

ENZIMAS DEL SUELO: INDICADORES DE SALUD Y CALIDAD

Soil Enzymes: Health and Quality Indicators

LAURA E. CERÓN RINCÓN, LUZ MARINA MELGAREJO MUÑOZ
Departamento de Biología, Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Presentado noviembre 12 de 2004, aceptado enero 24 de 2005, correcciones marzo 1 de 2005.

RESUMEN

Ante la creciente demanda de alimentos, fibras y protección ambiental de una sociedad urbanizada en constante expansión, el empobrecimiento de los recursos naturales no renovables y las alteraciones que ha sufrido la calidad ambiental global, se plantean los conceptos de salud y calidad del suelo como parte del conjunto de herramientas para definir y asignar sostenibilidad, es decir, el mantenimiento de sus funciones dentro de los límites de un ecosistema. Los indicadores de salud y calidad son un conjunto de parámetros (propiedades físicas, químicas y biológicas) que buscan establecer estándares de calidad para el recurso suelo; dentro de este conjunto se consideran las actividades enzimáticas por estar muy relacionadas con las demás propiedades y por ser sensibles a los cambios generados por el uso del suelo. La presente revisión pretende ilustrar que el seguimiento de la catálisis biológica del suelo a través de los usos o las alteraciones que pueda experimentar un ecosistema, puede proveer información para el entendimiento de por qué los procesos responsables de mantener funciones como la producción de biomasa, la remediación de contaminantes y el ciclaje de nutrientes, sufren cambios, y si estos son positivos, negativos o iterativos.

Palabras clave: enzimas del suelo, indicadores, salud y calidad, sostenibilidad.

ABSTRACT

In the presence of a crescent demand of food, fibres, environmental protection for an urban society in constant expansion, impoverishment of the natural non renewable resources and the serious alterations that the environmental global quality has suffered, concepts of health and quality of soils are exposed as part of the whole of tools used to define sustainability, in other words, the maintenance of their functions inside the limits of an ecosystem. The health and quality indicators are a set of measurements (physical, chemical and biological properties) that pretend to establish quality standards for this resource; the enzymatic activity is placed inside this set because of its close relationship with the other properties and because of its sensibleness to the changes due to handling and use. The present review pretends to illustrate how the tracking of the biological catalysis of the soil through uses and alterations that an ecosystem may suffer, may supply information for the understanding of how the processes responsible for the

maintenance of functions such as biomass production, pollutant remediation and cycling of nutrients, suffer changes and if these are positive, negative or iterative.

Key words: soil enzymes, indicators, health and quality, sostenibility.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso viviente, dinámico y no renovable, cuya condición y funcionamiento es vital para la producción de alimentos, y para el mantenimiento de la calidad ambiental local, regional y global (Doran *et al.*, 1999). Los procesos de descomposición y respiración que suceden en él tienen un papel importante para el mantenimiento del balance entre la producción y el consumo del CO₂ de la biosfera, tanto al reciclar el C atmosférico que está en forma de CO₂ como en la formación de la materia orgánica, la cual es reservorio no solo del C atmosférico sino de otros elementos. Las etapas esenciales de los ciclos globales del agua, C, N, P y S suceden en el suelo, la velocidad del ciclaje y la disponibilidad de estos elementos están siendo alteradas continuamente por las diferentes formas de vida y por la constante búsqueda de fuentes de alimento y energía (Doran *et al.*, 1999). Así, el suelo no solo es la base para la agricultura y para los diferentes ecosistemas, sino que además de él depende toda la vida del planeta. Las prácticas de manejo convencionales como el arado, los patrones de cultivo y el uso de plaguicidas y fertilizantes han tenido influencia sobre la calidad del agua y de la atmósfera, ya que han generado cambios en la capacidad del suelo para producir y consumir gases como CO₂, óxido nitroso y metano (Doran y Zeiss, 2000). Además, el manejo convencional ha promovido la pérdida de la materia orgánica, reduciendo la fertilidad, la capacidad de campo y la estabilidad estructural, esto ha incrementado la erosión y el CO₂ atmosférico; por consiguiente, las prácticas agrícolas convencionales han contribuido al calentamiento global (Roldán *et al.*, 2003). Los niveles elevados de gases asociados al efecto invernadero y las alteraciones en los ciclos hidrológicos han producido cambios en el clima global y la reducción del ozono. Para afrontar esta amenaza se requiere comprender cómo el manejo del suelo está afectando sus procesos y por otra, plantear alternativas de uso que mantengan tanto la calidad ambiental como la eficiencia, es decir, alternativas sostenibles.

“El reto de una vida sostenible requiere una nueva visión, aproximaciones holísticas para el manejo de ecosistemas y renovación de la relación entre ciencia y sociedad” (Doran y Safley, 1997), este reto se plantea frente a la creciente demanda de alimentos, fibras, protección ambiental y al empobrecimiento de recursos energéticos no renovables (Karlen *et al.*, 2001), en una sociedad urbanizada y en constante expansión. Para definir y asignar sostenibilidad surgen como herramientas los conceptos de salud y calidad, que se basan en las propiedades inherentes y dinámicas de los procesos del suelo; a este recurso no pueden ser asignados estándares de calidad amplios, como sí sucede con el agua y el aire, ya que existen varios factores que dificultan definir, medir y regular su calidad, debido a que el suelo es inherentemente variable (Bandick y Dick, 1999).

Las propiedades de los suelos varían naturalmente a través del tiempo por factores que determinan su formación como la precipitación, el material parental, los organismos que lo habitan, la actividad antropogénica, etc., en consecuencia no existe una sola medida biológica o química para determinar el estado de salud y calidad de un suelo (Doran, 2002). Para aproximarse al entendimiento de los ciclos de los nutrientes y a los niveles de actividad microbiana responsables de estos procesos, se investigan varias actividades enzimáticas del suelo porque dan cuenta de las reacciones bioquímicas que suceden dentro de este heterogéneo y complejo sistema; además, están estrechamente relacionadas con las propiedades físicas, químicas y biológicas y son sensibles a los cambios generados por manejo, por ende las actividades enzimáticas permiten monitorear el funcionamiento del suelo respondiendo a la necesidad de entender los efectos positivos, negativos e interactivos sobre las propiedades y los procesos que suceden dentro de esta matriz y las relaciones entre estos factores, los usos y prácticas de manejo. Las potenciales aplicaciones y expectativas al seguir la catálisis biológica del suelo son tan amplias e importantes como los usos, preocupaciones y esfuerzos por conservar este preciado recurso. Esta revisión pretende divulgar las aproximaciones metodológicas para el entendimiento de las funciones del ecosistema suelo, a partir de la reflexión de variables como el poco conocimiento, la degradación del recurso y la necesidad de establecer indicadores de salud y calidad. Actualmente no se encuentran publicadas medidas de actividades enzimáticas de nuestros suelos, ni investigaciones dirigidas hacia la aplicación de los conceptos de salud y calidad, que brinden herramientas que contribuyan al establecimiento de directrices para políticas de manejo, sostenibilidad y óptima administración del recurso.

CONCEPTOS RELACIONADOS

SALUD Y CALIDAD DEL SUELO

La calidad del suelo abarca tres componentes básicos: las características biológicas, las físicas y las químicas; mientras que la salud está determinada principalmente por sus características ecológicas. Un ecosistema saludable está definido por la integración de los ciclos de los nutrientes y flujos de energía, y por la estabilidad y elasticidad frente a una alteración o estrés. Sin embargo, las propiedades que se utilizan como indicadores de calidad no necesariamente están directamente relacionadas con la salud (van Bruggen y Semenov, 2000). En general la respuesta de los suelos y de los ecosistemas a una alteración tiene dos componentes: resistencia y resiliencia. La resistencia, es la capacidad inherente del sistema para tolerar la alteración; y la resiliencia, es la capacidad amortiguadora y la habilidad para regenerarse. Por otro lado, la biodiversidad es una propiedad que condiciona la capacidad de recuperación del sistema edáfico ante una alteración y de mantener su estabilidad funcional (Griffiths *et al.*, 2001), hay evidencias de la relación que existe entre los organismos que habitan en el ecosistema (diversidad, estructura de la cadena trófica, estabilidad de las comunidades) y la elasticidad de un suelo (van Bruggen y Semenov, 2000), pero se conoce muy poco acerca de cómo la biodiversidad asegura la continuidad de funciones específicas (Griffiths *et al.*, 2001). La calidad del suelo está determinada por funciones simultáneas como el sostener la productividad de los cultivos, el mantener la calidad del agua y del aire, y el propor-

cionar condiciones saludables para plantas, animales y el hombre dentro de los límites de un ecosistema. Por consiguiente, la calidad y salud de este recurso determina la sostenibilidad de la agricultura, la calidad ambiental y como consecuencia la salud de plantas, animales y del hombre (Doran y Safley, 1997). Al utilizar la salud y la calidad como herramientas para evaluar la sostenibilidad es necesario tener en cuenta las escalas espacio temporales, las cuales dependen de las propiedades inherentes (asociadas con los factores formadores) y de las propiedades dinámicas (que pueden ser afectadas por acciones humanas), ya que el recurso suelo y los ecosistemas que soporta son dinámicos en el espacio y el tiempo, lo cual acarrea limitaciones e incertidumbres acerca del conocimiento que de éstos tenemos (Karlen *et. al.*, 2001). Además, el manejo está dirigido por metas explícitas ejecutado por políticas y protocolos, aspectos que hay que ajustar para el seguimiento y búsqueda de un mejor entendimiento de las interacciones y procesos que sostienen la composición, estructura y función de los ecosistemas.

La sostenibilidad en este contexto responde a seis de las funciones del suelo (Doran y Safley, 1997), tres ecológicas: (i) la producción de biomasa (comida, fibra, energía), (ii) la capacidad de filtrar, amortiguar y transformar la materia, para proteger el ambiente y los nacimientos de agua de la contaminación, (iii) el proporcionar hábitat y ser reservorio genético para plantas, animales y organismos que deben ser protegidos de la extinción; y tres relacionadas con las actividades humanas: (i) como medio físico que sirve de base espacial para estructuras técnicas e industriales y actividades socioeconómicas, (ii) ser fuente de materia prima y suplemento de agua, arcilla, arena, grava, minerales, entre otros, (iii) como parte de la herencia cultural al contener tesoros arqueológicos y paleontológicos importantes para preservar la historia de la tierra y de la humanidad.

ESTABLECIMIENTOS DE INDICADORES

Desarrollar sistemas de manejo sostenible acarrea una gran dificultad al considerar las demandas sociales que esta actividad implica: la eficiencia en el uso del recurso y la habilidad para mantener un balance favorable (Doran *et al.*, 1999). La asignación de salud y calidad debe iniciarse dentro del contexto de metas sociales para un ecosistema o paisaje específico (calidad del agua, productividad, biodiversidad) y las funciones críticas del suelo deben responder a estas metas (Karlen *et. al.*, 2001). La calidad del suelo se basa sobre las funciones del mismo y para estimarla se necesita un conjunto de indicadores que cuantifiquen su estado, por lo cual la aproximación debe ser holística, integrando todas las partes del sistema; el establecimiento de indicadores responde a la necesidad de medidas que permitan evaluar los efectos del manejo sobre dichas funciones. El conjunto de indicadores debe ser sensible a los cambios en un período de tiempo relativamente corto, aún bajo los cambios de las condiciones climáticas (Doran *et al.*, 1999). Los criterios para establecer indicadores relacionan la utilidad en la definición de los procesos del ecosistema y además integran las propiedades físicas, químicas y biológicas, la sensibilidad a las variaciones climáticas y de manejo, junto con la accesibilidad y utilidad para productores, especialistas en agricultura, conservacionistas y responsables en definir políticas de manejo (Doran, 2002).

Se ha propuesto un conjunto mínimo de datos, utilizando propiedades químicas, físicas y biológicas específicas que den información acerca de la funcionalidad y productividad de un ecosistema (Tabla 1). Dentro de estas medidas encontramos las actividades enzimáticas del suelo que se han sugerido como potenciales dentro del conjunto de indicadores, debido a su relación con la biología del suelo, ya que su presencia depende directamente de la continua liberación al ambiente llevada a cabo por los organismos que habitan en el ecosistema (Burns, 1982), además están relacionadas con funciones ecológicas como la producción de biomasa, la remediación de contaminantes y la conservación de ecosistemas. Las actividades enzimáticas pueden ser usadas como parte del conjunto de herramientas necesarias para asignar sostenibilidad, son de fácil determinación y responden rápidamente al manejo del recurso (Dick y Tabatabai, 1992).

Físicas	Químicas	Biológicas
Estabilidad estructural	pH	Biomasa microbiana C
Distribución de poro	Capacidad de intercambio catiónico	Biomasa microbiana N
Capacidad de campo	Materia orgánica	Respiración
Velocidad de infiltración	Nitrógeno mineralizado	Actividades enzimáticas
Textura	Estado de óxido reducción	Organismos indicadores (colémbolos, lombrices, protozoarios, <i>Rhizobium</i>)
Densidad	Conductividad eléctrica	Diversidad: composición y número de especies

Tabla 1. Propiedades del suelo indicadores de salud y calidad.

LA CATÁLISIS BIOLÓGICA DEL SUELO

Las enzimas son proteínas cuyo papel es catalizar las reacciones químicas en los sistemas vivos, actúan sobre sustratos específicos transformándolos en productos necesarios para los ciclos biológicos. Los organismos y las plantas liberan enzimas al suelo por secreción y por lisis celular después de su muerte; un bajo porcentaje de estas proteínas quedan inmovilizadas y estabilizadas en interacción con los diferentes componentes de la fase sólida del suelo, como las arcillas, moléculas orgánicas y complejos organominerales (Joinville *et al.*, 2004). Dependiendo del material, la interacción se da por mecanismos que incluyen: microencapsulación, enlaces transversales, formación de copolímeros, adsorción, entrapamiento, intercambio iónico y enlaces covalentes (Dick y Tabatabai, 1992). Solo un bajo porcentaje de las enzimas que abandonan las células se encuentran estabilizadas, ya que se liberan a un ambiente inhóspito donde pueden ser sometidas a desnaturalización no biológica, adsorción, inactivación o degradación por proteasas. Al igual que en los otros sistemas vivos, la velocidad de la reacción catalizada por una enzima es dependiente del pH, de la fuerza iónica, de la temperatura y de la presencia o ausencia de inhibidores (Burns, 1982; Sarkar *et al.*, 1989). Las enzimas proceden de células proliferantes, latentes, o restos de ellas. La mayor producción de enzimas extracelulares se le atribuye a microorganismos por su gran biomasa, su alta actividad metabólica y su corto ciclo de vida, en contraste con otros organismos que

también las pueden liberar como las plantas y los animales (Dick y Tabatabai, 1992). Las fuentes y estado de las enzimas en el suelo se resumen en la figura 1. En el suelo se ha detectado la actividad de hidrolasas, transferasas, oxidoreductasas y liasas que están directamente relacionadas con los ciclos del C, N, P y S.



Figura 1. Fuente y estado de las enzimas en el suelo. (i) Enzimas intercelulares, (ii) Enzimas periplasmáticas, (iii) Enzimas unidas a la superficie exterior de las membranas celulares, (iv) Enzimas liberadas durante el crecimiento y la división, (v) Enzimas dentro de células latentes (esporas, quistes, semillas, endosporas), (vi) Enzimas unidas a células muertas y detritos, (vii) Enzimas liberadas de células intactas o de células lisadas, (viii) Enzimas temporalmente asociadas a complejos enzimasustrato, (ix) Enzimas adsorbidas en la superficie de minerales arcillosos, (x) Enzimas formando complejos con coloides húmicos.

APLICACIÓN Y CORRELACIÓN CON LOS USOS DEL SUELO

AGRICULTURA: FERTILIDAD E IMPACTO

Hoy en día la agricultura busca controlar la naturaleza para cubrir las necesidades de una creciente sociedad urbanizada, al pensar sus productos como mercancías que competirán en el mercado y cuya realización estará basada en los valores del consumo. Esto dificulta aún más el desarrollo de sistemas agrícolas sostenibles, que cumplan con un balance entre las necesidades de producción de fibra y comida junto con el mantenimiento del ambiente, que además integren la eficiencia en el uso del recurso y contribuyan a la calidad del ecosistema. Se plantea como parte del desarrollo de sistemas sostenibles el abandono de las prácticas de labranza, la adición de residuos de cosecha y/o estiércol, la rotación de cultivos, entre otras. La implementación de estas prácticas influye positivamente en un amplio espectro de los indicadores de actividad biológica (Bandick y Dick, 1999; Riffaldi *et al.*, 2002), lo que lleva a preguntarse ¿Cómo determinar el impacto por el tipo de manejo? ¿Cuál sería el “mejor” tipo de manejo? La aproximación a la dilucidación de estos interrogantes dependerá del conjunto de indicadores (propiedades físicas, químicas y biológicas) que se utilicen, de los antecedentes

del suelo (inherentes y dinámicos), del diseño experimental y de la interpretación de los resultados; además estará limitada por la sensibilidad de las medidas, las escalas espacio temporales y el conocimiento que se tenga para interpretar las funciones del ecosistema. Por ejemplo, para un cultivo de maíz tradicional de la cuenca del Patzcuaro, México, se comparó un sistema de manejo convencional frente a variaciones en sistemas de no labranza (Roldán *et al.*, 2003). Estos incluyeron la adición de 3,5 ó 7 T/ha⁻¹ de residuos de cosecha o la adición de 5 T/ha⁻¹ de residuos con cultivo de leguminosas. Las variaciones en la adición de residuos para el sistema de no labranza influyeron positivamente en las actividades fosfatasa, ureasa, β -glucosidasa. También se encontró una correlación significativa ($r=0,969$, $p<0,05$) entre la actividad deshidrogenasa (indicador del estado metabólico de la microflora) y la cantidad de residuos que se adicionaron (3,5 ó 7 T/ha⁻¹) por unidad experimental. Aunque estas actividades fueron claramente sensibles a diferentes sistemas de manejo, no discriminaron el efecto por el co-cultivo de leguminosas y el efecto de no labranza sin adición de residuos. La biomasa microbiana C, las fracciones de C solubles en agua (C y carbohidratos solubles) y la relación biomasa/carbono orgánico total respondieron significativamente a los tratamientos con cultivo de leguminosas y a la mayor adición de residuos (7 T/ha⁻¹). Sin embargo, estos últimos indicadores no fueron sensibles a las variaciones menores en el manejo, establecidas en este experimento, como si lo fueron las actividades enzimáticas. Estos resultados indicaron que es factible el mejoramiento de la calidad del suelo en la cuenca del Patzcuaro, México por la implementación de tecnologías de no labranza: la adición de residuos de cosecha y el cultivo de leguminosas en períodos intercosecha. A pesar de esto, el tipo de experimento proporciona poca información sobre las funciones y los procesos del ecosistema.

La materia orgánica constituye el reservorio temporal como secuestrador de C, es fuente primaria de nutrientes en el suelo para la nutrición vegetal, y presenta una fuerte influencia en la persistencia y degradación de plaguicidas y de residuos orgánicos (Fenton *et al.*, 1999). Además su importancia radica no solo en ser constituyente sino también contribuyente de los complejos humus-enzimas (Masciandaro y Ceccanti, 1999), que son cruciales para las reacciones minerales y orgánicas. Masciandaro y Ceccanti (1999) se aproximan al entendimiento de estos procesos a través de un conjunto de actividades enzimáticas y a la caracterización de las fracciones de la materia orgánica en tres sistemas: un suelo no alterado y dos tipos de manejo agrícola (intensivo y moderado), para dos ecosistemas mediterráneos, uno de zona húmeda templada y otro de una zona semiárida. En general, las actividades fosfatasa, proteasa y β -glucosidasa fueron mayores en el suelo no alterado que en los dos tipos de manejo agrícola, como se ha demostrado en otros trabajos, sin embargo, no se observaron diferencias por el tipo de manejo. Se encontraron correlaciones entre las actividades y la fracción de carbono soluble en agua, lo que indica una interacción entre disponibilidad de compuestos ricos en energía y la actividad biológica; además se halló una correlación entre la actividad deshidrogenasa y la fracción húmica, soportando la tesis de que los procesos de humificación están mediados por microorganismos. El índice de humificación, que representa la condición estructural de las sustancias húmicas y la actividad enzimática, fue más alto en el ecosistema semiárido, lo que sugiere

re la existencia en esta zona de mayor cantidad de humus condensado y de complejos humus-enzimas, que pueden metabolizar rápidamente materiales orgánicos lábiles. Las diferencias en el tipo de manejo para los dos ecosistemas fueron: la primera, en la fracción alifática de la materia orgánica, siendo mayor en el manejo moderado, caracterizado por la presencia de material celulósico, que en el manejo intensivo; y la segunda, en la fracción aromática que fue mayor en el tipo intensivo que en el moderado. El conjunto de indicadores que se utilizó en este trabajo permitió caracterizar algunos procesos bajo dos condiciones climáticas y establecer las modificaciones similares dadas por el manejo en ambos ecosistemas; además permitió considerar los complejos humus-enzimas como indicador de calidad junto con la actividad biológica, ya que pueden representar propiedades funcionales.

CONSERVACIÓN

Se ha valorado el impacto de la intervención antropogénica sobre el balance del funcionamiento de los ecosistemas, a través de un conjunto de indicadores de salud y calidad del suelo tratando de entender el proceso del ciclaje de nutrientes, ya que éste es una característica esencial. Los bosques orientales de Norteamérica, con más de 3.000 años, fueron sometidos a varios cambios debido a actividades antropogénicas durante el siglo XX. Entre ellas se encuentran la supresión de incendios forestales y el enriquecimiento con N debido a las actividades agrícolas; en consecuencia, se produjo un cambio en la vegetación originalmente dominada por especies de árboles asociados a ectomicorrizas (Boerner y Brinkman, 2003). Una alternativa de manejo para estos bosques, caracterizados por la acumulación de materia orgánica recalcitrante, fue la restauración mediante la reintroducción de incendios que aceleraran los ciclos de los nutrientes en un ecosistema relativamente pobre. Luego se analizaron las actividades enzimáticas (β -glucosidasa, quitinasa, fenol oxidasa y fosfatasa ácida) relacionadas con el contenido de materia orgánica y la mineralización de C y P. Estos proveen información acerca de la estructura de las funciones relacionadas con la disponibilidad de estos elementos para plantas y microorganismos, además de su relación con los incendios anuales en un período de cinco años. Después de los incendios se registró un descenso en las actividades enzimáticas fosfatasa y β -glucosidasa y un incremento en la actividad fenol oxidasa en un sitio rico en nutrientes; los descensos no se registraron sino hasta después de cuatro incendios en un sitio pobre en nutrientes. Los regímenes de los incendios afectan de manera diferente dependiendo del nivel de nutrientes disponibles para plantas y microorganismos; el impacto por el fuego es menor y más lento en un sitio rico en nutrientes que en uno pobre. Así mismo, los procesos que forman parte de la biodegradación en el mantillo de los bosques dependen de factores bióticos como los contenidos de proteína, los recuentos totales de bacterias y hongos, junto a los factores abióticos ambientales como el pH, la humedad y la temperatura. Críquet *et al.* (2004) siguieron las actividades de la fosfatasa ácida y alcalina durante un año en bosques de robles (*Quercus ilex* L.) y su relación con los factores mencionados anteriormente. Se encontró por análisis de regresión múltiple la correlación entre la actividad fosfatasa ácida, la humedad, la concentración de proteína y la temperatura, y por otro lado entre la concentración de fósforo inorgánico, los recuentos totales de bacterias y la humedad.

INDICADORES DE CONTAMINACIÓN

Es reconocido que la introducción de sustancias contaminantes como hidrocarburos, plaguicidas y metales pesados al suelo ejercen influencia sobre la microbiota. Para describir esta influencia se utilizan parámetros que puedan describir la condición general y su potencial como agentes en remediación. Dentro de los procesos metabólicos que catalizan las enzimas del suelo se encuentran la descomposición de materiales orgánicos y la detoxificación de xenobióticos. Baran *et al.* (2004) estudiaron el efecto de la contaminación por aceite diesel en una base aérea localizada en Yugoslavia, a través de la utilización de un índice biológico de fertilidad M_w , que combina las actividades ureasa, deshidrogenasa, fosfatasa ácida y alcalina y el carbono orgánico total, éste último regula la persistencia y degradación de residuos orgánicos (Fenton *et al.*, 1999). Los resultados se correlacionaron con algunas propiedades fisicoquímicas. La presencia de los hidrocarburos estimuló la mayoría de las actividades estudiadas, se encontraron correlaciones significativas entre la cantidad y la composición de los contaminantes y el índice de fertilidad M_w , así como con algunas de las actividades por separado, demostrando la relación entre las actividades y la degradación parcial de los hidrocarburos; sin embargo, se dieron algunas excepciones debido a otros factores (disponibilidad de nutrientes y pH) necesarios para que se realice la utilización de tales contaminantes como fuente de carbono. En algunos casos se pueden formar combinaciones muy estables con la materia orgánica, por tanto los contaminantes no están disponibles para los microorganismos y así se puede retardar su efecto tóxico sobre la micro y la mesobiota que habita en el ecosistema; sin embargo, los procesos de bioremediación quedan limitados por el efecto de la inmovilización. En suelos mediterráneos contaminados con hidrocarburos provenientes de las cercanías de una refinería de petróleo, también se observaron incrementos respecto al control en las actividades enzimáticas (ureasa, deshidrogenasa y fosfatasa), en la porosidad, en la velocidad de mineralización del N y en el contenido metabólico (Caravaca y Roldán, 2003); este último se utiliza como parámetro ecofisiológico y refleja la reducción en la eficiencia microbiológica debida al efecto tóxico de los hidrocarburos y permite indicar que existe una lenta incorporación de los hidrocarburos a la biomasa microbiana; por tanto el proceso de mineralización de tales contaminantes es lento, debido a su complejidad estructural y al estrés al que somete a las comunidades.

Para determinar el impacto y el potencial remediador del ecosistema frente a este tipo de contaminantes se hace necesario un conjunto de indicadores, ya que la influencia de dichos contaminantes sobre las actividades enzimáticas, así como la capacidad de las comunidades microbianas para utilizarlos como fuente de carbono, están relacionadas y dependen de otras propiedades del suelo, como la disponibilidad de nutrientes y el contenido de materia orgánica. En suelo agrícola, numerosos estudios han documentado los cambios que suceden como resultado de la aplicación de plaguicidas. Seguidamente a la aplicación de los fungicidas mfenoxam y metalaxyl se registraron descensos significativos en las actividades deshidrogenasa, β -glucosidasa, fosfatasa alcalina y en los recuentos de bacterias fijadoras de nitrógeno, y se observó estimulación en el recuento total de bacterias y en los niveles de amonificación (Monkiedje *et al.*, 2002); este conjunto de resultados indica un efecto nocivo en las propiedades

biológicas del suelo por la aplicación de los fungicidas. Adicionalmente, son reconocidos los efectos adversos de las concentraciones elevadas de metales pesados, los cuales pueden producir alteraciones en la estructura y funciones de la comunidad bacteriana del suelo. Es así como en suelos contaminados por cadmio se registraron incrementos significativos en el contenido metabólico, lo que indica condiciones de estrés de la microflora, descensos en la biomasa microbiana y en las actividades enzimáticas (fosfatasa alcalina, aril sulfatasa y proteasa); y se observaron cambios en las actividades de fosfatasa ácida, β -glucosidasa, ureasa, los recuentos totales de bacterias y la estructura de la comunidad bacteriana (utilizando técnicas PCR-DGGE; Renella *et al.*, 2004). Lo anterior indica efectos nocivos sobre las funciones de la comunidad microbiana. Es posible que se produzcan adaptaciones fisiológicas a la presencia de metales pesados más que selección bacteriana. Estas adaptaciones conllevan una demanda de energía adicional que podría explicar la reducción en las actividades enzimáticas y el aumento en el contenido metabólico.

REMEDIACIÓN Y BIOTECNOLOGÍA

La contaminación y degradación de los suelos como consecuencia del uso antrópico inadecuado ha conducido en ocasiones al abandono como consecuencia de su escasa fertilidad, por lo que es necesario emprender experimentos encaminados a conseguir la restauración de estos ecosistemas y la determinación de parámetros que permitan establecer su calidad y su actividad microbiana; una de las estrategias para la recuperación de estas áreas consiste en la adición de enmiendas orgánicas. Son numerosas las publicaciones que demuestran los beneficios de estas prácticas en el mejoramiento de la calidad biológica de suelos degradados. Comparado con tratamientos control y de fertilización mineral, la introducción de *compost* al suelo a partir de residuos de alimentos en un cultivo de lechuga, incrementó significativamente el peso fresco de las lechugas, las actividades enzimáticas deshidrogenasa, fosfatasa ácida y alcalina, así como los recuentos de bacterias y hongos totales presentes en la rizosfera de las plantas (Lee *et al.*, 2004). En suelos derivados de depósitos marinos aluviales (Liang *et al.*, 2003), cuyo mayor problema es la salinidad y toxicidad por aluminio, se adicionó estiércol y residuos de cosecha combinados y en tratamientos por separado, durante el cultivo de variedades de arroz y cebada tolerantes a condiciones de salinidad. En respuesta a la combinación de estiércol y residuos de cosecha se registraron incrementos significativos en el crecimiento de los cultivos, en las actividades ureasa y fosfatasa alcalina, en la respiración, y un descenso en el potencial redox. Se consideró que el incremento en las actividades enzimáticas estaba directamente relacionado con el mejoramiento de la fertilidad. En la restauración de suelos mediterráneos degradados por erosión, carentes en nutrientes y vegetación, Caravaca *et al.* (2002) determinaron que la metodología más adecuada para el restablecimiento de la cobertura vegetal con *Pistacia lentiscus*, en suelos semiáridos y alterados, era la adición de residuos compostados junto con la inoculación de hongos micorrizas arbusculares (*Glomus intraradices*). En este tratamiento, la habilidad de las plantas para establecerse en el suelo se asoció con el incremento de las actividades deshidrogenasa, ureasa, proteasa-BAA (N- α -benzoil-L-argininamida), fosfatasa ácida, β -glucosidasa, la biomasa por C, y la disminución en la densidad, con respecto a un control y a los tratamientos de adición de residuos e inoculación por separado. La

disminución en la densidad se correlacionó significativamente con los contenidos de carbohidratos solubles en agua, carbohidratos totales y actividades enzimáticas. El tratamiento con micorrizas sin adición de residuos no incrementó significativamente el crecimiento vegetal; estos resultados confirmaron el papel clave que tienen las micorrizas arbusculares en el sostenimiento de la cobertura vegetal, así como la necesidad de incluir la inoculación con estos organismos en los programas de reestablecimiento de la vegetación para mantener el desarrollo de las plantas. La remediación del suelo y del agua contaminados con hidrocarburos policíclicos aromáticos es considerada actualmente la prioridad en el mejoramiento de la calidad ambiental (Dodor *et al.*, 2004). Hoy en día han cobrado importancia los avances biotecnológicos dirigidos a la aplicación de enzimas en los procesos de remediación, debido a las ventajas que esta tecnología presenta frente a las metodologías químicas convencionales como la utilización de materiales recalcitrantes aplicables a altas y bajas concentraciones de contaminantes, bajo un amplio rango de pH, temperatura y salinidad, entre otras. Durán y Esposito (2000) reportan que la introducción al suelo de enzimas oxidativas (peroxidasas, lacasas, polifenol oxidasas) o de organismos que las produzcan, pueden transformar fenoles clorados y anilinas de forma parcial o total a través de la polimerización oxidativa, con la consecuente mineralización de estos xenobióticos. El potencial de esta tecnología, que utiliza procesos enzimáticos, se ha demostrado para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con fenoles (Dodor *et al.*, 2004). La efectividad de un proceso como éste se basa en la inmovilización de enzimas en materiales sólidos, donde quedan protegidas de los cambios ambientales que puedan llevar a su desnaturalización, de este modo se asegura la estabilidad de la actividad bajo las condiciones de operación; acarreado bajos costos económicos y energéticos. La inmovilización de enzimas se ha aplicado igualmente en diversos procesos industriales farmacéuticos y de alimentos (Roy y Nath Gupta, 2004), en la síntesis orgánica a escala de laboratorio, donde se pueden simplificar los procedimientos por disminución en el número de pasos de reacción; en tecnologías médicas y en técnicas analíticas como biosensores (Krajewska, 2004), ya que presentan las ventajas de alta eficiencia catalítica debido a su alto grado de especificidad, alto rendimiento de reacción y menores costos. Es así como las enzimas derivadas de plantas o microorganismos del suelo son de gran potencial para la remediación y estructuración del mismo.

CONCLUSIONES

Los organismos que habitan el suelo influyen directamente sobre el mantenimiento de la fertilidad, así que su biomasa y actividad se han convertido en elementos para el seguimiento de los cambios ambientales. Varios factores tienen influencia en la actividad enzimática de los suelos, los factores naturales (cambios climáticos, condiciones geográficas, profundidad, propiedades físicas, químicas y biológicas) y los factores antropogénicos (contaminación, manejo agrícola). Con el desarrollo de la civilización los factores antropogénicos han tomado el papel principal en los cambios que pueden sufrir los ecosistemas, por ello se requiere definir cómo y en qué intensidad los afectan. Dado esto las investigaciones en torno al tema hacen parte de los esfuerzos para enmarcar un uso sostenible que asegure la conservación del recurso suelo.

La catálisis enzimática en el suelo se posiciona dentro del conjunto de medidas que proporcionan información acerca de estos fenómenos, por su papel mediador en las transformaciones bioquímicas involucradas en la descomposición de residuos orgánicos y en el ciclaje de los nutrientes. El seguimiento de la catálisis biológica bajo los diferentes usos del suelo o las alteraciones que pueda experimentar dicho ecosistema, puede proveer información para el entendimiento de cómo ocurren los cambios en los procesos responsables de mantener funciones, como la producción de biomasa, la remediación de contaminantes y el ciclaje de nutrientes, y la tendencia de los mismos, si son positivos, negativos o iteractivos (repetición de ciclos). El papel determinante de catalizar las reacciones bioquímicas en dichos procesos, puede ser potencialmente explotado para el desarrollo de tecnologías dirigidas al uso directo en procesos ambientales, como la remediación de contaminantes en procesos industriales y en diversas aplicaciones de interés técnico.

AGRADECIMIENTOS

A Orlando Rangel por el apoyo dado para el desarrollo del proyecto “Indicadores de salud y calidad del suelo en el humedal de Jaboque”. Este trabajo ha sido financiado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EEAB) y la Universidad Nacional de Colombia bajo el proyecto “Investigación aplicada en la restauración ecológica en el Humedal de Jaboque”

BIBLIOGRAFÍA

- BANDICK A.K., R.D. DICK. 1999. Field Management Effects on Soil Enzyme Activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 31: 1.471-1.479.
- BARAN S., J.E. BIELI SKA, P. OLESZCZUK. 2004. Enzymatic Activity in an Airfield Soil Polluted with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Geoderma*. 118: 221-232.
- BOERNER R.E.J., J.A. BRINKMAN. 2003. Fire Frequency and Soil Enzyme Activity in Southern Ohio Oak-Hickory Forests. *Applied Soil Ecology*. 23: 137-146.
- BURNS R.G. 1982. Enzyme Activity in Soil: Location and a Possible Role in Microbial Ecology. *Soil Biology and Biochemistry*. 14: 423-427.
- CARAVACA F., A. ROLDÁN. 2003. Assessing Changes in Physical and Biological Properties in a Soil Contaminated by Oil Sludge Under Semiarid Mediterranean Conditions. *Geoderma*. 117: 53-61.
- _____, J.M. BAREA, A. ROLDÁN. 2002. Synergistic of Arbuscular Mycorrhizal Fungus and Organic Amendment on *Pistacia lentiscus* L. Seedlings Afforested in a Degraded Semiarid Soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 34: 1.139-1.145.
- CRIVET S., E. FERRE, A.M. FARNET, J. LE PETIT. 2004. Annual Dynamics Phosphatase Activities in and Evergreen Oak Litter: Influence of Biotic and Abiotic Factors. *Soil Biology and Biochemistry*. 36: 1.111-1.118.
- DICK A., M.A. TABATABAI. 1992. Significance and Potential Use of Soil Enzymes. En Meeting, FJB (Ed.). *Soil Microbial Ecology: Applications in Agriculture and Environmental Management*. Marcel Dekker, NY, USA, 95-127.

- DODOR D.E., H.M. HWANG, S.I.N. EKUNWE. 2004. Oxidation of Anthracene and Benzo[a]Pyrene by Immobilized Laccase from *Trametes versicolor*. *Enzyme and Microbial Technology*. 35: 210-215.
- DORAN J.W. 2002. Soil Health and Global Sustainability Translating Science into Practice. *Agriculture Ecosystems Environment*. 88: 119-127.
- _____, M.R. ZEISS. 2000. Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic Component of Soil Quality. *Applied Soil Ecology*. 15: 3-11.
- _____, A.J. JONES, M.A. ARSHAD, J.E. GILLEY. 1999. Determinants of Soil Quality and Health. En: Rattan Lat (Eds.). *Soil Quality and Soil Erosion*. CRC Press, Florida. 39-57.
- _____, M. SAFLEY. 1997. Defining and Assessing Soil Health and Sustainable Productivity. En Pankhurst, C. Doube, B.M. Gupta V.V.S.R. (Eds.). *Biological Indicators of Soil Health*. 1-22 CAB INTERNATIONAL, New York.
- DURÁN N., E. ESPOSITO. 2000. Potential Applications of Oxidative and Phenoloxidase-Like Compounds in Wastewater and Soil Treatment: A Review. *Applied Catalysis B: Environmental*. 28: 83-99.
- FENTON T.E., J.R. BROWN, M.J. MAUSBACH. 1999. Effects of Long-Term Cropping on Organic Matter Content of Soils: Implications for Soil Quality. En Rattan Lat (Eds.). *Soil Quality and Soil Erosion*. CRC Press, Florida.
- GRIFFITHS B.S., M. BONKOWSKI, J. ROY, K. RITZ. 2001. Functional Stability Substrate, Utilisation and Biological Indicators of Soil Following Environmental Impacts. *Applied Soil Ecology*. 16: 49-61.
- JOINVILLE S., M. REVAULT, H. QUIQUAMPOIX, M.H. BARON. 2004. Structural Effects of Drying and Rehydration for Enzymes in Soils: Kinetics-FTIR Analysis of Chymotrypsin Adsorbed on Montmorillonite. *Journal of Colloid and Interface Science*. 273: 414-425.
- KARLEN D.L., S.S. SINDREWS, J.W. DORAN. 2001. Soil Quality: Current Concepts and Applications. *Advances in Agronomy*. 74: 1-22.
- KRAJEWSKA B. 2004. Application of Chitin and Chitosan-Based Materials for Enzyme Immobilizations: A Review. *Enzyme and Microbial Technology*. 35: 126-139.
- LEE J.J., R.D. PARK, Y.W. KIM, J.H. SHIM, D.H. CHAE, Y.S. RIM, B.K. SOHN, T.H. KIM, K.Y. KIM. 2004. Effect of Food Waste Compost on Microbial Population Soil Enzyme Activity and Lettuce Growth. *Bioresource Technology*. 91: 21-28.
- LIANG Y., Y. YANG, C. YANG, Q. SHEN, J. ZHOU, L. YANG. 2003. Soil Enzymatic Activity and Growth of Rice and Barley as Influenced by Organic Manure in an Anthropogenic Soil. *Geoderma*. 1981: 1-12.
- MASCIANDARO G., B. CECCANTI. 1999. Assessing Soil Quality in Different Agro-Ecosystems Through Biochemical and Chemico-Structural Properties of Humic Substances. *Soil and Tillage Research*. 51: 129-137.
- MONKIEDJE A., M.O. ILORI, M. SPITELLER. 2002. Soil Quality Changes from the Application of the Fungicides Mefenoxam and Metalaxyl to Sandy Loam Soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 34: 1.939-1.948.
- RENELLA G., M. MENCH, D. VAN DER LE'IE, G. PIETRAMELLARA, J. ASCHER, M.T. CECCHERINI, L. LANDI, P. NANNIPIERI. 2004. Hydrolase Activity, Microbial

- Biomass and Community Structure in Long-Term Cd-Contaminated Soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 36: 443-451.
- RIFFALDI R., A. SAVIOZZI, R. LEVI-MINZI, R. CARDELLI. 2002. Biochemical Properties of a Mediterranean Soil as Affected by Long-Term Crop Management Systems. *Soil and Tillage Research*. 67: 109-114.
- ROLDÁN A., F. CARAVACA, M.T. HERNÁNDEZ, C. GARCÍA, SÁNCHEZ-BRITO, C. VELÁSQUEZ, M. TISCAREÑO. 2003. No-Tillage, Crop Residue Additions, and Legume Cover Cropping Effects on Soil Quality Characteristics Under Maize in Patzcuaro Watershed (Mexico). *Soil and Tillage Research*. 1786: 1-9.
- ROY I., M. NATH GUPTA. 2004. Hydrolysis by a Mixture of Glucoamylase and Pullulanase Entrapped Individually in Calcium Alginate Beads. *Enzyme and Microbial Technology*. 34: 26-32.
- SARKAR J., A. LEONOWICZ, J.M. BOLLAG. 1989. Immobilization of Enzymes in Clays and Soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 21: 223-230.
- VAN BRUGGEN A.H.C., A.M. SEMENOV. 2000. In Search of Biological Indicators for Soil Health and Disease Suppression. *Applied Soil Ecology*. 15: 13-24.