

Ronald Ferrera Cerrato, Alejandro Alarcón
La microbiología del suelo en la agricultura sostenible
Ciencia Ergo Sum, vol. 8, núm. 2, julio, 2001
Universidad Autónoma del Estado de México
México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10402108>



Ciencia Ergo Sum,
ISSN (Versión impresa): 1405-0269
ciencia.ergosum@yahoo.com.mx
Universidad Autónoma del Estado de México
México

La microbiología del suelo en la agricultura sostenible

RONALD FERRERA CERRATO* Y ALEJANDRO ALARCÓN*

Recepción: 13 de marzo de 2001

Aceptación: 15 de mayo de 2001

The Microbial Activity in the Agroecosystem

Abstract. *Physical, chemical and biological soil characteristics determine ecosystem and agroecosystem fertility. The role of microbial activity is very important in the kinetics of soil processes such as mineralization and immobilization, as well as other biogeochemical cycles of essential nutrients. The use of beneficial soil microorganisms in agriculture has been increasing, as these organisms directly influence development and plant growth on the agroecosystems. Microorganisms should be considered as basic agroecosystem components in order to reach sustainability, care of natural resources and environmental protection.*

Key words: *microbial activity, Rhizobium, mycorrhizae, organic matter, legume.*

Introducción

La sostenibilidad¹ agrícola ha cobrado especial interés en los últimos años, ya que este tipo de manejo de los agroecosistemas repercute en beneficios para el hombre, así como para el balance ecológico y agroecológico. Sin embargo, para fortalecer los sistemas agrícolas sostenibles se requiere del conocimiento fundamental de los diversos componentes que lo integran y que pueden ser determinantes en la funcionalidad de los mismos. Bajo este contexto, gran parte de la productividad de los cultivos está determinada por la fertilidad del suelo (Barea, 1991). Esa fertilidad puede ser evaluada con base en sus características físicas (densidad, estructura, porosidad, etc.), químicas (actividad de las arcillas, potenciales de óxido-reducción, materia orgánica, etc.) y biológicas (microorganismos que conforman la microflora y microfauna, además de la meso y macrofauna). Las interacciones que se derivan de estas tres características producen cambios significativos en los ciclos biogeoquímicos del suelo y en la disponibilidad de nutrimentos para las plan-

tas (figura 1). Además, estas interacciones permiten que las comunidades vegetales también contribuyan a la estabilidad del suelo como componente integral del ecosistema o agroecosistema en cuestión. De esta forma y con base en el manejo de los diversos elementos que componen a los sistemas agrícolas (Mary *et al.*, 1996), es posible generar agroecosistemas sostenibles cuyo flujo de energía (entrada y salida) sea balanceado, lo que permite que la funcionalidad del agroecosistema se autorregule y que requiera cada vez menos de la aplicación de insumos energéticos (fertilizantes y otros agroquímicos).

Por lo anterior, la presente revisión intenta resaltar no sólo la importancia del manejo de sistemas agrícolas orientados a la sostenibilidad, sino también el impacto de la actividad microbiana del suelo como elemento de regulación que facilita los nutrimentos a los agroecosistemas sostenibles.

I. Sistemas sostenibles y actividad microbiana

Cuando el hombre, por medio de la tecnificación, maneja un ecosistema con enfoques determinísticos para la producción intensiva de un cultivo, también genera cambios en las regulaciones energéticas. Estos cambios son provocados por el paulatino desgaste inducido por la sucesiva producción, lo cual conduce a que el agroecosistema poco a poco vaya dependiendo de la aplicación externa de energía. Esta energía frecuentemente es adicionada en forma química, lo que contribuye al incremento de los costos de producción.

* Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Carretera México-Texcoco km 35.5, Montecillo, 56230, Estado de México. Correo electrónico: ronaldjf@colpos.colpos.mx y alexcala@colpos.colpos.mx

1. Los términos sostenible y sostenibilidad son utilizados con base en la reflexión de Pérez y Ferrera (1996), quienes los han comparado con los términos sustentable y sustentabilidad.

FIGURA 1. FACTORES FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS QUE CONTRIBUYEN A LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS. LAS FLECHAS BIDIRECCIONALES INDICAN LAS INTERACCIONES DE LOS FACTORES Y DE LOS SUBSISTEMAS ORIENTADOS A LA SOSTENIBILIDAD DEL AGROECOSISTEMA.

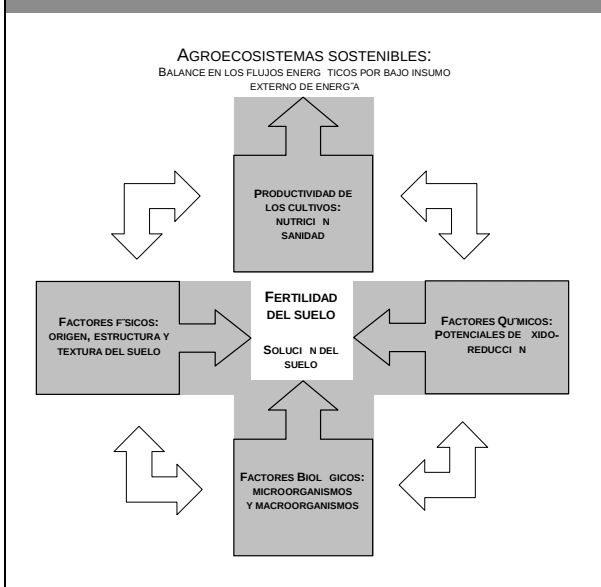
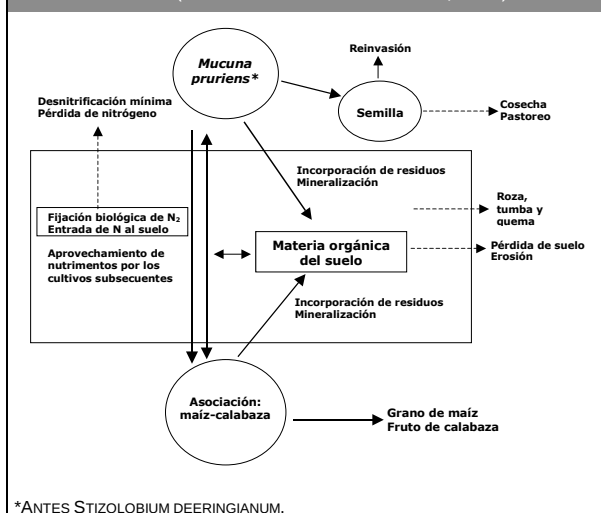


FIGURA 2. ESQUEMATIZACIÓN DE LA REGULACIÓN ENERGÉTICA EN EL AGROECOSISTEMA SOSTENIBLE DE TAMULTE DE LAS SABANAS, TABASCO. LAS FLECHAS CONTINUAS INDICAN EL FLUJO Y RECICLAJE DE LA MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES. LAS FLECHAS DISCONTINUAS INDICAN LA NULA O ESCASA PRESENCIA DE FACTORES QUE PROPICIAN LA PÉRDIDA DE ENERGÍA EN EL AGROECOSISTEMA (MODIFICADO DE GONZÁLEZ ET AL., 1990).



*ANTES STIZOLOBIUM DEERINGIANUM.

No obstante, desde tiempos antiguos se ha demostrado que los agroecosistemas no necesariamente requieren del ingreso de energía química. Un ejemplo de esto es el agroecosistema de bajo ingreso externo que se tiene en Tamulte de las Sabanas, Tabasco (González *et al.*, 1990), don-

de se utiliza la rotación de *Stizolobium deeringianum* [sinonimia de *Mucuna pruriens* (L.) var. *Utilis* (Wall. Ex Wright)], cuyos residuos son incorporados al suelo, posteriormente se siembra maíz y calabaza en asociación; además, no se realizan aplicaciones de fertilizantes ni plaguicidas y no se hace labranza alguna. Bajo este sistema de cultivo, la actividad de la fijación biológica del nitrógeno es tal que los incrementos de la actividad de la enzima nitrogenasa son de 400% más en comparación con aquella obtenida en monocultivo de maíz. El sistema permite que las poblaciones microbianas estén reguladas de tal forma que la diversidad observada incluye desde bacterias de vida libre y simbiótica con capacidad de reducir el nitrógeno atmosférico, hongos micorrízicos arbusculares e incluso propágulos de hongos fitopatógenos, mismos que presentaron cierta capacidad saprofítica; su expresión patológica estuvo minimizada. Mediante el uso de *Mucuna* en el sistema, el rendimiento de maíz fue mayor de 3000 kg ha⁻¹, mientras que el rendimiento del monocultivo de maíz fue de 776 kg ha⁻¹. Con el manejo de leguminosas herbáceas, anuales o perennes, es posible mantener producciones sostenidas sin deteriorar los aspectos ecológicos del sistema, toda vez que evita las pérdidas por la acción de otras prácticas, lo que mantiene el reciclaje de la energía (figura 2).

Otro ejemplo de sistemas sostenibles son las chinampas, aquellas que prevalecían antes de la Conquista, que se caracterizan por ser plataformas de suelo rodeado por canales de agua, y se fundamentan en aspectos agroecológicos relacionados con el mantenimiento de la diversidad y manejo de materia orgánica que propicia el reciclaje de nutrientes (Jiménez y Núñez, 1993). Mediante el manejo de estos sistemas no sólo se obtienen beneficios ecológicos, sino también económicos, en virtud de la rotación de cultivos de hortalizas permite la diversificación de los productos.

Las chinampas, al igual que otros agroecosistemas considerados como tradicionales o mesoamericanos (Rojas, 1991; González, 1993) representan una excelente alternativa para utilizarlos como modelos en la sostenibilidad agrícola de México. La sostenibilidad de los agroecosistemas se fundamenta en las regulaciones biológicas que se establecen en ellos, de tal forma que la diversidad existente permite que los organismos que la conforman sean regulados por la presencia de antagonistas. Con ello, la presencia de microorganismos simbióticos en las plantas favorece su mejor nutrición, al tiempo que les confieren un efecto de protección—directa o indirecta— ante el ataque de patógenos. Los hongos micorrízicos y otros filamentosos, son ejemplos de microorganismos simbióticos mutualistas, al igual que las bacterias de diversa actividad fisiológica que favorecen el crecimiento y nutrición de algunas plantas (Bethlenfalvay,

1993; Dubeikovsky *et al.*, 1993; Linderman, 1993; Unestam y Damm, 1993; Llovera *et al.*, 1994; Howell, 1999). Con base en lo anterior y de acuerdo con Robinson (1987) y García (1993a y b; 1998), los sistemas agrícolas deben ser manejados a partir del conocimiento de cada elemento integrante, es decir, en un sentido holístico, ya que de esta forma no sólo se fortalece la sostenibilidad de los agroecosistemas, sino que también se establecen regulaciones a los organismos potencialmente dañinos para los cultivos mediante la presencia de antagonistas o de diversas alternativas bióticas o abióticas de escape o resistencia.

1. Reciclaje de materia orgánica

Como se ha visto en los ejemplos anteriores, el manejo de la materia orgánica y su reciclamiento es considerado como un elemento importante en la sostenibilidad agrícola. La aplicación de materia orgánica, independientemente de su fuente, tiene como principal objetivo propiciar el mejoramiento de la estructura y características químicas de los suelos. Esta adición contribuye en forma significativa a la inducción de la diversidad y actividad microbiana; con ello se modifican todos los aspectos bioquímicos (enzimas, por ejemplo) y fisicoquímicos que intervienen en el mejoramiento de la fertilidad del suelo.

El reciclaje de la materia orgánica, producto de los residuos de cosecha, permite el mejoramiento de las características del suelo cuando se incorporan en éste y se exponen a los procesos de mineralización mediante reacciones de oxidación y reducción, favorecidos por la humedad, la temperatura y el pH, la profundidad del suelo y la aireación. Estos procesos provocan que los nutrientes contenidos en los residuos sean transformados de una forma orgánica a una forma inorgánica, lo cual permite su liberación y disponibilidad para las plantas. La materia orgánica está conformada por compuestos ricos en carbono, nitrógeno, fósforo y agua, principalmente. Éstos propician que los microorganismos responsables de la mineralización (Chung *et al.*, 1988; Estrada *et al.*, 2000; Corlay *et al.*, 2000) tengan las fuentes de nutrientes y energía requeridas para propiciar su desarrollo y metabolismo (Ferrera, 1995; Alarcón y Ferrera, 2001).

La transformación de la materia orgánica puede ser llevada a cabo *ex situ*, mediante procesos bien caracterizados como el composteo y vermicomposteo, cuyo proceso involucra la incorporación y actividad de ciertas lombrices de tierra (*Eisenia phoetida*, *E. Andrei*, etc.) una vez que el material ha sido precompostado. Ambos procesos biotecnológicos son excelentes para generar abonos agrícolas. En el caso de la vermicomposta, el material obtenido está enriquecido tanto química como biológicamente por la actividad de las lombrices y

por la dinámica microbiana y bioquímica que se establece durante el proceso (Corlay *et al.*, 1999; Quintero *et al.*, 2000).

Un aspecto importante a ser considerado en la transformación de la materia orgánica es la relación C:N. El nitrógeno es un elemento esencial requerido para el crecimiento microbiano y la degradación de la materia orgánica. Cuando la materia orgánica tiene alto contenido de nitrógeno, los microorganismos tienen suficiente sustrato para inducir mayor mineralización, ya que la microflora (bacterias, hongos y actinomicetos) satisface plenamente sus necesidades de N, por lo que no es un factor limitante para ellos. Por el contrario, si el contenido de N es bajo, la tasa de descomposición de la materia orgánica disminuye drásticamente y la tasa de mineralización de carbono orgánico dependerá de la adición de fuentes nitrogenadas. Rynk *et al.* (1988) señalan que para que el proceso del composteo se desarrolle en forma óptima se requiere una relación C:N de 25:1 a 30:1, además de otras condiciones de temperatura, pH y presencia de microorganismos que transformen la materia orgánica (Santamaría, 1999). En cuanto al proceso del vermicomposteo, además del origen del material, se debe cumplir con una relación C:N menor a 22:1. Estos conocimientos permiten predecir la mineralización de los materiales utilizados, como restos de plantas, preferentemente leguminosas, o estiércoles. La relación C:N puede ser de utilidad para establecer índices de estabilidad y no de la madurez de las vermicompostas (Santamaría, 1999).

Un parámetro para evaluar el impacto de la adición de materia orgánica en los suelos es la evaluación de la producción de CO₂ por obras de la actividad respiratoria de los microorganismos, la cual tiende a incrementarse con la incorporación de materia orgánica (Wick *et al.*, 1998; Álvarez-Solís *et al.*, 2000). Todos estos aspectos han sido motivo de diversas investigaciones relacionadas con la caracterización de la calidad de los suelos a partir del estudio de diversos indicadores (Rasad *et al.*, 1996; Drinkwater *et al.*, 1996; Smith y Doran, 1996), entre los que destacan los aspectos microbianos que componen la fase viva de un suelo (Rice *et al.*, 1996; Dick *et al.*, 1996; Blair *et al.*, 1996; Parkin *et al.*, 1996; Wick *et al.*, 1998; Álvarez *et al.*, 2000). Sin embargo, deben de considerarse las diversas condicionantes que podrían limitar el uso de los materiales orgánicos en los sistemas agrícolas o incluso para recuperación de zonas marginadas, ya que la naturaleza de los residuos (Corlay *et al.*, 1999) y tamaño de partícula (Quintero *et al.*, 2000) podrían ser determinantes en el éxito del uso de estos materiales en suelos de zonas altamente perturbadas por agentes de erosión (Wick *et al.*, 1998) o en suelos endurecidos de origen volcánico, como los tepetates (Álvarez *et al.*, 2000).

2. Abonos verdes y cultivos de cobertera

El uso de abonos verdes y cultivos de cobertera ha sido útil para la conservación de suelos, esto es, el control de la erosión; el mejoramiento de la fertilidad y como componente básico de los ecosistemas y agroecosistemas sostenibles.

En lo que respecta a la conservación de suelos, el uso de leguminosas de consistencia herbácea (frijol, haba, alfalfa, veza, trébol blanco, etc.) y leguminosas arbóreas (*Prosopis leavigata*, *P. juliflora*, *Mimosa biuncifera*, *M. luisiana*, *Pithecellobium dulce*, etc.) ha contribuido en la disminución del daño producido por el agua y el viento, los principales agentes de erosión, lo cual evita la pérdida de los componentes físicos y biológicos del suelo. Además, este tipo de plantas permite crear sistemas de manejo de suelos con fines de recuperación de zonas altamente degradadas, como los tepetates del Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala, lo cual favorece la obtención de productos consumibles cuando se realiza la rotación de cultivos como maíz o cebolla en combinación con las leguminosas e incluso con materia orgánica (Delgadillo y Ferrera *et al.*, 1996; Ferrera *et al.*, 1996; Flores y Ferrera, 1996; Navarro y Flores, 1996; Santamaría y Ferrera, 1996; Corlay *et al.*, 2000).

Dada la facultad de las leguminosas para fijar nitrógeno atmosférico, su cultivo ha venido a contribuir en el mejoramiento de la capacidad productiva de diversos sistemas agrícolas. Sin embargo, no todas las leguminosas tienen la misma capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico, por lo que su uso como abonos verdes puede ser limitado. Por citar un ejemplo, la aplicación de abonos verdes en el cultivo de arroz presentó efectos diferenciales en el rendimiento de grano. La incorporación de abono verde de *Sesbania emerus* produjo rendimientos mayores a 6,053 kg ha⁻¹, mientras que abonos verdes procedentes de *Aeschynomene americana* y *Mucuna pruriens* produjeron menos de 5,000 kg ha⁻¹ (Catón, 1995).

Con el uso de una leguminosa adecuadamente seleccionada es posible incrementar la productividad de los sistemas de producción agrícola. De esta forma, se pueden clasificar las leguminosas con base en su capacidad de fijar nitrógeno, entre las que destacan *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lablab*, *Sesbania deringianum* (Jiménez, 1993; Ortiz, 1995) y *Gliricidia sepium* (Melchor *et al.*, 1999); así como por su capacidad de producir biomasa, como *Canavalia ensiformis*, *Sesbania emerus* y *Aeschynomene americana* (Jiménez, 1993; Ortiz, 1995). Mediante el manejo de estas leguminosas no sólo se beneficia la capacidad de abastecimiento nutrimental de los suelos hacia los cultivos, sino también se puede lograr la obtención de sistemas de producción sostenibles como el caso de Tamulte de las Sabanas (González *et al.*, 1990) o como aquellos sistemas de producción de arroz y palma africana que se manejan tanto en México como en Costa Rica, cuya aplicación se basa en el

aumento de la nutrición de los cultivos y su producción, así como por evitar la competencia que se establece con las malezas, ya que las leguminosas, por su cobertura y capacidad alelopática, evitan que las malezas proliferen (Ortiz, 1995).

3. Fijación simbiótica del nitrógeno atmosférico

Una de las líneas de investigación con mayor estudio en la agricultura es la fijación biológica del nitrógeno atmosférico (FBN), con especial énfasis en la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa. En diversas investigaciones se ha puesto de manifiesto los diversos aspectos básicos relacionados con el microsimbionte (bacteria). Estos estudios permiten tener el conocimiento necesario para utilizar la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa como tecnología para la FBN.

El establecimiento de una simbiosis funcional entre la leguminosa y los rizobias depende de factores como la afinidad del microsimbionte al macrosimbionte (planta), al igual que de factores abióticos, como temperatura, oxigenación, nutrición, etc. Una vez establecida la simbiosis, se generan estructuras radicales denominadas nódulos, en las que se lleva a cabo la reducción del nitrógeno atmosférico (N^oN) para incorporarlo, mediante la acción de la enzima nitrógenasa localizada en el interior del simbiosoma, en compuestos ricos en nitrógeno (glutamina, glutamato, aspartato, asparagina y ureidos, en algunas especies) los cuales serán utilizados por el metabolismo celular para satisfacer los requerimientos de los procesos fisiológicos de la planta (Werner, 1992; Vance y Gantt, 1992; Edvardi y Day, 1997).

Mediante el uso de esta simbiosis es posible el mejoramiento genético y el incremento de la tasa de fijación de nitrógeno en leguminosas anuales consideradas de baja eficiencia en la fijación, como *Phaseolus vulgaris* y *Pisum sativum*, en comparación con plantas como *Vicia faba*, *Lupinus sp.* y *Cajanus cajan*, cuya tasa de fijación de nitrógeno es mayor.

Por medio del manejo de los sistemas simbióticos fijadores de nitrógeno (*Rhizobium*-leguminosa, *Frankia*-Casuarina, *Anabaena-Azolla*, etc.) es posible contribuir directamente al enriquecimiento de la fertilidad del suelo, ya que el ingreso neto de nitrógeno permite la estimulación de los procesos microbianos en la transformación de la materia orgánica y reciclaje de nutrientes necesarios en los sistemas agrícolas productivos, así como en aquellos considerados como agroecosistemas sostenibles. Por tal razón, los sistemas simbióticos son considerados elementos esenciales en la sostenibilidad agrícola.

4. Simbiosis micorrízica

Los hongos micorrízicos (HM) constituyen uno de los principales componentes microbianos que intervienen en la esta-

bilización de las comunidades vegetales integrantes de un ecosistema o agroecosistema. Ecológicamente, los HM han contribuido a la evolución y adaptación de las plantas en el ecosistema terrestre. De los seis tipos de micorriza conocidos, dos sobresalen por su importante función en plantas de interés agrícola, hortícola, frutícola y forestal: micorriza arbuscular y ectomicorriza (figura 3).

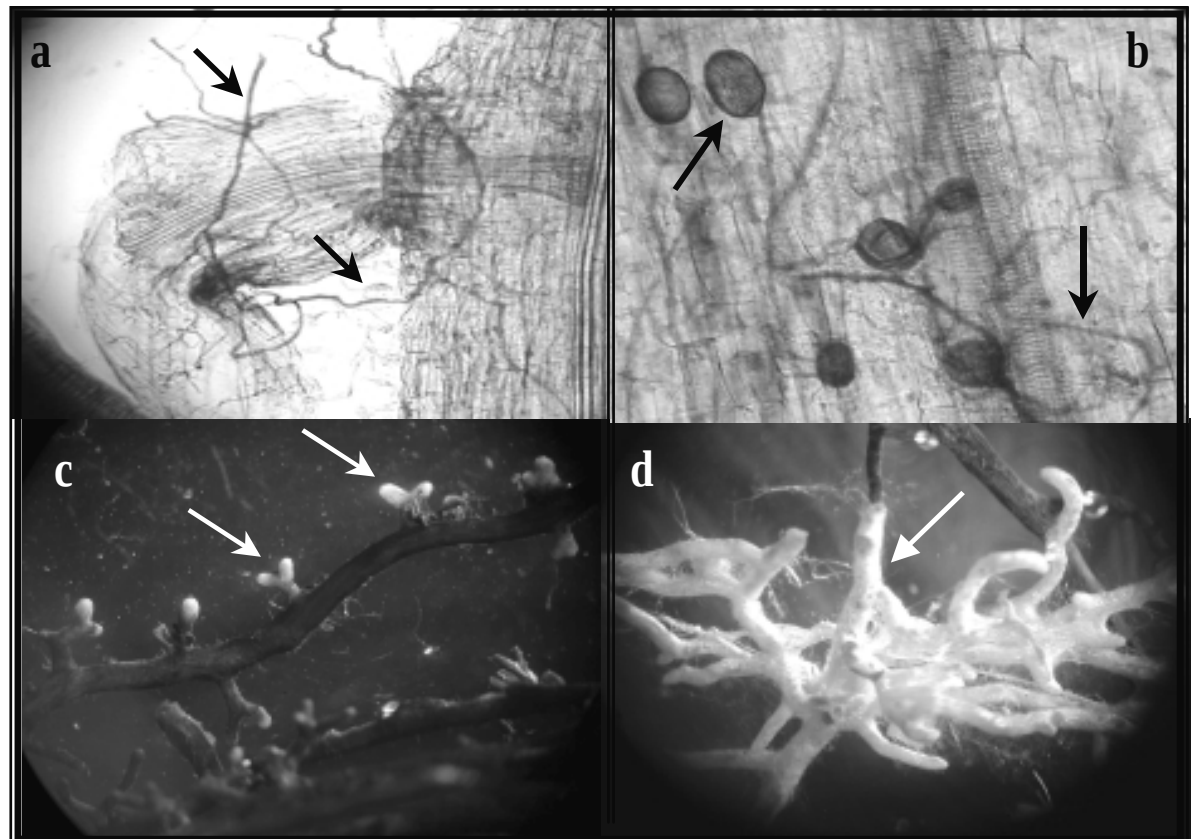
La micorriza arbuscular se refiere a una estructura especializada que se forma por la simbiosis entre hongos del orden de los Glomales (150 especies de hongos conocidas) y las raíces de más del 80% de las plantas conocidas en el mundo. Esta simbiosis tiene especial importancia en el mejoramiento de la nutrición de las plantas, particularmente fósforo y otros nutrimentos, lo que induce mayor capacidad de crecimiento a las que se les inoculan estos hongos.

Por otra parte, la ectomicorriza se forma cuando los hongos del grupo de los basidiomicetos, ascomycetos y zygom-

cetos, principalmente, establecen simbiosis con plantas de clima templado que comprenden familias como Pinaceae, Fagaceae, Betulaceae y algunos miembros de las familias Salicaceae, Tiliaceae, Rosaceae, Leguminosae y Juglandaceae. Se conocen aproximadamente dos mil especies de hongos formadores de ectomicorriza (Pérez, 1995).

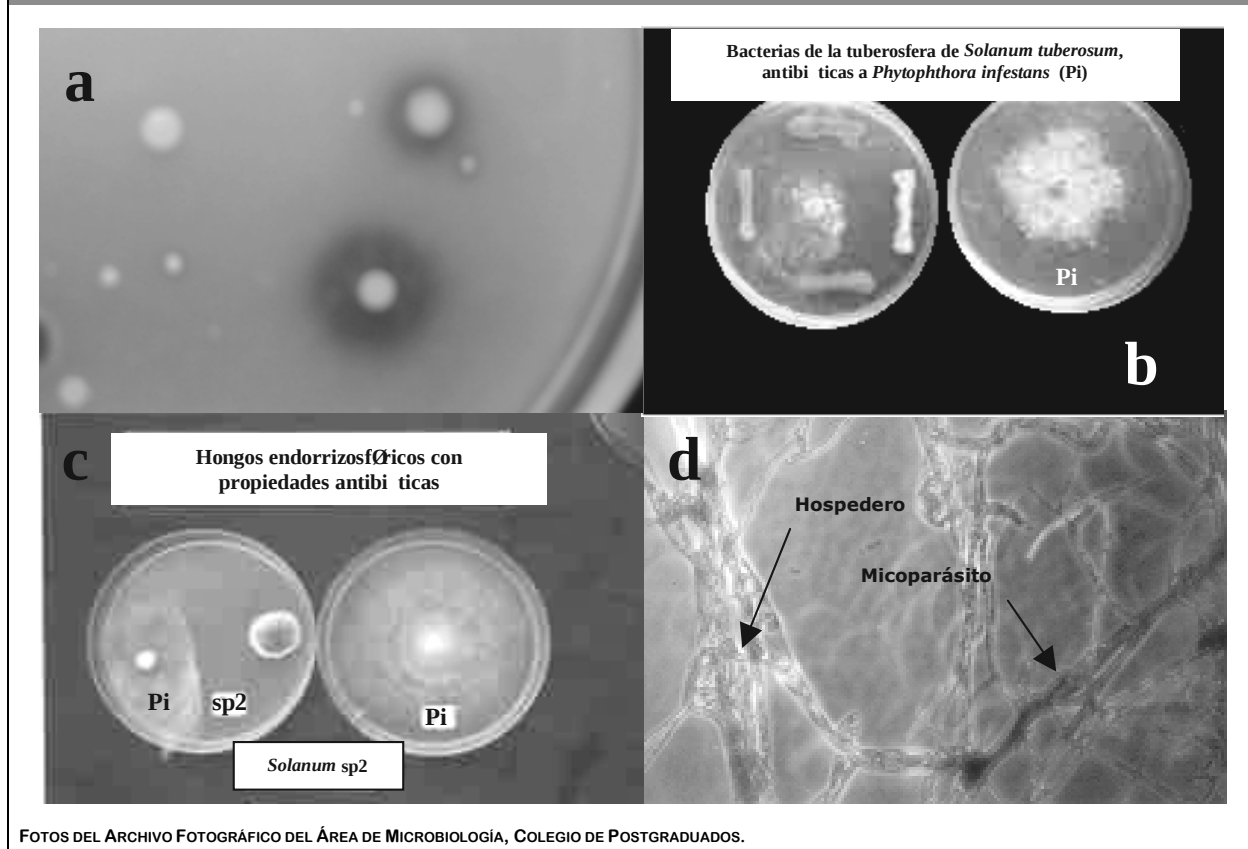
La simbiosis micorrízica ha cobrado especial interés por su enorme potencial de uso en los diversos programas de producción de plantas en sistemas de vivero y propagación (Alarcón y Ferrera, 1999). Al inocular HM en las plantas, éstas presentan mayor sanidad, vigor e incluso calidad, características que repercuten en la capacidad de adaptación a diferentes condiciones edáficas y climáticas, así como en su productividad. Desde el punto de vista ecológico, los HM han sido considerados como elementos primordiales en la funcionalidad de los sistemas productivos. Pérez (1995 y 1998) considera a la simbiosis micorrízica como un componente homeostático,

FIGURA 3. ESTRUCTURA MORFOLÓGICA TÍPICA DE LA SIMBIOSIS MICORRÍZICA ARBUSCULAR. A) MICELIO EXTERNO, B) VESÍCULAS Y MICELIO INTRARRADICAL, SE ALADOS CON FLECHAS) Y DE LA SIMBIOSIS ECTOMICORRÍZICA, C) ESTRUCTURA DICOTÍMICA TÍPICA EN PINOS, D) ESTRUCTURA ECTOMICORRÍZICA EN *CARYA ILLINOENSIS*-NOGAL PECANERO, SE ALADOS CON FLECHAS.



FOTOS DEL ARCHIVO FOTOGRÁFICO DEL ÁREA DE MICROBIOLOGÍA, COLEGIO DE POSTGRADUADOS.

FIGURA 4. ACTIVIDAD FISIOLÓGICA DE ALGUNOS GRUPOS MICROBIANOS QUE SE ESTABLECEN EN LA RIZOSFERA DE LAS PLANTAS Y QUE PARTICIPAN EN LA SOSTENIBILIDAD DE ECOSISTEMAS Y AGROECOSISTEMAS. A) BACTERIAS SOLUBILIZADORAS (VER HALOS DE SOLUBILIZACIÓN) DE FOSFATO INORGÁNICO, B) BACTERIAS ANTIBIÓTICAS A PATÓGENOS, C) HONGOS ENDORRIZOSFÉRICOS ANTIBIÓTICOS (SP2) A HONGOS PATÓGENOS (PI) Y D) HONGOS ENDORRIZOSFÉRICOS MICOPARASÍTICOS (BIOTRÓFOS).



FOTOS DEL ARCHIVO FOTOGRÁFICO DEL ÁREA DE MICROBIOLOGÍA, COLEGIO DE POSTGRADUADOS.

ya que participa como conector y regulador entre el sistema primario (plantas) y el subsistema descomponedor (microorganismos del suelo), propiciando beneficios en los componentes del sistema (ciclo autocatalítico).

En lo que respecta a las interacciones con otros microorganismos, al parecer los HM tienen un efecto inductor de poblaciones microbianas cuya actividad fisiológica repercute en beneficios para la planta. Así como las plantas ejercen un efecto rizosférico sobre los microorganismos que se establecen alrededor de las raíces, los exudados que producen las hifas de HM propician cambios significativos en la comunidad microbiana adyacente. En este sentido, se ha detectado mayor cantidad de bacterias diazotróficas y simbióticas, además de solubilizadoras de fosfatos insolubles, que inducen el mejoramiento de la nutrición (González, 1995) y protección de la planta ante patógenos de hábito radical (Linderman, 1993; Bethlenfalvay, 1995; Hamel y St-Arnaud, 1998; Azcón, 2000) cuando en la plan-

ta se establece la simbiosis micorrízica, tanto arbuscular como ectomicorrízica.

5. Otros microorganismos de importancia agrícola

Existen otros microorganismos de vida libre capaces de reducir el nitrógeno atmosférico y que son considerados como bacterias diazotrofas (*Azospirillum*, *Derxia*, *Pseudomonas*, *Beijerinckia*, *Azotobacter*, *Enterobacter*, y otras). Además, estas bacterias tienen la facultad de promover el crecimiento vegetal a través de la capacidad de propiciar la síntesis de hormonas reguladoras del crecimiento, como el ácido indolacético, así como de inhibir el crecimiento e incidencia de patógenos de hábito radical, mediante la secreción de sustancias de tipo antibióticas (Alarcón *et al.*, 1999; Ferrera *et al.*, 1999; Alarcón y Ferrera, 2001) (figura 4b). Otras bacterias tienen la capacidad de solubilizar compuestos ricos en fósforo (figura 4a), que no está disponible para las plantas, mediante su actividad fisiológica de secretar ácidos orgánicos y enzimas denomina-

das fosfatasas, por lo que propician la liberación del fósforo para que las plantas puedan aprovecharlo.

Algunos hongos filamentosos (no micorrízicos) del suelo se asocian con raíces (hongos endorizosféricos) de plantas, éstos intervienen en la solubilización de fósforo, mineralización de la materia orgánica y contribuyen también en el control biológico de otros hongos patógenos (figura 4c). En este último caso, los mecanismos de acción de estos hongos se fundamentan en actividad micoparasítica (Ferrera, 1977; Espinosa *et al.*, 1999) de tipo *biotrófica* (en la que sólo se alimentan del hongo parasitado sin provocarle la muerte) y *necrotrófica* (en la que se produce la muerte del hongo parasitado, figura 4d).

Conclusiones

Con base en el planteamiento anterior se ha podido apreciar la importancia de la actividad de los microorganismos en los diferentes aspectos que denotan la fertilidad de un suelo y la sostenibilidad de ecosistemas y agroecosistemas. El manejo de diversas prácticas culturales (establecimiento de leguminosas en rotación de cultivos, abonos verdes, aplicación de materia orgánica) permite que los sistemas agrícolas requieran menos aplicaciones externas de energía; con ello se favorece la conservación del recurso suelo en una condición por demás favorable. Por otra parte, estas prácticas permiten que la actividad microbiana sea favorecida y que se tenga mayor diversidad de microorganismos, de tal forma que se establezcan diversas relaciones tróficas que contribuyan a la sanidad y fertilidad de los suelos manipulados en esta forma.

El conocimiento de la actividad fisiológica de los microorganismos del suelo ha permitido seleccionar aquellos con potencial de uso en la agricultura. De esta manera, el hombre ha utilizado bacterias y hongos que propician mejor crecimiento y desarrollo de las plantas en los agroecosistemas donde se aplican. Con ello, y de acuerdo con un adecuado manejo de los sistemas, es posible incrementar la actividad microbiana del suelo, propiciando así el fortalecimiento de la sostenibilidad de los ecosistemas y agroecosistemas. Sin embargo, el uso de ciertos microorganismos debe contemplar algunos aspectos que permitan definir su potencial benéfico e incluso la factibilidad de utilizarlos, ya que algunos de ellos no son susceptibles de ser aplicados directamente en cultivos básicos (frijol o maíz), como es el caso de los hongos micorrízicos arbusculares, por ejemplo. La selección de los microorganismos a utilizar, así como de las condiciones del sitio, es un elemento determinante en el éxito del uso de microorganismos alóctonos. Con base en lo anterior, es preferible contemplar la implementación de prácticas culturales

para favorecer así el aumento y actividad microbiana autóctona de un sitio dado, cuando las condiciones de suelo y clima lo permitan. En caso contrario, como los sitios con alto grado de perturbación por erosión o por agentes de contaminación, la introducción de microorganismos alóctonos puede constituir una excelente alternativa de recuperación y rehabilitación, aunque a largo plazo.



BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, A. y R. Ferrera (1999). "Manejo de la micorriza arbuscular en sistemas de propagación de frutales", *Terra*. 17:179-19.
- _____. (2001). "Los microorganismos en la nutrición de cultivos", en Alcantar, G. (ed). *Nutrición de cultivos*. Colegio de Postgraduados Montecillo, Estado de México. En prensa.
- _____.; M. Manjarrez; N. Grunwald y H. Lozoya (1999). "Bacterias rizosféricas y de la tuberosfera de tres variedades de papa en función de su ciclo fenológico", en Rodríguez, L. y J. Escobar (eds). *Memorias XXII Congreso Nacional de Control Biológico*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México
- Alvarez, J.; R. Ferrera y J. Etchevers (2000). "Actividad microbiana en tepetate con incorporación de residuos orgánicos" *Agrociencia* 34:523-532.
- Arshad, M.; B. Lowery y B. Grossman (1996). "Physical Tests for Monitoring Soil Quality", en Doran, J. and A. Jones (eds). *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America (SSSA). Special Publication, Number 49. Madison, Wisconsin, USA.
- Azcón, R. (2000). "Papel de la simbiosis micorrízica y su interacción con otros microorganismos rizosféricos en el crecimiento vegetal y sostenibilidad agrícola", en Alarcón, A. y R. Ferrera (eds). *Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular*. Mundi Prensa, México.
- Barea, J. (1991). "Vesicular Arbuscular Mycorrhizae as Modifiers of Soil Fertility", en Stewart, B. (ed). *Advances in Soil Science*. Vol 15. Springer-Verlag, Nueva York.
- Bethlenfalvay, G. (1993). "The Mycorrhizal Plant-Soil System in Sustainable Agriculture", en Ferrera, R. y R. Quintero (eds). *Agroecología, sostenibilidad y educación*. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Blair, J.; P. Boleen y D. Freckman (1996). "Soil Invertebrates as Indicators of Soil Quality", en Doran, J. y A. Jones (eds). *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America (SSSA) Special Publication, Number 49 Madison, Wisconsin, USA.
- Chung, Y.; H. Hoitink y P. Lipps (1988). "Interactions Between Organic

- Matter Decomposition Level and Soilborne Disease Severity", *Agric Ecosystems Environ.* 24:183-193.
- Corlay, L.; R. Ferrera; J. Etchevers; A. Echegary y J. Santizo (1999). "Cinética de grupos microbianos en el proceso de producción de composta y vermicomposta", *Agrociencia*. 33:375-380.
- _____; R. García y R. Ferrera (2000). "Aplicación de vermicomposta y micorriza arbuscular en cebolla establecida en tepetate" en Alarcón, A. y R. Ferrera (eds). *Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular*. Mundi Prensa, México.
- Delgadillo, J. y R. Ferrera (1996). "Melilotus albus inoculado con Rhizobium meliloti y aplicación de materia orgánica en la recuperación de tepetates", en Zebrowski, C. y G. Trujillo (eds). *Suelos volcánicos endurecidos*. III Simposio Internacional. Diciembre. Quito, Ecuador.
- Dick, R.; D. Breakwell y R. Turco (1996). "Soil Enzyme Activities and Biodiversity Measurements as Integrative Microbiological Indicators", en Doran, J. y Jones, A. (eds). *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America (SSSA). Special Publication, Number 49 Madison, Wisconsin, USA.
- Drinkwater, L.; C. Cambardella; J. Reeder y C. Rice (1996). "Potentially Mineralizable Nitrogen as an Indicator of Biologically Active Soil Nitrogen", en Doran, J. y Jones, A. (eds). *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America (SSSA). Special Publication, Number 49 Madison, Wisconsin, USA.
- Dubeikovskiy, A.; E. Mordukhova; V. Kochetkov; F. Polikarpova y A. Boronin (1993). "Growth Promotion of Blackcurrant Softwood Cuttings by Recombinant Strain Pseudomonas fluorescens BSP53a synthesizing an increased amount of indole-3-acetic acid", *Soil Biol Biochem.* No. 25:PP. 1277-1281.
- Espinosa, C.; R. Ferrera y A. Alarcón (1999). "Propiedades antagónicas de hongos endorrizosféricos aislados de Solanum spp contra Phytophthora infestans (Mont) De Bary", en Rodríguez, E. y J. Escobar (eds). *Memorias XXII Congreso Nacional de Control Biológico*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.
- Estrada, E.; J. Santoyo y A. Robles (2000). "Soil mites Associated to Decomposed Logs in La Mancha Veracruz, México", en Quintero, R.; T. Reyna; L. Corlay; A. Ibañez y N. García (eds). *La edafología y sus perspectivas al siglo XXI*. Tomo I. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas-Universidad Nacional Autónoma de México-Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Ferrera, R. (1977). *Estudio del hiperparasitismo de algunos basidiomicetos in vitro*. Tesis Doctoral Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, México.
- _____. (1995). "Efecto de rizosfera" en Ferrera, R. y J. Pérez (eds). *Agromicrobiología, elemento útil en la agricultura sostenible*. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Estado de México.
- _____.; A. Ortiz; J. Delgadillo y S. Santamaría (1996). "Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos", en Zebrowski, C.; P. Quantin y G. Trujillo (eds). *Suelos volcánicos endurecidos*. III Simposio Internacional. Diciembre. Quito, Ecuador.
- _____.; M. Lara; A. Alarcón; N. Grunwald y H. Lozoya (1999). "Capacidad antibiótica de bacterias aisladas de rizosfera de Solanum tuberosum L. contra Phytophthora infestans (Mont) de Bary", en Rodríguez, E. y J. Escobar (eds). *Memorias XXII Congreso Nacional de Control Biológico*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.
- Flores, A. y R. Ferrera (1996). "Uso de vermicomposta y micorriza arbuscular en cebolla, para la rehabilitación de tepetates", en Zebrowski, C.; P. Quantin y G. Trujillo (eds). *Suelos volcánicos endurecidos*. III Simposio Internacional. Diciembre. Quito, Ecuador.
- García, R. (1993a). "Teoría general de sistemas y fitopatología", en Ferrera, R. y R. Quintero (eds). *Agroecología, sostenibilidad y educación*. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- _____. (1993b). "Dos cursos de fitopatología con un enfoque holístico" en Ferrera, R. y R. Quintero (eds). *Agroecología, sostenibilidad y educación*. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- García, R. (1998). "Manejo de agroecosistemas tropicales", en Ferrera, R. y J. Pérez (eds). *Manejo de agroecosistemas sostenibles*. Textos Universitarios, Universidad Veracruzana. México.
- González, M. (1995). "Interacción de la simbiosis endomicorrízica y la fijación biológica de nitrógeno", en R. Ferrera y J. Pérez (eds). *Agromicrobiología, elemento útil en la agricultura sustentable*. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas Montecillo, Estado de México.
- _____.; R. Ferrera; R. García y A. Martínez (1990). "La fijación biológica de nitrógeno en un agroecosistema de bajo ingreso externo de energía en Tamulte de las Sabanas, Tabasco", *Agrociencia*. No. 1.
- González, A. (1993). "Manejo de suelo, agua y vegetación en sistemas agrícolas de origen mesoamericano en el Altiplano Central", en Ferrera, R. y R. Quintero (eds). *Agroecología, sostenibilidad y educación*. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Hamel, C. y M. St-Arnaud (1998). "Interaction Between Plants Through Arbuscular Mycorrhiza and its Relations With Other Soil Organisms", en Zulueta, R.; M. Escalona y D. Trejo (eds). *Avances de la investigación micorrízica en México*. Universidad Veracruzana. México.
- Howell, C. (1999). "Selective Isolation from Soil and Separation in vitro of P and Q Strains of Trichoderma virens with differential media", *Mycologia* 91:930-934.

- Jiménez, C. (1993). *Aeschynomene americana* L., *Sesbania emerus* (Aubl) Urban y la urea en supergránulos como fuentes de nitrógeno en el cultivo de arroz. Tesis de Maestría en Ciencias Colegio de Postgraduados Montecillo, Estado de México.
- Jiménez, J. y P. Núñez (1993). "La producción en chinampas diversificadas de San Andrés Mixquic, México, D.F.", en Ferrera, R. y R. Quintero (eds). *Agroecología, sostenibilidad y educación*. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Linderman, R. (1993). "Effects of Microbial Interactions in the Mycorrhizosphere of Plant Growth and Health" en Ferrera, R. y R. Quintero (eds). *Agroecología, sostenibilidad y educación*. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados Montecillo, Estado de México.
- Llovera, L.; J. Sánchez y J. Peña (1994). "Reducción de acetileno por bacterias asociadas a raíces de especies de nopal (*Opuntia* L.)", *Latin-Amer Microbiol.* 36:183-189.
- Mary, B.; S. Recous; D. Darwis y D. Robin (1996). "Interactions Between Decomposition of Plant Residues and Nitrogen Cycling in Soil", *Plant Soil*. 181: 71-82.
- Melchor, J.; J. Vargas; R. Ferrera; J. Etchevers y A. Velásquez (1999). "Actividad de la nitrogenasa en *Gliricida sepium* en diferentes regímenes de poda", *Terra*. 17:299-308.
- Navarro, H. y D. Flores (1996). "Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola", en Zebrowski, C.; P. Quantin y G. Trujillo (eds). *Suelos volcánicos endurecidos*. III Simposio Internacional Quito, Ecuador. Diciembre.
- Ortiz, C. (1995). *Aporte de nitrógeno y control de arvenses por el uso de leguminosas en el cultivo del arroz*. Tesis de Maestría en Ciencias Colegio de Postgraduados Montecillo, Estado de México.
- Parkin, T.; J. Doran y E. Franco (1996). "Field and Laboratory Tests of Soil Respiration", en Doran, J. y A. Jones (eds). *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America (SSSA). Special Publication, Number 49. Madison, Wisconsin, USA.
- Pérez, J. (1995). "La simbiosis ectomicorrízica y su importancia ecológica", en Ferrera, R. y J. Pérez (eds). *Agromicrobiología, elemento útil en la agricultura sustentable*. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Montecillo, Estado de México.
- _____. (1998) "La ectomicorriza, una simbiosis mutualista útil en el sostenimiento de *Gaia*, el planeta viviente", en Ferrera, R. y J. Pérez (eds). *Manejo de agroecosistemas sostenibles*. Textos Universitarios. Universidad Veracruzana. México.
- _____. y R. Ferrera (1996). "Prefacio", en Pérez, J. y R. Ferrera (eds). *Nuevos horizontes en agricultura: Agroecología y desarrollo sostenible*. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas Montecillo, Estado de México.
- Quintero, R.; R. Ferrera; J. Etchevers; N. García; R. Rodríguez; G. Alcantar y A. Aguilar (2000). "Vermicomposteo, composteo y su dinámica microbiana", en Quintero, R.; T. Reyna; L. Corlay; A. Ibañez y N. García (eds). *La edafología y sus perspectivas al siglo XXI*. Tomo I. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas-Universidad Nacional Autónoma de México-Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Rice, C.; T. Moorman y M. Beare (1996). "Role of microbial biomass carbon and nitrogen in soil quality", en Doran, J. y A. Jones (eds). *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America (SSSA). Special Publication, Number 49. Madison, Wisconsin, USA.
- Rynk, R.; M. Van de Kamp; G. Wilson; M. Singley; T. Richard; J. Kolega; F. Gouin; L. Laliberty Jr.; D. Kay; D. Murphy; H. Hoitink y W. Brinton (1988). "On Farm Composting Handbook", en Rynk, R. (ed). *Northeast regional agricultural engineering service*. Cooperative extension Ithaca, New York.
- Robinson, R. (1987). *Manejo del hospedante en patosistemas agrícolas*. Trad. García, R. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Rojas, R.T. (1991). "La agricultura en la época prehispánica", en Rojas, T. (Coord.). *La agricultura en tierras mexicanas desde sus orígenes hasta nuestros días*. Serie Los Noventas. Conaculta-Grijalbo. México.
- Santamaría, S. (1999). *Escalamiento de los procesos de composteo y vermicomposteo: aspectos biológicos y nutrimentales*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Montecillo, Estado de México.
- _____. y R. Ferrera (1996) "Adición de vermicomposta e inoculación endomicorrízica en seis variedades criollas de maíz cultivadas en tepetate", en C. Zebrowski; P. Quantin y G. Trujillo (eds). *Suelos volcánicos endurecidos*. III Simposio Internacional Quito, Ecuador. Diciembre.
- Smith, J. y J. Doran (1996). "Measurement and Use of pH and Electrical Conductivity for Soil Quality Analysis", en Doran, J. y A. Jones (eds). *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America (SSSA). Special Publication, Number 49. Madison, Wisconsin, USA.
- Udvardi, M. y D. Day (1997). "Metabolite Transport Across Symbiotic Membranes of Legume Nodules", *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 48:493-523.
- Unestam, T. y E. Damm (1993). "Biological Control of Seedling Diseases by Ectomycorrhizae", *Diseases Insects Forest Nurseries*. October. Ed INRA, Paris 1994 (Les Colloques, No. 68).
- Vance, C. y J. Gantt (1992). "Control of Nitrogen and Carbon Metabolism in Root Nodules", *Physiologia Plantarum* 85:266-274.
- Werner, D. (1992). "Physiology of Nitrogen-Fixing Legume Nodules: Compartments and Functions", en Stacey, G.; R. Burris y H. Evans (eds). *Biological nitrogen fixation*. Chapman & Hal. New York.
- Wick, B.; R. Kühne y P. Vlek (1998). "Soil Microbiological Parameters as Indicators of Soil Quality Under Improved Fallow Management Systems in South-Western Nigeria", *Plant Soil*. 202:97-107.