

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE UN SUELO SOMETIDO A DIFERENTES
USOS

ANYI BIBIANA GÓMEZ ÁVILA
WENDY YURANNY HOYOS ROJAS

UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
VILLAVICENCIO
202

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE UN SUELO SOMETIDO A DIFERENTES
USOS

ANYI BIBIANA GÓMEZ ÁVILA
WENDY YURANNY HOYOS ROJAS

Tesis de grado presentada como requisito parcial para obtener el título de
Ingeniero Agrónomo.

DIRECTOR
Ingeniero agrónomo; MSc. Sergio David Parra Gonzáles

UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
VILLAVICENCIO
2020

Nota de Aceptación

Sergio David Parra Gonzáles
Director de tesis

Luis Alfonso Guarín
Jurado

Dayra Yisel García
Jurado

Villavicencio, Meta 03 de febrero de 2020

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto a la Universidad de los Llanos por abrirnos sus puertas y permitirnos formar profesionalmente. A los docentes que a través de su experiencia nos dieron bases fundamentales para este proceso de formación.

A el ingeniero Sergio Parra por su tiempo, dedicación y colaboración en la elaboración de este proyecto de grado. Así mismo, agradecemos a los ingenieros Dayra García y Luis Guarín por ser nuestros jurados.

Finalmente, a Darío por su colaboración y disposición al momento de analizar las muestras en laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco infinitamente a Dios por darme la vida, la salud y la fortaleza para cumplir esta meta personal.

A mi madre; Sandra y su esposo Miller quienes me brindaron su apoyo y confianza en todo mi proceso de formación.

A mi padre, Jesús por acompañarme en mis primeros años y quien hoy desde el cielo ha de sentirse orgulloso de mi.

A mi compañero de vida, Antonio por siempre tener una voz de aliento y esperanza en aquellos días que se tornaron gris.

Finalmente, a mis hermanos Valeria y Stiven por motivar y alegrar mi existencia.

Wendy Hoyos

Agradezco en primer lugar a mi madre, Sandra Ávila quien me dio la vida, la oportunidad y apoyo incondicional para poder desarrollarme profesionalmente y personalmente, hasta el punto que he llegado hoy día.

A mi abuela, María Villamil quien es y ha sido un apoyo indispensable en este proceso, a Francisco segura quien es la figura paterna que me ha inculcado valores fundamentales en mi vida.

A Simón Bossio, mi pareja que me ha motivado a seguir luchando para alcanzar mis objetivos y metas.

A mis hermanas Jicela y Gabriela Gómez que me han ayudado, motivado a seguir y no desistir en el camino.

A mi sobrina Luciana y mi primo Manuel les agradezco profundamente por brindarme alegría día a día.

A mis tíos y tía, los cuales fomentaron el crecimiento personal y académico.

Anyi Bibiana Gómez

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. RESUMEN.....	8
2. ABSTRACT	9
3. INTRODUCCIÓN	10
4. OBJETIVOS	11
4.1 Objetivo general.....	11
4.2 Objetivos específicos	11
5. JUSTIFICACIÓN	12
6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
7. REVISIÓN DE LITERATURA.....	14
7.1 La calidad del suelo	14
7.2 Indicadores de calidad del suelo.....	15
7.2.1 Indicadores físicos	16
7.2.2 Indicadores químicos.....	16
7.2.3 Indicadores biológicos	17
7.3 Índice de calidad del suelo.....	20
7.4 Análisis de componentes principales	20
7.5 Set de datos y su aplicación en la ciencia del suelo.....	22
8. METODOLOGÍA.....	24
8.1 Localización.....	24
8.2 Plan de muestreo y variables a determinar	24
8.3 Análisis estadístico.....	25
8.4 Obtención de los índices de calidad.....	25
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
9.1 Índice de calidad de suelos.....	35
9.2 Prácticas de manejo recomendadas de acuerdo al ICS	40
10. CONCLUSIONES.....	42
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

12. ANEXOS.....	54
12.1 Análisis de la varianza de las variables evaluadas.....	54

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Indicadores físicos, químicos y biológicos de la calidad del suelo.	17
Tabla 2. Límites inferiores y superiores de las propiedades evaluadas.	26
Tabla 3. Variables evaluadas en los diferentes sistemas.	28
Tabla 4. Análisis de componentes principales, autovalores.	35
Tabla 5. Análisis de componentes principales, autovectores.	37
Tabla 6. Coeficientes de correlación de Pearson.	39

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización de los sistemas evaluados.	24

1. RESUMEN

El presente estudio tiene como planteamiento la evaluación de la calidad del suelo sometido a tres diferentes usos (cultivos de cacao, guanábana y cítricos) ubicados en el Granja Barcelona de La Universidad de los Llanos. Se tomaron muestras de suelo de área mediante el plan de muestreo en forma de cuadro. A las muestras de suelo se les determinó las siguientes propiedades físicas y químicas: Densidad aparente (**Da**) (método del cilindro), acidez activa (**pH**) (potenciométrico en H₂O y KCl 1:1), Fósforo disponible (**P**) (método Bray II), Materia Orgánica (**M.O.**) (método Walkley & Black) y Resistencia a la penetración (**RP**) (penetrógrafo electrónico digital), todas las metodologías se realizaron siguiendo los protocolos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, igualmente se calculó el Stock de carbono. El índice de calidad del suelo (**ICS**) fue calculado usando el análisis de componente principales (**ACP**), esto para evaluar la relación existente entre los parámetros de suelo medidos. Los resultados obtenidos sugieren que el mayor aporte a la calidad del suelo se logra mediante el manejo de las propiedades químicas buscando prácticas que aumenten el valor del pH (H₂O) siendo el aspecto químico es el que más aporta a la determinación de la calidad del suelo, el aspecto físico relacionado con la resistencia a la penetración (RP) aporta aproximadamente 20%. Así, se recomiendan prácticas de manejo con base en estas dos propiedades.

Palabras clave: Multivariado, Coberturas, Propiedades, Agricultura.

2. ABSTRACT

The present study has as an approach the evaluation of the quality of the soil subjected to three different uses (cocoa, soursop and citrus crops) located in the Barcelona Farm of the University of the Llanos. Samples of area soil were taken using the sampling plan in the form of a table. The following physical and chemical properties were determined from the soil samples: Apparent density (Da) (cylinder method), active acidity (pH) (potentiometric in H₂O and 1: 1 KCl), Available phosphorus (P) (Bray method II), Organic Matter (MO) (Walkley & Black method) and Penetration resistance (RP) (digital electronic penetrometer), all methodologies were performed following the protocols of the Agustín Codazzi Geographic Institute, the Carbon Stock was also calculated. The soil quality index (ICS) was calculated using the principal component analysis (ACP), this to assess the relationship between the soil parameters measured. The results obtained suggest that the greatest contribution to soil quality is achieved through the management of chemical properties seeking practices that increase the value of pH (H₂O) being the chemical aspect that contributes most to the determination of soil quality, the physical aspect related to penetration resistance (RP) contributes approximately 20%. Thus, management practices based on these two properties are recommended.

Keywords: Multivariate, Coverages, Properties, Agriculture.

3. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la calidad del suelo puede utilizarse, como una herramienta que ayuda a optimizar la producción de alimentos, manteniendo la calidad ambiental del suelo y, como una medida de la sostenibilidad del suelo para generaciones futuras sometido a diferentes sistemas de manejo (Doran & Parkin, 1994).

Las propiedades del suelo que se utilizan para evaluar su calidad se denominan “indicadores de la calidad del suelo”: una propiedad medible que influye en la capacidad de un suelo para realizar una función. Ellos deben dar información útil para conocer el funcionamiento del suelo, ser accesibles para los usuarios y aplicables a las condiciones de manejo y clima en campo y ser económico de medir. Los indicadores son seleccionados de un conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y forman el “conjunto mínimo de datos” (MDS) (Anaya & Jaramillo 2017).

El suelo un cuerpo natural para la producción de alimentos y materias primas de los cuales depende la sociedad mundial (Burbano, 2016). A su vez, el suelo constituye uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta, ya que es la base fundamental para la explotación agropecuaria. La producción de alimentos depende en un alto porcentaje del uso que se les dé a los suelos (Martín y Adad, 2006). Por ello, es importante fomentar un manejo sostenible de los suelos beneficiando su salud y su fertilidad, lo que permitirá obtener las producciones que la humanidad demanda y así, contribuir a la reducción de la pobreza, al crecimiento económico y a la protección del medioambiente.

Gran parte del área de La Granja Barcelona de la Universidad de los Llanos está destinada al uso agrícola, consecuentemente se realizan diferentes prácticas agronómicas en cada uno de los sistemas implementados. En este mismo orden, las propiedades dinámicas del suelo cambian frecuentemente. Por lo anterior, se propone evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas para construir un índice de calidad del suelo y recomendar prácticas de manejo que ayuden a mejorar las propiedades de cada sistema evaluado, por lo tanto, el objetivo este estudio fue obtener un índice de calidad del suelo (ICS) usando técnicas multivariadas.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Obtener un índice de calidad del suelo (ICS) usando técnicas multivariadas.

4.2 Objetivos específicos

- Relacionar las propiedades más importantes con el servicio ecosistémico producción de fibra y alimentos.
- Construir recomendaciones de manejo de suelo en función del índice calculado.
- Relacionar el efecto de los sistemas productivos en la calidad del suelo.

5. JUSTIFICACIÓN

El suelo es un recurso finito, lo que implica que su pérdida y degradación no son reversibles en el curso de una vida humana. En cuanto componente fundamental de los recursos de tierras, del desarrollo agrícola y la sostenibilidad ecológica, es la base para la producción de alimentos, piensos, combustibles y fibras y para muchos servicios ecosistémicos esenciales (FAO, 2015). Sin embargo, pese a que es un recurso natural muy valioso, a menudo no se le presta la debida atención. La superficie natural de suelos productivos es limitada y se encuentra sometida a una creciente presión debido a la intensificación y el uso competitivo que caracteriza el aprovechamiento de los suelos con fines agrícolas, forestales, pastorales y de urbanización, para satisfacer la demanda de producción de alimentos, energía y extracción de materias primas de la creciente población (Herrera, 2017). Los suelos deben ser reconocidos y valorados por sus capacidades productivas y por su contribución a la seguridad alimentaria y al mantenimiento de servicios ecosistémicos fundamentales (FAO, 2015), por eso entender su comportamiento en los sistemas productivos permite tener experiencias exitosas que pueden ser utilizadas en diferentes lugares con condiciones similares, y de esta forma incidir positivamente su conservación, dicho entendimiento puede ser logrado mediante herramientas como los índices de calidad.

El análisis multivariado es una herramienta que permite analizar varios factores al mismo tiempo, como aquellos que inciden en la capacidad del suelo para prestar servicios ecosistémicos (Portillo, 2015), esta permite la agrupación de datos en pocos intervalos significativos, a través de diferentes técnicas matemáticas, que facilitan la identificación de correlaciones de las diferentes profundidades o entre puntos muestreados en el espacio, eliminando, así, la redundancia resultante del análisis de los datos por separado (Fauzi, 2011), permitiendo incluir conjuntamente un alto número de variables en un solo análisis, estos métodos multivariados son aplicados para clasificar, modelar y evaluar resultados de estudios ambientales y de producción agrícola (Portillo, 2015).

Por lo anteriormente expresado, este estudio busca evaluar la calidad del suelo en diferentes sistemas productivos, usando set de datos amplios y técnicas de análisis multivariado.

6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Es posible generar estrategias de manejo con el objetivo mejorar la capacidad productiva del suelo y cumplir sus funciones ecosistémicas, mediante el cálculo de índices de calidad obtenidos con técnicas de estadística multivariada?

Los suelos de la granja de la Universidad de los Llanos se han labrado a través del tiempo con el fin de implementar diferentes sistemas productivos (perennes, anuales o semestrales), debido al manejo de cada sistema se han generado cambios en las propiedades dinámicas del suelo que pueden llevar a la pérdida de productividad, incrementando así el proceso de degradación.

Los cambios de uso, las malas prácticas de manejo, la deforestación y la erosión pueden hacer que los suelos pierdan la capacidad de cumplir con sus funciones en los ecosistemas y agroecosistemas, afectando negativamente el sostenimiento de la vida en nuestro planeta.

Por otra parte, el mantenimiento de la funcionalidad del suelo puede ser alcanzado mediante las prácticas de manejo, y estas pueden ser guiadas mediante la integración de propiedades físicas, químicas y biológicas en índices, usando el marco axiológico de la calidad del suelo.

Este trabajo de investigación se plantea como la oportunidad de estudiar, evaluar y entender los efectos que tiene diferentes sistemas de manejo en la calidad un mismo tipo de suelo.

7. REVISIÓN DE LITERATURA

7.1 La calidad del suelo

La calidad debe entenderse como la utilidad del suelo para un fin específico y durante un tiempo continuado y duradero. Un suelo puede considerarse de buena calidad para una función y no tan buena e incluso baja para otra. Además, se han propuesto numerosas propiedades indicadores de la calidad. La evaluación de la calidad se presenta como la herramienta ideal para identificar el grado de funcionalidad del suelo en un momento dado, así como las medidas necesarias para su mejor funcionamiento, ya que proporciona información sobre las características físicas, químicas y biológicas.

La calidad del suelo permite una evaluación de cuán bien realiza todas sus funciones ahora, (lo que equivaldría a capacidad de uso más salud), además de como las preserva para el futuro. La calidad del suelo no sólo está relacionada con su productividad efectiva, sino también con la salud de otros recursos como al agua, aire, plantas y animales. Por ello, no se mide directamente, sino a través de indicadores cuantitativos o cualitativos.

La evaluación de la calidad se puede realizar siguiendo principalmente dos metodologías:

1. A lo largo del tiempo: consiste en realizar mediciones periódicas en un mismo suelo y comparar los valores y observar los cambios producidos en él.
2. Tomando un suelo de referencia ideal y compararlo con nuestras mediciones.

Las evaluaciones de la calidad del suelo deben tener en cuenta propiedades y procesos biológicos, químicos y físicos, de tal modo que la interpretación y las mediciones deben evaluarse con respecto a tendencias a largo plazo o a señales de sostenibilidad, que se traducirán en una degradación, mantenimiento o aumento de su calidad. La evaluación va a ofrecer información sobre el estado funcional que presenta el suelo en ese determinado momento y mediante ella va a ser posible identificar áreas de especial interés, áreas problemáticas, o comparar suelos sometidos a manejos diferentes (Jiménez & González, 2006).

Para medir la calidad del suelo se utiliza un Índice de Calidad del Suelo (I.C.S), el cual aplica técnicas de análisis multivariado que sirven para sintetizar cosas. Se tiene en cuenta que un índice es aquello que indica algo; bien sea si un suelo es bueno, malo o regular para cumplir una función. De igual manera, el I.C.S permite

saber debilidades o fortalezas para luego aplicar al dicho suelo las prácticas de manejo recomendadas (Jiménez & González, 2006)

7.2 Indicadores de calidad del suelo

Los indicadores de calidad del suelo son atributos medibles que influyen en la capacidad de éste para llevar a cabo sus funciones ambientales y la producción de cultivos. El uso de los suelos y las prácticas de manejo marcan principalmente el grado y la dirección de los cambios en su calidad en tiempo y espacio. Los aspectos más sensibles a la gestión son considerados los más deseables como indicadores, aunque no se ha de perder de vista el hecho de que muchos indicadores están estrechamente relacionados entre sí (Pulido, 2014).

Un indicador es una variable que simplifica información relevante haciendo que una condición de interés se haga perceptible; cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información relevante. Deben ser preferiblemente variables cuantitativas, aunque pueden ser cualitativas, nominales, de rango u ordinales, especialmente cuando no hay disponibilidad de información cuantitativa, el atributo no es cuantificable o cuando los costos para cuantificar son demasiado elevados. Las principales funciones son: evaluar condiciones o tendencias, comparar transversalmente sitios o situaciones, para evaluar metas y objetivos, proveer información preventiva temprana y anticipar condiciones y tendencias futuras (Vallejo, 2013).

Los indicadores deben ser limitados en número, manejables por diversos tipos de usuarios, sencillos, fáciles de medir y tener un alto grado de agregación, es decir, deben ser propiedades que resuman otras cualidades o propiedades; interdisciplinarios; en lo posible deberán contemplar la mayor diversidad de situaciones; por lo tanto, incluir todo tipo de propiedades de los suelos (químicas, físicas, biológicas), tener una variación en el tiempo tal que sea posible realizar un seguimiento de las mismas; asimismo, no deberán poseer una sensibilidad alta a los cambios climáticos y/o ambientales pero la suficiente como para detectar los cambios producidos por el uso y manejo de los recursos (Prieto, 2013) .

La importancia de establecer la línea de base o de inicio de una actividad que puede impactar positiva o negativamente sobre el ambiente, umbrales para controlar o hacer el seguimiento de impactos negativos que no deben exceder un predeterminado umbral y además objetivos o metas que permitan evaluar si el impacto positivo de una respuesta es suficientemente largo (Cabrera, 2014).

Para que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sean consideradas indicadores de calidad deben cubrir las siguientes condiciones:

a) Describir los procesos del ecosistema; b) integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; c) reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieren medir; d) ser o no sensitivas a variaciones de clima y manejo; e) ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo; f) ser reproducibles; g) ser fáciles de entender; h) ser sensitivas a los cambios en el suelo que ocurren como resultado de la degradación antropogénica; i) cuando sea posible, ser componentes de una base de datos del suelo ya existente (Bautista et al., 2004).

7.2.1 Indicadores físicos

Las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros. La estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hidráulica saturada son las características físicas del suelo que se han propuesto como indicadores de su calidad (Gustin et al., 2014).

7.2.2 Indicadores químicos

Los indicadores químicos propuestos se refieren a condiciones de este tipo que afectan las relaciones suelo planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos, algunos indicadores son la disponibilidad de nutrientes, carbono orgánico total, carbono orgánico lábil, pH, conductividad eléctrica, capacidad de adsorción de fosfatos, capacidad de intercambio de cationes, cambios en la materia orgánica, nitrógeno total y nitrógeno mineralizable (Bautista et al., 2004).

7.2.3 Indicadores biológicos

Los indicadores biológicos integran una gran cantidad de factores que afectan la calidad del suelo, como la abundancia y los subproductos de los macroinvertebrados. Estos rompen, transportan y mezclan el suelo al construir galerías, nidos, sitios de alimentación, turrículos o compartimientos; afectan los procesos de manera directa incorporación y redistribución de varios materiales o indirecta formación de comunidades microbiales, transporte de propágulos, antibiosis o reducción selectiva de la viabilidad; incluyen funciones como la tasa de respiración, el ergosterol y otros subproductos de los hongos, las tasas de descomposición de los residuos vegetales, y el N y el C de la biomasa microbiana (García et al., 2012) .

De acuerdo con estas ideas, no habría un enfoque único para generar un conjunto de indicadores para cada propósito. Los enfoques pueden cambiar con el tiempo conforme se incrementa el entendimiento de los problemas ambientales (Butista et., al, 2004). Se han desarrollado listas de indicadores de uso universal pensando en todas las situaciones y suelos posibles (Prieto et al., 2013).

Algunos estudios consideran indicadores de la calidad del suelo cualquiera de las propiedades físicas, químicas y biológicas; otros establecen la necesidad de aunar todas las propiedades para conocer el estado global del suelo (García Y. et al., 2012). La tabla 1 muestra una serie de indicadores para una caracterización inicial de calidad del suelo.

Tabla 1. Indicadores físicos, químicos y biológicos de la calidad del suelo.

Propiedad	Función	Referencia
Físicas Textura del suelo	Retención y transporte de agua y compuestos químicos; erosión del suelo a partir de su influencia en el tipo de estructura, la cantidad y tamaño de poros.	(García Y. et al., 2012)
Profundidad del suelo, y abundancia de raíces.	Estima la productividad potencial y la erodabilidad.	(Bautista A. et al., 2004)
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lixiviación, productividad, erodabilidad, filtrado de agua.	(Navarrete et al., 2011)
Capacidad de retención de agua	Transporte de solutos y contaminantes, y erosividad; humedad aprovechable, almacenamiento de carbono orgánico.	(Bautista A. et al., 2004)
Estabilidad de agregados	Reflejan la manera en que el suelo almacena y transmite agua a las plantas, así como sus limitaciones para la emergencia de las plántulas y el	(García Y. et al., 2012)

	crecimiento de las raíces.	
Porosidad y compactación	Retención, transporte de agua, nutrientes y erodabilidad del suelo.	(Navarrete <i>et al.</i> , 2011)
Cohesión y fricción.	Límite de resistencia para resistir el corte. Se utiliza en el modelado de labranza y diseño.	(Topp <i>et al.</i> , 1997)
Límite plástico	Compactación y capacidad de trabajo. Límites, medida empírica ampliamente utilizada.	(Topp <i>et al.</i> , 1997)
Químicos Materia orgánica (C y N orgánico)	Fuente de nutrientes para las plantas; retiene cationes en el sistema suelo de nutrientes base (Ca, Mg, K) y cationes intercambiables (amonio). Eliminación de pesticidas de la solución del suelo, almacenamiento de carbono orgánico del suelo.	(Heil D. & Sposito G., 1997)
pH	Define la actividad química y biológica, límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana.	(Navarrete <i>et al.</i> , 2011)
N, P y K extraíble	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida potencial de N; productividad e indicadores de la calidad ambiental. g cm ³ ; niveles suficientes para el desarrollo de los cultivos.	(Bautista A. <i>et al.</i> , 2004)
Capacidad de intercambio catiónico	Almacenamiento de nutrimentos para las plantas, retención de contaminantes y amortiguación de pH. Se mide como el número total de equivalentes de cationes desplazados por unidad de masa de suelo por una solución de extracción que contiene una alta concentración (generalmente 1,0 M) de un catión de extracción.	(Greer K. & Schoenau J, 1997)
Metales pesados disponibles	Niveles de toxicidad para el crecimiento de la planta y la calidad del cultivo. El mencionado efecto sobre la calidad se va a poner de manifiesto fundamentalmente sobre los microorganismos existentes y sobre la actividad de los mismos.	(García <i>et al.</i> , 2003)
Biológicos Biomasa microbiana (C y N)	Potencial microbiano catalítico y depósito para el C y N, cambios tempranos de los efectos del manejo sobre la materia orgánica. Se mide en g de N o C cm ³ relativo al C y N total o CO ₂ producidos. El contenido en Carbono de Biomasa Microbiana refleja el tamaño de la población microbiana total del suelo.	(Mora, 2006)
N potencial mineralizable	Productividad del suelo y suministro potencial de N. Se mide en g de N g cm ³ d ⁻¹ relativo al contenido de C y N total.	(Jiménez & González, 2006)

Respiración edáfica, contenido de agua, temperatura del suelo	Mide la actividad microbiana; estima la actividad de la biomasa. Se mide en g de C cm ³ d ⁻¹ relativo a la actividad de la biomasa microbiana; pérdida de C contra entrada al reservorio total de C.	(García Y. <i>et al.</i> , 2012)
Cantidad de lombrices	Las lombrices de tierra en particular pueden ser útiles como indicadores ya que poseen una movilidad moderada, ciclos de vida relativamente largos. Los patrones de microdistribución de lombrices constituyen un testimonio de las condiciones del suelo y se ha demostrado la asociación de estos organismos con la vegetación implantada.	(Momo F., Falco L & Craig L., 2003)
Rendimiento del cultivo	Producción potencial del cultivo, disponibilidad de nutrientes.	(García Y. <i>et al.</i> , 2012)
Plantas indicadoras	Integran aspectos físicos, químicos y biológicos para dar una calificación a la fertilidad del suelo. Las arvenses, pueden ser muy buenas indicadoras por ser pioneras, éstas pueden proliferar en diferentes grados de fertilidad y a medida que las condiciones del suelo cambian, ya sean estos cambios positivos o negativos, la presencia de éstas también cambia.	(Zaconeta, 2000)
Fracción ligera de materia orgánica	Una fracción de materia orgánica lábil que responde al manejo del suelo, y generalmente se reduce rápidamente en condiciones de bajos insumos de C al suelo.	(Gregorich <i>et al.</i> , 1997)
Enzimas	Proporcionan una medida sensible de los cambios en microbios y actividad bioquímica en un suelo.	(Gregorich <i>et al.</i> , 1997)
Indicadores de relieve Pendiente	Condiciones permisivas para la presencia de la erosión.	(Navarrete <i>et al.</i> , 2011)
Orientación del terreno	Diferencias en parámetros estructurales (biomasa, distribución de frecuencias), y comportamiento hídrico del suelo.	(Gustin <i>et al.</i> , 2014)
Altitud	Patrones de distribución de especies vegetales, velocidad en el ciclaje de nutrientes y acumulación de materia orgánica en el suelo.	(Navarrete <i>et al.</i> , 2011)
Unidad geomorfológica (posición en el relieve)	Forma del flujo del agua a lo largo de la ladera (zonas donadoras-zonas receptoras).	(Navarrete <i>et al.</i> , 2011)

Fuente: elaboración propia.

7.3 Índice de calidad del suelo

El índice de calidad del suelo (ICS) se obtiene a partir de un set mínimo de datos, el cual debe basarse en la función del suelo que se va a evaluar. El set mínimo de datos debe ser modificado ya que los valores de las variables allí plasmadas tienen diferentes unidades. Existen diferentes métodos para realizar dichas modificaciones, entre ellos métodos matemáticos como la transformación de logaritmos en base diez. Existen otros métodos más refinados donde el conocimiento del suelo se vuelve importante, en los que el usuario del método debe conocer valores límites de cada una de las propiedades evaluadas, y de esta forma usar métodos de estandarización como ecuaciones lineales del tipo cuanto más mejor y, cuanto menos mejor.

Cualquier índice de calidad de suelo debe considerar la función del mismo suelo, pero estas funciones pueden ser variadas y a menudo complejas. Un suelo que es considerado de alta calidad para una función puede no ser igual para otras. Como consecuencia hay potencialmente muchas propiedades del suelo que pueden servir como indicadores de la calidad del suelo (Jiménez & González, 2006).

7.4 Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) es una técnica multivariada que utiliza combinaciones lineales para reducir la dimensionalidad de los datos, transformando las variables originales en un conjunto de variables no correlacionadas entre sí, que se denominan componentes principales, según (Pérez C., 2004) estas últimas se caracterizan por no estar correlacionadas entre sí y, además, pueden ordenarse de acuerdo con la información que llevan incorporada, es decir, cuanto mayor sea su varianza mayor es la cantidad de información que lleva incorporada dicha componente. Por esta razón se selecciona como primera componente aquella que tenga mayor varianza, mientras que la última componente es la de menor varianza. Su posterior interpretación permitirá un análisis más simple del problema estudiado; siendo este el método factorial más popular (Cortez *et al.*, 2013).

A su vez, el ACP permite describir, de un modo sintético, la estructura y las interrelaciones de las variables originales entre elementos del problema estudiado a partir de las componentes obtenidas que, naturalmente, habrá que interpretar y nombrar. En el análisis en componentes principales las variables tienen que ser cuantitativas y las componentes deben de ser suficientes para resumir la mayor parte de la información contenida en las variables originales. El nuevo conjunto de variables que se obtienen por el método de componentes principales, es igual en número al de variables originales. Es importante destacar que la suma de sus varianzas es igual a la suma de las varianzas de las variables originales (Cortez *et*

al., 2013).

Los métodos asociativos, tienen como objetivo principal describir las relaciones que hay entre las variables en un set de datos, hallan asociaciones o patrones ocultos bases de datos de gran tamaño. El ACP y el análisis de correspondencia múltiple (MCA) se consideran los dos métodos factoriales más populares, y pueden ser usados en minería de datos ya que son métodos asociativos.

Para su uso se necesita que la información esté en forma de una matriz de datos con objetos (variables), donde cada variable es una columna y cada medida de esa variable sea una fila. Al tener una matriz es posible correr algoritmos en diferentes programas, y con los resultados es posible obtener un set de reglas de asociación que tienen un grado de certeza especificado por el usuario (Gibert *et al.*, 2018).

En el ACP las variables son de tipo numérico (Cuantitativos), la técnica es robusta a la presencia de valores atípicos, sin embargo, los valores faltantes deben ser tratados antes de construir los modelos, ya que no se puede trabajar con matrices con datos incompletos, es importante destacar que la interpretabilidad de los resultados depende del conocimiento previo que tenga el usuario de las variables o los fenómenos que se están evaluando (Gibert *et al.*, 2018).

Debido a que los factores que resultan de un análisis factorial son variables ficticias, los factores resultantes deben ser cuidadosamente interpretados en la base de las variables originales. Algunas veces, la interpretación puede ser difícil. Sin embargo, la inspección visual de los planos factoriales es muy intuitivo y permite identificar la asociación de las variables de una forma muy sencilla. A su vez, el ACP permite ver relaciones ocultas en la base de datos que no se puede percibir a simple vista (Gibert *et al.*, 2018).

El ACP es una técnica multivariada que puede ser aplicada a un variado número de problemas en las ciencias, siendo de gran utilidad a tareas de diagnóstico o predicción. Este método ha sido aplicado en la caracterización de sistemas de producción agrícola, en abordajes de comunidades indígenas agrícolas, tecnología de alimentos y desarrollo de productos y en agronomía, en el uso de información climática, evaluación de suelos productivos, determinación de áreas homogéneas de precipitación, en la distribución espacial de la lluvia y en sistemas de producción agropecuaria (Olivares, 2014).

Las reglas de asociación han sido ampliamente utilizadas para encontrar relaciones en dominios ambientales, extraer relaciones entre estos factores y la distribución de los peces o zonas de pesca; en geociencia y teledetección las reglas de asociación han sido usadas para el análisis de datos geográficos, análisis del paisaje, encontrar las relaciones entre los parámetros biofísicos y sociales, temperatura de la superficie del suelo urbano o la adaptación al cambio climático, procesamiento de imágenes para el análisis del medio ambiente urbano, clasificación de las aguas costeras, análisis de sedimentos del lago, gestión de

recursos de agua, el desarrollo de biopelículas en sistemas de suministro de agua y detección de nubes con fines meteorológicos (Gibert *et al.*, 2018).

Las redes bayesianas se han utilizado para detectar la anomalía de gas y los riesgos de CO₂ en el almacenamiento en el suelo en minas de carbón. La calidad del suelo se analiza mediante la combinación de ACP con el clúster y PLS. Además, las aplicaciones ecológicas incluyen estudios que apuntan a una mejor comprensión de vegetación, nutrientes y bacterias e identificar los niveles de seguridad en una planta de combustible (Gibert *et al.*, 2018).

7.5 Set de datos y su aplicación en la ciencia del suelo

La calidad del suelo no puede ser medida directamente, pero puede ser inferida desde cambios en sus atributos o atributos del ecosistema, llamados indicadores. Estos deben ser de fácil observación o registro, sencillos de comprender y sus mediciones deben ser reproducibles, cuando se evalúa la funcionalidad del suelo trabajamos con un set de datos mínimo o conjunto de datos mínimos (CDM). Este CDM sirve para evaluar la calidad del suelo y puede variar para distintos lugares, dependiendo del tipo de suelo, el uso, sus funciones y factores formadores del mismo (IICA, 2007). Se proponen dos metodologías para medir y evaluar los cambios en la calidad del suelo: 1) monitoreo de tendencias y 2) la determinación de los valores de referencia.

Cabe resaltar que, para obtener un índice de calidad, el primer paso es la consecución de un set mínimo de datos (MDS). Para ello se reduce el número de variables analizadas, bien por procesos estadísticos multivariantes como, por ejemplo, un análisis de componentes principales (ACP) o en base a opiniones de expertos, según Pulido (2014) los expertos concluyen que ambos métodos son válidos. La metodología de selección estadística de un MDS ha sido utilizada posteriormente, centrados en áreas de pastoreo de Irán y Argentina, respectivamente.

El uso de set de datos se evidencia en el estudio realizado por Jamioy *et al.*, (2014), donde reporta que los datos se analizaron con los paquetes estadísticos SAS y ADE-4 y se agruparon por componentes principales (ACP) lo que permitió reducir el número de variables originales a un conjunto mínimo de datos (CDM). Así mismo, las variables fueron seleccionadas según el aporte a la conformación de los componentes (Factor 1 y Factor 2 del ACP).

Se evidencia el uso de set de datos en el estudio realizado por Cantú *et al.*, (2004) sobre la “Evaluación de la calidad ambiental y calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices”, donde los resultados muestran claramente cómo a partir de dos sets de indicadores diferentes se alcanzan resultados comparables en la

evaluación de la Calidad Ambiental y la Calidad del Suelo. La importancia de la metodología utilizada en dicho trabajo radica en la posibilidad de brindar documentación fácil de obtener (pueden utilizarse bancos de datos) de lectura fácil (Jamioy *et al.*, 2014).

8. METODOLOGÍA

8.1 Localización

El set de datos se obtuvo a partir de la recolección de muestras en los sistemas de Guanábana, Cítricos y Cacao, de la Universidad de los Llanos, coordenadas 4° 4'16.20"N 73°34'49.04"O.



Figura 1. Localización de los sistemas evaluados.

8.2 Plan de muestreo y variables a determinar

En cada área se realizó el plan de muestreo en forma de cuadro, cuya distancia varió dependiendo del tamaño del lote, siempre con la finalidad de tomar en cada área 24 muestras disturbadas y no disturbadas. A las muestras de suelo se les determinó las siguientes propiedades físicas y químicas: Densidad aparente (**Da**) (método del cilindro), acidez activa (**pH**) (potenciométrico en H₂O y KCl 1:1), Fósforo disponible (**P**) (método Bray II), Materia Orgánica (**M.O.**) (método Walkley & Black) y Resistencia a la penetración (**RP**) (penetrógrafo electrónico digital) todas las metodologías se realizaron siguiendo los protocolos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC 2006), igualmente se calculó el Stock de carbono de acuerdo a la fórmula (1) (Rosenzweig & Hillel, 2000)

$$\text{COS} = \rho * C * d \quad (1)$$

Donde.

COS: masa de carbono orgánico en una masa de suelo de 1 cm de profundidad (Ton/ha)

ρ : promedio de densidad aparente a una profundidad específica (g/m^3)

C: concentración de carbono en el suelo (g C/kg suelo)

d: profundidad de la capa de suelo en m.

Con los datos obtenidos se construyó una base de datos, que fue usada en el análisis estadístico y en la obtención de los índices de calidad.

8.3 Análisis estadístico

Una prueba de box-plot, análisis de varianza y comparación de medias usando la prueba de Tukey fue realizada a cada una de las variables determinadas, con la finalidad de evaluar los sistemas de manejo muestreados, esto usando el paquete estadístico Infostat (Di Renzo et al., 2014).

8.4 Obtención de los índices de calidad

Cada una de las variables del set de datos fue estandarizada, mediante ecuaciones lineales, esto usando dos normas que son: cuanto más es mejor (ecuación 2) y cuanto menos mejor (ecuación 3), los límites máximo y mínimo usados en este proceso se encuentran consignados en la tabla 2.

$$Z = \frac{x - Li}{Ls - Li} \quad (2)$$

Donde:

Z= Valor estandarizado

X= Propiedad física, química o biológica a estandarizar

Li= Valor mínimo de la propiedad

Ls= Valor máximo de la propiedad

$$W = 1 - \frac{x - Li}{Ls - Li} \quad (3)$$

Donde:

W= valor estandarizado

X= Propiedad física, química o biológica a estandarizar

Li= Valor mínimo de la propiedad

Ls= Valor máximo de la propiedad

Como límite superior y límite se usarán los valores consignados en la tabla 2.

Tabla 2. Límites inferiores y superiores de las propiedades evaluadas.

Estandarización	Límite inferior	Límite superior	Regla	Referencia
Da	1	>1,3 (Arcilloso / Franco-arcilloso) >1,4 (Franco / Franco-arcilloso) >1,6 (franco-arenoso)	Cuanto menos es mejor	(Nivia, 2014) (Warner <i>et al.</i> , 1998)
RP	0,9	3	Cuanto menos es mejor	(Nivia, 2014)
AI	1,6	3	Cuanto menos es mejor	(Rivera, Leonardo, Herrera, & Romero, 2015)
M.O	1,3	4	Cuanto más es mejor	(Fassbender, 1987)
P	1,5	40	Cuanto más es mejor	(Moreno, 2018)
pH (H₂O)	3,0	6,5	Cuanto más es mejor	(Ferreira <i>et al.</i> , 2007)
pH (KCl)	3,7	4	Cuanto más es mejor	(Alconada, sf)
Δ pH	0,3	-0,7	Cuanto más negativo es mejor	(Ferreira <i>et al.</i> , 2007)

Los valores obtenidos en la estandarización se encontrarán entre 0 y 1, traduciéndose como: 0 baja calidad y 1 buena calidad.

Después de la estandarización se construyó nuevamente la matriz de datos y se usó la técnica multivariada análisis de componentes principales para obtener los autovalores y autovectores (Gibert *et al.*, 2018).

La selección de las componentes principales para la obtención del índice de calidad se realizó teniendo en cuenta que los autovalores acumulen el 70% de la variación del set de datos original. En cada componente principal se seleccionaron las propiedades que tuvieron un valor igual o superior al 90% del mayor autovector, cuando más de una propiedad fue seleccionada dentro de una componente principal se realizó la correlación de Pearson con la finalidad de eliminar información redundante (Parra y Rodríguez, 2017). Después de la selección de las propiedades fue determinado el índice de calidad utilizando la ecuación 4:

$$IDC = \frac{\sum Wi * S}{Wi} \quad (4)$$

Donde:

Wi = peso de la variable

S=propiedad del suelo seleccionada

El peso de cada variable (*Wi*) se calculó dividiendo la proporción de cada una de las componentes seleccionadas en la proporción acumulada de todas las componentes principales usadas en la obtención del índice de calidad (Parra y Rodríguez, 2017). Finalmente, el índice de calidad del suelo se determinó para cada sistema y con los resultados se realizó un análisis de varianza y una prueba de medias utilizando el estadígrafo de Tukey.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La acidez activa de los suelos (**pH**) presentó diferencias significativas entre los sistemas de manejo evaluados (tabla 3), siendo calificada como media en el sistema de cultivo guanábana, y muy elevada en el los sistemas de cultivo cítricos y cacao (Gomes de Sousa et al., 2007).

El pH en el suelo se clasifica en una escala, suelos con pH menores a 7.0 son ácidos, mientras que los valores arriba de 7.0 son básicos o alcalinos. Un pH de 5.2 es 10 veces más ácido en escala que un suelo con pH de 6.2. (Garbanzo *et al.*, 2016), esto permite inferir que los sistemas productivos Ci y Ca son por lo menos 10 veces más ácidos que el sistema G.

Tabla 3. Variables evaluadas en los diferentes sistemas.

LOTE	VARIABLES									
	pH H ₂ O	pH KCl	Da	M.O	P	RP	Pt	Δ pH	SCO	ICS
G	5,62 B	4,48 C	1,61 B	8,35 B	53,60 B	1,83 B	38,08 A	-1,14 A	138,0 4 C	0,71 B
Ca	3,94 A	3,53 A	1,31 A	3,44 A	46,68 A B	1,29 A	49,74 B	-0,42 B	51,76 B	0,37 A
Ci	4,05 A	3,95 B	1,26 A	1,74 A	12,36 A	1,91 B	51,46 B	-0,10 C	25,27 A	0,34 A

Nota: pH H₂O (adimensional), pH en KCl (adimensional), Δ pH (adimensional), Da (gr/cm³), M.O (%), P (%), RP (megapascuales), pt (%) y SCO (ton/ha), ICS índice de calidad del suelo (adimensional). Letras diferentes en las columnas difieren significativamente por la prueba de Tukey a 0.05%.

Generalmente, el pH óptimo de los suelos agrícolas debe variar entre 6.5 y 7.0 para obtener los mejores rendimientos y la mayor productividad (Ibarra *et al.*, 2009). Del mismo modo, existen varios procesos en el suelo que promueven la reducción del pH. Todos estos procesos ocurren naturalmente dependiendo del tipo de suelo, del tipo de cultivo y de las condiciones de manejo.

Afirma Estrada *et al.*, (2009) que el pH del suelo normalmente cambia debido a la remoción de nutrientes por los cultivos, sobre todo los de alto rendimiento pueden ocasionar acidificación al suelo mediante la absorción de cationes básicos (Ca, Mg y K). La planta, al absorber cationes libera hidrógeno para mantener el equilibrio en

su interior, el cual genera acidez. La elevada precipitación ocasiona la lixiviación o lavado de cationes intercambiables; la descomposición de la materia orgánica que realizar dicho proceso se libera fácilmente dióxido de carbono que a su vez se transforma en bicarbonato liberando hidrógeno que acidifica el suelo; el uso de fertilizantes nitrogenados; la presencia de aluminio que al desplazarse de las arcillas por otros cationes reacciona con el agua y libera hidrógenos (FAO,2019).

El pH obtenido en KCl, presentó diferencias significativas en los tres sistemas evaluados, siendo el mayor pH en G, seguido de Ci, y Ca siendo el menor (tabla 3). Como se obtuvo valores de pH menor a 7.0 se interpreta que los suelos de los tres sistemas son ácidos. Así, los suelos ácidos presentan problemas de retención de macroelementos como el calcio, magnesio y fósforo; en el caso de los micronutrientes sucede lo contrario a excepción del molibdeno, donde es mejor absorbido en estos tipos de suelo (Arciniegas y Gómez, 2018).

Pellegrini et al., (2016) plantea que el pH medido con KCl tiende a ser menor al pH medio en H₂O en un orden de 0.5 a 1.0 unidades, siendo menor la diferencia a medida que el pH sea mayor. En este trabajo la variación de pH determinado en agua y KCl varió de 0.10 a 1.14 unidades. Los valores más bajos de pH obtenidos cuando la determinación es realizada en KCl se explican por el efecto de la concentración de potasio en la solución, que reemplaza los hidrogeniones y demás formas de acidez del complejo de cambio, provocando un incremento de la concentración de hidrogeniones que da como resultado un pH bajo (Arciniegas y Gómez, 2018).

La densidad aparente (Da) presentó diferencias significativas en el sistema G (1,61 gr/cm³) con respecto a los sistemas Ci (1,26 gr/cm³) y Ca (1,31 gr/cm³) donde se encuentran valores cercanos entre ellos (tabla 3). En estudios realizados por Rodríguez et al., (2000) citado por García et al., (2018) encontraron que la densidad aparente tiende a disminuir a medida que aumenta el contenido de materia orgánica, la densidad aparente disminuye en suelos donde se realiza labranza con cincel. Así, los cambios de densidad aparente indican que el uso del suelo tiene un efecto acumulativo que hace que las partículas removidas y sueltas se reacomoden y ocupen el espacio que correspondía al agua y al aire (Gutiérrez, 2000).

Un suelo con alta densidad aparente se encuentra adensado, lo que puede incidir en una baja capacidad de infiltración y baja aireación, situación que afecta el crecimiento y desarrollo de las raíces del cultivo de guanábana. La densidad aparente del suelo aumenta como consecuencia del tránsito repetido de la maquinaria agrícola, afectando principalmente los poros de mayor tamaño. Esto reduce la capacidad de retención de agua en succiones bajas y puede aumentar la capacidad de retención en succiones altas. (Amézquita et al., 2016).

Cabe resaltar que el sistema Ci presentó una baja densidad aparente con respecto a los demás sistemas, se infiere que una de las razones por las que se presenta

este resultado es debido al sistema forrajero que allí se encuentra establecido, siendo maní forrajero (*Arachis pintoï*). Márquez et al., (2017), afirma que el maní forrajero mejora las condiciones físicas y químicas del suelo por su aporte en nitrógeno, lo cual también contribuye a minimizar las pérdidas de nutrientes por erosión, lixiviación y estímulo sobre la diversidad biológica del suelo, presenta rápida degradación de sus hojarasca y mejoría en el contenido de materia orgánica en este, su presencia permite la recuperación de suelos degradados, lo que facilita su utilización como estrategia para mejorar la calidad de este recurso. De igual forma, Altieri y Schmidt (1986 citado por Orduz et al., 2011) afirma que introducir leguminosas en medio de cultivos frutales contribuye en la proliferación de microhábitats para un gran número de microorganismos, insectos, etc. El movimiento de la mesofauna del suelo favorece el movimiento de nutrientes y oxígeno, mejorando su estructura y composición.

La materia orgánica (M.O) presentó diferencias significativas en los dos de los sistemas evaluados (tabla 3), siendo G (8,35%) el que presentó mayor porcentaje, seguido de Ca (3,44%) y Ci (1,74%) (tabla 3). La materia orgánica está relacionada con la hojarasca, raíces y residuos de podas en diferentes estados de descomposición que se encuentra en el horizonte O y horizonte A de los suelos.

Es importante tener en cuenta que, la producción de hojarasca y su descomposición son procesos fundamentales en el ciclo de nutrientes, ya que representa la principal transferencia de materia orgánica y nutrientes desde la parte aérea a la superficie del suelo (Isaac y Nair, 2006), esta vía, además de la precipitación directa y flujos corticales, es la principal fuente de fertilización natural (López et al., 2013). Más de la mitad de la absorción anual de nutrientes en los bosques es debido a la reincorporación de hojarasca al suelo y el subsecuente reciclaje de estos nutrientes, además representa la principal fuente de minerales disponibles (Del Valle, 2003).

Cuando se realizó el muestreo de los sistemas para determinar el contenido de materia orgánica, se esperaba que el sistema (Ca) al ser un sistema agroforestal tuviese el mayor contenido de MO, se observó que hay alta presencia de hojarasca en el suelo que es la vegetación muerta que se encuentra depositada sobre la superficie del suelo y que está en diferentes grados de descomposición. Sin embargo, este tipo de materia orgánica es de lenta degradación, lo que sugiere que probablemente la mineralización esté siendo condicionada por la humedad del sitio (Carrillo Ávila et al, s.f.) , el sistema (G) tiene mayor contenido de MO comparado con los demás sistemas , esto se puede inferir ya que el cultivo tienen establecido una cobertura (*Arachis pintoï*), la que involucra una adición de materia orgánica fresca al suelo, la cual es aprovechada por los organismos edáficos como fuente de nutrientes (Sanclemente , 2019).

El sistema G (Guanábana) fue el más alto, superando el valor indicado como límite superior de 4% propuesto por Andrades & Martínez, (2014), evidenciando el predominio del proceso de acumulación sobre mineralización.

Para dar explicación a los resultados obtenidos, es necesario tener en cuenta que la velocidad de la descomposición de la hojarasca depende de varios factores como: las condiciones climáticas, composición química y las concentraciones de los nutrientes (Navarro y Navarro, 2003). Así, la acumulación, descomposición y conversión en humus dependen de factores como la productividad primaria, la composición y la estructura de la vegetación, los flujos de viento y agua, la temperatura y la humedad en el ambiente, la fertilidad del suelo, la actividad de los microorganismos y la fauna edáfica, así como de la inclinación del terreno y su exposición respecto al tránsito del sol (Gaspar *et al.*, 2015).

Durante la descomposición de la materia orgánica pueden llegar a diferenciarse tres fases para la liberación de nutrientes: una inicial de rápida liberación de componentes solubles la descomposición de materiales lábiles (azúcares, algunos fenoles, almidones y proteínas), en la que dominan los procesos de lavado, seguida por una fase más lenta de inmovilización, como resultado de la lenta descomposición de elementos recalcitrantes como celulosa, hemicelulosa, taninos y lignina (Arellano *et al.*, 2004), y finalmente una fase de liberación neta (Weerakkody & Parkinson 2006). Esta liberación puede tomar varios caminos dependiendo de diferentes factores como la humedad, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes en el suelo, la especie, la edad y, fundamentalmente, la calidad de la hojarasca (concentraciones de N y P; relaciones C/N y N/P) (Castellanos & León, 2011).

La concentración de N y la relación C: N se han identificado como los factores más importantes que controlan los procesos de descomposición de la materia orgánica. Estas características de calidad de la hojarasca pueden determinar a su vez la biomasa microbiana y la mineralización de los nutrientes, la relación depende de las especies y la edad de las mismas, y es un buen indicador de la susceptibilidad de la hojarasca a ser degradada (Farfán y Urrego, 2007). Si el residuo inicial es rico en C y pobre en N, la descomposición será lenta, pero si el residuo tiene altas concentraciones de N, éste se transformará en amoníaco e impedirá la correcta actividad biológica. Por lo general, el índice de descomposición es más alto en las especies que tienen máximos valores de ceniza y de nitrógeno y mínimos valores en la relación C: N y de lignina (FAO, 2011).

Así, un suelo con alto contenido de materia orgánica evidencia gran cantidad de microorganismos presentes en el mismo, participando algunos de estos en la liberación de promotores de crecimiento para las plantas, otros que son antagonistas de enfermedades y plagas (Sales, 2006). De igual manera, los altos niveles de materia orgánica en el suelo están asociados con el incremento de la agregación, la menor erosión y escorrentía superficial, la mejor infiltración (Murillo *et al.*, 2014), el movimiento y la retención del agua lo que ayuda a aminorar la compactación, la capacidad de intercambio catiónico, la disponibilidad de nutrientes, el vigor de los cultivos y la reducción de la presión de plagas y enfermedades en las plantas (Sales, 2006).

El contenido de fósforo (P) en cada una de las áreas de estudio está directamente relacionado con los requerimientos nutricionales de cada cultivo y su plan de fertilización. Cuanto mayor sea el requerimiento del cultivo, los contenidos de fósforo en el suelo tienden a disminuir (Arciniegas y Gómez, 2018). Los lotes G (53,60 ppm) y Ca (46,68 ppm) tienen un contenido de fósforo alto, sin presentar diferencias significativas entre estos dos. Los altos contenidos de este elemento en G y Ca y las diferencias entre G y Ci (tabla 3) pueden ser explicarse a la aplicación de fertilizantes con contenidos de este elemento.

De acuerdo a la clasificación de Quintana et al., (1983) el contenido de fósforo en el suelo se clasifica en categorías dadas en partes por millón (ppm) donde un valor menor a 10 ppm es bajo, de 10 a 20 ppm para categoría media y, mayor a 20 ppm para categoría alta. Así, el contenido de fósforo es bajo para el sistema Ci (12,36 ppm), se debe principalmente a la extracción de fósforo por parte de las plantas, además de factores que afectan la concentración y disponibilidad de nutrientes como la acidez (Berrocal et al., 2009).

Una consecuencia de la disminución del pH es la reducción la solubilidad del fósforo, siendo este fijado por los hidróxidos de Fe y Al (Munera & Meza, 2014); así, si el pH es inferior a 5.5 la absorción de fósforo por parte de la planta se reducirá, lo que puede conducir a la aparición de síntomas de deficiencia. Un pH inadecuado, puede deteriorar severamente las raíces antes de que la planta muestre síntomas de deficiencia, alteraciones morfológicas y de funcionamiento, reduciendo la cantidad y calidad de las cosechas (Beltrán, 2014).

La resistencia a la penetración (RP) se vio reflejada en los tres sistemas con diferencias significativas entre el sistema G frente a los sistemas Ca y Ci. Siendo el sistema Ci (1,91 MPa) el que presentó mayor valor y el sistema Ca (1,29 MPa) el que presentó menor valor (tabla 3).

En el sistema Ci, las posibles razones para su excesiva compactación puede ser consecuencia del uso frecuente de maquinaria, el trayecto de los trabajadores, exposición directa del suelo a la lluvia y la pérdida de suelo por escorrentía al realizar prácticas tradicionales como eliminación de la cobertura vegetal, causando cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando la resistencia a la penetración (Petterson, 1977; citado por Orduz *et al.*, 2011). Así, el manejo convencional de gramíneas, permite que se reduzca el sistema de macroporos, generando condiciones anaeróbicas en el suelo, y favoreciendo la reducción del oxígeno disponible, lo cual trae como consecuencias a mediano plazo la reducción en la desnitrificación, pérdida de nutrimentos en las raíces y cambios en el metabolismo de las plantas (Orduz *et al.*, 2011). En consecuencia, cuando un suelo se compacta ocurre una densificación mecánica, con reducción de vacíos e incremento de la resistencia a la penetración, lo que puede redundar en un menor crecimiento radicular (Draghi et al., 2005).

La posible baja resistencia a la penetración que presenta el sistema Ca se debe a su contenido de materia orgánica (3,44%) y porosidad total (49,74%) en el suelo, un suelo con buen contenido de materia orgánica y gran cantidad de poros presenta menor grado de compactación (Macías et al., 2017).

La compactación del suelo generalmente ha sido evaluada a través de la medición de tres propiedades: densidad aparente, porosidad y resistencia mecánica o resistencia a la penetración (Gaitán y Penón, 2003). El sistema G presentó en Da 1,61 gr/cm³, en RP 1,83 MPa y en Pt 38,08 %; el sistema Ca presentó en Da 1,31 gr/cm³, en RP 1,29 MPa y en Pt 49,74%; el sistema Ci presentó en Da 1,26 gr/cm³, en RP 1,91 MPa y Pt 51,46%. Se analiza que, de los tres sistemas, el sistema Ci presentó altos valores relevantes en cuanto a RP (1,91 MPa) y Pt (51,46%), es poco común y no concuerda con lo mencionado por la literatura, en este sentido, la compactación provoca el aumento de la densidad aparente del suelo y la resistencia mecánica, modifica la estructura porosa y disminuye el volumen de poros (Villazón et al., 2015).

Los cambios estructurales por compactación alteran las propiedades volumétricas del suelo, lo que repercute en el desarrollo y crecimiento de las plantas porque decrece la conductividad hidráulica y la capacidad de retención de agua y se altera la difusión de gases en su interior. Estos cambios provocan una deficiente aireación y un suministro inadecuado de oxígeno para el desarrollo de las plantas. Así mismo, la degradación de la estructura del suelo por compactación provoca una ralentización o paralización del desarrollo de las raíces, al aumentar la RP (Blanco, 2009). Una posible explicación a la hipótesis es un déficit hídrico cuando se realizó el muestreo. Por lo general, el muestreo de la RP debería realizarse con la humedad de suelo alrededor de capacidad de campo para que los datos no tengan la influencia de ésta (Paredes et al., 2009). Soane et al., (1980), Busscher et al., (1997) y Pires da Silva et al., (2002) reconocen la influencia del contenido de agua en la variabilidad de la resistencia a la precipitación. Pires da Silva et al., (2002) indican que 43 % de la variación de la RP es atribuible a la humedad del suelo. Por tanto, es necesario muestrear en condiciones homogéneas de humedad para reducir las variaciones atribuidas al contenido de agua en el suelo. Del mismo modo, Villalobos y Feres (2017) proponen que la resistencia mecánica de los suelos aumenta bruscamente cuando el suelo se seca y se utiliza para complementar la información proporcionada por la densidad aparente.

Para el Delta pH (Δ pH) (Tabla 3) se encontró diferencias significativas en los tres sistemas. Fue el sistema G que presentó menor Δ pH (-1,14) siendo éste el mejor resultado y el sistema Ci el que presentó mayor valor (-0,10).

De acuerdo con Woods et al. (2008), si el valor delta del pH es negativo, significa que el suelo está dominado por arcilla de silicato. Así, si la diferencia entre los valores de Δ pH en KCl y H₂O es grande, el Δ pH es más negativo y esto a menudo está relacionado con un alto contenido de aluminio intercambiable. Por el contrario,

y si el Δ pH es positivo significa que los óxidos de hierro y aluminio son dominantes. Es importante tener en cuenta que, si el Δ pH del suelo es positivo o cero, se indica que hay predominio de minerales de carga variable. Por su parte, Saltos (1998) indica que la obtención de Δ pH negativo, no implica una ausencia de cargas positivas en las superficies de las arcillas, ya que un pequeño número de cargas positivas también tienen lugar en áreas aisladas de las cargas negativas. Saltos (1998) agrega que el Δ pH negativo en los suelos, se debe a la presencia de materia orgánica; que al neutralizarse con el KCl se liberan de iones H^+ , que resulta del intercambio entre H^+ y K^+ .

El Stock de carbono (SCO) estimado presenta diferencias significativas entre los diferentes sistemas (tabla 3), siendo el sistema G (138,04 ton/ha) el que presentó mayor contenido de carbono, seguido del sistema Ca (51,76 ton/ha) y Ci (25,27 ton/ha) con el menor contenido. Se analiza que al presentarse un aumento de la densidad aparente aumentó el valor de Stock de Carbono, este suceso se atribuye a la presencia del alto contenido de materia orgánica del sistema G que a su vez aumenta el contenido de carbono orgánico en el suelo. Un indicador usual de la materia orgánica del suelo es el contenido de carbono orgánico, con el cual, las propiedades biológicas, químicas y físicas del suelo están fuertemente correlacionadas (Castillo et al, 2009). Inversamente, si se presenta baja densidad aparente; así mismo baja el contenido de carbono orgánico, como sucede con el sistema Ci.

Ahora bien, la densidad aparente juega un papel importante en el stock de carbono (Aguilar et al., 2011), también, está ligada con la porosidad del suelo. Al existir más poros hay mayor disponibilidad de oxígeno y espacio para los microorganismos que se encargan de la mineralización de la materia orgánica (Díaz *et al.*, 2016). Por esta razón, los porcentajes de carbono orgánico del suelo (COS%), se reportan como altos si son mayores a 2.5%, medios si se encuentran entre 1 a 2.5% y bajos si son menores a 1% (Núñez, 2000).

Otros factores que están ligados con el contenido de carbono en el suelo son los ambientales en cada sistema, ya que existe una dependencia de este factor como lo mencionan Díaz *et al.*, (2016) en su estudio, en el Bosque seco Tropical (Bs-T) hay mayor acumulación de carbono en el suelo que en Bosque húmedo Tropical y le atribuye la causa a la humedad disponible en el suelo del Bosque húmedo tropical (Bh-T). Esta condición de humedad es suficiente para no detener completamente la descomposición de materia orgánica, aún durante la época seca, por lo que los procesos de lixiviación y descomposición de la materia orgánica son más constantes y permiten; por tanto, una acumulación mayor de C a través del tiempo (FAO, 2017).

9.1 Índice de calidad de suelos

Las dos primeras componentes principales presentaron autovalores superiores a 1 y fueron responsables del 84% de la variación total del set de datos (tabla 4), en la componente principal 1 (CP1) las variables: pH en agua (pH H₂O), porosidad total (PT) y densidad aparente (Da) fueron las más representativas. En la componente principal 2 (CP) la variable de mayor peso fue resistencia a la penetración. Por lo tanto, se puede inferir que CP2 representa las propiedades físicas o mecánicas de las áreas de este estudio.

Tabla 4. Análisis de componentes principales, autovalores.

Lamba	Valor	Proporción	Proporción acumulada
1	5,46	0,68	0,68
2	1,27	0,16	0,84
3	0,64	0,08	0,92
4	0,35	0,04	0,97

El análisis de correlación la propiedad con mayor peso es la componente 1 (CP1) (tabla 5) indica una alta correlación con nivel de significancia muy alto ($P < 0.0001$), a pesar que la correlación de Pearson no permite determinar la causalidad de la correlación entre variables analizadas, estudios indican que:

La acidez de un suelo afecta a muchas otras propiedades físico-químicas y biológicas (Villalobos & Feres, 2017), además influye en el crecimiento de las plantas. Las propiedades físicas afectadas son: dispersión-floculación de coloides; estructura; porosidad y aireación; conductividad hidráulica, régimen de humedad y temperatura. En cuanto a las propiedades químicas: meteorización química, movilidad de elementos (Al, Mn y metales pesados); disponibilidad de nutrientes (Ca, Mg, MO, P); descomposición de la materia orgánica; absorción de aniones (fosfatos, sulfatos y cloruros); procesos de hidromorfismo; neoformación de minerales de arcilla. Por último, las propiedades biológicas que se afectan son: relaciones bacterias-hongos; población bacteriana; humificación; fijación de nitrógeno; y movilidad y absorción de nutrientes (Barettino et al., 2005).

Detallando la química de la coagulación-floculación, se afirma que está basada en las cargas eléctricas de las partículas, es por ello que el pH y las sustancias coagulantes influyen en este proceso (Santamarina *et al.* 2001). Para diferentes cantidades de sustancias coagulantes y pH es posible inferir un arreglo de

partículas diferente, lo que controla o determina la posibilidad de adsorción y generación de flóculos. Algunas partículas son de un tamaño tan pequeño y tienen una carga eléctrica superficial, que las hace repelerse continuamente, impidiendo su aglomeración y la formación de una partícula más pesada para poder así sedimentar (Ramírez, 2000).

La carga eléctrica del mismo signo de las partículas coloidales origina una repulsión entre ellas, (generalmente en el agua las partículas de arcilla y otros coloides tienen carga negativa), impidiendo así su unión y separación del líquido, de aquí la necesidad de adicionar un electrolito que neutralice la carga eléctrica del coloide para eliminarlas (Lorenzo, 2006).

Así, en una primera etapa los compuestos químicos en solución se absorben a la superficie de partículas sólidas en suspensión y posteriormente en la coagulación estos coloides se agrupan formando flóculos de mayor tamaño, los cuales son removidos mediante precipitación o filtración (Franco et al., 2014). La mayoría de los coloides están cargados negativamente, por lo que en agua son estables debido a la repulsión electrostática entre estas partículas invisibles. Así, la formación de los flóculos es consecuencia de la agrupación de las partículas descargadas al ponerse en contacto unas con otras (Lorenzo, 2006).

Existen numerosos parámetros que influyen en las fuerzas químicas y físicas que posibilitan que estos fenómenos ocurran; en ellas los aspectos de mayor relevancia son las cargas eléctricas superficiales de las partículas coloidales presentes en el agua, la temperatura, el pH y sustancias coagulantes (Romero, 1999). Los coagulantes producen un incremento de sulfatos o cloruros y el descenso del pH, lo cual resulta de fundamental importancia no sólo porque controlan la eficiencia de la coagulación sino también por la necesidad de disposición adecuada de los residuos o lodos como producto de la floculación (Franco et al., 2014).

Tabla 5. Análisis de componentes principales, autovectores.

Variables	CP1	CP2	CP3	CP4
pH H ₂ O E	0,42	-0,12	0,10	-0,09
pH KCl E	0,34	-0,15	0,63	-0,44
Da E	-0,41	0,05	0,31	0,05
M.O E	0,39	0,15	0,07	-0,22
P E	0,28	0,47	0,43	0,70
Rp E	-0,03	0,84	-0,21	-0,42
Pt E	-0,41	0,05	0,31	0,05
Δ pH E	0,38	-0,08	-0,41	0,29

Al evaluar los autovectores obtenidos mediante el análisis de componentes principales (ACP) (tabla 5), se decidió dejar solamente la variable pH H₂O como indicador de calidad en la componente principal 1 (CP1), por lo tanto, se puede inferir que la primera componente representa las propiedades químicas en los sistemas de manejo estudiados. Con las propiedades seleccionadas se determinó que el índice de calidad para los tres sistemas productivos se representa por la ecuación 5.

En la componente principal 1 se seleccionó la propiedad pH por ser la que tiene mayor significancia y se relaciona con las demás variables. A partir de esta selección se puede dar un manejo al suelo teniendo en cuenta que el pH es un importante índice para el diagnóstico del estado de disponibilidad de los nutrientes para las plantas. Aunque las especies de plantas cultivadas tienen ciertas diferencias en cuanto al pH en que se desarrollan mejor, se acepta que, en general, habrá mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas a pH del suelo entre 6.0 y 7.0 (Toledo, 2016).

Cuando el pH se reduce por debajo de 5.5, los niveles de acidez son tan altos que nutrientes como el calcio, magnesio, molibdeno y fósforo pueden no estar tan disponibles para las plantas, las que sufrirán deficiencia nutricional. Además, algunos nutrientes y otros elementos del suelo llegan a volverse tóxicos para las plantas como el hierro, aluminio y manganeso (Campanilla, 2005). Además, y en el caso de muchos de los suelos tropicales con altos contenidos de coloides de carga variable, la acidez puede causar pérdidas de nutrientes catiónicos (como el calcio, magnesio, potasio, amonio) por lavado ya que bajo esta condición de acidez muchos de los coloides de los suelos se vuelven de carga positiva, siendo incapaces de retener los nutrientes de carga positiva o cationes (Toledo, 2016).

En la medida en que el pH se incrementa por arriba de 7, volviéndose más alcalino, la disponibilidad de nutrientes como hierro, zinc, boro, manganeso y fósforo se reduce, limitándose fuertemente el crecimiento de las plantas. El fósforo es especialmente afectado por la condición del pH del suelo. Este nutriente es más aprovechado por las plantas cuando el rango del pH está entre 6 y 6.5 (Toledo, 2016). Por arriba y por debajo de este rango, gran proporción del fósforo forma compuestos no absorbibles por las plantas con elementos como el aluminio, hierro, manganeso y zinc (cuando el pH es ácido) y con calcio (cuando el pH es alto). Esto causa que, para lograr que las plantas absorban algo de este nutriente, se tengan que hacer altas aplicaciones de fertilizantes fosfóricos, lo que viene a encarecer mucho los cultivos sembrados en suelos con el pH fuera del rango adecuado (Thompson, 1998).

La tasa de absorción de varios nutrientes vegetales depende del pH, generalmente los aniones, incluyendo nitratos y fosfatos, se absorben a una tasa más alta dentro de rangos de pH más bajos. Las tasas de absorción de los cationes parecen ser más altas en el rango más neutro de pH (Toledo, 2016). A niveles de pH muy bajos, (< 3.0), se dañan las membranas de las células que se vuelven más permeables.

Esto resulta en una pérdida de nutrientes, en particular de K^+ que difunden fuera de las células de las raíces hacia la solución edáfica. Este efecto depresivo de las concentraciones altas de H^+ en las membranas biológicas puede contrarrestarse por el Ca^{2+} (Badajoz, 1997).

En el mismo orden, el cambio de pH en el suelo se ve reflejado en que la aplicación de ciertos fertilizantes a los suelos en altas dosis y en forma continua puede afectar la reacción el suelo. Como efecto de ello se conoce el efecto acidificante que tienen algunos fertilizantes nitrogenados amoniacales o el efecto alcalinizante del termofosfato de magnesio (Alcarde, 2007). Es por ello que la acidificación se considera como una tendencia del complejo cambio del suelo a cargarse con iones hidrógeno (H^+) y se mide a través del pH. La modificación del pH del suelo influye de forma directa en la disponibilidad de nutrientes que los cultivos necesitan para su crecimiento y desarrollo. De esta manera, los suelos con valores de pH cercanos a la neutralidad proveen la mayor disponibilidad de nutrientes (García y González, 2013).

De igual manera, el pH influye en la microflora del suelo actuando como regulador de la actividad y estabilidad de las enzimas. Alef (1995) sobre la base de resultados no publicados, puntualizó que los suelos ácidos ($pH < 5$) tienden a mostrar actividades deshidrogenasas muy bajas. Por su parte, Dick y Tabatabai (1992), mencionan que se ha detectado la actividad de hidrolasas, transferasas, oxidorreductasas y liasas estando directamente relacionadas con los ciclos del C, N, P y S.

A su vez, el pH del suelo influye en la actividad de los microorganismos de suelo. Generalmente, en el rango de pH más bajo, (< 5.5), los hongos dominan en el suelo y en la rizosfera, mientras que en los niveles de pH más altos las bacterias son más abundantes. La nitrificación del $N-NH_4$ y del HNO_2 , realizada por *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, depende considerablemente del pH del suelo, dado que estas bacterias prefieren condiciones de suelo más bien neutras. En suelos fuertemente ácidos el contenido natural de nitratos es extremadamente bajo. La fijación de N molecular por microorganismos libres del suelo (*Azotobacter* y *Chlostridium*) o simbióticos (*Rhizobium* y *Actinomyces*), así como las bacterias desnitrificadoras son también favorecidos por condiciones de pH del suelo más bien neutras. Las especies de *Beijerinckia*, importantes fijadores libres de N en los suelos tropicales, son menos sensibles a los niveles bajos de pH (Mengel & Kirkby, 2000).

En la componente principal 2 se seleccionó la resistencia a la penetración (RP) por ser la propiedad con mayor peso frente a las demás (tabla 5). Este resultado indica que la resistencia a la penetración del suelo es un factor importante en el desarrollo de las plantas cultivadas. Un suelo que presente alta resistencia a la penetración impide la adecuada y óptima porosidad de este, disminuyendo la aireación, el drenaje y el almacenamiento de agua para cubrir las necesidades de la planta, principalmente en periodos de sequía (Cantú *et al.*, 2007). A su vez, las raíces presentan dificultad de penetrar el suelo y adquirir los nutrientes necesarios para el

desarrollo de las plantas. En este orden, disminuye la actividad bioquímica y microbiológica que facilita la descomposición de la materia orgánica (Vallejo, 2013).

Tabla 6. Coeficientes de correlación de Pearson.

Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
pH H ₂ O E	Da E	23	-0,89	<0,0001
pH H ₂ O E	Pt E	23	-0,89	<0,0001
pH H ₂ O E	Δ pH E	23	0,88	<0,0001
Da E	Pt E	23	1,00	<0,0001
Da E	Δ pH E	23	-0,89	<0,0001
Pt E	Δ pH E	23	-0,89	<0,0001

El índice sugiere que el mayor aporte a la calidad del suelo se logra mediante el manejo de las propiedades químicas (valor de 0.8095 en la ecuación 5), por lo tanto, las recomendaciones de manejo deben prestar atención especial a este aspecto, buscando prácticas que aumenten el valor del pH (H₂O) a niveles que se acerquen al límite superior usado para la estandarización (Tabla 2). Podría pensarse que el mayor peso de las propiedades químicas en el ICS (ecuación 5) se debe a que la mitad de las variables del set de datos son propiedades de este tipo. A pesar que el aspecto químico es el que más está aportando a la determinación de la calidad del suelo, el aspecto físico relacionado con la resistencia a la penetración aporta aproximadamente 20% de esta (ecuación 5). Así, las estrategias de manejo no deben subestimar este aspecto.

Índice Calidad del Suelo (ICS): $0,8095 \times (\text{pH agua}) + 0,1904 \times (\text{RP})$ (5)

donde:

ICS: índice de calidad (adimensional)

pH H₂O: pH medido en agua en relación (2:1)

RP: resistencia a la penetración en megapascales (MPa)

9.2 Prácticas de manejo recomendadas de acuerdo al ICS

De acuerdo a lo planteado, para el aumento de pH y disminución de la RP en el suelo en los sistemas productivos se recomiendan las siguientes prácticas de manejo:

1. La incorporación de enmiendas, abonos orgánicos, abonos verdes y fertilizantes minerales puede tener el mayor impacto sobre la fertilidad del suelo y el estado de calidad del mismo (Gutiérrez *et al.*, 2017). Es necesario mantener un plan permanente de corrección de la acidez de los suelos agrícolas. Esto puede incluir el uso de fertilizantes que no acidifiquen el suelo, como el cloruro de potasio (KCl) y el sulfato de potasio, que son neutrales, y los que contienen nitratos, los cuales más bien tienden a reducir la acidez del suelo. Sin embargo, cuando los suelos son continuamente enmendados con cal o gallinaza, los fertilizantes acidificantes, que son los que tienen amonio o los que ya en el suelo se transforman a amonio, como la urea, pueden aplicarse, ya que el grado de acidez que forman es neutralizado por la enmienda que continuamente se aplica (Toledo, 2016).
2. Evitar el uso de quemas físicas (uso de fuego) para eliminar la vegetación indeseada. Esta práctica a pesar que incrementar el pH del suelo reduce el contenido de carbono orgánico (COS) Parsons *et al.*, (2010) y Neary *et al.* (2005), esto sugiere que esta propiedad es sensible a los cambios de la severidad de la quema de suelos.
3. La rotación de cultivos es otra alternativa para el manejo del pH del suelo ya que evita el agotamiento de las reservas nutritivas del suelo, moviliza y transporta nutrientes de capas más profundas para la superficie (Díaz *et al.*, 2004).
4. Uso moderado de la labranza de los suelos para evitar la pérdida de los agregados que forman la estructura del suelo y a su vez aceleran la descomposición de la materia orgánica (Camacho *et al.*, 2010). De igual manera, se puede implementar el incremento de la velocidad de movimiento de la maquinaria agrícola con el objetivo de disminuir la compactación debido al menor tiempo de carga (Pytka, 2003). También, implementar patinaje máximo en el suelo del 10%, para evitar daños a la capa superficial, subsuelo debido al esfuerzo cortante del neumático (González *et al.*, 2009).
5. Implementar el método de fitocorrección mediante el uso de especies vegetales y sus microorganismos asociados para extraer, acumular, inmovilizar o transformar los elementos que aumentan la acidez del suelo (Diez, 2008).
6. Aplicación de materia orgánica, la presencia de esta tiene un efecto protector frente a la compactación. La adsorción de compuesto orgánicos humificados (CAH) a la superficie de las arcillas aumenta la porosidad intra-agregados

(porosidad textural) para constituir el complejo arcillo-húmico, modificando el comportamiento global de los suelos frente a la compactación y a las propiedades de retención de agua (Guérif et al., 2001; Ferraras et al., 2007).

7. Siembra de plantas tales como leguminosas contribuyen a disminuir la resistencia mecánica del suelo a la penetración de las raíces (Delgado et al., 2009). Además, los resultados obtenidos por Gester *et al.*, (2010) muestran reducciones en la resistencia a la penetración por efecto de la inclusión de gramíneas en la rotación y la descompactación mecánica en un corto plazo, pero sólo la inclusión de gramíneas en la rotación incrementó la producción de soja, sugiriendo que los efectos positivos de la rotación con gramíneas podría estar relacionado con una mejora de la condición física del suelo por debajo de los 25 cm que le permitiría al cultivo hacer una mayor exploración radical del perfil.

El índice de calidad de suelos para las áreas presentó diferencias significativas según el estadígrafo de Tukey (tabla 3), siendo más alto para la cobertura cultivo de guanábana (G), las áreas Ci y Ca no presentaron diferencias significativas entre ellas, los valores de ICS en Ci y Ca son similares a los reportados por Parra & Rodríguez (2017).

En síntesis, la calidad del suelo es un término actual y necesario, que se debe considerar en la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas pues constituyen una herramienta poderosa para la toma de decisiones en el manejo y uso del suelo a escala local, regional y global, y su estudio debe hacerse de forma particular, según las condiciones de cada agroecosistema.

10. CONCLUSIONES

- Es posible obtener un índice de calidad de calidad del suelo (ICS) usando el análisis de componentes en un set de datos de las propiedades químicas y físicas que pueden ser determinadas rutinariamente en laboratorio y campo. A partir del índice se establecieron posibles prácticas de manejo que contribuyan a incrementar los valores de los indicadores con baja valoración.
- En los usos evaluados el pH del suelo y la resistencia a la penetración fueron las variables que presentaron mayor peso en el set de datos, por lo tanto son características del suelo más sensibles a ser mejoradas o degradadas por las prácticas del programa de manejo.
- Mediante la evaluación de las variables seleccionadas se conoció el estado físico, químico y biológico del suelo de los diferentes sistemas productivos donde se realizó el muestreo.
- El área dedicada al cultivo de Guanaba presentó el mayor índice de calidad (0,71), las áreas dedicadas al cultivo de Cítricos y Cacao fueron 0,34 y 0,37 respectivamente.
- El uso y manejo del suelo de cada sistema de cultivo genera cambios significativos en las propiedades físicas, químicas y biológicas de este.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, H., Ortiz, E., Vilchez, B., Chazdon, R. 2011. Biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo en cuatro estadios de sucesión de bosques en la península de Osa, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 22 (9): 22-31.

Alcarde, C. J. 2007. Fertilizantes. En: *Fertilidade do Solo*. Novais, R.F., Alvarez, V.H., Barros, N.F., Fontes, R.L.F., Cantarutti, R.B., Neves, J.C.L. (eds.). SBCS, Viçosa, Brasil. 1017 p.

Alconada, M. (n.d.). aula virtual. Retrieved from http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/18677/mod_resource/content/2/TEMA%208%20-%20REACCI%C3%93N%20DEL%20SUELO%20%28pH%29.pdf

Alef K. 1995. Estimation of microbial activities. Págs: 193-270. En: K. Alef y P. Nannipieri (eds). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press. Londres.

Altieri M, Schmidt L. 1986. Cover crops affect insect and spider populations in apple orchards. *Calif Agric* 40(1):15-17

Amézquita Collazos, E., Campo Quesada, J. M., & Volveras Mambuscay, B., (2016). Indicadores de calidad física del suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 372.
Anaya, G., & Jaramillo, J., Determinación de dos índices de la calidad del suelo en la calidad de la taza de café.

Andrade, M., & Martínez, M. (2014). Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. Universidad de la Rioja, servicio de publicaciones.

Arciniegas, E., & Gómez, N. (2018). Variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos, con diferentes sistemas de manejo. Tesis de grado. Universidad de los Llanos, Villavicencio.

Arellano, R., J. Paolini, L. Vásquez & E. Mora. 2004. Producción y descomposición de hojarasca en tres agroecosistemas de café en el estado de Trujillo, Venezuela. *Rev. Forest. Venez.* 48: 7-14.

Badajoz, (1997). Estudio de los flujos netos simultáneos de H⁺ y K⁺ y la actividad redox en raíces aeropónicas estériles de plántulas de girasol (*Helianthus annuus* L.). Universidad de Extremadura, departamento de biología y producción de los vegetales.

Barettino D., Loredó J. & Pendás F. (2005). Acidificación de suelos y aguas: problemas y soluciones. Madrid, España: Gráficas Chile, S.A.L.

Bautista, C., Etchevers, B., del Castillo, R., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. México: ecosistema.

Beltrán-Pineda M. (2014). La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 15(1), 101-113.

Berrocal R., Durango J., Barrera J. & Díaz B. (2009). Evaluación de formas de fósforo en suelos cultivados con plátano. *Acta Agronómica*, 58(3), 152-159. Retrieved October 10, 2019, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122009000300006&lng=en&tlng=es.

Blanco-Sepúlveda, R. (2009). La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*, 43(3), 231-239. Recuperado en 14 de octubre de 2019, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000300002&lng=es&tlng=es.

Burbano-Orjuela, Hernán. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. <https://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>

Busscher, W. J., P. J. Bauer, C. R. Camp, and R. E. Sojka. 1997. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil Tillage Res.* 43: 205–217.

Cabrera-Garavito, D. (2014). Impacto del control fiscal ambiental en la optimización de los recursos naturales y el ambiente. Bogotá: Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario.

Camacho-Tamayo, Jesús H, y Luengas-Gómez, Carlos. (2010) Análisis multivariado de propiedades químicas en Oxisoles con diferentes niveles de intervención agrícola. *Acta Agronómica*, 59 (3), 273-284. Recuperado el 21 de enero de 2020, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122010000300003&lng=en&tlng=es.

Campanilla, R; Sadzawaka, A. 2005. La acidificación de los suelos: origen y mecanismos involucrados. Santiago, Chile, INIA.

Cantú, P., Becker, A., Bedano, J., Musso, T., & Schiavo, H. (2004). Capítulo 3: Evaluación de la calidad ambiental y calidad de los suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Contaminación y salud del suelo*. Editado por E. Ruda, A.

- Mongiello, & A. Acosta, 2004. (págs. 85-86). Santa Fe, República Argentina: UNL.
- 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.
- Carrillo Ávila, E., García López, E., Córdova G, P., Guerrero Peña, A., Obrador Olán, J. J., Sánchez Soto, S., & Ortiz Garcia , C. F. (s.f.). Evaluación del sistema agroforestal de Cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante indicadores de calidad de suelo en Tabasco, México. Colegio de Postgraduados Campus Tabasco México, 39.
- Castellanos-Barliza, Jeiner, & León Peláez, Juan Diego. (2011). Descomposición de hojarasca y liberación de nutrientes en plantaciones de *Acacia mangium* (Mimosaceae) establecidas en suelos degradados de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 59(1), 113-128. Retrieved October 08, 2019, from http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442011000100009&lng=en&tlng=es.
- Castillo-Morales M., Linares-Fleites G., Valera Pérez M., García-Calderón N. & Acevedo-Sandoval A. (2009). Modelación de la materia orgánica en suelos volcánicos de la región de Teziutlán, Puebla, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 5 (2): 148-154.
- Cortéz, A., Camacho, J., & Leiva, F. (2013). Análisis multivariado del comportamiento espacial y temporal de la resistencia del suelo a la penetración. *Acta Agronómica*, 268-278.
- Dávila, B. (2006). Caracterización de la materia orgánica de suelos representativos de ecosistemas amazónicos del Perú, departamento de Ucayali, e influencia de su uso y manejo en el secuestro del carbono. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Del Valle-Arango, J.I., (2003). "Cantidad, calidad y nutrientes reciclados por la hojarasca fina de bosques pantanosos del Pacífico Sur Colombiano". *Interciencia*, 28: 443-449.
- Delgado H., Hernando, & Navas R., Gloria Elena, & Salamanca S., Carmen Rosa, & Chacón D., Adolfo (2009). Barbechos mejorados con leguminosas: una promisoría alternativa agroecológica para el manejo alelopático de malezas y mejoramiento del cultivo de arroz y maíz en los Llanos de Colombia. *Agronomía Colombiana*, 27(2),227-235.[fecha de Consulta 21 de Enero de 2020]. ISSN: 0120-9965. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1803/180316234011>
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Díaz G., Hernández T. & Cabello R. (2004). La rotación de cultivos, un camino a la sostenibilidad de la producción arrocera. *Cultivos Tropicales*, vol. 25, núm. 3, 2004, pp. 19-44. La Habana, Cuba.

Díaz-Chuquizuta P., Fachin-Ruíz G., Tello-Salas C. & Arévalo-López L. (04 de octubre de 2016). Carbono almacenado en cinco sistemas de uso de tierra, en la región San Martín Perú. *RINDERESU*, Vol. 1 (2), 57-67.

Dick A., M.A. Tabatabai. 1992. Significance and Potential Use of Soil Enzymes. En Meeting, FJB (Ed.). *Soil Microbial Ecology: Applications in Agriculture and Environmental Management*. Marcel Dekker, NY, USA, 95-127.

Doran, J. & Parkin, T. (1994). Defining and assessing soil quality. *Soil Science Society of America*, 677(35), 3-21.

Draghi L., Botta G., Balbuena R., Claverie J. & Rosatto H.. (2005). Diferencias de las condiciones mecánicas de un suelo arcilloso sometido a diferentes sistemas de labranza. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9, 120-124.

Estrada, I., Hidalgo, C., Guzmán, R., Almaraz, J., Navarro, H., & Etchevers, J. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. México: *Agrociencia*.

FAO, (2019). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido el 22 de septiembre de 2019 de Portal de Suelos de la FAO: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>

FAO. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile: Proyecto CHI/00/G32. FE

FAO. (2015). *El suelo es un recurso no renovable*. Viale delle Terme di Caracalla: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO. (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Itali.

Farfán F. & Urrego J. (2007). Descomposición de la hojarasca y liberación de nutrientes de *Coffea arabica*, *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis*, en sistemas agroforestales con café. *Cenicafé* 58(1):20-39.

Fassbender, H. W. (1987). *Química de suelos: con énfasis en suelos de América Latina*. San José, Costa Rica: IICA.

Fauzi, S. (2011). Revisión de técnicas estadísticas para el análisis de datos de gran dimensión. Universidad de Granada.

Ferraras, L; G Magra; P Besson; E Kovalevski & F García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 25(2): 159-172.

Ferreira, R., Álvarez, V., Félix de Barros, N., Fontes, R., Bertola, R., & Lima, J. C. (2007). Fertilidade do solo. Viçosa, Minas Gerais: SBCS.

Franco M., & Carro-Pérez M. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 177-190. Recuperado en 17 de diciembre de 2019, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000200005&lng=es&tlng=es.

Gaitán J. & Penón E. (2003). Efecto de la resistencia mecánica del suelo sobre la densidad de raíces finas de *Eucalyptus globulus*. *INvest. Agrar: Sist. Recur.* Vol. 12, Pág. 125-130.

Garbanzo-León, Gabriel, & Molina-Rojas, Eloy, & Cabalceta-Aguilar, Gilberto (2016). Efecto de la aplicación de enmiendas líquidas en el suelo y en el crecimiento de maíz bajo condiciones de invernadero. *Agronomía Costarricense*, 40(2), undefined-undefined. [fecha de Consulta 10 de octubre de 2019]. ISSN: 0377-9424. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=436/43648865003>

García C., Moreno J., Hernández M. & Polo A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Ciencia y Medio Ambiente*, 125-138.

García Y., Ramírez W. & Sánchez S., (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y forrajes*, 125-138.

García, D., Cárdenas, J., & Silva, A. (2018). Evaluación de sistemas de labranza sobre propiedades físico-químicas y microbiológicas en un Inceptisol. *Revista de ciencias agrícolas*, 34(1). Recuperado el 06 de octubre de 2019, de <http://www.scielo.org.co/pdf/rcia/v35n1/0120-0135-rcia-35-01-00016.pdf>

García, F., y González Sanjuán, M. F. 2013. La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Cómo estamos? IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. 9:2-7.

Gaspar-Santos I., González-Espinosa M., Ramírez-Marcial N. & Álvarez-Solís J. (2015). Acumulación y descomposición de hojarasca en bosques secundarios del sur de la Sierra Madre de Chiapas, México. *BOSQUE*, 36(3), 467-480.

Gerster G., Bacigaluppo S., Bodrero M. & F. Salvagiotti (2010). Secuencia de cultivos, descompactación mecánica y rendimiento de soja en un suelo degradado de la región pampeana. - INTA EEA OLIVEROS.

Gibert, K., Izquierdo, J., Sánchez, M., Hamilton, S., Rodríguez, I., & Holmes, G. (2018). Which method to use? An assessment of data mining methods in Environmental Data Science. *Environmental Modelling and Software*, 3-27.

Gomes de Sousa, D. M., de Miranda, L. N., de Oliveira, S., A. (2007) Acidez do solo e sua Correção en: Ferreira, N. R., Alvarez, V. H., Fontes, R, L., Cantarutti, R. B., Lima, N. J. C. Fertilidade do solo pp. 204-274. Viçosa - Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

González, C., Herrera, M., Iglesias, C., (2009) Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola.

Greer K. & Schoenau J. Chapter 14: Toward a framework for soil quality assessment and prediction. *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*, Edited by E.G. Gregorich, M.R. Carter, 1997, elsevier, págs: 447.

Gregorich E., Carter M., Doran J. & Pankhurst C. Chapter 4: Biological attributes of soil quality. *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*, Edited by E.G. Gregorich, M.R. Carter, 1997, elsevier, págs.: 447.

Guerif, J; G Richard; C Dürr; JM Machet; S Recous & S Seoane. 2001. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.* 37: 877-887.

Gustin-Gomez, Y., Morales-Jamioy, N., & Ortiz-Estrella, C. (2014). Evaluación de la calidad del suelo por medio de indicadores en sistemas de manejo frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), granadilla (*Passiflora ligularis*), bosque y chagras tradicionales en el municipio de Sibundoy Putumayo. Sibundoy, Putumayo: Instituto Tecnológico del Putumayo.

Gutiérrez J., Cardona W., & Monsalve O. (2017). Potencial en el uso de las propiedades químicas como indicadores de calidad de suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(2), 450-458. <https://dx.doi.org/10.17584/rcch.2017v11i2.5719>

Gutiérrez N. (2000). Efecto del manejo del suelo sobre la densidad aparente y la resistencia mecánica a la penetración. UNNE; [consultado 2019 sep]. www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2000/5_agrarias/a_pdf/a_020.pdf.

Heil, D., & Sposito, G. Chapter 3: Chemical attributes and processes affecting soil quality. *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*, Edited by E.G. Gregorich, M.R. Carter, 1997, elsevier, págs.: 447.

Herrera-Pineda, L. (2017). Manejo del suelo como recurso en asociaciones del sector agropecuario en el municipio de La Dorada, departamento de Caldas. Bogotá D.C: Universidad Santo Tomás.

Ibarra, D., Ruíz, J., González, D., Flores, J., & Díaz, G. (2009). Distribución espacial del pH de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. México: Agric. Téc. Méx vol.35 no.3.

IGAC. (2017). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Retrieved from Uso inadecuado del suelo en Colombia: un generador de Gases Efecto Invernadero. Tomado de URL: <https://noticias.igac.gov.co/es/contenido/uso-inadecuado-del-suelo-en-colombia-un-generador-de-gases-efecto-invernadero-0>

IICA. (2007). Aportes de la Ciencia y la Tecnología al Manejo Productivo y Sustentable de los suelos del Cono Sur. Montevideo: PROCISUR.

Isaac, S.R. y Nair, M.A., 2006. "Litter dynamics of six multipurpose trees in a homegarden in Southern Kerala, India". *Journal of Agroforestry System*, 67: 203-213.

Jamióy, D., Menjivar, J., & Rubiano, Y. (2014). Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Acta Agron*, 302-307.

Jiménez, R., & González, V. (2006). La calidad de suelos como medida para su conservación. *Edafología*, 125-138.

López, J., González, H., Ramírez, R., Cantú, I., Gómez, M., Pando, M., & Estrada, A. (2013). Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres sitios del estado de Nuevo León, México. *Polibotánica* no.35.

Lorenzo-Acosta Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XL, núm. 2, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Ciudad de La Habana, Cuba. pp. 10-17.

Macías-Socarrás I., Barrera-Amat, A., Gaskin-Espinosa B., de la Rosa-Andino A., & Aguilera-Corrales Y. (2017). Evaluación de la compactación de un Vertisol dedicado al cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* Mill). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(2), 38-47. Recuperado en 14 de octubre de 2019, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542017000200005&lng=es&tlng=es.

Márquez J., Rodríguez J. & Marín M. (diciembre 2017). Estado físico-químico del suelo en pasturas con y sin maní forrajero (*Arachis pintoi*), URACCAN-Siuna.

Revista Universitaria del Caribe, 2, 113-120.

Martin, N. & Adad, I. (2006). Generalidades más importantes de las ciencias del suelo. En: Disciplina Ciencias del Suelo. Tomo I. Pedología. Universidad Agraria de La Habana. Cuba. 504 p.

Mengel K. & Kirkby A. (2000). Principios de nutrición vegetal. 4ta edición. Instituto Internacional del Potasio. Basilea, Suiza.

Momo, F., Falco, L., & Craig, E. (2003). Las lombrices de tierra como indicadores del deterioro del suelo. Revista de Ciencia y Tecnología, 55-63.

Mora, J. (2006). La actividad microbiana: un indicador integral de la calidad del suelo. Manizales.

Moreno, J. (2018). Laboratorio de suelos Terrallanos. Resultados de análisis químico de los suelos. Villavicencio.

Munera, G., & Meza, D. (2014). El fósforo elemento indispensable para la vida vegetal. Pereira: universidad tecnológica de Pereira.

Murillo, J., Rodríguez, G., Roncallo, B., Amparo Rojas, Leila, & Bonilla, Ruth Rebeca. (2014). Efecto de la aplicación de prácticas sostenibles en las características físicas, químicas y microbiológicas de suelos degradados. Pastos y Forrajes, 37(3), 270-278. Recuperado en 06 de octubre de 2019, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942014000300003&lng=es&tlng=es.

Navarrete A., Vela G., Blanco J. & Rodríguez M. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. Contactos, 2937.

Navarro, S., Navarro, G. (2003). Química agrícola, Madrid España, Aedos s.a. <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=HufLwjgirtwC&oi=fnd&pg=PR1&dq=accion+de+los+microorganismos+en+el+suelo&ots=7F0s66y8&sig=xrMlqGmDbVmjDiFsbogUwL7Ezds#v=onepage&q=acción%20de%20los%20microorganismos%20en%20el%20suelo&f=false>

Neary, D.G., K.C. Ryan y L.F. De Bano. 2005. Wildland fire in ecosystems. Effects of fire on soil and water. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. General Technical Report RMRS-GTR-42-vol 4, Ogden, UT, USA.

Nivia, J. G. (2014). Efecto del uso y ocupación en las propiedades físicas y químicas en un suelo del piedemonte llanero. Universidad Nacional de Colombia.

Núñez, J. 2000b. Fundamentos de edafología. 2ª ed. San José, CR, EUNED. 185 p.
Olivares, B. (2014). Aplicación del Análisis de Componentes Principales (ACP) en

el diagnóstico socioambiental. Caso: sector Campo Alegre, municipio Simón Rodríguez de Anzoátegui.

Orduz, J., Calderón, C., Bueno, G., & Baquero, J. (2011). Evaluación de gramíneas y leguminosas forrajeras como coberturas y su influencia en el control de malezas en el establecimiento de cítricos en el piedemonte del Meta. *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.*, 12(2). Recuperado el 12 de noviembre de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/247164477_Evaluacion_de_gramineas_y_leguminosas_forrajeras_como_coberturas_y_su_influencia_en_el_control_de_malezas_en_el_establecimiento_de_citricos_en_el_piedemonte_del_Meta

Paredes, D.; D'amico, J.P.; Roba, M.; Romito, A.; Florean, R.; Cura, J.; Tesouro, M.O. 2009. Calibración del índice de cono de un suelo argiudol vértico por humedad y profundidad. X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del Mercosur. Rosario, Santa Fe, Argentina.

Parra-González, S. D., & Rodríguez-Valenzuela, J. (2017). Determination of the Soil Quality Index by Principal Component Analysis in Cocoa Agroforestry System in the Orinoco Region, Colombia. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 10(3), 1-8.

Parsons, A., P. Robichaud, S. Lewis, C. Napper y J. Clark. 2010. Field guide for mapping post-fire soil burn severity. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-243. Washington D.C., USA.

Patterson J. 1977. Soil compaction-effects on urban vegetation. *Arboriculture* 3:161-167.

Pellegrini, A., Sucunza, F., Millán, G., & Vázquez, M. (2016). Comparación de metodologías analíticas para diagnosticar suelos con enmiendas básicas en el ámbito templado argentino. *Ciencia del suelo*, 34(1). Recuperado el 05 de septiembre de 2019, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672016000100001#tab1

Pérez, C. (2004). *Técnicas de Análisis Multivariante de Datos, Aplicaciones con SPSS®*. Madrid: Pearson Educación S.A.

Pires Da Silva, A., S. Imhoff, and M. Corsi. 2002. Soil compaction versus cow-stocking rates on an irrigated grazing system. In: Pagliai, M., and R. Jones (eds). *Sustainable Land Management – Environmental Protection. A Soil Physical Approach*. *Adv. in GeoEcology* 35: 397–406.

Portillo, A. (2015). Análisis multivariado para la caracterización de zonas agroecológicas según factores edafoclimáticos en las fincas productoras de banano del Urabá Antioqueño. Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle.

Prieto-Méndez, J., Prieto-García, F., Acevedo-Sandoval, O., & Méndez-Marzo, M. (2013). Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del estado de Hidalgo, México. *agronomía mesoamericana*, 83-91.

Pulido, M. (2014). Indicadores de calidad del suelo en áreas de pastoreo. Badajoz, España: Universidad de Extremadura.

Pytko, J. (2003) Analysis of soil stress and deformation under off road vehicles. En: Proceedings of the 9th European Conference of the ISTVS, 425–432.

Quintana, J., Blandón, J., Flores, A., & Mayorga, E. (1983). Manual de fertilidad para suelos de Nicaragua. Managua: Primer Territorio Indígena Libre de América. Ithaca.

Ramírez- Regalado V. (2000). Química 2. Tema 3: Floculación. Editorial Patria.
Rivera, Y., Leonardo, M., Herrera, M., & Romero, H. (2015). La toxicidad por aluminio (Al³⁺) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de las palmas de aceite. Palmas.

Rodríguez, C., Herrera, O., & Madero, E. (2000). efecto de la labranza en las propiedades físicas de un Vertisol Ustico y en la producción de sorgo, en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta agronómica*, 50(1).

Romero Rojas J.A. (1999) Potabilización del agua. Alfaomega, México. 327 pp.
Rosenzweig, C., & Hillel, D. (2000). Soils and Climate Change: Challenges and opportunities. *Soils science an interdisciplinary approach to soil research*. 165(1), 47-59.

Saltos-Moncayo J. (1998). Caracterización de la Acidez de Suelos Volcánicos del Ecuador. Maracay, Venezuela: Universidad Central.

Sanclemente Reyes, O. E. (2019). Efecto del cultivo de cobertura: *Mucuna pruriens*, en algunas propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo *Typic haplustalfs*, cultivado con maíz (*Zea mays* L.) en zona de ladera del municipio de Palmira, Valle..Universidad Nacional de Colombia, 14.

Santamarina J.C., Klein K.A. y Fam M.A. (2001). *Soils and waves*. Wiley, Nueva York. 488 pp.

Six, J., E. T. Elliott, and K. Paustian. (2000). Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1042-1049.

Soane, B. D., P. S. Blackwell, P. S. Dickson, and D. J. Painter. (1980). Compaction by agricultural vehicles: a review. I. Soil and wheel characteristics. *Soil and Tillage*

Res. 1: 207–237.

Thompson, LM; Troeh, FR. (1998). El suelo y su fertilidad. 4 ed. Barcelona, España, Editorial Reverte.

Toledo. M., (2016). Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de honduras. IICA. Tegucigalpa, Honduras. 152 p.

Topp G., Reynolds W., Cook F., Kimby J. & Carter M. Chapter 2: Physical attributes of soil quality. Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health, Edited by E.G. Gregorich, M.R. Carter, 1997, elsevier, págs: 447.

Úbeda, X. y L. Outeiro. (2009). Physical and chemical effects of fire on soil. pp. 105-132. En: Cerdà, A. y P.R. Robichaud (eds.). Fire effects on soils and restoration strategies. Science Publishers, Estfield, NH, USA. Doi: 10.1201/9781439843338-c4

Vallejo, V. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. Scielo, 83-99.

Villalobos-Martín F. & Feres-Castiel E. (2017). Fitotecnia: Principios de agronomía para una agricultura sostenible. España: Gráficas Summa (Llanera, Asturias).

Villazón, J. A, Martín, G, Rodríguez, Y, & Cobo, Yakelin. (2015). Resistencia a la penetración en un Vertisol Crómico con diferentes usos, manejos y sitios de muestreo. Pastos y Forrajes, 38(2), 162-169. Recuperado en 14 de octubre de 2019, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942015000200002&lng=es&tlng=es.

Wagner, M., & Medina, G. (1998). Técnicas de evaluación de compactación de suelos. CENIAP.

Weerakkody, J. & D. Parkinson. (2006b). Leaf litter decomposition in an upper montane rainforest in Sri Lanka. Pedobiologia 50: 387-395.

Woods W., Teixeira W., Lehmann J., Steiner C., WinklerPrins A. & Rebellato L. (2008). Tierras oscuras amazónicas: la visión de Wim Sombroek. NY, USA: Springer.

Zaconeta, F. (2000). Identificación de plantas locales como indicadoras de calidad de suelos en parcelas agrícolas, en la microcuenca Luquigüe, Yoro, Honduras. Honduras.

12. ANEXOS

12.1 Análisis de la varianza de las variables evaluadas

Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
ICS	23	0,78	0,76	20,47	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,63	2	0,31	34,96	<0,0001
LOTE	0,63	2	0,31	34,96	<0,0001
Error	0,18	20	0,01		
Total	0,81	22			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,12509

Error: 0,0090 gl: 20

LOTE Medias n E.E.

Ci 0,34 10 0,03 A

Ca 0,37 6 0,04 A

G 0,71 7 0,04 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Análisis de la varianza

pH - Agua

Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
pH - Agua	23	0,81	0,79	8,57	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	12,61	2	6,30	42,44	<0,0001
LOTE	12,61	2	6,30	42,44	<0,0001
Error	2,97	20	0,15		
Total	15,58	22			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,50951

Error: 0,1486 gl: 20

LOTE Medias n E.E.

Ca 3,94 6 0,16 A

Ci 4,05 10 0,12 A

G 5,62 7 0,15 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

pH KCl

Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
pH KCl	23	0,59	0,55	8,03	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2,99	2	1,50	14,48	0,0001
LOTE	2,99	2	1,50	14,48	0,0001
Error	2,07	20	0,10		
Total	5,06	22			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,42489

Error: 0,1033 gl: 20

LOTE Medias n E.E.

Ca 3,53 6 0,13 A

Ci 3,95 10 0,10 B

G 4,48 7 0,12 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

da (gr/cm3)

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
da (gr/cm3)	23	0,80	0,78	5,93

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	0,54	2	0,27	40,53	<0,0001
LOTE	0,54	2	0,27	40,53	<0,0001
Error	0,13	20	0,01		
<u>Total</u>	<u>0,68</u>	<u>22</u>			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,10808

Error: 0,0067 gl: 20

LOTE Medias n E.E.

Ci 1,26 10 0,03 A

Ca 1,31 6 0,03 A

G 1,61 7 0,03 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

M.O

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
M.O	23	0,81	0,79	35,50

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	184,74	2	92,37	41,67	<0,0001
LOTE	184,74	2	92,37	41,67	<0,0001
Error	44,33	20	2,22		
<u>Total</u>	<u>229,07</u>	<u>22</u>			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1,96816

Error: 2,2167 gl: 20

LOTE Medias n E.E.

Ci 1,74 10 0,47 A

Ca 3,44 6 0,61 A

G 8,35 7 0,56 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

P

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
P	23	0,31	0,24	90,17

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	8334,33	2	4167,16	4,47	0,0249
LOTE	8334,33	2	4167,16	4,47	0,0249
Error	18650,00	20	932,50		
<u>Total</u>	<u>26984,32</u>	<u>22</u>			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=40,36786

Error: 932,4999 gl: 20

LOTE Medias n E.E.

Ci 12,36 10 9,66 A

Ca 46,68 6 12,47 A B

G 53,60 7 11,54 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

RP

Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
RP	23	0,36	0,29	21,63	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1,53	2	0,77	5,51	0,0124
LOTE	1,53	2	0,77	5,51	0,0124
Error	2,78	20	0,14		
Total	4,31	22			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,49303

Error: 0,1391 gl: 20

LOTE Medias n E.E.

Ca	1,29	6	0,15	A
G	1,83	7	0,14	B
Ci	1,91	10	0,12	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

pt

Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
pt	23	0,80	0,78	6,70	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	801,48	2	400,74	40,53	<0,0001
LOTE	801,48	2	400,74	40,53	<0,0001
Error	197,77	20	9,89		
Total	999,25	22			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=4,15698

Error: 9,8886 gl: 20

LOTE Medias n E.E.

G	38,08	7	1,19	A
Ca	49,74	6	1,28	B
Ci	51,46	10	0,99	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Delta pH

Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
? pH	23	0,82	0,81	43,78	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4,47	2	2,24	47,06	<0,0001
LOTE	4,47	2	2,24	47,06	<0,0001
Error	0,95	20	0,05		
Total	5,42	22			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,28810

Error: 0,0475 gl: 20

LOTE Medias n E.E.

G	-1,14	7	0,08	A
Ca	-0,42	6	0,09	B
Ci	-0,10	10	0,07	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

SCO

Análisis de la varianza

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² A_i</u>	<u>CV</u>
SCO	22	0.95	0.94	18.88

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	48780.51	2	24390.26	171.02	<0.0001
LOTE	48780.51	2	24390.26	171.02	<0.0001
Error	2709.69	19	142.62		
Total	51490.20	21			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=16.30643

Error: 142.6151 gl: 19

LOTE Medias n E.E.

Ci	25.27	10	3.78	A
Ca	51.76	6	4.88	B
G	138.04	6	4.88	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)