

Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia

Chemical soil quality indicators in productive systems of Colombian Piedmont Eastern Plains

Diego David Jamioy Orozco^{1*}, Juan Carlos Menjivar Flores¹, y Yolanda Rubiano Sanabria²

¹Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira, Colombia. ² Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Colombia. *Autor para correspondencia: ddjamioyo@gmail.com

Rec.: 13.07.2013 Acep.: 10.04.2014

Resumen

En sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia se evaluaron varios indicadores para determinar la calidad de los suelos de la región. Para el efecto, en un muestreo aleatorio se incluyeron once sistemas y en cada uno de ellos se tomaron cinco muestras de suelo para evaluar las propiedades principales y seleccionar aquellas con posibilidades para ser incluidas como indicadores de calidad. Los resultados de la caracterización completa fueron analizados mediante componentes principales (ACP). Por su importancia fueron priorizadas como indicadores de calidad las propiedades siguientes: carbono orgánico, pH, acidez intercambiable, calcio y magnesio intercambiable y hierro. Con estos indicadores se propone una clasificación de la calidad química de los suelos de la región, que puede ser de gran utilidad en la implementación de sistemas de monitoreo que permitan la evaluación de la degradación de los suelos a través del tiempo debidos a cambios en los sistemas de uso.

Palabras clave: Oxisol, muestreo, análisis de componentes principales, clasificación.

Abstract

This research evaluated indicators for determining the quality of soils in the productive systems of the piedmont plains; on random sampling eleven systems were included, and on each of those, five samples of soil were taken in order to evaluate all its properties; and in the selection of those which can be included as indicators, the full characterization results were analyzed by principal component analysis (PCA). Because of its importance were prioritized as quality indicators the following properties: organic carbon, pH, exchangeable acidity, exchangeable calcium and magnesium and iron. With these indicators, a classification of the chemical quality of the soils of the piedmont plains is proposed; which can be useful when implementing a monitoring system which allows assessing the degradation of these soil properties over time due to changes in its use.

Keywords: Oxisol, sampling, principal component analysis, classification.

Introducción

La degradación de los suelos es un problema causado principalmente por cambios en el uso y por la adopción de prácticas de manejo propias de cada cultivo. La evaluación de los efectos de la actividad agropecuaria en el suelo permite establecer los parámetros necesarios para estimar la magnitud del impacto ambiental ocasionado por los sistemas productivos, lo que ayuda a la toma de decisiones enfocadas en la conservación, la sostenibilidad, y la productividad del suelo. Para lograr este objetivo es necesario conocer la calidad del suelo y tener indicadores para evaluarla, en ese sentido la calidad se puede definir como la capacidad de un suelo de funcionar (Karlen *et al.*, 1997) de tal forma que presente aptitud para el uso (Larson y Pierce, 1994).

Aunque el suelo es un recurso que permite sostener el desarrollo de cultivos necesarios para la vida, sólo recientemente se ha reconocido su susceptibilidad a la degradación y consecuente disminución de la productividad de cosechas. En Colombia, específicamente en la región de los Llanos Orientales, desde hace varios años se ha venido haciendo un gran esfuerzo por parte de entidades privadas y públicas como la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), la Universidad Nacional de Colombia, el CIAT y la Universidad de los Llanos, entre otras, para desarrollar investigaciones tendientes a conocer los procesos, las condiciones y la dinámica de los suelos de esta importante región y calificar su calidad (Rubiano, 2005; Phiri *et al.*, 2001; Basamba *et al.*, 2006; Amézquita *et al.*, 2004). No obstante, es necesario generar información que permita proponer indicadores químicos de calidad, a partir de los cuales sea posible hacer estimaciones para valorar los impactos que ocasionan en los suelos los cambios en los sistemas de uso y las prácticas de manejo adoptadas.

Estos indicadores químicos de calidad son de utilidad para evaluar el grado de vulnerabilidad de los suelos y las acciones correctivas de acuerdo con el sistema productivo, además permiten establecer un mecanismo para el monitoreo y la alerta temprana, lo que ayuda a prevenir o mitigar procesos de degradación progresiva. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de estudio fue desarrollar indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas de producción del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia.

Materiales y métodos

Zona del estudio. La investigación se desarrolló en el centro de investigación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) la Libertad, ubicado aproximadamente a

4° 03' 30" latitud Norte y 73° 28' 5" longitud Oeste, a 336 m.s.n.m, en el municipio de Villavicencio – Meta, km 25 vía Villavicencio-Puerto López. El clima tropical se caracteriza por una temperatura, promedio, de 26 °C, 2700 mm de precipitación anual y una humedad relativa promedio de 85%.

El centro de investigación tiene 1342 ha conformadas por terrazas aluviales de topografía ligeramente plana, donde se han desarrollado suelos con predominio de arcillas caolinitas y cuarzo, provenientes de sedimentos del Pleistoceno reciente al Holoceno antiguo. En estos suelos predominan las pasturas naturales y son fuertemente ácidos (pH < 4.5), con una alta saturación de aluminio (> 70%) y una baja saturación de bases (< 25%), presentan baja disponibilidad de fósforo (1 ppm), calcio, magnesio y potasio, y deficiencia de elemento menores, con excepción de hierro (Rincón y Caicedo, 2010). La vegetación natural corresponde al Bosque Húmedo Tropical (IGAC, 2004) según la clasificación de Holdridge (1967), la cual en un gran porcentaje ha sido eliminada para establecer distintos sistemas agropecuarios.

Selección de sistemas productivos y sitios de muestreo. Se seleccionaron once sistemas productivos localizados en terrazas alta, media y en aluviones recientes. Para ello se utilizó el mapa de coberturas de suelos (IGAC, 1973). En cada sistema de uso se tomaron muestras en cinco puntos y en cada uno de ellos se hicieron cajas de muestreo de 40 cm (largo) x 40 cm (ancho) x 50 cm (profundidad) para un total de 55 muestras.

En la terraza alta fueron seleccionados los sistemas: palma de aceite (*Elaeis guineensis*) de 18 años de edad, piña Golden (*Ananas sativus*), sorgo dulce (*Sorghum vulgare*), maíz (*Zea mays*), soya (*Glycine max*) y naranja Valencia (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck).

En la terraza media los sistemas productivos seleccionados fueron: caucho (*Hevea brasiliensis*), pasto cultivar (cv.) Llanero (*Brachiaria distachneura*) asociado con Maní forrajero (*Arachis pintoi*), solo pasto cv. Llanero, palma de aceite (*Elaeis guineensis*) de 30 años de edad y bosque asociado de acacia (*Acacia mangium*), yopo (*Anadenanthera peregrina*) y melina (*Gmelina arborea*).

En los aluviones recientes se seleccionó el sistema pastura degradada de brachiaria (*B. decumbens*).

Variables de respuesta analizadas. Las propiedades químicas fueron analizadas en muestras de suelo llevadas al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, e incluyeron: pH_(1:1) con potenciómetro; carbono orgánico (C.O.) oxidable (Walkley y Black, 1934); fósforo (P) dis-

ponible (Bray II, 1945); calcio (Ca); potasio (K); magnesio (Mg); sodio (Na); capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) (extracción con acetato de amonio 1M, pH 7, absorción atómica); acidez intercambiable (extracción con KCl 1N); cobre (Cu); hierro (Fe); manganeso (Mn) y zinc (Zn) (extracción con DTPA, absorción atómica) y Boro (B) (extracción con fosfato monocálcico).

Procesamiento estadístico de la información.

Los datos se analizaron con los paquetes estadístico SAS y ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997) y se agruparon por componentes principales (ACP) lo que permitió reducir el número de variables originales a un conjunto mínimo de datos (CMD). Las variables fueron seleccionadas según el aporte a la conformación de los componentes (Factor 1 y Factor 2 del ACP).

Para la selección de las variables de mayor aporte, se consideró la contribución de cada una de ellas a la construcción de los dos primeros componentes del ACP, luego se dividió entre dos el mayor valor y se mantuvieron las variables con valores iguales o superiores al valor resultante; a continuación se seleccionaron aquellas que presentaron la mayor variabilidad como posibles indicadores de calidad del suelo, ya que posiblemente son las más afectadas por las variaciones en los sistemas de producción y uso de los suelos. Por último, se hace una propuesta de aproximación para la clasificación de la calidad química de los Oxisoles del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia; para ello se emplearon los datos resultantes tomando como referencia la pastura degradada de brachiaria, los rangos de variación de las propiedades químicas de los suelos en la región (Rincón *et al.*, 2010), los niveles de interpretación estándares para suelos agrícolas y la clasificación de los suelos según el nivel de fertilidad para plantas tolerantes a la acidez (Salinas y García, 1985, adaptado por Rincón *et al.*, 2010).

Resultados y discusión

Selección de indicadores químicos de calidad del suelo

Para la selección de los indicadores químicos se utilizó la contribución de cada variable a la formación de los Factores 1 y 2 del ACP (Tabla 1). En las Figuras 1 y 2 se presentan los resultados del análisis multivariado o análisis de componentes principales (ACP), donde se observa que existe separación ($P < 0.001$) de los resultados según los sitios de muestreo. Los dos primeros componentes explican el 47% de la variabilidad de los datos, distribuidos en 28% para el primer Factor y 19% para el segundo. El primer Factor separó los sitios por su contenido de Ca, Mg, P,

B, pH y acidez intercambiable (Ac.I); mientras que el segundo Factor los separa por los contenidos de Fe, Mn, C orgánico y K, principalmente (Figura 2). Siendo el pH y la acidez intercambiable variables opuestas.

Tabla 1. Contribución de cada variable química a la construcción de los Factores 1 y 2. Oxisoles del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia.

Variables	Factor 1	Factor 2	Variables	Factor 1	Factor 2
pH	1185	1651	C.I.C.	237	158
Carbono orgánico	465	1781	Fósforo	714	0
Calcio	2002	143	Cobre	30	418
Potasio	138	160	Hierro	6	2696
Magnesio	2093	50	Manganeso	3	1058
Sodio	52	150	Zinc	513	1165
Acidez intercambiable	1673	272	Boro	882	291

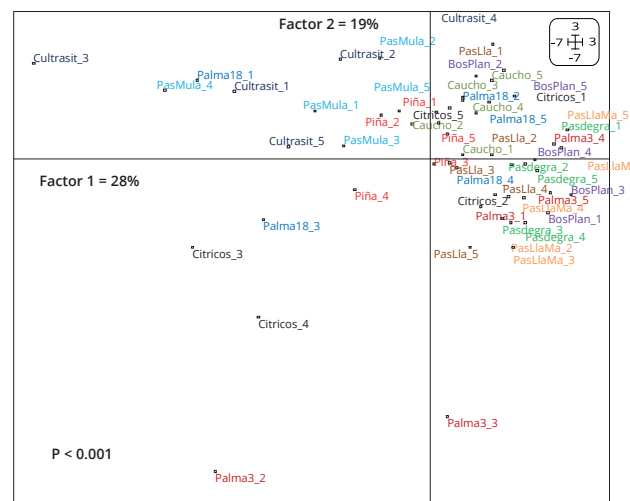


Figura 1. Distribución de los sitios evaluados en función del aporte de las variables químicas a la conformación de los Factores 1 y 2. Oxisoles del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia.

La baja explicación de la varianza ($< 50\%$) de los Factores 1 y 2 se debe a la variabilidad química de los suelos, la que está relacionada con los diferentes usos y el manejo agronómico de los cultivos, principalmente con la aplicación de enmiendas como cal dolomita para corregir acidez y aumentar la saturación de bases y de cantidades altas de P para aumentar su contenido y disponibilidad en el suelo.

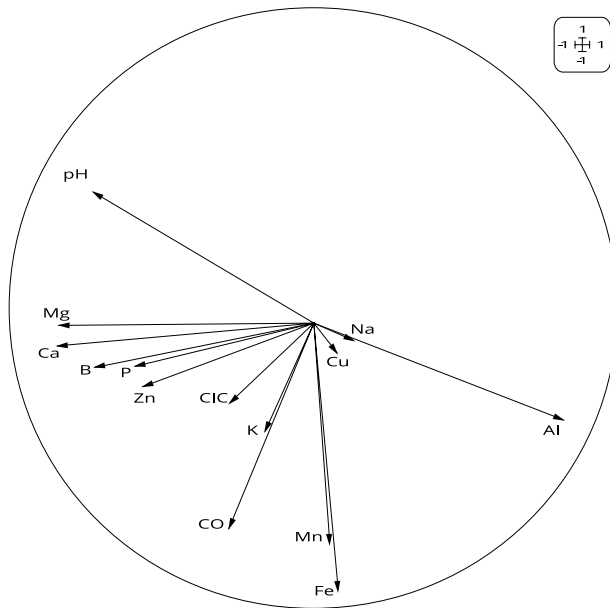


Figura 2. Correlaciones para las variables químicas en función de sus aportes a la conformación de los Factores 1 y 2. Oxisoles del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia.

El primer componente diferenció los sitios con valores más altos de pH, Ca y Mg que corresponden a cultivos de *Brachiaria* cv. Mulato II, palma-18 y cultivos transitorios vs. los sistemas con altos valores de acidez intercambiable que corresponden a *Brachiaria* cv. Llanero, bosque cultivado, pastura degradada y pasto cv. Llanero asociado con maní forrajero. En el segundo Factor se separan los sitios por los niveles de Fe, Mn, C orgánico, y K, diferenciando los de alto contenido de estos elementos —pasto cv. Llanero, pasto cv. Llanero asociado con maní forrajero, palma-30, cítricos y pastura degradada vs. los de bajo contenido —caucho, piña, pasto cv. Mulato y cultivos transitorios— (Figuras 2 y 3).

Las variables químicas dentro de un mismo sistema son muy heterogéneas (Figuras 1 y 3), variabilidad que puede ser debida al manejo, principalmente a la aplicación localizada por planta de los fertilizantes. Por otra parte, aunque las enmiendas, como la cal dolomita, se aplican en forma uniforme en el área de cultivo, las plantas sólo absorben el Ca y el Mg próximos al sistema radicular de la planta, quedando sitios donde no son extraídos por los cultivos y por tanto presentan valores más altos de estos elementos. Se debe mencionar que algunos sitios evaluados dentro de un mismo sistema se encontraban en otra serie diferente de suelo, por ejemplo, el cv. Llanero asociado con maní forrajero y el cultivo de palma-30.

La heterogeneidad de las variables entre los diferentes sistemas se debe al manejo agronómico diferencial en cada sistema y a la posición geo-

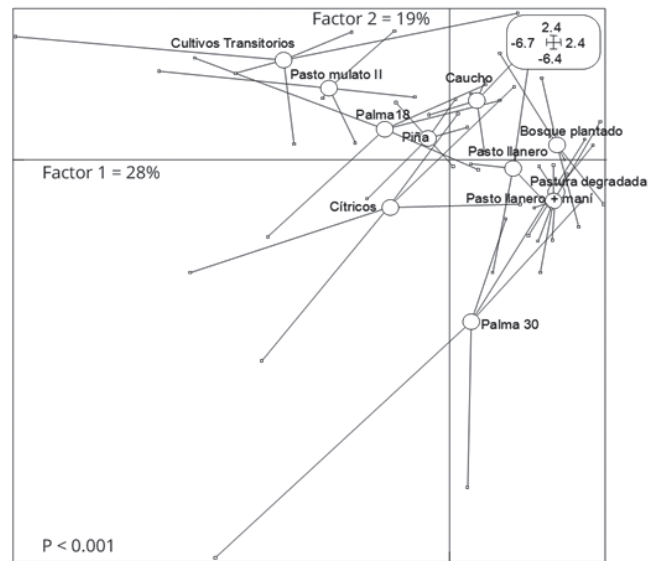


Figura 3. Agrupación de los sistemas de uso en función del aporte de las variables químicas a la conformación de los Factores 1 y 2 y de sus similitudes. Oxisoles del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia.

morfológica de los suelos en los sistemas productivos. En la Figura 3 se observa un primer grupo conformado por el pasto cv. Mulato II, los cultivos transitorios y la palma-18 caracterizado por altos valores de pH, P, Ca y Mg y menores valores de acidez intercambiable y Fe. En el segundo grupo se encuentran los cultivos de piña y caucho con valores de pH, Ca y Mg ligeramente menores que en el grupo anterior, pero con mayores niveles de acidez intercambiable y Fe y altos niveles de B y P disponible. El tercer grupo comprende los sistemas pastura degradada, solo pasto cv. Llanero y asociado con maní forrajero y palma-30 el cual presentó los mayores valores de C orgánico y acidez intercambiable, así como niveles altos de Fe y Mn. El cuarto grupo está conformado por el cultivo de cítricos caracterizado principalmente por un bajo pH, pero con un alto contenido de P disponible y Zn, además de un alto valor de C orgánico superado sólo por la pastura degradada y el cultivo de palma-30. El quinto grupo se encuentra conformado por el bosque plantado caracterizado por menores contenidos de C orgánico (Figuras 2 y 3). Las formas de agrupación de estos sistemas por su similitud en algunas propiedades químicas, se debe a su posición geomorfológica y al manejo, lo que significa que los suelos de terraza alta han sido mejorados en sus propiedades químicas mediante un sistema rotacional de cultivos transitorios, especialmente pasturas de cv. Mulato II y cultivos transitorios. Los cítricos, no obstante de encontrarse en terrazas altas, no se agruparon con otros sistemas ubicados en esta posición geomorfológica, debido a que la aplicación de cal dolomítica se hace en

franjas alternas y no en forma uniforme como se hace en pasturas y otros cultivos.

La separación significativa ($P < 0.001$) por el ACP indica que los sistemas de uso influyen en las propiedades químicas de los suelos, como lo demuestra el hecho que suelos en posiciones geomorfológicas iguales presentan altas diferencias en sus componentes químicos, lo cual es el resultado de los sistemas de manejo diferentes en cada uno de ellos.

De acuerdo con estos resultados, las variables más representativas son pH, C orgánico, Ca intercambiable, Mg intercambiable, acidez intercambiable y Fe. Estas propiedades son las que más contribuyen a la explicación de la varianza y por tanto pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo; además, las prácticas agrícolas en estos suelos conllevan al aumento de la saturación de bases (Ca y Mg) que automáticamente causan un aumento en el pH y una disminución en la acidez intercambiable y la disponibilidad de Fe. De acuerdo con lo anterior, los indicadores químicos propuestos son representativos de la dinámica edafológica de la zona y pueden ser de utilidad para determinar la calidad de estos suelos. Por otro lado, el C orgánico constituye un buen indicador de la calidad del suelo ya que es una reserva de nutrientes y su comportamiento influye sobre otras propiedades (USDA-NRCS, 2011). La M.O. es una reserva importante de nutrientes y contribuye con el mantenimiento de las propiedades físicas de los suelos, a la retención de agua y a la resistencia a procesos erosivos (Gregorich et al., 1994), principalmente cuando son sometidos a labranza.

Es importante resaltar que el Ca y el Mg son indicadores de impacto, es decir, causan efectos sobre algunas propiedades del suelo cuando se aplican y por tanto sus efectos son inherentes al manejo del suelo y dependen del aporte de cal dolomita para corregir la baja saturación de bases que caracteriza estos suelos. Por el contrario, el pH, el C orgánico, la acidez intercambiable y el Fe son indicadores que resultan afectados por el cambio en el uso y manejo del suelo; así, el pH y la acidez intercambiable son afectados positiva-

mente cuando se aplica cal dolomita, en este caso el primero aumenta y reduce la segunda y por consiguiente el nivel de toxicidad de Al para las plantas disminuye. El C orgánico y el Fe disminuyen con el uso y el manejo del suelo y por tanto son afectados negativamente. En resumen, los indicadores químicos seleccionados están dentro de los recomendados por USDA (1999), Doran y Parkin (1994) y Larson y Pierce (1994), con excepción de la acidez intercambiable debido a las diferencias en las características agroecológicas donde se realizaron los estudios.

Aproximación a la clasificación de la calidad química de Oxisoles con manejos similares a los del presente estudio

La información presentada en la Tabla 2 es una aproximación útil para evaluar la fertilidad desde el punto de la calidad química de suelos del Piedemonte, con manejos similares a los de este estudio. Esta información permite establecer niveles críticos si se cruza con los requerimientos nutritivos de los sistemas de producción. No obstante sólo es aplicable para los suelos del estudio y los valores y la clasificación no son extrapolables a otras zonas diferentes al Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia, ya que únicamente responden a las condiciones climatológicas y edafológicas de la región de estudio, inclusive, sólo se deben utilizar en sitios con características ambientales similares y en el mismo orden de suelo de la muestra (Oxisol). Además se deben tener en cuenta el tipo de cultivo y sus requerimientos nutritivos, por lo que es necesario en el futuro validarlos para cada cultivo.

Esta clasificación de la calidad química de los suelos puede ser de gran utilidad para establecer un sistema de monitoreo, ya que los futuros evaluadores solo tendrán que tomar las muestras de suelo, realizar los análisis de laboratorio respectivos y observar en la tabla la clasificación de cada dato obtenido para la variables que se están evaluando y de esta manera, determinar la calidad química del suelo.

Tabla 2. Clasificación de la calidad química del suelo. Oxisoles del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia.

Indicador	Calidad química del suelo			Medición (tiempo)	Método	Valoración
	Baja	Media	Alta			
pH	<4.5	4.5 - 5	>5	Trimestral	Agua: Suelo (p/v) 1:1	Potenciometro
CO (%)	<1.2	1.2 - 1.7	>1.7	Anual	Walkley y Black	Colorimetría
Ca (Cmol+/kg)	<0.3	0.3 - 1.5	>1.5	Semestral	Extracción con Acetato de Amonio 1 M, pH 7	Absorción atómica
Mg (Cmol+/kg)	<0.05	0.05 - 0.5	>0.5	Semestral		
Fe (ppm)	<50 y >182	50 - 100	100-182	Anual	Extracción con DTPA	
Ac.I (Cmol+/kg)	>3.5	1.5 - 3.5	<1.5	Trimestral	Extracción con KCl 1N	Volumétrica

Conclusiones

Las condiciones edafológicas en la zona de estudio, permitieron seleccionar las principales propiedades químicas para determinar la calidad de suelos en el Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia, entre ellas, pH, C orgánico, Ca intercambiable, Mg intercambiable, acidez intercambiable y Fe.

Los indicadores seleccionados, además de ser de utilidad para el monitoreo del efecto de los sistemas de uso sobre algunas propiedades químicas de los suelos, pueden ser de utilidad en el diseño de sistemas productivos y sostenibles que prevengan o mitiguen los efectos negativos (aumento de la acidez) y maximicen los efectos positivos (aporte de nutrientes) de las prácticas agrícolas empleadas en la región.

Los indicadores propuestos son adecuados para monitorear la calidad química del suelo, son fáciles de medir y sensibles a cambios en los sistemas de manejo.

Agradecimientos

Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Facultad de Ciencias Agrarias y al Centro de Investigación Corpoica la Libertad, por su apoyo financiero, científico y técnico para el desarrollo de esta investigación. A la Doctora Elena Velásquez Ibáñez y el Doctor Edgar Madero por sus valiosas asesorías y Sugerencias, y al licenciado Nelson Mejía Román, por su valiosa colaboración. Este trabajo fue financiado por el MADR, la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, el Centro de Investigación Corpoica la Libertad y la Fundación para el Desarrollo Agroindustrial de la Altillanura (FUNDALLANURA).

Referencias

Amézquita, E.; Thomas, R. J.; Rao, I. M.; Molina, D. L. y Hoyos, P. 2004. Use of deep-rooted tropical pastures to build-up an arable layer through improved soil properties of an Oxisol in the Eastern Plains (Llanos Orientales) of Colombia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 103:269 - 277.

Basamba, T. A.; Barrios, E.; Amézquita, E.; Rao, I. M., y Singh, B. R. 2006. Tillage effects on maize yield in a Colombian savanna Oxisol: soil organic matter and P fractions. *Soil Tillage Res.* 91:131 - 142.

Bray, R. H. y Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59: 39 - 45.

Doran, J. W. y Parkin, T. B. 1994. *Defining and assessing soil quality*. En: Doran, J. W., et al. (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. *Soil Sci. Soc. Am.* 35:3 - 21 (Special issue).

Gregorich, E. G.; Carter, M. R.; Angers, D. A.; Monreal, C. M.; y Ellert, B. H. 1994 Towards a minimum data

set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74:367 - 385.

Holdridge, L.R. 1967. Life zone ecology. Tropical Science Center. San José, Costa Rica. 206 p

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 1973. Reconocimiento semidetallado de suelos del C.I. La Libertad. Villavicencio, Meta. Colombia. 72 p.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2004. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Meta. Bogotá.

Karlen, D. L.; Mausbach, M. J.; Doran, J. W.; Cline, R. G.; Harris, R. F.; y Schuman, G. E. 1997. Soil Quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am.* 61:4 - 10.

Larson, W. E. y Pierce, F. J. 1994. *The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management*. En: Doran, J. W. et al. (eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment*. *Soil Sci. Soc. Am.* 35:37 - 51 (Special issue).

Phiri, S.; Amézquita, E.; Rao, I. M.; y Singh, B. R. 2001. Disc harrowing intensity and its impact on soil properties and plant growth of agropastoral systems in the llanos of Colombia. *Soil Tillage Res.* 62:31 - 143.

Rincón, C., A.; Bueno G., G. A.; Álvarez de León., M.; Pardo B., O.; Pérez L., O.; y Caicedo G., S. 2010. *Establecimiento, manejo y utilización de recursos forrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) C.I. La libertad. Villavicencio, Meta. Colombia. 252 p.

Rincón C., A. y Caicedo G., S. 2010. Monitoreo de las condiciones de los suelos establecidos con la asociación maíz/pastos para la recuperación praderas degradadas en el piedemonte llanero. En: Memorias. XV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. El suelo: soporte de la biodiversidad y la producción en los agroecosistemas tropicales. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional Eje Cafetero. (CD-ROM).

Rubiano, Y. 2005. Sistema georreferenciado de indicadores de calidad del suelo. Herramienta SIG para apoyo a la planificación, uso y manejo del suelo. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Palmira, Valle, Colombia. 111 p.

Salinas J., G. y García, R. 1985. *Métodos químicos para el análisis de suelos ácidos y plantas forrajeras*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Programa de Pastos Tropicales. Cali, Colombia. 83 p.

Thioulouse, J., Chessel, D., Doledec, S., Olivier, J.M., 1997. ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. *Statistical Computation* 7, 2-15.

USDA. 1999. *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. Disponible en: <http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/KitSpanish.pdf>

USDA-NRCS. 2011. *Soil Quality Concepts*. Available online at: <http://soils.usda.gov/sqi/concepts/concepts.html>.

Walkley, A. y Black, I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 37:29 - 38.