

Artículo de revisión

IMPORTANCIA Y UTILIDAD DE LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUELOS MEDIANTE EL COMPONENTE MICROBIANO: EXPERIENCIAS EN SISTEMAS SILVOPASTORILES

Importance and utility of microbial elements in evaluating soil quality: case studies in silvopastoral systems

Palabras clave: calidad del suelo, indicadores de calidad, microorganismos edáficos, sistemas agroforestales, sistemas silvopastoriles, uso del suelo.

Key words: soil quality, soil quality indicators, soil microorganisms, agroforestry systems, silvopastoral systems, land use.

Victoria Eugenia Vallejo-Quintero¹

RESUMEN

La sostenibilidad ambiental se alcanza a través del mantenimiento y del mejoramiento de la calidad del suelo. Dicha calidad es definida como la “capacidad del suelo para funcionar”, y se evalúa midiendo un grupo mínimo de datos que corresponden a diversas propiedades edáficas (físicas, químicas y biológicas). Sin embargo, no todos los parámetros cumplen con todas las condiciones que debe reunir un indicador ideal, tales como: generar una clara discriminación entre los sistemas de uso o manejo evaluados, ser sensibles a condiciones de estrés asociadas con intervenciones antrópicas, ser de fácil medición, ser accesibles a muchos usuarios y que respondan en escalas de tiempo cortas. Debido a que la pérdida de calidad está asociada con la alteración de numerosos procesos realizados por los microorganismos edáficos, además de que ellos reúnen las condiciones anteriormente mencionadas, se han propuesto como indicadores válidos para diagnosticar el impacto generado por cambios en el uso del suelo y en la restauración de ecosistemas. De esta manera, mediante la evaluación de su densidad, actividad o estructura-composición se puede conocer si los actuales sistemas de manejo conservan, mejoran o degradan el suelo. En este artículo se realiza una revisión de los principales conceptos relacionados con la calidad del suelo y sus indicadores. Adicionalmente, se aborda y se

discute sobre el efecto generado sobre la calidad edáfica debido a la implementación de sistemas silvopastoriles, haciendo énfasis en el uso de indicadores microbianos.

ABSTRACT

Environmental sustainability is achieved by maintaining and improving soil quality. This quality is defined as “the ability of soil to function” and is evaluated through measuring a minimum set of data corresponding to different soil properties (physical, chemical and biological). However, assessment of these properties does not meet all the conditions necessary to be ideal indicators such as: clearly discriminating between the systems use and / or management evaluation, sensitivity to stress conditions associated with anthropogenic actions, easy measurement, accessibility to many users and short response time. Because loss in quality is associated with the alteration of many processes performed by soil microorganisms they meet the above conditions and have been proposed as valid indicators for diagnosing the impact of changes in land-use and ecosystem restoration. Thus, through the evaluation of the density, activity and /or structure-composition of microorganisms we can determine whether current management systems maintain, improve or degrade the soil. In this article we review the main concepts related to soil

¹ Grupo de investigación Agua y Desarrollo Sostenible, Programa de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería, Universidad Central, cra. 5, núm. 21-38, Bogotá, Colombia. evallejoq@ucentral.edu.co. Autora para correspondencia.

quality and its indicators. We discuss the effect of the implementation of silvopastoral systems on soil quality, with an emphasis on the use of microbial indicators.

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más críticos a la hora de implementar políticas y programas fundamentados en el desarrollo sostenible es la selección idónea de indicadores de calidad de suelo que permitan evaluar el impacto de la implementación de diferentes prácticas de manejo agrícolas y pecuarias. En la actualidad las propiedades biológicas se han convertido en criterios importantes para valorar el manejo o uso de los suelos, de tal forma que se crea la necesidad de orientar la producción agropecuaria hacia nuevas tecnologías fundamentadas en la recuperación de los suelos degradados a través de un manejo agroecológico sostenido que favorezca la biodiversidad.

Es bien conocido que la ganadería en Colombia se ha desarrollado de manera extensiva, destinándose grandes terrenos, con bajos niveles de inversión y manejo inadecuado de praderas, lo cual ha provocado un deterioro ambiental de los ecosistemas y un impacto negativo en los sectores socioeconómicos del país (Mahecha *et al.*, 2002; Murgueitio *et al.*, 2011). Dichas pasturas, caracterizadas por una baja o nula diversidad vegetal y por la implementación de inadecuadas prácticas de manejo como el sobrepastoreo del ganado, la quema y la mecanización han causado una pérdida de calidad de los suelos, reduciendo los indicadores productivos, la biodiversidad e incrementando la necesidad de insumos químicos externos (fertilizantes y plaguicidas).

Por lo tanto, se hace necesario frenar la degradación edáfica y la pérdida de la biodiversidad en sistemas ganaderos, este reto implica cambios en las políticas estatales y un compromiso por parte de los productores, quienes deben ser los más implicados con la recuperación de su entorno para garantizar la sostenibilidad del sistema productivo (Nair *et al.*, 1995; Molina *et al.*, 2001).

Bajo el contexto anterior, la incorporación de árboles y arbustos en los sistemas de producción ganadera a través de sistemas silvopastoriles (SS) representa una alternativa sostenible que responde a las necesidades actuales relacionadas con la demanda alimenticia, la preservación del medio ambiente y las realidades socioeconómicas de países tropicales (Molina *et al.*, 2008; Murgueitio & Ibrahim, 2008). Los SS involucran la presencia de leñosas perennes (árboles o arbustos) que interactúan con los componentes tradicionales (forrajeras herbáceas y animales), todos ellos bajo un sistema de manejo integral (Mahecha, 2003; Murgueitio & Ibrahim, 2008). Dichos sistemas se caracterizan por ser altamente diversificados y autosuficientes, lo cual, asociado con un manejo agropecuario adecuado y acorde con las características del agroecosistema, favorece procesos naturales e interacciones biológicas, mejora la calidad edáfica, disminuye la dependencia de insumos químicos externos e incrementa la productividad agropecuaria (Vallejo, 2012); así mismo, genera otros beneficios económicos adicionales a sus productores, tales como: la producción de madera, leña y frutos, a la vez que prestan diversos servicios ambientales, entre ellos la regulación de gases efecto invernadero, secuestro de carbono, belleza escénica, control de la erosión, protección de la biodiversidad y de los recursos hídricos (Molina *et al.*, 2001; Giraldo *et al.*, 2010; Vallejo *et al.*, 2010; Murgueitio *et al.*, 2011).

El suelo es un sistema vivo, heterogéneo y dinámico que incluye componentes físicos, químicos, biológicos y sus interacciones. Por lo tanto, para evaluar su calidad resulta necesario la medición y descripción de sus propiedades (Luters & Salazar, 1999). La definición más completa y mundialmente aceptada define la calidad como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sustentar la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat (Doran & Parkin, 1994).

Es necesario evaluar y monitorear dicha calidad con el objetivo de mejorar o conservar la fertilidad

y la productividad del suelo, garantizando la sustentabilidad de los agroecosistemas. Por lo tanto, como parte de las estrategias para lograrlo, resulta indispensable la selección y uso de indicadores de calidad que proporcionen información sobre los cambios generados en las propiedades edáficas como consecuencia del uso y del manejo. Un indicador es una herramienta de medición que resume o simplifica información relevante, haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible mediante la cuantificación, medición y subsecuente interpretación de propiedades que suministran información acerca de su estado actual y potencial (Karlen *et al.*, 2001; Astier *et al.*, 2002).

Debido a que la pérdida de calidad del suelo se encuentra asociada con la alteración de numerosas funciones realizadas por los microorganismos edáficos (p. ej., ciclaje de nutrientes, mantenimiento de la estructura edáfica, pérdida de fertilidad, degradación de contaminantes y control biológico), estos se han propuesto como indicadores válidos a la hora de evaluar el impacto generado por las actividades agropecuarias (Nielsen & Winding, 2002; Romaniuk *et al.*, 2011). Por otra parte, estudios previos han demostrado que los microorganismos presentan una elevada sensibilidad a disturbios antropogénicos, respondiendo en escalas de tiempo mucho más cortas en comparación con aquellos físicos o químicos, lo cual los convierte en indicadores ideales de la calidad del suelo (De la Paz-Jiménez *et al.*, 2002). Entre los parámetros microbianos utilizados vale la pena mencionar las actividades enzimáticas; la biomasa microbiana total; la respiración microbiana; el recuento de hongos totales; la densidad de grupos funcionales de bacterias como las nitrificantes, desnitrificantes y fijadoras de N; así como estudios a nivel de la estructura y composición de las comunidades llevados a cabo a través de metodologías independientes de cultivo como los perfiles de ácidos grasos de fosfolípidos (PLFA, por sus siglas en inglés) y la electroforesis en gel en gradiente denaturante (DGGE, por sus siglas en inglés).

Los estudios enfocados en evaluar el impacto del establecimiento de SS sobre la calidad del suelo

a nivel mundial y en Colombia son limitados, adicionalmente son muy pocas las investigaciones que han incluido el componente microbiano como parte fundamental de la evaluación de dicha calidad (Amatya *et al.*, 2002; Kaur *et al.*, 2002; Vallejo *et al.*, 2012). No obstante, a nivel mundial se han desarrollado investigaciones que han evaluado el comportamiento de diferentes propiedades (físicas, químicas y biológicas) en sistemas agroforestales, permitiendo evidenciar que la calidad del suelo bajo dichos sistemas es más similar a la existente en ecosistemas naturales como bosques, en comparación con los sistemas tradicionales o intensivos agrícolas. Se ha demostrado que la presencia de distintos estratos vegetales en los SS afecta la cantidad, calidad y distribución de la materia orgánica, lo cual tiene un impacto a nivel de la biomasa microbiana edáfica y su actividad (Vallejo *et al.*, 2010; Paudel *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2011).

Para sistemas agroforestales como los SS se deben tener en cuenta indicadores de calidad edáfica como la estabilidad y porcentaje de agregados, porcentaje de C orgánico total, densidad aparente, resistencia a la penetración, porosidad, biomasa microbiana, densidad de hongos totales y simbióticos (endomycorizas) y actividades enzimáticas, los cuales permiten detectar respuestas tempranas frente al manejo agropecuario (Udawatta *et al.*, 2008; Vallejo *et al.*, 2012). La anterior aproximación, al igual que la evaluación de la estructura y la composición de las comunidades microbianas en los SS, contribuye a una estimación de beneficios ambientales y económicos que permiten tomar decisiones de manejo y políticas para esos sistemas.

Una experiencia pionera en el desarrollo e implementación de SS en Colombia y en América Latina ha sido la reserva natural El Hatico, empresa familiar certificada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural como ecológica desde 1996. En los últimos años, sus propietarios, con el acompañamiento del Centro de Investigación para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), así como con la participación de estudiantes (pregrado y posgrado) de diferentes universidades públicas

y privadas de nuestro país, han estudiado los diferentes componentes del sistema (suelo, pastura, árbol y animal). De esta manera, se han implementado sistemas de producción con distintos arreglos agroforestales y manejo agropecuario, los cuales han permitido evidenciar un impacto positivo a nivel económico, ambiental y social. Estudios previos en dicha reserva han demostrado que los SS mejoran la calidad del suelo, a través de una mayor biomasa y actividad microbiana en comparación con pasturas convencionales (Vallejo *et al.*, 2010; Vallejo *et al.*, 2012).

En los SS, la productividad de las plantas depende casi exclusivamente de la transformación y ciclaje de nutrientes en el suelo llevado a cabo por los microorganismos debido a que en la gran mayoría de sistemas no se adicionan fertilizantes químicos; por tal motivo, resulta fundamental el mantenimiento de una comunidad microbiana edáfica activa y diversa.

El propósito del presente manuscrito es explorar y revisar la literatura relacionada con el concepto de calidad de suelo y con los principios teóricos que fundamentan la utilización de indicadores de calidad con especial énfasis en los microbiológicos. Así mismo, se pone como ejemplo el impacto generado por la implementación de sistemas silvo-pastoriles sobre la calidad del suelo, analizándose en detalle los resultados de estudios llevados a cabo en el área de la reserva natural El Hatico (departamento del Valle), los cuales han permitido destacar la importancia del estudio del componente microbiano para el desarrollo de estrategias de producción pecuaria sostenible, además de su potencial uso como indicador de calidad de suelos, en conjunto con un selecto grupo de propiedades físicas y químicas.

La revisión resalta la importancia de profundizar en la investigación sobre las comunidades microbianas edáficas, lo cual, en conjunto con los demás impactos generados por los SS, permitirá seguir fomentando su implementación no solo en Colombia, sino también alrededor del mundo.

IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DEL SUELO EN EL MANEJO SOSTENIBLE

A principios de los años noventa el concepto científico de calidad del suelo surgió como una contribución trascendental y válida para mejorar el conocimiento acerca del suelo, a la vez que para realizar el monitoreo y seguimiento de sus posibles cambios/alteraciones y determinar la sostenibilidad de su uso y manejo. La *calidad del suelo* se define como su capacidad para funcionar dentro de un ecosistema natural o antrópico; para sostener o mejorar la productividad animal o vegetal; para mantener y controlar la calidad ambiental, y para soportar la habitabilidad y salud del hombre (Doran & Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 2001; Bone *et al.*, 2010). La calidad del suelo se conceptualiza como un vínculo entre las estrategias de conservación, las prácticas de manejo y el alcance de los principales objetivos de la agricultura sostenible. Es así como la evaluación de la calidad y su cambio a través del tiempo es considerado como un indicador primario del manejo sostenible del suelo (Astier *et al.*, 2002; Schloter *et al.*, 2003; Gil-Stores *et al.*, 2005; Udawatta *et al.*, 2009).

En regiones tropicales la conversión extensiva de bosques a pasturas y la intensificación agrícola son típicamente identificadas como los conductores más importantes de cambio en el uso del suelo, con consecuente pérdida de su calidad y biodiversidad. Por otra parte, el sector pecuario, impulsado por el incremento de los ingresos y apoyado por los cambios tecnológicos y estructurales, es uno de los segmentos de crecimiento más rápido de la economía agrícola. No obstante, este ritmo del cambio podría segregar a los pequeños agricultores y, por otro lado, deben abordarse los impactos generados para el medio ambiente y la salud humana en aras de garantizar la sostenibilidad (FAO, 2007). Debido a lo anterior, resulta fundamental cuantificar el estado de degradación actual del suelo con el fin de proponer, plantear y desarrollar estrategias sostenibles, que satisfagan las necesidades crecientes de alimento de la población mundial, y que contribuyan al mantenimiento y a la conservación del medio ambiente, así como al

mejoramiento y a la diversificación de la productividad agrícola y pecuaria.

La evaluación de la sostenibilidad de un sistema de manejo se puede realizar comparándolo a través del tiempo (cronosecuencia) en relación con otros usos o manejos alternativos, cuya clase textural sea similar, teniendo siempre como referencia un sistema de baja o menor intervención antrópica (Vallejo, 2012). Sin embargo, la evaluación de la calidad de un suelo, a través de propiedades edáficas claves que sirvan como indicadoras de las funciones de ese suelo, constituye una tarea difícil debido a la multiplicidad de factores que controlan los procesos biogeoquímicos y su variación en el tiempo y espacio (Astier *et al.*, 2002; Cantú *et al.*, 2007).

Cada función del suelo integra, o es el resultado, de la interacción de las diversas propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales son susceptibles de ser empleadas como indicadores de calidad, siempre que puedan ser medidas de manera cualitativa o cuantitativa y proporcionen una idea acerca del funcionamiento del suelo (Navarrete *et al.*, 2011; SQI, 1996a). Al evaluar la calidad del suelo se pueden realizar comparaciones entre distintos sistemas de manejo para determinar sus respectivos efectos sobre la calidad edáfica; realizar mediciones en una misma área a lo largo del tiempo para monitorear las tendencias de la calidad del suelo, determinadas por el uso y manejo del suelo; comparar áreas problema dentro de un predio con áreas sin problemas, y comparar valores medidos con condiciones edáficas de referencia o con el ecosistema natural (Luters & Salazar, 1999). Lo anterior permite implementar acciones a priori, evitando que la degradación del suelo adquiera un carácter irreversible, al mismo tiempo permite evaluar los efectos de la introducción de prácticas de manejo, identificar las fuentes de degradación y desarrollar criterios de calidad del suelo con fines regulatorios.

Un denominador común entre los elementos estratégicos para alcanzar la sostenibilidad de los agroecosistemas es el mejoramiento de la calidad y productividad edáfica (Astier *et al.*, 2002;

Schlöter *et al.*, 2003; Paudel *et al.*, 2012). Para tal fin, los agricultores, ganaderos, investigadores y en general quienes toman decisiones requieren de una evaluación detallada del efecto generado a través del tiempo por la implementación de nuevas prácticas de manejo agrícolas o pecuarias sobre la calidad edáfica a través del uso de indicadores, solo así se podrá promover y contribuir al desarrollo de una agricultura sostenible.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUELOS MEDIANTE INDICADORES

La evaluación de la calidad del suelo es indispensable para determinar si un sistema de manejo es sustentable a corto o largo plazo. Dicha evaluación permite comprender y revertir el deterioro en la funcionalidad ecosistémica que ocurre como consecuencia de la degradación de los suelos, generada por fenómenos como la erosión, la compactación, la pérdida de nutrientes, la contaminación, las alteraciones en el pH, el aumento en la solubilidad de metales pesados, la reducción de la densidad y la actividad biológica; la mayoría de ellos son causados por la implementación de prácticas de manejo inadecuadas. Por ejemplo, es ampliamente aceptado que la conversión de ecosistemas nativos a la agricultura o ganadería es uno de los principales impulsores de cambios ambientales globales, debido al hecho que se asocia con el cambio climático, pérdida de biodiversidad y contaminación de suelos y aguas por el uso excesivo de agroquímicos (Wang *et al.*, 2012). Lo anterior conlleva a un deterioro de la calidad del suelo, ya que disminuye su capacidad para realizar sus funciones de producción biológica, protección ambiental y sustento de la salud humana.

La calidad del suelo depende de un conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales, de acuerdo con su variabilidad espacial y temporal, sensibilidad a cambios de uso y manejo del suelo, clara discriminación entre los sistemas de manejo, rápida respuesta al cambio y facilidad en su interpretación y ejecución, pueden ser utilizadas como indicadores de calidad (Gil-Stores *et al.*, 2005; De la Rosa, 2005; Cantú *et al.*, 2007). Es así como dichas propiedades edáficas pueden

emplearse como mecanismos de análisis para detectar tendencias y determinar si los actuales sistemas de manejo conservan, mejoran o degradan el suelo. Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible, y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información relevante acerca de procesos y características (Luters & Salazar, 1999). Adicionalmente, los indicadores resumen o simplifican información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible, y cuantifican, determinan y proporcionan información acerca del estado actual del funcionamiento edáfico (Navarrete *et al.*, 2011).

Los indicadores de calidad se consideran una fuente de conocimiento importante porque facilitan la formulación de estrategias y acciones para la planeación territorial, proveen información preventiva temprana y anticipan condiciones; de igual manera, son indispensables en la toma de decisiones para ganaderos y agricultores, así como para el establecimiento de políticas de conservación del recurso suelo (Doran & Zeiss, 2000; Karlen *et al.*, 2003). En el ámbito de recuperación o restauración ecológica, el estudio de la calidad edáfica permitirá la selección y la adaptación de indicadores de evaluación y monitoreo a partir de los cuales se desarrollará y se estimulará la implementación de prácticas de manejo que no degraden el suelo.

Los indicadores deben ser preferiblemente variables cuantitativas, aunque pueden ser cualitativas, nominales o de rango u ordinales, especialmente cuando no hay disponibilidad de información cuantitativa, la propiedad no es cuantificable o cuando los costos para cuantificar son demasiado elevados (Cantú *et al.*, 2007). Puesto que el suelo es un recurso natural y un sistema muy complejo que permite el sostenimiento de las actividades productivas, pero por su amplia variabilidad es difícil establecer una sola medida física o química que refleje su calidad (Bandick & Dick, 1999), la regresión lineal (factor simple) y el análisis multivariado (*e.g.* análisis de componentes princi-

pales, análisis de correspondencias, análisis de factores, entre otros) han sido las herramientas estadísticas más utilizadas para evaluar la calidad del suelo y para determinar indicadores.

Los indicadores de calidad se clasifican en cuatro categorías: indicadores visuales, físicos, químicos y biológicos (Luters & Salazar, 1999; De la Rosa, 2005). Los indicadores visuales pueden ser obtenidos a través de visitas de campo, así como de la percepción de los agricultores y los conocimientos locales; básicamente estos se basan en la observación e interpretación fotográfica; por ejemplo, la exposición del subsuelo, el cambio del color del suelo, la presencia de cárcavas, el encharcamiento prolongado, la presencia de malezas, la escorrentía, el pobre desarrollo de vegetación, entre otros, todos ellos son indicios claros de que la calidad del suelo ha sido alterada y está siendo amenazada (Navarrete *et al.*, 2011). No obstante, algunos autores destacan que los indicadores deben ser preferiblemente variables cuantitativas, y el uso de variables cualitativas es válido y útil cuando no hay disponibilidad de información cuantitativa, cuando el atributo no es cuantificable o cuando los costos para cuantificar son elevados. Aunque la mayoría de propiedades del suelo son interdependientes, es importante determinar o involucrar todas o la mayoría de propiedades (físicas, químicas y biológicas) para proveer una mejor comprensión de las condiciones edáficas (Doran & Zeiss, 2000; De la Paz-Jiménez *et al.*, 2002; Vallejo, 2012).

Los indicadores físicos están relacionados con el tamaño, la disposición y el arreglo de las partículas del suelo. Los más relevantes son la porosidad, la densidad aparente, la resistencia a la penetración, la capacidad de retención de agua, la conductividad hidráulica, la estabilidad y el tamaño de los agregados, la profundidad y la textura. Estos indicadores reflejan primordialmente limitaciones en el crecimiento de raíces, emergencia de plántulas, infiltración o movimiento de agua dentro del perfil del suelo, retención, transferencia y ciclaje de nutrientes, e intercambio óptimo de gases (Luters & Salazar, 1999; Schoenholtz *et al.*, 2000).

Un suelo de buena calidad no debe presentar compactación, reflejando una baja densidad aparente y resistencia a la penetración, de esta manera no opone resistencia mecánica al avance de la raíz. Por otra parte, la ausencia de compactación genera una adecuada y óptima porosidad que facilita la aireación, el drenaje y el almacenamiento de agua para cubrir las necesidades de la planta, principalmente en periodos de sequía. Los indicadores edáficos sensibles a las variaciones inducidas por el manejo deben evaluarse y compararse a través del tiempo, para determinar cómo responden a corto, mediano y largo plazo.

De las propiedades anteriormente mencionadas es importante destacar que la textura y la profundidad son propiedades que cambian poco en el tiempo como consecuencia del uso o manejo del suelo, por lo cual, a pesar de la importancia e influencia que ejercen sobre otras propiedades edáficas, especialmente la textura, su uso como indicadores resulta es cuestionable. Lo anterior se asocia a que la textura, por ejemplo, solo cambia en periodos geológicos de tiempo o debido a cataclismos y, por lo tanto, modificaciones en el uso de suelo o manejo no causan alteraciones en dicha propiedad (Schoenholtz *et al.*, 2000; Vallejo *et al.*, 2012).

Por su parte, los indicadores químicos de calidad incluyen propiedades que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de agua y nutrientes para plantas y microorganismos. Dentro de las propiedades químicas que más han sido empleadas como indicadores se destacan el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y los nutrientes (N total, nitratos, amonio, relación C:N, fósforo total y disponible, y potasio) (De la Rosa, 2005; De la Rosa & Sobral, 2008). Los indicadores que reflejan estándares de fertilidad (pH, contenido de materia orgánica, N, P y K) son importantes en términos de productividad de cultivos. Sin embargo, resulta importante mencionar que uno de los problemas que presenta la utilización de propiedades químicas como indicadores es su alta variabilidad estacional.

En un sistema agrícola convencional, los nutrientes provienen tanto de la mineralización de la materia orgánica como de fertilizantes químicos, pero en ambos casos están controlados por el pH (que determina el estado químico de los elementos y su disponibilidad) y por la CIC (que determina la capacidad de retención o almacenamiento de los nutrientes). Hoy en día con el uso de fertilizantes químicos y orgánicos, así como con la incorporación de cubiertas vegetales, árboles y arbustos en los sistemas, es posible alterar el *pool* de nutrientes disponibles, evidenciado a través de aumentos y disminución de indicadores químicos edáficos como el contenido de N total, concentración de amonio, nitrato, fósforo, porcentaje de C orgánico, entre otros.

Un criterio clave para un indicador es su capacidad para representar un servicio en cuestión. El carbono orgánico total (COT), por ejemplo, representa un indicador clave en suelos agrícolas, debido a que está ampliamente documentada su relación positiva con la productividad de los cultivos (SQI, 1996b; Karlen *et al.*, 2001; Fließbach *et al.*, 2007 2006; Guimaraes *et al.*, 2013). Sin embargo, aunque el COT ha sido empleado tradicionalmente como un indicador de calidad, se ha evidenciado que cambia muy lentamente, siendo relativamente estable en el tiempo, por lo tanto, se considera inadecuado para evaluar los efectos de la implementación de prácticas agronómicas a corto plazo (menores de cinco años), siendo usualmente detectados a largo plazo (mayores a 25 años) (De la Paz-Jiménez *et al.*, 2002; Haynes, 2005; Weil & Magdoff, 2004). El contenido de COT es considerado como un parámetro estable comparado con las fracciones de C lábiles o livianas o la biomasa microbiana edáfica (Bonanomia *et al.*, 2011). Dichas fracciones de C lábil o activo responden rápidamente y son más sensibles a cambios en el manejo agrícola; adicionalmente son más importantes que el COT desde el punto de vista agronómico y productivo (Tan *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2012). Esto último asociado a que la MO lábil tiene un significado especial para el funcionamiento del ecosistema edáfico, ya que representa una fuente de energía primaria para los organismos heterótrofos

y una reserva de nutrientes (Galantini & Suñer, 2008).

Finalmente, los indicadores biológicos se relacionan con la eficacia con la que los organismos edáficos descomponen los residuos animales y vegetales incorporados al suelo. A partir de lo anterior se cumple una función muy importante porque se controla el suministro de nutrientes (vía mineralización de la materia orgánica) y el humus (humificación de los residuos orgánicos frescos) al cultivo o ecosistema natural, lo que se relaciona con la fertilidad edáfica. Dentro de los indicadores biológicos se incluyen determinaciones tanto de microorganismos y macrorganismos, sus enzimas o bioproductos (SQI, 1996b). Como ejemplos de estos indicadores suelen emplearse la respiración del suelo, la biomasa microbiana, el conteo de especies y grupos de la fauna del suelo (biodiversidad del suelo), así como ensayos sobre actividades enzimáticas, considerados indicadores del balance de la actividad metabólica de los microorganismos edáficos.

Las propiedades biológicas tienen la ventaja de actuar como señales tempranas de degradación o de mejoramiento del suelo (Bandick & Dick, 1999; Cantú *et al.*, 2007; Vallejo *et al.*, 2012). De ellas, las microbiológicas y bioquímicas son consideradas las más sensibles y valiosas en la interpretación de la dinámica de la materia orgánica y ciclaje de nutrientes; proporcionan una rápida respuesta a los cambios del manejo del suelo, son sensibles al estrés ambiental y la mayoría son de fácil medición en el laboratorio, lo que las hace idóneas para su uso en los diferentes programas de monitoreo. Es así como la presencia, ausencia o densidad y actividad de estos organismos los convierte en un buen indicador para determinar la calidad de suelos en una variedad de ecosistemas.

Una vez descritos todos los indicadores, vale la pena mencionar que la mayoría de autores reconocen la importancia de integrar los distintos parámetros físicos, químicos y biológicos. Adicionalmente, se debe tener en cuenta la heterogeneidad metodológica utilizada en la determinación de una misma variable o de un factor, que es diferente

según la escala de observación adoptada. Como consecuencia, evaluar la calidad del suelo ha sido objeto de diferentes propuestas, que incluyen distintos parámetros edáficos. No obstante, parece que existe un consenso en la necesidad de disponer de un conjunto mínimo de datos que permita cuantificar la calidad de un suelo. Este incluye a nivel físico propiedades como: textura, profundidad de raíces, tasa de infiltración, densidad aparente y capacidad de retención de agua (químicos: pH, C orgánico total, conductividad eléctrica y niveles de nutrientes, y biológicos: C y N de la biomasa microbiana, N potencialmente mineralizable, respiración del suelo). Sin embargo, muchas de estas propiedades incluidas en el grupo de datos no satisfacen los requerimientos como indicadores (*e.g.* textura, C orgánico total; Bandick & Dick, 1999; Paudel *et al.*, 2011).

¿CÓMO LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES CONTRIBUYEN AL MANTENIMIENTO O AL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL SUELO?

Tradicionalmente, los sistemas de producción ganadera convencional han sido manejados como monocultivos de gramíneas, caracterizados por una baja o nula cobertura arbórea y una alta dependencia tecnológica (*e.g.* maquinaria pesada, uso de fertilizantes y pesticidas). El resultado final es un sistema artificial que requiere de una intervención humana permanente. En este contexto, los plaguicidas reemplazan los controles naturales de poblaciones de malezas, insectos y patógenos, y la manipulación genética sustituye los procesos naturales de selección y evolución (Altieri & Nicholls, 2004; Labrador & Altieri, 2001). Este tipo de ganadería de carácter extensivo se ha caracterizado por unos bajos niveles de inversión y un manejo inadecuado de las pasturas, lo cual ha impactado de manera negativa la economía de los agricultores, conllevando además a un deterioro progresivo del medio ambiente (Giraldo *et al.*, 2010; Murgueitio & Ibrahim, 2008).

Una alternativa real y válida para los problemas mencionados es la implementación de prácticas de conservación y de manejo ecológico del suelo. Estas

prácticas tienen en común un aporte más eficaz de materia orgánica, una menor intensidad de laboreo, un empleo de coberturas vegetales permanentes y una limitación en el uso de agroquímicos. De esta manera, se consigue aumentar la calidad del suelo, mejorando su fertilidad, reteniéndose más agua y disminuyendo la susceptibilidad a la compactación, erosión y pérdida de nutrientes a cuerpos de agua. Dentro de las alternativas para incrementar la sostenibilidad a nivel pecuario se encuentra el establecimiento de SS. Dichos sistemas incorporan leñosas perennes (árboles o arbustos multipropósitos), los cuales interactúan con los componentes tradicionales: forrajeras herbáceas y animales, bajo un sistema de manejo integral (Molina *et al.*, 2001; Mahecha, 2003). Como resultado de esta asociación deliberada se generan interacciones ecológicas o económicas entre sus componentes (Nair, 1997; Murgueitio *et al.*, 2011).

Los SS a diferencia de los sistemas de producción convencional se caracterizan por ser altamente diversificados y autosuficientes, lo cual, asociado con un manejo agropecuario adecuado y acorde con las características del agroecosistema, favorece procesos naturales e interacciones biológicas, que benefician procesos ecosistémicos fundamentales, tales como el ciclaje de nutrientes, el control biológico, el secuestro de C, el mantenimiento de la estructura edáfica, la fertilidad y consecuentemente su productividad (Vallejo, 2012). Estudios previos han indicado que una disminución de la biodiversidad rompe las interacciones ecológicas e incrementa dramáticamente la dependencia de la producción agropecuaria por insumos químicos externos. Por el contrario, la diversificación en sistemas agroforestales mejora los procesos ecológicos, por lo que de manera simultánea se favorecen la conservación de la biodiversidad y el suministro de servicios ecosistémicos que mejoran la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas agropecuarios (Altieri & Nicholls, 2004; Tripathi *et al.*, 2005).

Los SS generan impactos positivos sobre la calidad del suelo debido principalmente al incremento en el contenido y en la calidad de C orgánico que ingresa

al sistema, asociado con la alta cobertura arbórea y ausencia o limitación de prácticas agropecuarias convencionales como la labranza y la quema (Molina *et al.*, 2001, 2008; Tripathi *et al.*, 2005). Por ejemplo, la labranza, cuyo objetivo primordial es el control de malezas, la preparación de la cama de siembra y el acondicionamiento de las propiedades del suelo, puede generar, por la fuerte y continua mecanización, compactación edáfica y la formación de costras, cambios en el balance hídrico del suelo, disminuyendo la infiltración y el intercambio gaseoso, lo cual afecta la actividad y diversidad de los organismos vivos (Hernández-Hernández & López-Hernández, 2002).

Finalmente, la labranza genera la ruptura de los agregados exponiendo a la descomposición la materia orgánica previamente protegida. Estos cambios pueden activar procesos de erosión intensos que llevan a la degradación del suelo y, en definitiva, a largo plazo, a la disminución de la producción. Por el contrario, en los SS el mayor ingreso de materia orgánica proveniente de los distintos estratos arbóreos proporciona una amplia variedad de sustratos para los microorganismos edáficos, incrementando su actividad, estimulando el crecimiento de las plantas al proveer alimento para dichos organismos, que participan activamente en el ciclaje de nutrientes (Vallejo, 2012).

Los SS imitan las características de los ecosistemas naturales, tales como un dosel multiestrato y raíces profundas, minimizando las consecuencias de los cambios generados por el manejo agropecuario al proveer protección al suelo y manteniendo de condiciones similares a aquellas bajo vegetación natural. Lo anterior fue evidenciado en un estudio en el cual se observó un mejoramiento en las propiedades físicas edáficas (resistencia a la penetración, densidad aparente, y contenido de agua) en agrosilvopasturas y SS de Brasil, similares a los suelos bajo vegetación natural (Silva *et al.*, 2011).

Se ha observado un aumento en el contenido de nutrientes, una reducción de las pérdidas del suelo por la protección conferida por los árboles contra la erosión hídrica y eólica, así como una mitigación de los efectos del pisoteo de los animales en los suelos,

reflejada en una menor compactación y ausencia de deterioro en la estructura edáfica (menor densidad aparente y resistencia a la penetración, mayor porosidad y estabilidad de agregados), asociada con la rotación e introducción de árboles y arbustos en los sistemas (Reis *et al.*, 2009; Staley *et al.*, 2008; Vallejo *et al.*, 2010, 2012; Yadav *et al.*, 2011).

La compactación edáfica reportada y encontrada en los sistemas convencionales por los distintos autores mencionados produce un aumento en la densidad aparente y en la resistencia mecánica; destruye o debilita la estructura del suelo; reduce la porosidad total, lo cual disminuye la densidad y actividad microbiana; restringe el movimiento de agua y la transferencia de oxígeno, resultando en un impedimento en el crecimiento y elongación de las raíces de las gramíneas. Adicionalmente, en relación con las propiedades físicas, estudios previos han indicado que el porcentaje y la estabilidad de agregados incrementan significativamente en sistemas agroforestales, lo que se asocia con el ingreso de materia orgánica, siendo este un factor que promueve la estabilidad. Un mayor porcentaje de agregados estables mejora el movimiento y la transferencia de aire y agua; además de ser considerados como una estructura secundaria del suelo con poros, proporciona hábitat microbiano y protección física a la materia orgánica (Udawatta *et al.*, 2008, 2009).

Por otra parte, investigaciones desarrolladas por Haile *et al.* (2008), Mahecha (2003) y Molina *et al.* (2001) soportan la hipótesis de que los SS contienen más carbono en las capas más profundas del suelo en comparación con las pasturas (monocultivos), como consecuencia de un suministro importante a la materia orgánica del suelo proveniente de la descomposición de las raíces de árboles muertos. Adicionalmente, los árboles incorporados a los SS a través de sus raíces profundas y extendidas toman los nutrientes de las capas más profundas del suelo donde no llegan las raíces de los pastos y los depositan sobre la superficie en forma de hojas, tallos y frutos, siendo estos una importante fuente

de materia orgánica para el suelo.

En general, son varios los efectos positivos encontrados en el suelo por la introducción de los árboles en los SS, los cuales se resumen así: control de la erosión hídrica y eólica, aumento en la fijación de nitrógeno por las leguminosas, mejoramiento en el reciclaje de nutrientes, solubilización de nutrientes de difícil incorporación por las plantas a través de exudados de raíces y secreciones ácidas, cambios positivos en las propiedades físicas edáficas, aporte en la regulación del ciclo hidrológico y en la protección y mejoramiento de la calidad del agua (Nair *et al.*, 1995; Nair, 1997; Murgueitio & Ibrahim, 2008; Murgueitio *et al.*, 2011).

Estudios realizados por Vallejo *et al.* (2010, 2012) indican la importancia de evaluar distintas edades de establecimiento (cronosecuencias), evidenciándose un mayor contenido de C orgánico/arcilla en los SS de doce a quince años, en comparación con el manejo convencional y SS de tres y ocho años de edad. Las diferencias encontradas en el contenido de C orgánico en los SS frente al manejo convencional son ocasionadas por una mayor acumulación de hojarasca proveniente de las gramíneas, leguminosas y residuos de pastoreo; así como por una disminución o eliminación de prácticas de manejo como: labranza, quema, fertilización intensiva y sobrepastoreo. Por ejemplo, se ha reportado que la fertilización intensiva en pasturas ocasiona una disminución en el tamaño de la masa radicular de las gramíneas, lo que conlleva a una menor liberación de sus exudados radiculares, que son considerados una fuente importante de C orgánico lábil en el sistema (Parfitt *et al.*, 2010; Tan *et al.*, 2007). Por otra parte, es probable que las diferencias encontradas en el contenido de CO en la cronosecuencia sean ocasionadas por los cambios que sufren las diferentes fracciones de C (activa, lenta y pasiva) a través del tiempo como consecuencia de procesos sucesionales ecológicos en los SS, diferencias en el manejo y composición agroforestal.

EFFECTO DEL ESTABLECIMIENTO DE SISTEMAS AGROFORESTALES SOBRE PROPIEDADES MICROBIOLÓGICAS Y SU USO COMO INDICADORES DE CALIDAD DE SUELOS

Los sistemas agroforestales han sido promovidos como un sistema productivo sostenible debido a su cobertura vegetal continua y diversificación en la producción. Su uso es particularmente relevante cuando los suelos tienen bajo potencial agropecuario y los dueños de las tierras poseen bajos recursos para acceder a insumos químicos externos, de los cuales son dependientes los sistemas tradicionales (Nair *et al.*, 1995). Por otra parte, los sistemas agroforestales son considerados estructural y funcionalmente más complejos, con una mayor eficiencia en la captación y utilización de recursos (nutrientes, luz y agua), en comparación con los sistemas convencionales. La mayor diversidad estructural incluye y favorece ciclos estrechos de nutrientes, la conservación del suelo, almacenamiento de C, mantenimiento de la biodiversidad y mejoramiento de la calidad de agua. Por lo tanto, métodos simples y adaptados de indicadores de calidad de suelos que incluyan el componente biológico, el cual gobierna los procesos del suelo, son requeridos para mejorar el manejo y promover el uso de estos sistemas (Giraldo *et al.*, 2010; Rousseau *et al.*, 2012).

Del componente biológico, los microorganismos son considerados claves para un adecuado funcionamiento ecosistémico ya que desempeñan alrededor del 80% al 90% de las funciones edáficas más relevantes (productiva, filtrante y degradativa) (Silva *et al.*, 2011; Garbeva *et al.*, 2004). Es bien conocido que dichos organismos juegan un importante rol en el ciclaje de nutrientes y flujo de energía y proveen información acerca del impacto de prácticas de manejo agrícola y pecuarias, tales como: actividades de labranza, quema, sobrepastoreo y uso de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, así como de factores ecológicos como la diversidad de plantas, tipo de cobertura vegetal, ingresos de materia orgánica y cambios climáticos (Van der Heijden *et al.*, 2008). Adicionalmente, los microorganismos ayudan a la formación y

al mantenimiento de la estructura edáfica; por ejemplo, a través de la producción de polisacáridos extracelulares y otros restos celulares provenientes de los microorganismos, los cuales actúan como agentes cementantes que estabilizan los agregados del suelo. Por lo tanto, ellos también afectan propiedades como la capacidad de almacenamiento de agua, la tasa de infiltración, la formación de costras, la erodabilidad y la susceptibilidad a la compactación; es así como desarrollan una amplia gama de acciones que inciden en el desarrollo y en la nutrición vegetal.

El suelo contiene una gran variedad de microorganismos con una amplia diversidad de actividades metabólicas; se ha evidenciado que estos pueden ser indicadores de calidad de suelos más sensibles comparados con organismos superiores, debido a su rápida respuesta frente a situaciones de estrés asociadas con eventos naturales y antropogénicos (Bandick & Dick, 1999; Nielsen & Winding, 2002; Vallejo *et al.*, 2012). Esto último se asocia con un corto periodo de generación y su íntima relación con su entorno, atribuido a su mayor superficie en relación con el volumen. La biomasa microbiana, las enzimas del suelo y la respiración basal son algunos de los parámetros biológicos más importantes que han demostrado ser herramientas eficaces en el monitoreo de la calidad edáfica; aunque algunos autores han reportado que los suelos sometidos a diferentes prácticas o tratamientos pueden tener una biomasa microbiana similar, mientras que su funcionamiento difiere considerablemente. Por lo tanto, otros indicadores microbianos de calidad pueden ser mejores y más eficaces para evaluar el estado actual del suelo, como lo son la diversidad, la estructura y la función de las comunidades microbianas.

Estudios realizados por Paudel *et al.* (2011, 2012) evidenciaron una mayor actividad enzimática y diversidad microbiana en sistemas agroforestales en comparación con sistemas *grass buffer* y cultivos en hileras. Lo anterior se asoció con diferencias en la cantidad y en la calidad de la materia orgánica y exudados de raíces provenientes de los cultivos de cobertura y vegetación permanente. Se evidenció que los polisacáridos de plantas e hifas de hongos

asociados con la vegetación perenne ayudan y contribuyen a la formación de macroagregados más estables. El comportamiento de las actividades enzimáticas observadas en dichos estudios soporta la hipótesis de que la vegetación perenne provee condiciones más favorables para la actividad enzimática y diversidad microbiana en comparación con sistemas convencionales. Dichas diferencias son también atribuidas a un mayor volumen de las raíces perennes frente a los cultivos en hileras. En general, una mayor actividad enzimática y biomasa microbiana en prácticas conservacionistas permite el incremento de otros parámetros de calidad de suelos, tales como el contenido de C orgánico y la agregación e infiltración de agua, incrementando así la sostenibilidad y la productividad edáfica.

Así mismo, Kaur *et al.* (2002), quienes desarrollaron su estudio en sistemas agroforestales en suelos moderadamente alcalinos en el norte de la India, encontraron que dichos sistemas incrementaron la biomasa microbiana y su actividad debido a los efectos positivos ejercidos por la incorporación de árboles y los ingresos de materia orgánica. Adicionalmente, la hojarasca generada por árboles de *acacia* y *populos* se caracteriza por una concentración media de N (1.52% a 2.51%), bajo contenido de lignina (6.13% a 9.0%), favoreciendo el crecimiento de los microorganismos y resultando en una mayor biomasa microbiana.

Por otra parte, estudios llevados a cabo por Yadav *et al.* (2011), Paudel *et al.* (2012) y Vallejo *et al.* (2012) evidenciaron que las propiedades fisicoquímicas, con excepción de la densidad aparente, la resistencia a la penetración y los agregados estables, cambian muy lentamente y, por lo tanto, un largo periodo de tiempo es requerido para detectar efectos sobre la calidad del suelo. Por el contrario, cambios en las actividades enzimáticas, en la estructura y en la composición de las comunidades microbianas pueden detectarse en cortos periodos de tiempo (≤ 5 años), ayudando a detectar e identificar los efectos del manejo agrícola o pecuario rápidamente. Estos estudios, además, demuestran que incrementos en la biomasa microbiana y actividades enzimáticas asociadas a los ciclos del C, N y P en sistemas

agroforestales representan cambios positivos en el funcionamiento ecosistémico comparado con el manejo convencional. La disponibilidad de materiales carbonáceos y sustratos tales como: azúcares, aminoácidos y ácidos orgánicos en el suelo, provenientes de la descomposición de la hojarasca y raíces muertas debajo del dosel de los árboles como *prosopis* en los sistemas agroforestales, representan una importante fuente de abastecimiento de energía para las poblaciones microbianas (Yadav *et al.*, 2011).

Así mismo, estudios realizados en Colombia en la reserva natural El Hatico permitieron evidenciar que cada tipo de uso de suelo-manejo agropecuario genera diferentes nichos ecológicos (Vallejo *et al.*, 2011), los cuales pueden favorecer o promover el establecimiento de ciertos grupos microbianos, que estarían adaptados a las condiciones ambientales impuestas por las prácticas de manejo. En el caso de los SS, estos favorecen el crecimiento de hongos totales, hongos micorrícicos arbusculares (HMA) y actinomicetos, independiente de la edad de establecimiento del sistema. Por el contrario, las densidades significativamente menores de hongos en sistemas convencionales pueden ser el resultado de actividades como la labranza que afecta el establecimiento y el mantenimiento de las redes extensivas de hifas fúngicas y en el caso de las endomicorrizas, reduce la colonización de raíces, como consecuencia de la fragmentación de la red del micelio fúngico (Acosta-Martínez *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

La evaluación de la calidad edáfica es una herramienta fundamental que permite evaluar la sustentabilidad de las prácticas de manejo agrícolas y pecuarias, tanto a corto como a mediano y a largo plazo. Dicha evaluación se realiza por medio de la medición y del seguimiento en el tiempo de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Un indicador es una propiedad, característica o proceso que puede ser medido para detectar cambios en el sistema estudiado. Los indicadores permiten desarrollar e implementar políticas de mejoramiento o conservación de suelos, man-

teniendo o mejorando su calidad, a la vez de revertir y contrarrestar aquellos procesos que han conducido a una degradación.

Desde un punto de vista sostenible y de salud para los ecosistemas (naturales e intervenidos antrópicamente), la calidad debe definir la capacidad del medio para mantener su productividad biológica, su calidad ambiental, promoviendo, además, la salud de plantas, de animales y del hombre. De esta forma, los parámetros microbiológicos aportan información relativa a la actividad metabólica que existe en el suelo, además mantienen una mayor sensibilidad y rápida respuesta frente a procesos de degradación física, química o biológica, asociadas al inadecuado manejo, en comparación con otras propiedades edáficas.

Es por ello que los efectos de prácticas agrícolas o pecuarias, tales como la adición de fertilizantes, la labranza, la quema, el sobrepastoreo y el uso de monocultivo pueden ser evaluados a partir de las determinaciones como la biomasa microbiana, actividades enzimáticas, densidad o recuento de microorganismos edáficos, cambios en la estructura y composición de la comunidad microbiana, así como estudios a nivel de grupos funcionales, como densidad y actividad de bacterias nitrificantes, desnitrificantes, fijadores de nitrógeno, entre otros.

Actualmente, los SS se han convertido en una alternativa viable para el manejo convencional pecuario, al emplear técnicas de producción sostenibles acordes con la demanda alimenticia actual de la población y con las realidades socioeconómicas de países tropicales, contribuyendo a la conservación de los recursos naturales, a la recuperación de suelos degradados, así como al mejoramiento y a la diversificación de la productividad agrícola. Los SS se caracterizan por ser altamente diversificados y autosuficientes, lo cual, asociado con un manejo agropecuario adecuado y acorde con las características del agroecosistema, favorece los procesos naturales e interacciones biológicas que benefician procesos ecosistémicos fundamentales, tales como el ciclaje de nutrientes, el control biológico, el secuestro

de C, el mantenimiento de la estructura edáfica y la fertilidad. No obstante, a pesar de los avances, en Colombia es prioritario el desarrollo de nuevas investigaciones enfocadas al estudio de la calidad edáfica en dichos sistemas, involucrando el componente microbiano, bien sea a través de técnicas dependientes o independientes de cultivo.

Es evidente que el cambio en el uso del suelo tiene efectos considerables sobre la estructura y sobre la composición de la comunidad microbiana, sin embargo, se ha evidenciado una mayor similitud de dichas comunidades (independiente de su edad de establecimiento) con las comunidades del bosques o sistemas naturales, demostrando una rápida respuesta (menor a cinco años), así como una restauración de la comunidad y una rápida resiliencia después de la conversión de pasturas convencionales a SS. Lo anterior permite concluir que la implementación de sistemas agroforestales como los SS produce un mejoramiento o incremento en un conjunto de propiedades edáficas (físicas, químicas y biológicas).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Martínez, V., Bell, C.W., Morris, B.E.L., Zak, J., & Allen, V.G.** (2010). Long-term soil microbial community and enzyme activity responses to an integrated cropping-livestock system in a semi-arid region. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 137, 231-240.
- Altieri, M., & Nicholls, C.** (2004). Una base agroecológica para el diseño de sistemas diversificados de cultivo en el Trópico. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, 73, 8-20.
- Amatya, G., Chang, S., Beare, M., & Mead, D.** (2002). Soil properties under a *Pinus radiata* - ryegrass silvopastoral system in New Zealand. Part II. C and N of soil microbial biomass, and soil N dynamics. *Agroforestry Systems*, 54, 149-160.

- Astier, M., Maas, M., & Etchevers, J.** (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36, 605-620.
- Bandick, A.K., & Dick, R.P.** (1999). Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*, 31, 1471-1479.
- Bonnomia, G., D'Ascolic, A., Antignania, V., Capodilupoa, M., Cozzolino, L., Marzaiolic, R., Puopoloa, G., Rutiglianoc, F., Scelzab, R., Scotti, R., Raob, M.A., & Zoinaa, A.** (2011). Assessing soil quality under intensive cultivation and tree orchards in Southern Italy. *Applied Soil Ecology*, 47, 184-194.
- Bone, J., Head, M., Barraclough, D., Archer, M., Scheib, C., Flight, D., & Voulvoulis, N.** (2010). Soil quality assessment under emerging regulatory requirements. *Environment International*, 36, 609-622.
- Cantú, M., Becker, A., Bedano, J., & Schiavo, H.** (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo*, 25, 173-178.
- De la Paz-Jiménez, M., De la Horra, A.M., Pruzzo, L., & Palma, R.M.** (2002). Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters. *Biology Fertility Soils*, 35, 302-306.
- De la Rosa, D.** (2005). Soil quality and monitoring based on land evaluation. *Land Degradation & Development*, 16, 551-559.
- De la Rosa, D., & Sobral, R.** (2008). Soil quality and methods for its assessment. En: A.K. Braimoh & P.L.G. Vlek (eds.). *Land Use and Soil Resources* (pp.167-190). Dordrecht: Springer Science Musiness Media.
- Doran, J.W., & Parkin, T.B.** (1994). Defining and assessing soil quality. En J.W. Doran, D.C. Coleman, D.E. Bezdicek, & B.A. Stewart (eds.). *Defining soil quality for sustainable environment* (pp.3-21). Madison: Soil Science Society of America.
- Doran, J.W., & Zeiss, M.R.** (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 3-11.
- FAO [Food and Agriculture Organization of the United Nations].** (2007). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación: La ganadería a examen*. Roma: FAO. 200 p.
- Fließbach, A., Oberholzer, H-R., Gunst, L., & Mäder, P.** (2007). Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 273-284.
- Galantini, J.A., & Suñer, L.** (2008). Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia*, 25(1), 41-55.
- Garbeva, P., van Veen, J.A., & van Elsas, J.D.** (2004). Microbial diversity in soil: Selection of microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness. *Annual Review of Phytopathology*, 42, 243-270.
- Gil-Stores, F., Trasar-Cepeda, C., Leiros, M.C., & Seoane, S.** (2005). Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 877-887.
- Giraldo, C., Escobar, F., Chará, J.D., & Calle, Z.** (2010). The adoption of silvopastoral systems promotes the recovery of ecological processes regulated by dung beetles in the Colombian Andes. *Insect Conservation and Diversity*, 4, 115-122.

- Guimaraes, D.V., Silva Gonzaga, M.I., Oliveira da Silva, T., Lima da Silva, T., Silva Dias, N., & Silva Matias, M.I.** (2013). Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. *Soil & Tillage Research*, 126, 177-182.
- Haile, S., Nair, K.R., & Nair, V.D.** (2008). Carbon storage of different soil-size fractions in Florida silvopastoral systems. *Journal of Environmental Quality*, 37, 1789-1797.
- Haynes, R.J.** (2005). Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. *Advances in Agronomy*, 85, 221-268.
- Hernández-Hernández, R.M., & López-Hernández, D.** (2002). El tipo de labranza como agente modificador de la materia orgánica: un modelo para suelos de sabana de los llanos centrales venezolanos. *Interciencia*, 27(10), 529-536.
- Karlen, D.L., Andrews, S.S., & Doran, J.W.** (2001). Soil quality: current concepts and applications. *Advances in Agronomy*, 74, 1-40.
- Karlen, D., Ditzler, C.A., & Andrews, S.S.** (2003). Soil quality: why and how? *Geoderma*, 114, 145-156.
- Kaur, B., Gupta, S., & Singh, G.** (2002). Bio-melioration of a sodic soil by silvopastoral systems in northwestern India. *Agroforestry Systems*, 54, 13-20.
- Labrador, J., & Altieri, M.A.** (2001). Agroecología y desarrollo: aproximación a los fundamentos agroecológicos para la gestión sustentable de agroecosistemas mediterráneos. Madrid: Universidad de Extremadura. 566 p.
- Luters, J.C., & Salazar, J.P.** (1999). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Buenos Aires: United States Department of Agriculture, CRN-CNIA-INTA. 88 p.
- Mahecha, L.** (2003). Importancia de los sistemas silvopastoriles y principales limitantes para su implementación en la ganadería colombiana. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 16, 11-17.
- Mahecha, L., Gallego, L.A., & Peláez, F.** (2002). Situación actual de la ganadería de carne en Colombia y alternativas para impulsar su competitividad y sostenibilidad. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 15, 213-225.
- Molina, C.H., Molina, C.H., Molina, E., & Molina, J.P.** (2008). Carne, leche y mejor ambiente en el sistema silvopastoril con *Leucaena leucocephala*. En E. Murgueitio, C. Cuartas & J. Naranjo (eds.). *Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo* (pp. 41-65). Cali: Fundación CIPAV.
- Molina, C.H., Molina, C.H., Molina, E.J., Molina, J.P., Navas, A., Ibrahim, M. (comp.)** (2001). Advances in the implementation of high tree-density silvopastoral systems. *Silvopastoral systems for restoration of degraded tropical pasture ecosystems*. Turrialba: International Symposium on Silvopastoral Systems, 2 Congress on Agroforestry and Livestock Production in Latin America. 299-302 p.
- Murgueitio, E., & Ibrahim, M.** (2008). Ganadería y medio ambiente en América Latina. En E. Murgueitio, C. Cuartas & J. Naranjo (eds.). *Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo* (pp. 19-40). Cali: Fundación CIPAV.
- Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A., & Solorio, B.** (2011). Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management*, 10, 1654-1663.

- Nair, P.** (1997). Directions in tropical agroforestry research: past, present, and future. *Agroforestry Systems*, 38, 223-246.
- Nair, P.K.R., Kang, B.T., & Kass, D.B.L.** (1995). Nutrient cycling and soil erosion control in agroforestry system. *American Society of Agronomy*, 60, 117-138.
- Navarrete, A., Vela, G., López, J., & Rodríguez, M.L.** (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *Revista Contactos*, 80, 29-37.
- Nielsen, M., & Winding, A.** (2002). Microorganisms as indicators of soil health. Denmark: Ministry of the Environment, National Environmental Research Institute. 84 p.
- Parfitt, R L., Yeates, G.W., Ross, D.J., Schon, N.L., Mackay, A.D., & Wardle, D.A.** (2010). Effect of fertilizer, herbicide and grazing management of pastures on plant and soil communities. *Applied Soil Ecology*, 45, 175-186.
- Paudel B.R., Udawatta, R.P., & Anderson, S.H.** (2011). Agroforestry and grass buffer effects on soil quality parameters of grazed pasture and row-crop systems. *Applied Soil Ecology*, 48, 125-132.
- Paudel, B.R., Udawatta, R.P., Kremer, J.R., & Anderson, S.H.** (2012). Soil quality indicator responses to row crop, grazed pasture, and agroforestry buffer management. *Agroforestry Systems*, 84, 311-323.
- Reis, G., Lana, Â., Mauricio, R., Lana, R., Machado, R., Borges, I., & Neto, T.** (2009). Influence of trees on soil nutrient pools in a silvopastoral system in the Brazilian Savannah. *Plant and Soil*, 329, 185-193.
- Romaniuka, R., Giuffrea, L., Costantinia, A., & Nannipieri, P.** (2011). Assessment of soil microbial diversity measurements as indicators of soil functioning in organic and conventional horticulture systems. *Ecological Indicators*, 11, 1345-1353.
- Rousseau, G.X., Deheuvels, O., Rodríguez Arias, I., & Somarribae, E.** (2012). Indicating soil quality in cacao-based agroforestry systems and old-growth forests: The potential of soil macrofauna assemblage. *Ecological Indicators*, 23, 535-543.
- Schlöter, M., Dilly, O., & Munch, J.C.** (2003). Indicators for evaluating soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 98, 255-262.
- Schoenholtz, S.H., Van Miegroet, H., & Burger, J.A.** (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 138, 335-356.
- Silva, G.L., Lima, H.V., Campanha, M.M., Gilkes, R.J., & Oliveira, T.S.** (2011). Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, 167-168: 61-70.
- SQI [Soil Quality Institute].** (1996a). Indicators for Soil Quality Evaluation. Auburn: USDA Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Institute, Agricultural Research Service. 2 p.
- SQI [Soil Quality Institute].** (1996b). Soil Quality Indicators: Organic Matter. Auburn: USDA Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Institute, Agricultural Research Service. 2 p.

- Staley, T., Gonzalez, J., & Neel, J.** (2008). Conversion of deciduous forest to silvo-pasture produces soil properties indicative of rapid transition to improved pasture. *Agroforestry Systems*, 74, 267-277.
- Tan, Z., Lal, R., Owens, L., & Izaurrealde, R.C.** (2007). Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil and Tillage Research*, 92, 53-59.
- Tripathi, G., Ram, S., Sharma, B.M., & Singh, G.** (2005). Soil faunal biodiversity and nutrient status in silvopastoral systems of Indian desert. *Environmental Conservation*, 32, 178-188.
- Udawatta, R.P., Kremer, R.J., Garrett, H.E., & Anderson, S.H.** (2009). Soil enzyme activities and physical properties in a watershed managed under agroforestry and row-crop systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131, 98-104.
- Udawatta, R.P., Kremer, R.J., Adamson, B.W., Anderson, S.H., & Garrett, H.E.** (2008). Variations in soil aggregate stability and enzyme activities in a temperate agroforestry practice. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 39, 153-160.
- Vallejo, V.** (2012). Efecto del establecimiento de sistemas silvopastoriles sobre la comunidad microbiana edáfica (total y de bacterias oxidadoras de amonio) en la Reserva Natural: El Hatoco-Valle (Tesis doctoral). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. 239 p.
- Vallejo, V., Roldan, F., & Dick, R.P.** (2010). Soil enzymatic activities and microbial biomass in an integrated agroforestry chronosequence compared to monoculture and a native forest of Colombia. *Biology and Fertility of Soils*, 46, 577-587.
- Vallejo, V.E., Roldán, F., Arbeli, Z., Terán, W., Lorenz, N., & Dick, R.P.** (2012). Effect of land management and *Prosopis juliflora* (Sw.) DC trees on soil microbial community and enzymatic activities in silvopastoral systems of Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 150, 139-148.
- Van der Heijden, M.G.A., Bardgett, R.D., & Van Straalen, N.M.** (2008). The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11, 296-310.
- Wang, Q., Liu, J., Wang, Y., Guan, J., Liu, Q., & Lv, D.** (2012). Land use effects on soil quality along a native wetland to cropland chronosequence. *European Journal of Soil Biology*, 53, 114-120.
- Weil, R.R., & Magdoff, F.** (2004). Significance of soil organic matter to soil quality and health. En R.R. Weil & F.F. Magdoff (eds.). *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture, Advances in Agroecology* (pp. 1-34). London : Taylor & Francis.
- Xu, M., Lou, Y., Sun, X., Wang, W., Baniyammuddin, M., & Zhao, K.** (2011). Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation. *Biology and Fertility of Soils*, 47, 745-752.
- Yadav, R.S, Yadav, B.L, Chhipa, B.R., Dhyani, S.K., & Munna, R.** (2011). Soil biological properties under different tree based traditional agroforestry systems in a semi-arid region of Rajasthan, India. *Agroforestry Systems*, 81, 191-201.
- Zhou, X., Chen, C., Lu, S., Rui, Y., Wu, H., & Xu, Z.** (2012). The short-term cover crops increase soil labile organic carbon in southeastern Australia. *Biology and Fertility of Soils*, 48, 239-244.