancia en condiciones tropicales.

El pH del suelo es otro factor importante. Algunas especies de Rhizobium como R. phaseoli son sensibles a la acidez y sus células,

cuando el pH es bajo, pueden morir antes de que se formen los nódulos. Este problema puede solucionarse mediante la peletización de la semilla inoculada con cal u otros materiales. En otros casos se pueden hacer una selección de cepas resistentes a condiciones ácidas (Graham, 1973). Actualmente hay muchos interrogantes sobre este aspecto que deben ser investigados.

Cuando una leguminosa muere, sus nódulos se descomponen en el suelo y las bacterias se liberan en él. Aunque el tiempo que pueda sobrevivir el Rhizobium en el suelo es variable, en general, al estar ausente el hospedero apropiado la bacteria muere. Por esta razón en suelos que no han sido cultivados con leguminosas o que dejan de ser cultivadas por un tiempo, la población de Rhizobium para un hospedero dado puede ser muy baja para causar una buena nodulación (Gray y Williams, 1971). Por otra parte, en muchos casos la población "nativa" de Rhizobium está formada por cepas inefectivas. Esto hace que en la mayoría de los casos de siembras comerciales de leguminosas sea necesario aplicar un inoculante adecuado.

Los inoculantes más comunmente usados se preparan agregando un cultivo líquido de la bacteria a un portador sólido, que generalmente es turba. El inoculante se aplica mezclándolo con la semilla poco antes de la siembra. La proporción de

inoculante y semilla depende del tipo de ésta.

El costo del inoculante es por lo general muy bajo comparado con el fertilizante que se ahorra, por lo cual su uso es recomendable casi para toda siembra comercial, siempre y cuando sea de buena calidad y contenga la cepa apropiada para el caso.

Con buenas prácticas de inoculación se puede lograr una fijación de N_2 que represente un sustituto importante de fertilizantes nitrogenados. Los estimativos de la cantidad de nitrógeno fijado por leguminosas varían. Algunos ejemplos aparecen en la Tabla 7.

TABLA 7. Ejemplos de niveles de fijación de nitrógeno de algunas asociaciones de leguminosas y Rhizobium *

| Leguminosas | N_2 Fijado (Kg/ Ha) |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| <u>Glycine max</u> | 33 - 40 / ciclo de crecimiento ** |
| <u>Glycine max</u> | 40 - 120 / ciclo de crecimiento |
| <u>Glycine max</u> | 40 - 80 / año |
| <u>Trifolium subterraneum</u> | 100 - 200 / año |
| <u>Stylosantes guyanensis</u> | 100 / año |
| <u>Desmodium intortum</u> | 303 / año |
| <u>Medicago sativa</u> | 150 - 160 / año |
| <u>Medicago sativa</u> | 90 - 220 / año |

* Adaptada de Graham y Hubbell, (1974).

** La tabla original incluye la referencia para cada ejemplo.

3.2.2. Transformaciones de otros nutrimentos.

El fósforo (P) del suelo está sujeto a transformaciones por los microorganismos. Ciertos compuestos inorgánicos de P en el suelo que son insolubles, así como la roca fosfórica, son poco o muy lentamente asimilables por las plantas. Sin embargo, muchos microorganismos del suelo pueden solubilizar los fosfatos inorgánicos (Alexander, 1971). Aunque la población de microorganismos que tienen esta capacidad es muy variada, el que se ha estudiado en más detalle es Bacillus megatherium var. phosphaticum (Cooper, 1959).

El principal medio por el cual se produce la solubilización de los fosfatos es la formación de ácidos orgánicos o inorgánicos, como resultado de la acción microbial sobre diferentes substratos. Por medio de estas reacciones, fosfatos tricálcicos se convierten en formas di o monocálcicas. Bacterias del género Thiobacillus pueden formar ácido sulfúrico a partir de azufre (S) elemental; el ácido formado libera fosfatos asimilables de la roca fosfórica (Sulfur Institute, 1975).

Otro proceso microbiológico de transformación del P es la mineralización o sea, la conversión de P orgánico a formas inorgánicas utilizables por las plantas. En suelos con contenidos de materia orgánica relativamente altos, este proceso puede ser de gran importancia para su fertilidad ya que gran parte del P del suelo se halla en forma orgánica. Como en el caso del nitrógeno, la mineralización se lleva a cabo en forma simultánea con el proceso inverso

(inmovilización). Las condiciones particulares de cada suelo determinan cuál de los dos procesos se lleva a cabo a una mayor tasa.

El azufre es otro elemento, nutriente para las plantas, que sufre transformaciones microbiológicas en el suelo. Microorganismos del suelo realizan mineralización, inmovilización, oxidación del azufre y reducción de sulfatos.

La disponibilidad de algunos micronutrientes se favorece por la acción de los microorganismos del suelo. Cuando estos descomponen la materia orgánica del suelo, el medio tiende a reducirse. Esto causa que algunos cationes de hierro y magnesio por ejemplo, pasa de una forma oxidada a una más reducida (divalente). Las formas reducidas ofrecen una mayor disponibilidad para las plantas (Clark, 1957).

3.2.3. Micorrizas.

Un gran número de plantas cultivadas y silvestres forman una asociación simbiótica con hongos del suelo. En este tipo de asociación denominada micorriza, el hongo invade parte del tejido de la raíz y así ambos, la planta y el hongo, se benefician de esta asociación. La ocurrencia de esta asociación es muy amplia y algunos autores consideran que son más numerosas las especies de plantas que forman micorrizas, que aquellas que no la forman (Hacskeylo, 1972).

Mientras el hongo que forma la micorriza recibe beneficios de la planta por los nutrimentos (fuentes de energía, etc.) que esta le suministra, la planta recibe beneficios del hongo por diversos conceptos. Se ha determinado que la absorción de ciertos nutrimentos como el fósforo se incrementa notoriamente por la presencia de micorrizas. En general la superficie de absorción de la planta se incrementa ampliamente, con lo cual puede tomar más nutrimentos y su capacidad para absorber agua del suelo también se favorece. Como consecuencia de estos y otros beneficios, la capacidad de la planta para crecer en condiciones adversas de fertilidad, temperatura y humedad del suelo se incrementa notoriamente.

En el establecimiento de ciertas especies forestales se ha comprobado la necesidad de las micorrizas y se han hecho algunos intentos de inoculaciones a nivel comercial (Hacskeylo, 1972).

Se ha determinado en varias oportunidades el efecto positivo de las micorrizas en el rendimiento de diversos cultivos, incluyendo leguminosas noduladas (Schenck y Hinson, 1973).

3.2.4. Otras funciones de los microorganismos del suelo.

Aunque este escrito no pretende examinar en forma exhaustiva las actividades que desarrollan los microorganismos en el suelo, es conveniente mencionar, aunque con menos detalle que en los temas anteriores, otras funciones de ellos, hasta ahora menos estudiadas.

Las propiedades físicas del suelo se benefician por la actividad microbiana, especialmente por el desarrollo de la estructura que ella favorece. Este efecto, causado principalmente por los agentes cementantes que sintetizan muchos microorganismos se refleja en una mejor aireación y capacidad de retención de humedad, agregación y resistencia a la erosión (Clark, 1957).

Recientemente se ha despertado gran interés por la influencia de los microorganismos de suelo en la calidad del ambiente. Muchos microorganismos tienen la capacidad de degradar pesticidas aplicados al suelo. Al utilizar los pesticidas como fuente de carbono y/o energía los transforman en compuestos no tóxicos reduciendo los riesgos de contaminación ambiental (Geissbuhler, 1969).

Las numerosas transformaciones que realizan los microorganismos del suelo hacen parte de lo que se ha denominado el reciclaje de nutrientes en la naturaleza. Esto permite que los nutrientes del suelo y la atmósfera que son tomados por plantas y animales vuelvan a ser utilizados después de que sus residuos son degradados por los microorganismos.

3.3. RESUMEN

A pesar de que microorganismos del suelo constituyen una fracción muy pequeña del volumen y la masa total del suelo, las funciones que realizan hacen

que la población microbiana sea esencial para la fertilidad y la producción de cultivos.

La población de microorganismos del suelo es muy heterogénea en cuanto a tipos de organismos se refiere así como en términos de los hábitos nutricionales que estos poseen. Esto hace que las transformaciones y procesos que realiza la población microbiana del suelo sean muy variadas.

El nitrógeno del suelo es uno de los nutrimentos que sufre mayores transformaciones por los microorganismos. Las bacterias del género Rhizobium crecen en asociación simbiótica con las leguminosas y tienen la capacidad de tomar el nitrógeno gaseoso elemental (N_2) de la atmósfera y convertirlo en una forma asimilable por la planta. Otros microorganismos realizan el mismo proceso asociado con plantas no leguminosas y un tercer grupo puede fijar nitrógeno en condiciones de vida libre.

Las formas orgánicas de N son convertidas en formas inorgánicas disponibles para la planta mediante la mineralización que realizan diversos microorganismos. Grupos más específicos de microorganismos convierten unas formas inorgánicas de N en otras de diferente grado de disponibilidad para la planta. Los riesgos de contaminación de aguas subterráneas y otros ambientes por altas concentraciones de nitratos se disminuyen por la acción de microorganismos que causan denitrificación.

El P y el S orgánico también son convertidos a compuestos inorgánicos por la acción de los microorganismos.

Ciertos microorganismos tienen la capacidad de solubilizar fosfatos con lo cual aumentan la disponibilidad del P en el suelo.

Las micorrizas -asociaciones simbióticas entre las raíces de las plantas y los hongos - constituyen un mecanismo que favorece la adaptación de las plantas a condiciones adversas de suelo y el cual ha producido aumentos en el rendimiento, de plantas de cultivo.

El uso intensivo de pesticidas en la agricultura moderna ha determinado problemas de contaminación del ambiente. Algunos microorganismos reducen este tipo de riesgos al descomponer los pesticidas en formas no tóxicas.

Las múltiples funciones de los microorganismos del suelo son parte del reciclaje de nutrientes y del equilibrio biológico en la naturaleza.

3.4. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ALEXANDER, M. Introduction to soil microbiology. New York, Wiley, 1961. 472 p.
2. BARTHOLOMEW, M.W. Mineralization and immobilization of nitrogen in the decomposition of plant and animal residues. In: Bartholomew, M. W. ed. Soil nitrogen. Madison, Amer. Soc. Agron. 1965. Agronomy 10. pp. 285-306.
3. BREMNER, J. M. Nitrogenous compounds. In: McLaren, A. D. and Peterson, G. H. ed. Soil biochemistry. New York, Dekker, 1967. pp.19-63.
4. CLARK, F. E. Living organisms in the soil. In: Stefferud, A. ed. Soil. The yearbook of agriculture. Washington D. C., U.S.D.A. U.S. Govt printing office, 1957. pp. 157-165.
5. COOPER, R. Bacterial fertilizers in the Soviet Union. Soil Fert. 22:327-333. 1959.
6. DOBEREINER, J. and DAY, J. M. Importancia potencial de la fijación simbiótica de nitrógeno en la rizosfera de gramíneas tropicales. In: Bornemisza, E. y Alvarado, A. ed. Manejo de suelos en América Tropical. Tibás, Costa Rica. University Consortium on Soils of the tropics. Litografía e Imprenta Lehmann, S.A. 1974. pp. 203-216.

7. DOETSCH, R. N. and COOK, T. M. Introduction to bacteria and their ecobiology. Baltimore, University Park Press. 1973. 371 p.
8. ECHLIN, P. The blue-green algae. Scientific American. 214:74-81. 1966.
9. EPSTEIN, E. The acquisition of nitrogen. In: Mineral nutrition of plants; principales and perspectivas. New York, Wiley & Sons, 1972. pp. 257-283.
10. GEISSBUHLER, H. The substituted ureas. In: Kearney, R. C. and Kaufman, D. D. ed. Degradation of herbicides. New York, Dekker, 1969. pp. 79-111.
11. GRAHAM, P. H. Plant-Rhizobium interaction and its importance to agriculture. In: Srb, A. M. ed. Genes, enzymes and population. New York, Plenum Publishing, 1973. pp.321-330.
12. ——— . and HUBBELL, D. Interacción suelo-planta-Rhizobium en la agricultura tropical. In: Bormenisza, E. y Alvarado, A. ed. Manejo de suelos en América Tropical. Tibás, Costa Rica University Consortium on soils of the Tropic. Litografía e imprenta Lehmann S.A., 1974. pp. 217-233.
13. GRAY, T. R. G. and WILLIAMS, S. T. Soil micro-organisms. New York, Hafner Publishing, 1971. 240 p.

14. HACSKAYLO, F. Mycorrhiza : the ultimate in reciprocal parasitism.
22:277-583. 1972.
15. McCANTS, C. B. SKOGLEY, E. O. and WOLTZ, W. G. Influence of certain soil fumigation treatments on the response of tobacco to ammonium and nitrate forms of nitrogen. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23:466-469. 1959.
16. MUNEVAR, F. Some factors affecting the mineralization of organic matter in volcanic ash soils. Thesis Mag. Sci. Raleigh, North Carolina State University, 1974. 101 p.
17. MYERS, R. J. K. Temperature effects on ammonification and nitrification in a tropical soil. Soil Biol. Bioche. 7:78-82. 1975.
18. POINCELOT, R. P. A scientific examination of the principles and practice of composting. Compost Sci. 15(3). 1974.
19. SCHENCK, N. C. and HINSON, K. Response of nodulating and nonnodulating soybeans to a species of Endogone mycorrhiza. Agron. J. 65:849-859. 1973.
20. STEWART, W. D. P. Nitrogen-fixing plants. Science 158:1426-1432. 1967.
21. SULFUR INSTITUTE. Bio-super : potential P₂O₅ - S fertilizer for the tropics. Sulfur Institute J. 11(2):9-11. 1975.