

### 3. PRINCIPALES PROCESOS MICROBIOLÓGICOS EN EL SUELO Y SU FUNCION EN LA PRODUCTIVIDAD AGROPECUARIA

Fernando Munévar Martínez \*

#### 3.1. INTRODUCCION

Entre los diversos constituyentes del suelo se encuentran los microorganismos, los cuales, a pesar de representar menos del uno por ciento del volumen total del cuerpo del suelo, cumplen múltiples funciones que juegan un papel muy importante en la fertilidad y por lo tanto en la productividad agropecuaria.

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

La mayoría de los efectos benéficos de los microorganismos del suelo sobre las plantas se deben a su influencia positiva en la nutrición de éstas. Hay

---

\* Ingeniero Agrónomo, Ph.D. Programa de Suelos. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Tibaitatá. Apartado Aéreo 151123 Bogotá, D.E.

diversos mecanismos por los cuales los microorganismos favorecen la nutrición de las plantas, entre los cuales se pueden destacar los siguientes: (1) Un su ministro casi directo de nutrimentos, como en algunas modalidades del proceso de fijación de nitrógeno; (2) un aumento en la capacidad de las raíces de la planta para absorber nutrimentos, como en el caso de las micorrizas; (3) mi neralización de nutrimentos, o sea transformación de compuestos orgánicos que la planta no puede absorber en formas inorgánicas que sí pueden ser absorbidas; (4) solubilización de formas inorgánicas de nutrimentos, como ocurre con el fós foro; (5) otros cambios químicos de formas inorgánicas de nutrimentos, debidos a procesos de oxidación - reducción; (6) algunos efectos indirectos, como aquéllos debidos al mejoramiento de las propiedades físicas del suelo.

Existen algunos procesos microbiológicos en el suelo que tienen un efecto negativo en su fertilidad pues significan una pérdida de formas disponibles de nu trimentos. Ejemplos de estos procesos son la desnitrificación, por la cual se pierden formas de nitrógeno del suelo, y la inmovilización de nutrimentos, por la cual formas utilizables por la planta se incorporan a las estructuras micro - bianas y no pueden ser tomadas por la planta al menos por cierto tiempo. Al gunos otros procesos de transformación microbiana como la nitrificación pueden tener un efecto final benéfico o perjudicial para la fertilidad, dependiendo de las condiciones del suelo, el clima, la planta y la rata a la cual ocurren.

En este capítulo se dan algunas ilustraciones sobre los procesos antes mencionados.

### 3.2. TRANSFORMACIONES DEL NITROGENO

El nitrógeno del suelo se encuentra presente en diferentes formas químicas; en general la mayor parte se encuentra formando compuestos orgánicos (materia orgánica del suelo). Sólo del 5 al 10% del nitrógeno total se encuentra en formas inorgánicas: amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) o nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ). Casi todo el  $\text{NO}_3^-$  y el  $\text{NO}_2^-$  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) (5).

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 distintas 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. Fijación Biológica del Nitrógeno ( $\text{N}_2$ ).

Este proceso consiste en la conversión de nitrógeno elemental, es decir de gas  $\text{N}_2$  de la atmósfera, a una forma combinada por la acción de un microorganismo (3). De esta manera el  $\text{N}_2$  de la atmósfera que no puede ser utilizado por las plantas se convierte, por acción de los microorganismos, en formas que sí pueden ser utilizadas por la planta directa o indirectamente.

La fijación de  $N_2$  se lleva a cabo por microorganismos en vida libre o por asociaciones simbióticas de plantas y microorganismos (Tabla 3.1). Como se puede observar, hay una gran variedad de organismos y sistemas que fijan nitrógeno y hay muy pocos hábitats ecológicos para los cuales no se haya registrado fijación de nitrógeno actualmente (7).

El potencial para fijar nitrógeno y por tanto contribuir a la productividad agropecuaria es diferente para cada uno de estos sistemas como se aprecia en la Tabla 3.2.

La fijación por la asociación de leguminosas con Rhizobium es indudablemente el sistema de mayor importancia. Posiblemente le sigue en importancia la asociación simbiótica no-leguminosas y organismos del género Frankia, los cuales también forman nódulos (transformaciones del tejido de la raíz). El número de especies de plantas leguminosas que forman nódulos se estima entre 10.000 y 14.000 (3, 12), mientras que existen cerca de 200 especies de no-leguminosas noduladoras (35).

Las algas verde-azuladas (cianobacterias) son tal vez el grupo de microorganismos de vida libre más importantes en cuanto a fijación de  $N_2$  (7).

La contribución potencial de las bacterias de vida libre como Azotobacter a la economía de N en suelos agrícolas se considera limitada. El nitrógeno fijado por la bacteria generalmente se incorpora a la célula, la cual debe

TABLA 3.1. Algunos sistemas biológicos que fijan nitrógeno. Adaptada de Postgate y Hill (32).

<u>SISTEMAS DE VIDA LIBRE</u>	
<u>AEROBICOS:</u>	
<p><u>Azotobacter</u>, <u>Beijerinckia</u>, <u>Dexia</u>, <u>Spirillum lipoferum</u>, <u>Rhizobium</u>,  <u>Mycobacterium flavum</u>, <u>Corynebacterium autotrophicum</u>, bacterias  oxidantes del metano, algas verde-azules.</p>	
<u>ANAEROBICOS:</u>	
<p><u>Clostridium</u>, <u>Desulfovibrio</u>, <u>Desulfotomaculum</u>, <u>Chlorobium</u>, <u>Chromatium</u>.</p>	
<u>FACULTATIVOS:</u>	
<p><u>Klebsiella</u>, <u>Enterobacter</u>, <u>Bacillus</u>, <u>Rhodospirillum</u>, <u>Rhodopseudomonas</u>.</p>	
<u>SISTEMAS SIMBIOTICOS</u>	
<u>NODULOS DE LAS RAICES:</u>	
Leguminosas	+ <u>Rhizobium</u>
No - leguminosas	+ <u>Frankia</u>
<u>LIQUENES:</u>	
Hongo	+ Alga Verde - Azul
AZOLLA + ALGA VERDE - AZUL	

TABLA 3.2. Ejemplos de ratas relativas de fijación de nitrógeno por diferentes sistemas biológicos. Adaptada de Evans y Barber (13).

Sistema Biológico	N <sub>2</sub> fijado (Kg/Ha/año)
<b>LEGUMINOSAS</b>	
Soya ( <u>Glycine max</u> )	57 - 94
Alfalfa ( <u>Medicago sativa</u> )	128 - 600
<b>NO-LEGUMINOSAS</b>	
<u>Alnus</u>	40 - 300
<b>ASOCIACIONES PLANTA-ALGA</b>	
<u>Azolla</u> - Anabaena	313
<b>SISTEMAS DE VIDA LIBRE</b>	
Algas verde - azules	25
<u>Azotobacter</u>	0.3

descomponerse para que los compuestos de nitrógeno se liberen hacia el suelo. Por lo tanto, el nitrógeno fijado por estos organismos se hace disponible para las raíces de las plantas sólo en forma indirecta. Por otra parte, la mayoría de las bacterias de vida libre que fijan N<sub>2</sub> dependen de los compuestos orgánicos del suelo para obtener la energía requerida y hay muchos otros organis-

mos que compiten por esos recursos (7).

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 (11). Aunque actualmente no se han determinado con certeza los niveles reales de fijación de  $N_2$  por estos sistemas y por tanto no se ha establecido su posible aporte a la agricultura, no hay duda de que éstos ocurren naturalmente y es probable que tengan una amplia distribución. Cálculos con plantas basados en determinaciones in situ o usando cilindros de suelo indican que el  $N_2$  fijado en praderas tropicales podría variar alrededor de 860 g de N/Ha/año (7).

También existe un creciente interés por la asociación entre los helechos acuáticos del género Azolla y el alga verde-azul (cianobacteria) Anabaena azollae. Este sistema parece tener el potencial de fijar  $N_2$  a ratas comparables a aquellas observadas en buenos cultivos de leguminosas.

1. 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 asociación con una planta leguminosa. De la asociación del Rhizobium con la raíz de la planta se forma un nódulo, luego de lo cual el sistema puede fijar  $N_2$ . Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la presencia de nódulos en la raíz de una planta leguminosa no indica necesariamente que está ocu -

riendo fijación de  $N_2$ . Algunas 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 (17).

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 (17). En esta forma se han establecido las especies de Rhizobium que figuran en la Tabla 3.3.

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 de Rhizobium para causar nodulación y posteriormente fijar nitrógeno depende de factores asociados con el suelo, la planta, el microorganismo, el clima y la interacción entre estos factores.

TABLA 3.3. Especies de Rhizobium y sus hospederos. Tomada de Graham (15).

Especie	Leguminosas en las cuales forma nódulos
<u>R. trifolii</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

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 especificidades es el que se presenta en soya, donde se ha encontrado que diversas cepas se comportan en forma diferente en las variedades de planta (38).

Los factores ambientales en muchos casos determinan en qué grado ocurren 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  $33^{\circ}C$ , aún en el caso de que

sean eficientes a 28°C (28, 29). Parece posible que mediante selección de cepas de Rhizobium y genotipos de planta tolerantes a extremos de temperatura se pueda contrarrestar este problema (28, 29, 30).

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. Es posible solucionar este problema mediante el recubrimiento de la semilla inoculada con cal u otros materiales. En otros casos se puede hacer una selección de cepas resistentes a condiciones ácidas (21).

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 puede morir rápidamente. Por esta razón en suelos que no han sido cultivados con leguminosas o que dejan de ser cultivados por un tiempo, la población de Rhizobium para un hospedero dado puede ser muy baja para causar una buena nodulación (17). Por otra parte, en muchos casos la población "nativa" de Rhizobium está formada por cepas inefectivas. Esto hace que en la mayoría de las siembras comerciales de leguminosas sea necesario aplicar un inoculante adecuado.

Los inoculantes más comúnmente usados se preparan agregando un cultivo líquido de la bacteria a un portador sólido, que generalmente es turba. El inocu

lante 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 la 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 valores estimados de la cantidad de nitrógeno fijado por leguminosas varían. Algunos ejemplos aparecen en la Tabla 3.4.

TABLA 3.4. Ejemplos de niveles de fijación de nitrógeno de algunas asociaciones de leguminosas y *Rhizobium*. Adaptada de Graham y Hubbell (16).

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

\* La Tabla original incluye la referencia para cada ejemplo.

Por medio de la fijación de  $N_2$  por leguminosas se puede obtener no sólo una substitución del requerimiento de N de la planta que se cosecha, sino un mejoramiento del nivel de N del suelo al incorporar los residuos. También este sistema biológico puede utilizarse como fuente de N en sistemas de cultivo múltiple, rotaciones de cultivos, o al usar leguminosas como cobertura del suelo en cultivos perennes (19).

.2. Fijación de Nitrógeno por la Simbiosis Azolla-Anabaena. Existen varias especies de helechos acuáticos, pertenecientes al género Azolla, que poseen en sus hojas cavidades dentro de las cuales albergan el alga Anabaena azollae y por medio de esta asociación fijan  $N_2$ . Tales helechos, así como el alga Anabaena azollae, tienen una distribución prácticamente universal y se ha encontrado que, en asociación, estos dos organismos pueden fijar  $N_2$  en cantidades superiores a 300 Kg de N/Ha/año (24).

El cultivo de Azolla se ha utilizado por muchos años como fuente de N para el cultivo de arroz en Vietnam y China, donde se siembra conjuntamente con el arroz bajo inundación. Azolla puede utilizarse en muchos otros sistemas de cultivo como un abono verde. La planta tiene una tasa de crecimiento muy alta y una tasa de descomposición en el suelo muy rápida. Estas son características ideales para un abono verde.

Los resultados sobre experimentos de campo que fijan nitrógeno y que se presentan en la Figura 3.1 muestran que el N contenido en los tejidos de la

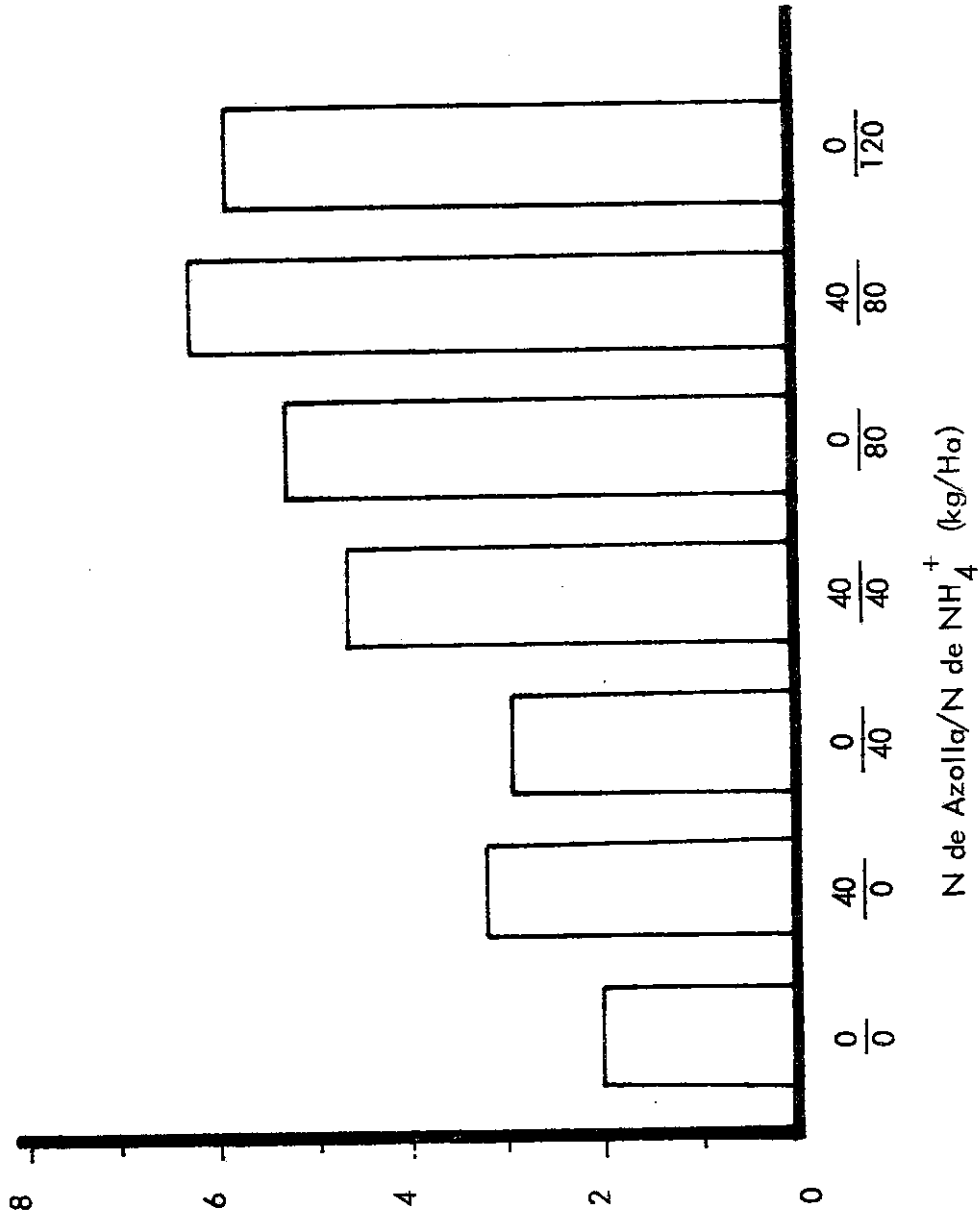


FIGURA 3.1. Efecto de la fertilización nitrogenada en el rendimiento de arroz, usando como fuentes plantas de Azolla o sulfato de amonio. El numerador de cada quebrado en el eje horizontal indica la cantidad de N aplicado como Azolla y el denominador la cantidad de N aplicado como sulfato de amonio. Tomada de Talley and Reins (37).

planta de Azolla tiene una disponibilidad para la planta de arroz equivalente al de un fertilizante de alta disponibilidad como el sulfato de amonio.

Aunque el sistema Azolla-Anabaena no ha sido usado con fines prácticos en América tiene un gran potencial como fuente biológica de nitrógeno para uso agrícola y debe ser investigado ampliamente.

### 3.2.2. Mineralización e Inmovilización.

El proceso microbiológico por el cual el nitrógeno del suelo es convertido de una forma orgánica a formas inorgánicas se denomina mineralización 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 importantes de nitrógeno disponible para las plantas.

Debido a que el producto inorgánico de la mineralización que se puede reconocer más fácilmente es el amonio  $\text{NH}_4^+$ , al referirse a la mineralización generalmente se está indicando una transformación a nitrógeno amoniacal.

En el proceso de inmovilización del nitrógeno, los microorganismos del suelo toman de este nutrimento las formas inorgánicas que requieren para incorporarlo al material celular que sintetizan. No solamente el nitrógeno amoniacal es inmovilizado; los microorganismos también pueden tomar nitrógeno en

forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) 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 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 (27).

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 C/N es alta (alto carbono disponible y/o poco nitrógeno) habrá una tendencia a causar inmovilización neta, mientras que cuando la relación es estrecha habrá tendencia a mineralización neta. Por ejemplo, se ha observado que residuos de maíz (relación C/N alta) pueden causar inmovilización neta de nitrógeno, mientras que residuos de alfalfa (relación C/N baja) en el mismo suelo pueden producir una mineralización neta superior a la del suelo sin ningún tratamiento (4).

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 tempera-

tura, la humedad y la aireación, el pH del suelo, el tipo de coloides inorgánicos predominantes y el suministro de nutrientes inorgánicos (3).

La temperatura afecta la tasa 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 tasa se aumenta al aumentar la temperatura hasta un óptimo cercano a los 40°C (3).

La conversión de nitrógeno orgánico a amoniacal es llevada a cabo por organismos tanto aeróbicos como anaeróbicos, luego puede ocurrir independientemente el 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 tasas 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  $\text{NH}_4^+$  en  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  es un proceso aeróbico, bajo condiciones anaeróbicas el producto final será solamente  $\text{NH}_4^+$ , mientras que bajo condiciones aeróbicas se formarán tanto amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) como nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ).

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 ésta es más rápida cerca de la neutralidad. Sin embargo, con valores de pH cercanos y superiores a 7,0 hay tendencia a la volatilización como amoníaco ( $\text{NH}_3$ ),

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 sólo para las plantas sino para los microorganismos y por ende para 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 (27).

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 los 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); en ellos se presentan de los más altos contenidos de N total en suelos agrícolas y de las más lentas mineralizaciones. Esto permite pensar que en casos como éste, un alto contenido de N total significa que el proceso de mineralización a tasas tan bajas ha determinado acumulación de la materia orgánica. En suelos volcánicos de Colombia se ha encontrado que al aplicar N inorgánico se favorece la mineralización del N del suelo y el N agregado estimula el efecto ya anotado del P (27).

Dentro de la mineralización de nitrógeno puede mencionarse la transformación de la úrea en el suelo ya sea que ésta provenga de la descomposición de residuos orgánicos o que haya sido aplicada como fertilizante sintético. La molécula de úrea 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. Por otra parte, para algunos cultivos y especialmente en suelos arenosos es deseable que la úrea aplicada al suelo se mineralice lentamente para aumentar su eficiencia como fertilizante. Con tal fin se han desarrollado productos químicos que permiten disminuir la tasa de mineralización de la úrea al regular la actividad microbiana (26).

### 3.2.3. Nitrificación.

Nitrificación es el proceso por el cual el N es transformado por la acción de los microorganismos de la forma amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) a nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y posteriormente a nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). 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 son tóxicas las concentraciones altas de  $\text{NH}_4^+$  (25).

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

aplicaciones en el movimiento del N en el suelo y su lavado.

El proceso de nitrificación se realiza bajo condiciones aeróbicas, es decir, en presencia de oxígeno libre. La transformación de  $\text{NO}_2^-$  a  $\text{NO}_3^-$  generalmente ocurre a tasas más altas que la conversión  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_2^-$ . Por esta razón es poco frecuente que el  $\text{NO}_2^-$  se acumule en el suelo.

El pH y la temperatura son dos de los factores más importantes que influyen en la tasa de nitrificación. La temperatura óptima para la nitrificación está entre 30 y 35°C (31).

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 (25).

#### 3.2.4. Desnitrificación.

Desnitrificación es el proceso microbiológico por el cual el nitrógeno en forma de  $\text{NO}_3^-$  o  $\text{NO}_2^-$  es reducido en formas gaseosas, principalmente óxido nítrico (NO), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), o dinitrógeno ( $\text{N}_2$ ). En esta forma, el nitrógeno se pierde al pasar del suelo a la atmósfera. Así, el proceso microbiológico de desnitrificación puede verse como uno de los principales factores determinantes de la baja eficiencia de algunos fertilizantes nitrogenados aplicados al suelo, especialmente aquéllos a base de nitratos.

Algunos cálculos indican que de la superficie de la tierra se pueden perder

cerca de 167,5 millones de toneladas de N/Ha anualmente, debido a desnitrificación (22).

Actualmente no, mucha preocupación por el aumento en la atmósfera del contenido de  $N_2O$  proveniente de desnitrificación. Como el  $N_2O$  puede convertirse en NO y este último destruye el ozono ( $O_3$ ), los aumentos en la rata de desnitrificación pueden causar aumentos en la rata de destrucción del  $O_3$  y así se presentaría una mayor incidencia de radiaciones ultravioleta, las cuales son causa del cancer de la piel (9). En esta forma se aprecia como, debido a un proceso microbiológico, las prácticas agrícolas que favorezcan la desnitrificación pueden ser causa de problemas para la salud humana. Sin embargo, recientemente se ha pensado que puede haber otras reacciones en la estratosfera que no permitan concluir todavía sobre la perturbación que causan en el  $O_3$  los cambios en  $N_2O$  y NO en la atmósfera (22).

La desnitrificación ocurre bajo condiciones anaeróbicas es decir, en ausencia de oxígeno libre. Otro requisito para que se lleve a cabo este proceso es la presencia de fuentes de energía disponibles. Las mayores ratas de desnitrificación se presentan bajo condiciones de pH cercano a la neutralidad o ligeramente alcalino. Generalmente la rata de desnitrificación es baja si el pH es inferior a 6,0.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, la desnitrificación se considera como un proceso perjudicial pues significa la pérdida de N del suelo al

pasar a una forma no utilizable por las plantas y una posible causa de problemas para la salud humana. Sin embargo, se puede considerar que la desnitrificación tiene un efecto benéfico desde el punto de vista de la calidad del ambiente, pues este proceso reduce los riesgos de altas concentraciones de nitratos en los suelos y en otros ambientes como aguas subterráneas, reduciendo así los efectos perjudiciales que tienen estos iones para la salud humana y animal.

### 3.3. MICORRIZAS

Muchas 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 ella. Su ocurrencia es muy amplia y algunos autores consideran que son más numerosas las especies de plantas que forman micorrizas, que aquéllas que no las forman (18).

Mientras el hongo que forma la micorriza recibe beneficios de la planta por los nutrimentos (fuentes de energía, etc.) que ésta 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 aumenta ampliamente, con lo cual puede tomar más nutrimentos y su capacidad para absorber agua del suelo también se favorece. Se ha

comprobado experimentalmente que las micorrizas pueden aumentar la capacidad de la planta para absorber potasio, nitrógeno, azufre, calcio, hierro, cobre y zinc, además de fósforo (33).

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 (18). Ciertas plantas cultivadas como la yuca tienen un sistema radical muy poco eficiente para absorber nutrimentos como el P. La toma de este elemento por la yuca parece depender altamente de la asociación micorrítica (20), y una situación similar podría presentarse en otras plantas.

Se ha determinado en varias oportunidades el efecto positivo de las micorrizas en el rendimiento de diversos cultivos, incluyendo leguminosas noduladas (33, 34).

Aunque existen dificultades prácticas para promover la formación de micorrizas en el campo, este aspecto se está estudiando intensamente en la actualidad, debido a que tiene un gran potencial de utilización agrícola para ahorrar fertilizantes y aumentar la productividad (1).

### 3.4. TRANSFORMACIONES MICROBIOLÓGICAS DEL FOSFORO

Las distintas formas químicas del fósforo en el suelo, ya sean orgánicas o inorgánicas, están sujetas a transformación microbiológica. Estas transformaciones pueden agruparse en los siguientes tipos de reacciones: (1) mineralización de compuestos orgánicos con la liberación del fósforo inorgánico disponible para las plantas; (2) conversión de formas inorgánicas disponibles en componentes celulares del microorganismo (inmovilización); (3) alteración de la solubilidad de los compuestos inorgánicos de fósforo, debida principalmente a cambios en la acidez del suelo y (4) oxidación-reducción de compuestos inorgánicos del fósforo.

Indudablemente las transformaciones mencionadas influyen notoriamente en la disponibilidad del fósforo para la planta, bien sea del fósforo del suelo o del fósforo aplicado en distintas formas como fertilizante.

El proceso microbiológico de mineralización o sea, la conversión de P orgánico a formas inorgánicas utilizables por las plantas, es de gran importancia, especialmente en suelos con contenidos de materia orgánica relativamente altos, ya que por medio de esta transformación se pueden liberar cantidades apreciables del fósforo disponible. 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 proporción. En general, la adición al suelo

de compuestos ricos en carbono disponible y pobres en fósforo estimula la inmovilización de este elemento y por lo tanto la competencia de los microorganismos del suelo con las raíces de las plantas por las formas de fósforo disponibles para las últimas.

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 (3). 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 (9).

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 de mayor disponibilidad para las plantas (23). Bacterias del género Thiobacillus pueden formar ácido sulfúrico a partir de azufre (S) elemental; el ácido formado libera los fosfatos asimilables de la roca fosfórica (36).

Esta función solubilizadora de los microorganismos ofrece un gran potencial para la utilización de fuentes de fósforo como las rocas fosfóricas que, por ser materiales no procesados químicamente, tienen un menor costo. Actualmente se investiga sobre este aspecto y sobre la utilización de estiércoles

y residuos de cosechas para estimular la actividad microbiana y la solubilización del fósforo.

Como se indicó antes, una función muy importante de los microorganismos con respecto al fósforo es aquella que realizan las micorrizas en la absorción de este elemento por muchas especies de plantas.

### 3.5. TRANSFORMACIONES MICROBIOLÓGICAS DEL AZUFRE

El azufre es otro nutrimento que sufre transformaciones microbiológicas en el suelo. Los microorganismos del suelo realizan mineralización, inmovilización, oxidación del azufre y reducción de sulfatos. Estas transformaciones tienen importancia práctica en la agricultura.

La mineralización y la inmovilización del azufre ocurren simultáneamente. En la mayoría de los suelos la mineralización es lenta e insuficiente para satisfacer la demanda de azufre de las plantas en un sistema de cultivo intensivo (3).

El ion sulfato ( $\text{SO}_4^{=}$ ) es la principal forma de azufre disponible para las plantas. Por medio de reacciones de oxidación llevadas a cabo por microorganismos del suelo se forman, a partir de azufre elemental (S), sulfatos, tiosulfato ( $\text{S}_2\text{O}_3^{=}$ ) o ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (6).

La capacidad de algunos microorganismos, como las bacterias del género Thiobacillus, de oxidar S a sulfatos tiene importantes implicaciones prácticas en

la agricultura. Como se mencionó en el tópico anterior, la oxidación del azufre es un proceso acidificante (se forma ácido sulfúrico) que puede utilizarse para favorecer la solubilización de fosfatos insolubles. Por otra parte, esta reacción permite la utilización de S para bajar el pH de suelos alcalinos y así hacerlos utilizables para la agricultura.

La transformación microbiológica de  $H_2S$  a sulfatos es de importancia práctica no solamente por aportar una forma de azufre disponible para la planta, sino porque el  $H_2S$  es tóxico para las plantas. En suelos inundados, incluyendo aquellos cultivados con arroz, es muy posible que existan las condiciones propicias para la formación de  $H_2S$ . Sin embargo, existen bacterias como las del género Beggiatoa, las cuales, por medio de una asociación con la planta de arroz bajo inundación, pueden eliminar este factor de toxicidad para la planta al transformarlo en  $SO_4^{=}$  (6).

### 3.6. TRANSFORMACIONES DE OTROS ELEMENTOS INDUCIDAS POR ACCION MICROBIANA

Muchos elementos nutritivos para las plantas que no se han mencionado hasta ahora están sujetos a la acción de los microorganismos del suelo y por tanto su disponibilidad para las plantas puede ser afectada.

Una gran cantidad de nutrimentos puede liberarse de la materia orgánica del suelo al ser ésta mineralizada por acción microbiana.

La mayoría de los nutrimentos para las plantas son también requeridos para el crecimiento microbiano y por tanto pueden ser inmovilizados.

La disponibilidad de ciertos elementos especialmente hierro y manganeso puede afectarse indirectamente por la acción de los microorganismos mediante un cambio en su estado de oxidación. El proceso de descomposición de la materia orgánica del suelo es una reacción de oxidación que determina una reducción de otros substratos. En muchos casos el hierro se reduce de  $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$  y el manganeso de  $MnO_2$  a  $Mn^{2+}$ , como consecuencia indirecta de una activa descomposición de la materia orgánica. En esta forma se favorece la disponibilidad para las plantas de estos dos elementos pues las formas reducidas son más disponibles que las formas oxidadas (3).

Además de los elementos cuyas transformaciones se han discutido hay evidencias que indican la participación de los microorganismos del suelo, bien sea directa o indirectamente, en transformaciones que afectan la disponibilidad de elementos como K, Mg, Zn, Cu, Ca y Mo y la toxicidad de elementos como Al, Se, As, Hg, Ni y Pb (3).

### 3.7. EFECTOS INDIRECTOS DE LOS MICROORGANISMOS EN EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS

Hay muchas acciones indirectas de los microorganismos que afectan el crecimiento de las plantas. Dos ejemplos sobresalientes son: (1) el control que ejercen ciertos microorganismos benéficos sobre fitopatógenos y (2) el papel

de la población microbiana del suelo en el desarrollo de condiciones físicas favorables para las plantas.

En el ambiente del suelo existen múltiples interacciones entre microorganismos. Algunos de estos fenómenos permiten que una fracción de la población microbiana ejerza control sobre otra. Las poblaciones de muchos microorganismos fitopatógenos son controladas por microorganismos benéficos y en esta forma se reduce la ocurrencia de enfermedades, especialmente de aquellas que afectan las raíces. La severa incidencia de enfermedades de las plantas causadas por microorganismos del suelo puede deberse en muchos casos a alteraciones en el equilibrio entre organismos benéficos y patógenos (2).

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 y por lo tanto en un mejor ambiente para el crecimiento de las raíces y de la planta en general. Mucho de los efectos benéficos de la aplicación de ciertos residuos orgánicos al suelo se deben precisamente a que éstos estimulan el crecimiento de los microorganismos y a su efecto favorable en las propiedades físicas del suelo (8).

### 3.8. RELACIONES ENTRE LOS MICROORGANISMOS DEL SUELO Y LA UTILIZACION DE PESTICIDAS

Recientemente se ha despertado gran interés por la influencia de los microorganismos del 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. Más aún, la degradación de muchos pesticidas se lleva a cabo principalmente por acción microbiana y no por medios químicos (14).

La degradación microbiológica de pesticidas en el suelo tiene dos implicaciones prácticas importantes. Primero hace que muchos productos se puedan usar sin grandes riesgos pues sus residuos se degradan rápidamente sin acumularse a niveles perjudiciales; pero por otra parte puede significar la degradación de un pesticida antes de que éste ejerza la función para la cual se ha aplicado, reduciéndose así su eficiencia. Lo anterior hace obvia la necesidad de conocer la relativa biodegradabilidad de un pesticida aplicado al suelo antes de recomendar su uso para una situación específica.

### 3.9. RESUMEN

Este capítulo señala las principales funciones que cumplen los diversos grupos de microorganismos que existen en el suelo y la repercusión de esas actividades en las propiedades del suelo y en la productividad agropecuaria.

Los microorganismos del suelo son responsables de muchas transformaciones del N del suelo que tienen implicaciones directas en la nutrición de las plantas, la eficiencia de los fertilizantes nitrogenados y la substitución de las necesidades de fertilizantes nitrogenados por fuentes biológicas. Por esto se describen en forma resumida los procesos de fijación biológica de nitrógeno, mineralización e inmovilización de nitrógeno, nitrificación y desnitrificación.

Las asociaciones simbióticas entre los hongos y las raíces de las plantas (micorrizas) se presentan como un mecanismo que contribuye notoriamente a la nutrición de muchas especies de plantas y que ofrece grandes posibilidades para ser utilizado en la substitución de fertilizantes.

Se presentan también importantes transformaciones microbiológicas del fósforo y el azufre en el suelo que influyen en la disponibilidad de estos nutrientes.

Finalmente se señala cómo muchos otros nutrientes pueden ser transformados en el suelo por acción microbiana, así como la influencia directa e indirecta de los microorganismos en las propiedades físicas del suelo y en la degradación de pesticidas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. AGUILAR, C.; BAREA, J.M. Micorrizas. *Investigación y Ciencia*. (s.l.) v.47, p.8-16. 1980.
2. ALEXANDER, M. *Microbial ecology*. New York, Wiley, 1971. 511 p.
3. \_\_\_\_\_ . *Introduction to soil microbiology*. New York, Wiley, 1977. 467 p.
4. BARTHOLOMEW, M.W. Mineralization and inmovilization of nitrogen in the descomposición of plant and animal residues. En: Bartholomew, M.W., ed. *Soil Nitrogen*. Madison Amer. Soc. Agron., 1965. p. 285-306. (Agronomy 10).
5. BREMNER, J.M. Nitrogenous compounds. En: McLaren, A.D.; Peterson, G.H., ed. *Soil biochemistry*. New York, Dekker, 1967. p. 19-63.
6. BROCK, T.D. *Biology of microorganisms*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, 1979. 802 p.
7. CHILD, J.J. Biological nitrogen fixation. En: Paul, E.A.; Ladd, J. N., ed. *Soil biochemistry* (EE.UU) v.5, p. 297-321. 1981.
8. CLARK, F.E. Living organisms in the soil. En: Stefferud, A., ed. *Soil. The yearbook of agriculture*. Washington D.C., U.S.D.A. U.S. Govt. Printing Office, 1957. p. 157-165.
9. COOPER, R. Bacterial fertilizers in the Soviet Union. *Soil Fert.* (Inglaterra) v.22, p. 327-333. 1959.
10. CRUTZEN, P.J. Estimates of possible variations in total ozone due to natural causes and human activities. *Ambio* (s.l.) v.3, p. 201-210. 1974.
11. DOBEREINER, J.; DAY, J.M. Importancia potencial de la fijación simbiótica de nitrógeno en la rizosfera de gramíneas tropicales. En: Bornemisza, E.; Alvarado, A., ed. *Manejo de suelos en América Tropical*. Tibás, Costa Rica University Consortium on Soils of the tropics, Lehmann, 1974. p. 203-216.

12. EPSTEIN, E. The acquisition of nitrogen. En: Mineral nutrition of plants; principles and perspectives. New York, Wiley, 1972. p. 257-283.
13. EVANS, H.J.; BARBER, L.E. Biological nitrogen fixation for food and fiber production. Science (EE.UU) v.197, p. 332-339. 1977.
14. GEISSBUHLER, H. The substituted ureas. En: Keamey, R.C.; Kaufman, D.D., ed. Degradation of herbicides. New York, Dekker, 1969. p. 79-111.
15. GRAHAM, P.H. Plant - Rhizobium interaction and its importance to agricultural. En: Srb, A.M., ed. Genes, enzymes and population. New York, Plenum, 1973. p. 321-330.
16. \_\_\_\_\_; HUBBELL, D. Interaction suelo-planta-Rhizobium en la agricultura tropical. En: Bormenisza, E.; Alvarado, A., ed. Manejo de suelos en América Tropical. Tibás, Costa Rica University Consortium on Soils of the tropic , Lehmann, 1974. p. 217-233.
17. GRAY, T.R.G.; WILLIAMS, S.T. Soil microorganisms. New York, Hafner, 1971. 240 p.
18. HACSKAYLO, F. Mycorrhiza: the ultimate in reciprocal parasitism. BioScience (EE.UU) v.22, p. 277-583. 1972.
19. HALLIDAY, J. Agrotechnologies based on symbiotic systems that fix nitrogen. International workshop on BNF Technology. Cali, 1981. 26 p.
20. HOWELER, R.H. The effect of mycorrhizal inoculation on the phosphorus nutrition of cassava. s.l., s.f. p. 131-137.
21. KEYSER, H.H.; MUNNS, D.N. Tolerance of rhizobia to acidity, aluminum, and phosphate. Soil Sci. Soc. Am. J. (EE. UU) v.43, p. 519-523. 1979.
22. KNOWLES, R. Denitrificación. En: Paul, E.A.; Ladd, J.N., ed. Soil biochemistry (EE. UU) v.5, p. 323-369. 1981.
23. LOUW, H.A.; WEBLEY, D.M. A study of soil bacteria dissolving certain mineral phosphate fertilizers and related compounds. J. Appl. Bacteriol. (EE. UU) v.22, p. 227-233. 1959.

24. LUMPKIN, T.A.; PLUCKNETT, D.L. Azolla: botany, physiology and use as a green manure. *Econ. Bot. (EE. UU)* v.34, p. 111-153. 1980.
25. McCANTS, C.B.; SKOGLEY, E.O.; 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. (EE. UU)* v. 23, p. 466-469. 1959.
26. MULVANEY, R.L.; BREMNER, J.M. Control of urea transformations in soils. En: Paul, E.A.; Ladd, J.N., ed. *EE. UU*, 1981. p. 153-196.
27. MUNEVAR, F.; WOLLUM, A.G. Effects of the addition of phosphorus and inorganic nitrogen on carbon and nitrogen mineralization in andepts from Colombia. *Soil Sci. Soc. Amer. J. (EE. UU)* v. 41, p. 540-545. 1977.
28. \_\_\_\_\_; WOLLUM, A.G. Effect of high root temperature and Rhizobium strain on nodulation, nitrogen fixation, and growth of soy - beans. *Soil Sci. Soc. Amer. J. (EE. UU)* v.45. 1981. (en im prenta).
29. \_\_\_\_\_; WOLLUM, A.G. Growth of Rhizobium japonicum strains at temperatures above 27°C. *Appl. Envir. Microbiol. (EE. UU)* v.42, p. 272-276. 1981.
30. \_\_\_\_\_; WOLLUM, A.G. Response of soybean plants to high root temperature as affected by plant cultivar and Rhizobium strain. *Agronomy J. (EE.UU)* v.74. 1982. (en imprenta).
31. MYERS, J.K. Temperature effects on ammonification and nitrification in a tropical soil. *Soil Biol. Biochem. (Inglaterra)* v.7, p. 78-82. 1975.
32. POSTGATE, J.R.; HILL, S. Nitrogen fixation. En: Lynch, J.M.; Poole, N.J., ed. *Microbial ecology: a conceptual approach*. London, Blackwell Scientific, 1979. p. 191-213.
33. SAFIR, G.R. Vesicular - arbuscular mycorrhizae and crop productivity. En: Carlson, P.S., ed. *The biology of crop productivity*. New York, Academic Press, 1980.
34. SCHENCK, N.C.; HINSON, K. Response of nodulating and nonnodulating soybeans to a species of Endogone mycorrhiza. *Agron. J. (EE. UU)* v.65, p. 849-859. 1973.

35. STEWART, W.D.P. Nitrogen - fixing plants. Science. (EE. UU) v. 158. p. 1426-1432. 1967.
36. SULFUR INSTITUTE. Bio-super: potential  $P_2O_5$  - S fertilizer for the tropics. Sulfur Institute J. (EE. UU) v.11 no. 2, p. 9-11. 1975.
37. TALLEY, S.N.; RAINS; D.W.: Azolla filiculoides Lam. as a fallow-season green manure for rice in temperature climate. Agron. J. (EE. UU) v.72, p. 11-18. 1980.
38. VARELA G., R.; MUNEVAR M., F. Comportamiento de cepas de Rhizobium japonicum, asociadas con variedades de soya (Glycine max (L.) Merr) seleccionadas para el Departamento del Tolima. Rev. ICA (Colombia) v.13, p. 249-255. 1978.