



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Efecto del uso y ocupación en las propiedades físicas y químicas en un suelo del piedemonte llanero

Janeth González Nivia

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2014

Efecto del uso y ocupación en las propiedades físicas y químicas en un suelo del piedemonte llanero

Janeth González Nivia

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería- Ingeniería Agrícola

Director:

Ing. Agr. M. Sc. Doctor Jesús Hernán Camacho Tamayo

Co-director

Agrologo M.Sc Jorge Alberto Sánchez Espinosa

Línea de Investigación:

Adecuación de tierras y manejo sostenible

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2014

Nota de Aceptación

Ing. Agr. Doctor Bernardo Castillo Herrán

Agrólogo MSc. Edgar Álvaro Ávila Pedraza

Ing. Agr. Doctor Jesús Hernán Camacho Tamayo

Agrólogo MSc. Jorge Alberto Sánchez Espinosa

Bogotá D.C., 2014

*A mis padres José y Raquel, mi hermano
William, y a mi negro.*

*Gracias por el apoyo y estímulo brindados
para llevar a cabo este logro.*

Agradecimientos

El autor agradece al Centro de Investigación La Libertad de – CORPOICA, por el apoyo en el trabajo de campo para realizar este estudio, al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, proyecto línea Base de Indicadores de Calidad del Suelo por el financiamiento parcial del estudio, así como a la Subdirección de Agrología en especial al Laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi por el apoyo en la realización de los análisis de Laboratorio de esta investigación.

Al igual, mi más profundo agradecimiento al doctor Jesús Hernán Camacho Tamayo, mi director de tesis y tutor, con quien conté permanentemente para su apoyo y acompañamiento a lo largo de estos estudios.

Por otro lado a la profesora Yolanda Rubiano Sanabria, al doctor Jorge Alberto Sánchez Espinosa (IGAC) y al profesor Edgar Ávila Pedraza (Universidad del Tolima), por su apoyo y sugerencias.

Igualmente a Antonio José Patiño Escobar, Jaime Humberto Bernal, Andrés Felipe Rodríguez, Milton Alarcón, Javier Martín, Camilo Ramírez, Jorge Andrade, por su apoyo incondicional.

Resumen

La calidad de los suelos está influenciada por el uso/ocupación, afectando las propiedades químicas y físicas a través del inadecuado manejo de enmiendas, fertilizantes, riego y mecanización. Para determinar los cambios en las propiedades físicas y químicas se realizó muestreo en 10 usos/ocupaciones diferentes (cultivos transitorios, caucho, plátano-maíz, palma (18 años), pasto toledo, pasto brequearía, cítricos, cultivo de mango, plantación forestal y cultivo de marañón) en un suelo oxisol del piedemonte llanero Colombiano. Para cada uso/ocupación se realizó muestreo para los dos primeros horizontes con cuatro (4) repeticiones; se tomó muestras alteradas e inalteradas para llevar al Laboratorio, en capo se realizaron la pruebas de infiltración y resistencia a la penetración.

Los datos obtenidos fueron analizados mediante análisis de varianza para comprobar los efectos sobre las medias de las variables de respuesta medidas. Para detallar la diferencia entre usos/ocupaciones se utilizaron comparaciones o pruebas de rango múltiples, por la prueba de Duncan, De igual forma se halló una correlación de Pearson entre las propiedades en estudio y por último se sometieron los datos a análisis Cluster y de Componentes Principales.

Las propiedades determinadas fueron desde el punto de vista físico textura, densidad aparente, densidad real, retención de humedad, conductividad hidráulica, estabilidad de agregados, diámetro medio ponderado, porosidad, infiltración y resistencia a la penetración; para las químicas carbono orgánico, pH, acidez intercambiable, capacidad de intercambio catiónico, fosforo intercambiables, calcio, magnesio y sodio.

La influencia del uso/ocupación se presentó en el horizonte superficial, tal vez por las prácticas de manejo implementadas para la mejora nutricional con el fin de suministrar los requerimientos del cultivo.

Palabras clave: Calidad de suelo, indicadores, manejo, y análisis de componentes principales.

Abstract

The soil quality is influenced by the use/occupation, affecting the chemical and physical properties through improper handling of amendments, fertilizers, irrigation and mechanization. To determine changes in physical and chemical sampling was performed in 10 uses / occupations different (annual crops, rubber, banana, corn, palm (18 years), pasture toledo, brequearía grass, citrus, mango cultivation, forest plantation and cashew cultivation) in a Colombian oxisol soil piedmont plains. For every use / occupancy for the first two sampling horizons with four (4) repeats was performed; altered samples were taken and it unchanged to bring the Laboratory in the infiltration tests capo and penetration resistance were performed.

The data obtained were analyzed by analysis of variance to test the effects on the means of the response variables measured. To detail the difference between uses/occupations comparisons or multiple range tests were used to test Duncan Similarly Pearson correlation between the properties under study and finally the data were subjected to analysis of Cluster Components and was found Top.

The properties were determined from the physical point of view texture, bulk density, true density, moisture retention, hydraulic conductivity, aggregate stability, mean weight diameter, porosity, infiltration and penetration resistance; organic carbon for chemical, pH, exchangeable acidity, cation exchange capacity, exchangeable phosphorus, calcium, magnesium and sodium.

The influence of the use / occupation appeared in the surface horizon, perhaps management practices implemented to improve nutrition in order to supply crop requirements.

Keywords: Soil quality, indicators, management, and principal component analysis

Contenido

	Pág.
Resumen y Abstract	IX
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XV
Introducción	1
1. Marco teórico	5
1.1 Calidad de Suelo.....	5
1.1.1 Indicadores de Calidad	7
1.1.2 Evaluación de la Calidad de Suelo	8
1.2 Propiedades Físicas de los Suelos	8
1.2.1 Textura	9
1.2.2 Densidad Aparente.....	10
1.2.3 Densidad Real.....	11
1.2.4 Retención de Humedad.....	11
1.2.5 Porosidad	13
1.2.6 Estabilidad Estructural.....	14
1.2.7 Infiltración.....	14
1.2.8 Conductividad Hidráulica	15
1.2.9 Resistencia a la Penetración	16
1.3 Propiedades Químicas de los Suelos.....	16
1.3.1 pH	16
1.3.2 Fosforo Disponible:.....	17
1.3.3 Capacidad de Intercambio Catiónico – CIC	18
1.3.4 Bases	18
1.3.5 Carbono Orgánico	19
1.4 Suelos de la Altillanura.....	19
2. Materiales y métodos	21
2.1 Características del Área de Estudio	21
2.2 Selección de los usos y ocupaciones del suelo y sitios de muestreo	24
2.3 Mediciones y toma de muestras.....	26
2.3.1 Infiltración.....	27
3. Modelo de Kostiakov	27
2.3.2 Resistencia a la Penetración	29
2.4 Análisis de laboratorio.....	30
2.4.1 Propiedades físicas	30

2.4.1.1 Granulometría por pipeta	30
2.4.1.2 Conductividad Hidráulica.....	31
2.4.1.3 Retención de Humedad.....	32
2.4.1.4 Estabilidad Estructural.....	35
2.4.1.5 Porosidad.....	37
2.4.2 Propiedades Químicas.....	37
2.4.2.1 pH.....	37
2.4.2.2 Acidez intercambiable	37
2.4.2.3 Carbono Orgánico.....	38
2.4.2.4 Fosforo Disponible	39
2.4.2.5 Capacidad de intercambio catiónico - CIC.....	40
2.4.2.6 Bases.....	41
2.4.3 Propiedades Mineralógicas	43
2.4.3.1 Fracción Arcilla.....	43
2.4.3.2 Fracción Arena.....	45
2.5 Análisis estadístico	46
3. Análisis de resultados y discusión.....	49
3.1 Descripción morfológica de los usos/ocupaciones evaluados para los dos primeros horizontes del suelo.....	49
3.2 Análisis de las propiedades de los suelos.....	54
3.2.1 Propiedades Físicas de los Suelos	54
3.2.1.1 Textura.....	54
3.2.1.2 Densidad Aparente	57
3.2.1.3 Densidad Real	58
3.2.1.4 Retención de Humedad.....	59
3.2.1.5 Infiltración.....	62
3.2.1.6 Conductividad Hidráulica.....	64
3.2.1.7 Resistencia a la penetración	66
3.2.1.8 Distribución de Poros	67
3.2.3 Propiedades Mineralógicas de los suelos	81
3.3 Análisis de Correlación	85
3.4 Análisis clúster.....	90
3.5 Propuesta Indicadores	97
3.5.1 Físicos	97
3.5.2 Químicos.....	98
4 Conclusiones y recomendaciones	99
Bibliografía	101

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Diagrama de Calidad de Suelo	6
Figura 1-2. Triangulo textural	9
Figura 1-3: Unidades de suelos del piedemonte depositacional	20
Figura 2-2: Balance Hídrico La Libertad	21
Figura 2-2: Mapa de Suelos La Libertad	22
Figura 2-3: Prueba de infiltración	25
Figura 2-4: Medición resistencia a la penetración	27
Figura 2-5: Equipo Yoder	34
Figura 2-6: Equipo Absorción Atómica	40
Figura 2-7: Equipo Difracción de rayos x	43
Figura 3-3: Perfiles de los suelos estudiados	47
Figura 3-2: Curva de retención de humedad para diferentes usos/ocupaciones	59
Figura 3-3. Infiltración básica y acumulada para diferentes usos/ocupaciones	61
Figura 3-4: Resistencia a la penetración para diferentes usos/ocupaciones	64
Figura 3-5. Dendograma de agrupamiento de las propiedades física por uso/ocupación para los horizontes 1 y 2	78
Figura 3-6. Dendograma de agrupamiento de las propiedades químicas por uso/ocupación para los horizontes 1 y 2	79
Figura 3-7. Componentes principales obtenidos para las propiedades física por uso/ocupación para los horizontes 1 y 2	80

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1.1: Densidad aparente de suelos con diferentes materiales	10
Tabla 1.2: Densidad real o de sólidos de algunos componentes	11
Tabla 1.3: Clasificación de la velocidad de Infiltración	15
Tabla 1.4: Clasificación de la Conductividad hidráulica (K) según Konke para suelos saturados	15
Tabla 1.5: Calificación de la reacción del suelo	17
Tabla 1.6: Contenidos óptimos de Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ y K ⁺ , de acuerdo a la CIC	18
Tabla 2-1. Usos/Ocupaciones seleccionados.	23
Tabla. 3-1. Comportamiento de la Fracción Arena de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	52
Tabla. 3-2. Comportamiento de la Fracción Limo de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	53
Tabla. 3-3. Comportamiento de la Fracción Arcilla de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	54
Tabla. 3-4. Comportamiento de la Densidad Aparente de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	55
Tabla. 3-5. Comportamiento de la Densidad Real de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	56
Tabla 3-6. Datos de retención de Humedad para el horizonte 1, acuerdo al uso y ocupación.	57
Tabla 3-7. Datos de retención de Humedad para el horizonte 2, acuerdo al uso y ocupación.	58
Tabla. 3-8. Comportamiento de la Lámina aprovechable de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	59
Tabla. 3-9. Comportamiento de la Infiltración básica del horizonte 1 por uso/ocupación	60
Tabla 3-10. Comportamiento de la Conductividad Hidráulica de los horizontes 1 y 2 por Uso	62
Tabla. 3-11. Comportamiento de la Resistencia a la Penetración de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	63
Tabla. 3-12. Comportamiento de la Macroporosidad de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	65
Tabla. 3-13. Comportamiento de la Mesoporosidad de los horizontes 1 y 2	65

por uso/ocupación	
Tabla. 3-14. Comportamiento de la Microporosidad de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	66
Tabla. 3-15. Comportamiento de la Porosidad Total de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	67
Tabla 3-16. Comportamiento de la Estabilidad de Agregados de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	68
Tabla. 3-17. Minerales que componen la Fracción Arena para los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	70
Tabla. 3-18. Minerales que componen la Fracción Arcilla para los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación	71
Tabla 3-19. Correlaciones de Pearson de las propiedades Físicas para el horizonte 1	73
Tabla 3-20. Correlaciones de Pearson de las propiedades Físicas para el horizonte 2	75
Tabla 3-21. Correlaciones de Pearson de las propiedades químicas para el horizonte 1	76
Tabla 3-22. Correlaciones de Pearson de las propiedades químicas para el horizonte 2	77
Tabla 3-23. Valores del análisis de componentes principales de las propiedades físicas para el horizonte 1	80
Tabla 3-24. Valores del análisis de componentes principales para el horizonte 2	81
Tabla 3-25. Valores del análisis de componentes principales de las propiedades químicas	83

Introducción

La productividad del suelo, junto con la conservación de la fertilidad, es uno de los elementos fundamentales para la sustentabilidad de los agroecosistemas, para lo cual el uso de los indicadores de calidad suministra información sobre el comportamiento y variación de las propiedades de los suelos.

La identificación de los cambios en las propiedades ayuda a realizar una mejor evaluación de los factores ambientales, con el fin de identificar y evaluar los resultados de la aplicación de los acuerdos internacionales y de programas de acción, así como orientar políticas nacionales y regionales.

El aumento en la producción agrícola para satisfacer la demanda futura de alimentos e insumos agroindustriales, ejercerá aún más presión sobre los recursos naturales. El uso de indicadores permiten evaluar la situación actual de la capacidad de producción agrícola de las tierras y su cambio en el tiempo, insumo necesario para la promoción de prácticas de manejo con el fin de mantener o mejorar la productividad del suelo propender por un uso sostenible de los recursos naturales. Estos indicadores de calidad del suelo se deben considerar a partir de un enfoque integral, orientado a sistemas productivos. Los indicadores son elaborados a partir de las diferencia de rendimiento, entre el real y el obtenido con óptimas prácticas de gestión, o a partir de rendimientos determinados por los recursos naturales, a partir de las características y del balance de nutrientes del suelo, es decir, la tasa de fertilidad, la que es dinámica en el tiempo. En estos niveles de producción no se incorporan los aspectos socio-económicos, que pueden obstaculizar la gestión agrícola, en su esfuerzo por mejorar la inadecuada fertilidad de los suelos, disponibilidad de agua y presencia de plagas y enfermedades (Bindraban *et al.*, 2000).

El inadecuado uso del suelo, ya sea por labranza, mal manejo del agua de riego o por falta de rotación de cultivos, lleva a que se presenten limitantes del suelo, que afectan la productividad. La intervención del hombre ha conllevado a que estos limitantes se acentúen debido a la preocupación de aumentar la productividad del suelo, lo cual conlleva al uso indiscriminado de insumos externos que contaminan, al igual que las aguas con que se riegan los cultivos, que en ocasiones no son de las calidades apropiadas para su uso agrícola. El sistema de laboreo y la rotación de cultivos son prácticas de manejo con reconocida capacidad de modificar la calidad del suelo. La implementación de sistemas de

producción que incluyen rotación anual de cultivos con pasturas perennes, mejoran los indicadores de calidad del suelo y reducen la erosión.

La calidad del suelo se mira generalmente desde tres aspectos: físicos, químicos y biológicos, que se consideran importantes para la evaluación del grado de degradación de los suelos o los procesos de mejoramiento, y para identificar las prácticas de gestión sostenible del suelo o de todos los problemas físicos que puedan suceder. Para Dexter & Czyz (2000), estos aspectos tienen una característica común en el suelo relacionada con la estructura, por lo que consideran que una forma de evaluar la calidad física del suelo, es la integración de las propiedades, a partir de lo que se puede definir un índice que pondera las propiedades físicas del suelo.

Para Batista Cruz *et al.* (2004), el término calidad del suelo se empezó a acotar al reconocer las funciones del suelo: (1) promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible); (2) atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); y (3) favorecer la salud de plantas, animales y humanos. Al desarrollar este concepto, también se considera que el suelo es el sustrato básico para las plantas; debido a que capta, retiene y libera agua y es un filtro ambiental efectivo (Larson & Pierce, 1991; Buol, 1995). En consecuencia, este concepto refleja la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema del cual forma parte y con el que interactúa (Parr *et al.* 1992).

Según Astier *et al.* (2002), un suelo de calidad es aquél que tiene la capacidad de producir cultivos sanos y nutritivos en forma sostenida a largo plazo, y de promover, al mismo tiempo, la salud humana y animal, sin detrimento de los recursos naturales o del medio ambiente circundante. Doran & Jones (1996) prefieren considerar el término calidad de suelos y a sus descriptores a partir de las características físicas, químicas y biológicas inherentes a este. Para Schloter *et al.* (2003), la calidad del suelo se define como la capacidad continua de este para funcionar como un sistema vivo dentro de los límites del ecosistema y el uso del suelo, en el cual se debe mantener la productividad biológica, promover la calidad del aire y el agua, así como mantener las plantas, animales y la salud humana.

Para Shukla *et al.* (2005), los factores dominantes en la evaluación de la calidad del suelo varían con la profundidad, autores que concluyeron que la aireación del suelo es un factor de discriminación entre 0 y 10 cm y la agregación del suelo fue el factor más importante entre 10 y 20 cm de profundidad, en un estudio realizado en New México. Para cada factor, la medida dominante fue el contenido de carbono orgánico. Si se desea considerar solo una propiedad del suelo para vigilar los cambios de calidad en el tiempo, la más indicada es el contenido de carbono orgánico.

Para caña de azúcar, Hartemink (2004), evaluó la sostenibilidad del manejo del suelo, que se llevó a cabo a partir de la medición de la variación de sus propiedades, a partir de la información histórica disponible, en los sitios donde no se contaba con información se tomaron muestras para la determinación de las características físicas y químicas del suelo, en suelos cultivados en caña de azúcar y sin cultivar. Los análisis de los datos arrojaron cambios significativos que fueron atribuibles al efecto del cultivo de caña de azúcar sin rotación.

Los cambios de uso del suelo son generalmente conscientes, a partir respuestas propias de los seres o sociedades humanas a los cambios en las condiciones biofísicas o de la sociedad. Es por tanto, un indicador de respuesta el que refleja cómo y en qué medida la sociedad responde a esos cambios, o como se adapta a las condiciones ambientales variables. No se excluye la posibilidad de que algunos cambios de uso de la tierra puedan a su vez constituir una presión para los cambios en el estado del ambiente, aspecto implícito en la naturaleza de la compleja red que las causa.

Para algunos autores como Hernández *et al.*, 2007, El indicador más usado de calidad del suelo es el contenido de materia orgánica (MO), pero aproximaciones basadas sobre la caracterización de varias fracciones de MO (activas, pasivas y lentas) se han reconocido como buenos indicadores de calidad del suelo y resiliencia, Además de que el mantenimiento de la calidad del suelo es crítico para un ambiente sostenible; así, es necesario una buena selección de indicadores de calidad del suelo para una rápida respuesta al cambio, clara discriminación entre los sistemas de manejo, mayor sensibilidad al estrés y a la restauración ambiental, y reflejo de la variabilidad espacial y temporal (Gil-Stores *et al.*, 2005).

Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información relevante. Los indicadores deben ser preferiblemente variables cuantitativas, aunque pueden ser cualitativas o nominales o de rango u ordinales, especialmente cuando no hay disponibilidad de información cuantitativa, o el atributo no es cuantificable, o cuando los costos para cuantificar son demasiado elevados. Las principales funciones de los indicadores 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. Cantu Et al., 2007

Se acepta mayoritariamente que la medida de la calidad del suelo se puede establecer a partir de indicadores que reflejen procesos esenciales (físicos, químicos y biológicos) que ocurren en el suelo, cuyos cambios son sensibles de

detectar en el espacio y el tiempo, estableciendo con claridad una relación causa-efecto. A partir de tales indicadores se puede obtener un índice de calidad del suelo (ICS o SQI en su terminología inglesa) para conocer su estado. La propuesta de índices aparece con bastante frecuencia en la literatura científica y varía según la percepción que tienen los diferentes autores en la identificación de índices relevantes.

Los llanos Orientales es una de las regiones más extensas del país, con el limitante que sus tierras no cuenta con la condiciones adecuadas para ser utilizadas en la agricultura, debido a la acidez de sus suelos, los altos contenidos de aluminio y bajos niveles de materia orgánica.

Según Amézquita, (2001), Para mejorar las condiciones de estos suelos y lograr producir de manera económica y sostenible, es necesario desarrollar una capa arable, para poder mejorar el suelo física, química y biológicamente. Con el mejoramiento físico, que se logra haciendo labranza vertical con cinceles, se aumenta la infiltración y la capacidad de enraizamiento. La labranza vertical se realiza con cinceles que van unidos a un tractor y van aflojando el suelo. Generalmente, los cinceles están separados 60 cm, entre sí, y penetran a una profundidad que oscila entre 25 y 30 cm. Para esta metodología se recomienda una separación de 30 cm, lo que significa que hay que dar dos pasadas del tractor en la misma dirección. Esto hace que el suelo se afloje, permitiendo mejor infiltración de agua y de aire, generando un mejor ambiente para el crecimiento de las raíces

Los suelos de la altillanura Colombiana, son propensos a la degradación por uso, esto debido a que son superficiales, presentan sellamiento superficial y poca permeabilidad e infiltración.

El objetivo del presente estudio es:

Evaluar la incidencia de diferentes usos y ocupaciones en las propiedades físicas y químicas en un suelo del piedemonte llanero, para la determinación de indicadores de calidad, a través de técnicas estadísticas univariadas y multivariadas.

Los específicos:

- Evaluar la influencia de los diferentes usos y ocupaciones en el comportamiento de las propiedades físicas y químicas.
- Establecer la relación de las propiedades físicas y químicas del suelo en los diferentes usos y ocupaciones.
- Identificar indicadores de calidad del suelo en estudio.

1. Marco teórico

El suelo es uno de los recursos naturales, al igual que los bosques y el agua, pero en general no le damos la misma importancia que estos por lo que se ha venido deteriorando y desmejorando. Según Malagón 2000, el suelo es un concepto natural conformado por una conexión de elementos y procesos, resultado de su localización y del contacto de atmosfera con la superficie de la corteza. La atmosfera del planeta ha evolucionado, por lo que ya no predominan en ella el hidrogeno y el helio, su lugar lo ocupan el nitrógeno, el oxígeno, el gas carbónico y el vapor de agua.

Para Lan R *et al*, 2006, La degradación del suelo, la disminución de la productividad del suelo y su capacidad regulatoria del medio ambiente, debido al mal uso y aun herrado manejo, deben ser cuantificados midiendo los cambios en las propiedades o procesos del suelo inducidos por el manejo que se le ha dado y midiendo el impacto causado por su productividad actual y potencial y en su capacidad regulatoria del medio ambiente. El establecimiento, por una parte, de La relación causa-efecto entre las propiedades y procesos del suelo y por otra entre la productividad de cultivos y las funciones regulatorias del medio ambiente, son cruciales para la recuperación de tierras degradadas y el mejoramiento de la calidad del medio ambiente.

1.1 Calidad de Suelo

El concepto de calidad de suelo es un aspecto que se ha venido manejando desde hace muchos años cuando se habla de las cualidades que tiene los suelos, ya sea para la producción agrícola, para la ganadería o aquellos que no son utilizados para hacer producir.

La necesidad de suplir los requerimientos de alimentación de la población, hace que el tema de calidad de suelo se vuelva importante o tome relevancia en el mundo.

Varios autores definen la calidad de suelo de diversas maneras:

Para Wilson *et al*, 2008 La calidad del suelo es la habilidad o capacidad del mismo para cumplir varias funciones y se puede representar por una serie de propiedades físicas, químicas y biológicas que a su vez promueven un medio para el crecimiento de las plantas y para la actividad biológica, regulan el flujo y el

almacenamiento del agua en el ambiente y sirven como buffer en la formación y destrucción de compuestos ambientalmente riesgosos

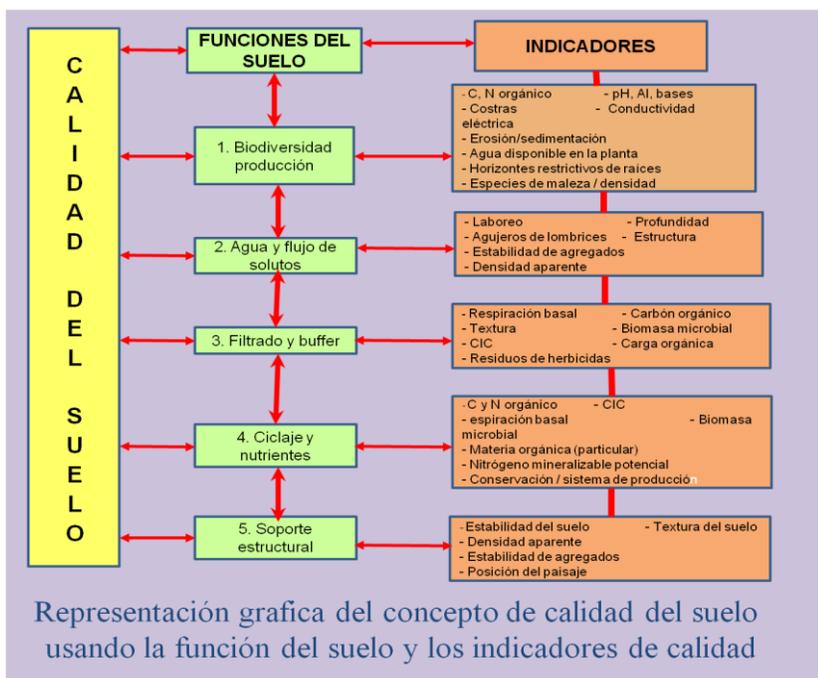
Según USDA, 1999, La calidad del suelo abarca los componentes físicos, químicos y biológicos del suelo y sus interacciones. Por esto, para captar la naturaleza holística de la calidad, o salud, del suelo, deberán ser medidos todos los parámetros.

La capacidad del suelo de funcionar, dentro de las fronteras del ecosistema y el uso de la tierra, manteniendo la calidad ambiental y fomentando la salud de plantas, de los animales y del hombre" Doran y Parkin (1994).

Según Bautista Cruz *et.al*, 2004 las definiciones de calidad de suelo fueron sintetizadas por el Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America (Karlen *et al.*, 1997) como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat.

El Comité de la Sociedad de la Ciencia del Suelo Americana define la Calidad del suelo como "La capacidad funcional de un tipo específico de suelos, para sustentar la productividad animal o vegetal, mantener o mejorar la calidad de agua y el aire, y sostener el asentamiento y salud humanos con límites ecosistémicos naturales o determinados por el manejo.

Figura 1-1: Diagrama de Calidad de Suelo



Fuente; Amezcua 2004

La calidad del suelo, o la capacidad de un suelo para funcionar adecuadamente debe contar con una calidad ambiental, salud de plantas y salud animal y productividad biológica sostenible. Por otro lado debe involucrar factores de manejo y de formación de los suelos.

La calidad de la tierra para FAO, (1997) es la capacidad de funcionamiento del suelo y depende de factores climáticos y de manejo por lo tanto es más apropiado hablar de calidad de tierra y no de calidad de suelo.

Por otro lado el criterio de sostenibilidad se ha venido manejando en los sistemas productivos. Lan R *et al*, 2006, propone que la meta de la medición de la sostenibilidad es concomitante con la cuantificación del impacto del manejo del suelo sobre las propiedades y procesos del suelo relevantes para la productividad agropecuaria y la calidad del medio ambiente. Esto significa que el uso de la tierra y el sistema de manejo del suelo son una medida de la capacidad de la tierra y se basan en el conocimiento previo de un detallado inventario de los recursos naturales, tales como clima, vegetación, hidrología, relieve y suelo.

Se debe tener en cuenta la capacidad del suelo para realizar las funciones básicas de lo llamado calidad agrícola, como es la nutrición para las plantas, la capacidad de retención de agua y movimiento del agua, aireación y transmisión térmica de los suelos.

Por lo anterior se hace necesario la determinación de las características de los suelos físicos, químicos y biológicos basados en la habilidad para indicar la capacidad del suelo para funcionar respecto a un uso específico de la tierra, clima y tipo de suelo (USDA 1999).

1.1.1 Indicadores de Calidad

La dinámica de las fracciones de materia orgánica o aspectos biológicos y físicos de los suelos que responden al manejo son posibles candidatos a indicadores de calidad (Wander *et al.*, 2002). Con base en diversos estudios algunos investigadores han concluido que la estructura, porosidad, materia orgánica del suelo, y las fracciones de materia orgánica lábil del suelo son, entre otras, variables importantes que permiten evaluar su calidad (Bronick y Lal, 2005; Duiker, *et al.*, 2003; Carter, 2002; Chefetz *et al.*, 2002; Six, *et al.*, 2000)

La agregación de las partículas del suelo y el grado de estabilidad de dichos agregados interviene en los procesos de infiltración, regulación de aire y agua, resistencia del suelo a agentes destructivos (ej: mecanización) y pueden servir como un indicador asociado con procesos de permeabilidad, degradación de

materia orgánica y erosión de suelos (Duiker et al., 2003; Carter, M. 2002). Es un factor clave en el funcionamiento del suelo y su capacidad para soportar vida vegetal y animal y un factor importante en la calidad del medio ambiente y del agua. (Six, et al., 2000).

Es importante generar condiciones para el almacenamiento y disponibilidad de agua en el suelo. Porosidades muy bajas inhiben la absorción y transporte de agua en el suelo. Porosidades excesivamente altas facilitan el movimiento de agua a través del perfil y pérdida de nutrientes por escorrentía (Nissen y Wander, 2003).

La densidad aparente óptima para el desarrollo de raíces en suelos de texturas finas oscila en el orden de 0,8 a 1,2 g.cm⁻³. Las raíces pueden detener completamente su crecimiento en suelos con densidades aparentes superiores a 1,5 Mg m⁻³ (Drury et al, 2003).

La compactación del suelo se determina rutinariamente por medición de resistencia a la penetración. Según el Soil Survey Division Staff, 1990, suelos con valores superiores a 2 megapascuales (MPa) son considerados con alta resistencia a la penetración (suelos compactados) y suelos con valores superiores a 4 MPa con muy alta resistencia penetración

1.1.2 Evaluación de la Calidad de Suelo

La evaluación de la calidad de suelo permite mejorar la respuesta de los recursos, como son pérdida de suelo por erosión, depósitos de sedimentos por viento e inundación, reducción de la infiltración e incrementos de lluvias, endurecimiento de la capa superficial, pérdida de nutrientes, transporte de pesticidas, cambio en el pH, aumento en la disponibilidad de metales pesados, pérdida de materia orgánica, reducción de la actividad biológica, infestación de organismos patógenos y reducción de calidad de agua.

Debido a la dinámica de la calidad de suelos, esta puede cambiar en largo o corto plazo de acuerdo al uso y las prácticas de manejo, por lo tanto, es necesario monitorear los cambios de suelos y determinar que prácticas son sustentables (NRCS) 2004.

1.2 Propiedades Físicas de los Suelos

Las propiedades físicas de los suelos son importantes en el conocimiento de la ciencia del suelo, ya que se requiere conocer de manera exacta los factores que intervienen en el crecimiento de las plantas, como son el suelo y el agua y su manejo. A partir de su conocimiento se pueden implementar técnicas para resolver los problemas de producción de cultivos.

Dentro de las características físicas que se estudiarán en el presente estudio están:

1.2.1 Textura

La textura es la forma en la que se distribuyen por tamaños las partículas del suelo. Específicamente a las proporciones relativas de las partículas o fracciones de arena, limo y arcilla, en el suelo tamizado y con diámetro inferior a 2 mm.

Arcilla: Partículas minerales con un tamaño menor a 0.002 mm

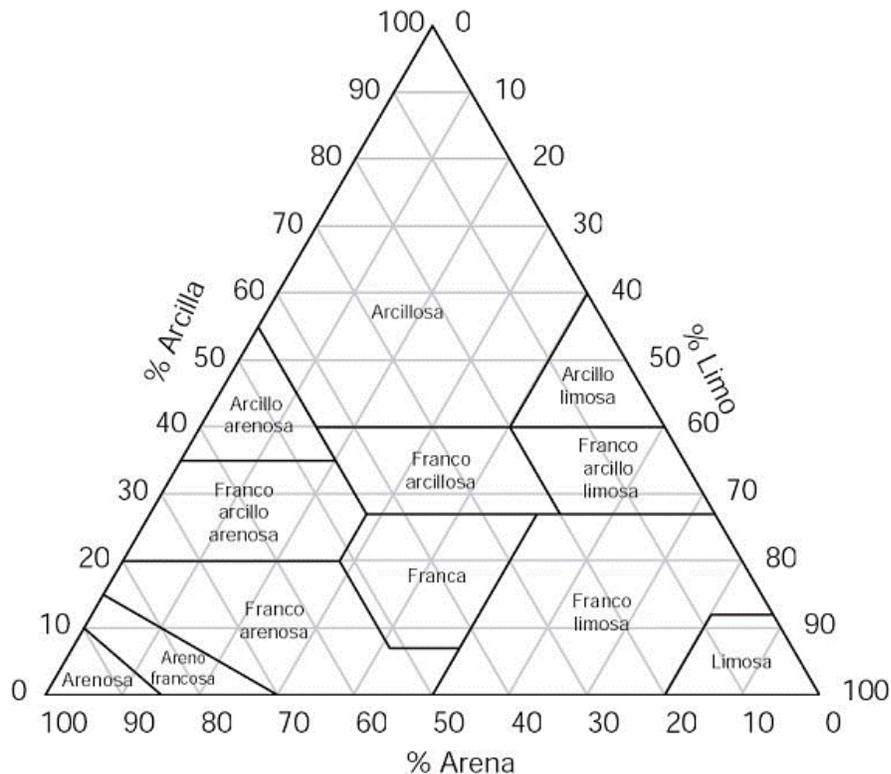
Limos: El tamaño de las partículas de limo se consideran entre 0.05 a 0.002 mm

Arenas: La fracción arena tiene un tamaño de partículas entre 0.005 y 2.0 mm

Según IGAC (1990), la textura puede ser apreciada directamente en campo y sólo en casos muy especiales se necesita la comprobación de laboratorio. Un factor que muchas veces hace variar el dato textural de campo es el contenido de materia orgánica.

La clase textural se determina con base en la proporción la arena, el limo y la arcilla, como se puede ver en el triángulo textural.

Figura 1-2. Triángulo textural



1.2.2 Densidad Aparente

La densidad aparente se define como la relación entre la masa y el volumen de las partículas de suelo y se expresa en g.cm^{-3} .

Para Pinzón (2010), la densidad aparente presenta grandes variaciones dentro del perfil del suelo, tanto en sentido vertical como horizontal; a estas variaciones se agregan las temporales, especialmente en los primeros centímetros del suelo. Por lo anterior, se considera que es muy difícil establecer valores óptimos para todos los suelos sin tener en cuenta también el desarrollo de las plantas, que en últimas han de cumplir su ciclo vegetativo.

Según Mogollón (2012), la densidad aparente (D_a) se ha definido como un parámetro que da indicios de la presencia de zonas endurecidas y compactadas ya que la reducción del espacio poroso presente en el suelo acarrea un aumento en el valor de la densidad aparente.

Tabla 1.1: Densidad aparente de suelos con diferentes materiales

Naturaleza del Suelo	Densidad Aparente g.cm^{-3}
Suelos arenosos	1.40 – 1.60
Suelos arcillosos	1.00 – 1.40
Suelos orgánicos	0.10 – 0.40
Suelos con ceniza volcánica	0.60 – 0.90
Suelos compactados	> 1.60

Fuente Pinzón 2009

La densidad aparente influye en el desarrollo radical ya que interactúa con otras propiedades como la porosidad, la estructura y la humedad del suelo.

1.2.3 Densidad Real

La densidad real se define como la relación entre la masa y el volumen de las partículas de suelo, el volumen es el de las partículas de suelo menos el volumen que ocupa los poros y se expresa en g.cm^{-3} .

La densidad real corresponde a la densidad media de la fase sólida del suelo o densidad de sus partículas. (Pinzón 2009). Para un horizonte dado, la densidad real será prácticamente constante a lo largo del tiempo, puesto que la naturaleza de las partículas no varía.

Tabla 1.2: Densidad real o de sólidos de algunos componentes del suelo

Componente del suelo	Densidad real g.cm^{-3}
Minerales de arcilla	2.00 – 2.65
Cuarzo y Feldespato	2.50 – 2.60
Minerales con elementos metálicos	4.90 – 5.30
Horizontes minerales	2.60 – 2.80
Horizontes orgánicos	1.00 – 1.60
Horizontes con minerales pesados	> 2.80

Fuente Pinzón 2009

La densidad real es importante para la determinación de la porosidad total del suelo, la medición de la velocidad de sedimentación de las partículas y la evaluación de la concertación de los sólidos en suspensión.

1.2.4 Retención de Humedad

Con la excepción de las regiones extremadamente áridas, el agua es siempre un componente del suelo, encontrándose en éstos en forma de humedad intergranular o como hielo (suelos tipo *permafrost*), en mayor o menor abundancia en función de factores diversos. Debido a la propia dinámica del suelo, el agua siempre contiene componentes diversos en solución, y ocasionalmente también en suspensión, si bien la ausencia de una dinámica de consideración minimiza este último componente. (Hillel 1998)

Para IGAC, 1990, la relación entre el contenido de agua del suelo y la fuerza con que es retenida se determina habitualmente mediante la curva de retención de humedad, pues a medida que el contenido de humedad del suelo disminuye, se requiere más energía para extraer el agua retenida. En este comportamiento del agua en el suelo influyen el tamaño de las partículas, forma y dimensiones de los poros.

La única medida satisfactoria de la disponibilidad de agua en el suelo es el potencial agua. Sin embargo, otros términos, tales como capacidad de campo, punto de marchitez permanente y contenido de agua útil, son de utilidad y ampliamente usados.

Capacidad de campo: La capacidad de campo *in situ* de un suelo es usualmente descrita como el contenido de agua después que el drenaje de agua por flujo gravitacional es tan pequeño que llega a estar relativamente estable. Esta situación generalmente existe algunos días después que el suelo haya sido totalmente humedecido por una lluvia o irrigación. (IGAC, 1990).

La capacidad de campo se determina simplemente vertiendo agua en la superficie del suelo y dejándola drenar por unos 5 a 15 días (depende del tipo de suelo), previniendo la evaporación de la superficie. Las muestras de suelo son luego recolectadas con barreno para su medición gravimétrica y el contenido de agua es expresado en bases volumétricas. Determinado de esta manera el valor de capacidad de campo es reproducible si se tiene en cuenta no muestrear en zonas de transición.

Punto de marchitez permanente: El punto de marchitez permanente es el contenido de agua en el suelo cuando la planta se marchita y no vuelve a estar turgente por más que se le agregue agua al suelo. Brigg y Shantz (1911,1912) enfatizan primero la importancia de esta constante de agua en el suelo, denominándola como coeficiente de marchitez. Ellos efectuaron mediciones en varios tipos de plantas y encontraron que todas se marchitaron en alrededor del mismo contenido de agua del suelo. Richards y Wadleigh (1952) encontraron que La mayoría de las plantas cultivadas tienen potenciales osmóticos en el rango de -14 a -18 bares, de tal manera que para propósitos prácticos el contenido de agua en -15 bares es un valor generalmente usado como la mejor aproximación del contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente. (IGAC, 1990)

Agua útil: Esta expresión se refiere al agua disponible en el suelo para el crecimiento de la planta. Es la cantidad de agua retenida en el suelo entre los valores de capacidad de campo (0,1 a 0,3 bares) y de punto de marchitez permanente (15 bares). Este valor constituye a campo, una importante característica del suelo cuando es interpretada apropiadamente. La capacidad de agua disponible de diferentes suelos varía ampliamente. En general, suelos de

textura fina tienen mayor capacidad de agua útil que suelos de textura gruesa. (IGAC, 1990)

En función de la naturaleza y textura del suelo el agua puede encontrarse bien como fase libre, móvil en el suelo (en suelos con altas porosidades y permeabilidades), o bien como fase estática (ab/ad sorbida), en los suelos de naturaleza más arcillosa. En el primer caso el agua podrá tener una cierta dinámica, que mantendrá una cierta homogeneidad composicional, mientras que en el segundo caso podrán darse variaciones composicionales más o menos importantes.

La cantidad de agua que permanece en un suelo en equilibrio es función del tamaño y volumen de los poros llenos de agua y de la cantidad adsorbida por las partículas. Esta función es medida de forma experimental y representada por una curva llamada curva de retención de humedad del suelo, también conocida como curva de liberación de humedad del suelo y curva característica de humedad del suelo. (Pinzón 2009).

1.2.5 Porosidad

La porosidad es la relación entre el volumen de los espacios vacíos y el volumen total de la masa del suelo. En un suelo hay varios tamaños de poros y cada uno tiene una función específica. Poros grandes y medianos: facilitan la aireación y la infiltración, permiten la circulación del aire y el agua. Poros pequeños: conducen el agua y los microporos almacenan agua. La proporción de los poros grandes y pequeños en el suelo permite establecer un equilibrio aire-agua. Los poros permiten el desarrollo y la nutrición de la raíz y planta y toda actividad del suelo. (Pinzón 2009)

Es un parámetro importante porque de él depende el comportamiento del suelo frente a las fases líquida y gaseosa, y por tanto vital para la actividad biológica que pueda soportar.

Sobre su clasificación se ha escrito mucho, con bastante variabilidad, no existe un concepto único sobre el cual trabajar, la más utilizada es:

Macroporos, cuentan con un tamaño mayor a 50 micras y son generalmente visibles y suceden en fisuras de suelos arcillosos después de secados, también el resultado de actividad biológica ya sea por la edaf fauna o las raíces de las plantas.

Microporos, tienen un diámetro menor a una micra y son típicos de suelos arcillosos; el agua es limitada y sujeta a fuerzas de adsorción lo cual la hace poco disponible para las plantas.

Mesoporos, llamados poros de almacenamiento con un tamaño entre 0,5 y 50 micras, en estos poros se establece el agua útil o aprovechable por las plantas.

1.2.6 Estabilidad Estructural

Aquellos suelos que cuentan con algo de contenido de arcilla tienden a agruparse en unidades de partículas sin tamaños ni formas establecidas.

Para Hillel (1998), los agregados visibles se llaman *peds*, son de tamaño variables que están compuestos de agregados de tamaños pequeños, microagregados, los cuales se unen entre estructuras. La interesante de estas estructuras es que une todas las partículas primarias, arena, limo, arcilla, que con anterioridad se hayan floculado. Es una medida del grado de vulnerabilidad del suelo a fuerzas externas destructivas, principalmente la acción destructiva del agua.

La agregación de las partículas del suelo y el grado de estabilidad de dichos agregados interviene en los procesos de infiltración, regulación de aire y agua, resistencia del suelo a agentes destructivos (ej: mecanización) y pueden servir como un indicador asociado con procesos de permeabilidad, degradación de materia orgánica y erosión de suelos (Duiker et al., 2003; Carter, M. 2002).

La disminución de la estructura es identificada como una forma de degradación, es afectada por el uso de la tierra y prácticas de manejo de los cultivos (Six et al., 2000). La pérdida de la estructura del suelo a pesar de ser un proceso físico tiene grandes repercusiones económicas y sociales ya que afecta la productividad, la disponibilidad de alimentos y la posibilidad de mejorar directa e indirectamente la calidad de vida de las familias involucradas (Lal y Shukla, 2006).

1.2.7 Infiltración

La infiltración es el movimiento del agua de la superficie hacia el interior del suelo. La infiltración es un proceso de gran importancia económica, es vista por el ingeniero como un proceso de pérdida y por el agricultor como una ganancia. Del agua infiltrada se proveen casi todas las plantas terrestres y muchos animales; alimenta al agua subterránea y a la vez a la mayoría de las corrientes en el período de estiaje; reduce las inundaciones y la erosión del suelo.

La infiltración también se conoce como el componente vertical de la entrada de agua al suelo. La cantidad de agua que se infiltra, por unidad de tiempo y bajo condiciones de campo, disminuye conforme aumenta la cantidad de agua que haya entrado. Esta es máxima al comenzar la aplicación de agua al suelo.

Para Forero (2000), Entre menor valor tenga el potencial matricial, mayor será la velocidad de infiltración del agua en el suelo; a medida que el suelo se humedece

el potencial matricial aumenta, disminuyendo así la velocidad de entrada de agua al suelo.

Tabla 1.3: Clasificación de la velocidad de Infiltración

Infiltración cm h ⁻¹	Interpretación
< 0,1	Muy lenta
0,1 – 0,5	Lenta
0,5 – 2,0	Moderadamente lenta
2,0 – 6,3	Moderada
6,3 – 12,7	Moderadamente rápida
12,7 – 25,4	Rápida
> 25,4	Muy rápida

Fuente: IGAC, 1990

1.2.8 Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica se define como la velocidad de filtración que se presenta en un medio saturado, depende tanto de las características del suelo como del fluido y se expresa en forma cuantitativa.

La conductividad hidráulica es probablemente la característica más importante y difícil de estimar acertadamente en los suelos. Son múltiples los problemas que pueden ser resueltos satisfactoriamente si se cuenta con esta prueba, especialmente en relación con su aplicación en la ingeniería de riegos y drenajes de las tierras.

El conocimiento de la conductividad hidráulica permite determinar la productividad y espaciamiento apropiado de los drenes superficiales, los canales de riego y evaluar y calcular las pérdidas de agua por filtración.

Tabla1.4: Clasificación de la Conductividad hidráulica (K) según Konke para suelos saturados

Valor cm.hr ⁻¹	Clasificación
< 0,125	Muy baja
0,125 – 0,50	Baja
0,50 – 1,60	Moderadamente Baja
1,60 – 5,00	Moderada

5,00 – 16,00	Moderadamente Rápida
>16,00	Rápida

Fuente: IGAC 2006

1.2.9 Resistencia a la Penetración

Es una característica importante de los suelos para la definición del grado de compactación en los suelos, la cual consiste en la fuerza que se debe ejercer para penetrar en el suelo. Para Gómez (2012) quien cita a Hakansson & Lipiec, 2000; Taboada, 2007, el valor crítico de resistencia mecánica a la penetración que impide la elongación radical de los cultivos es muy discutida, variando entre 0,9 y 3 MPa, aunque en general se asume el valor de 2 MPa).

1.3 Propiedades Químicas de los Suelos

Al determinar las propiedades químicas de los suelos, se estudia la composición características y reacciones químicas de los suelos. Los mayores estudios se han dirigido a tratar lo relacionado con la dinámica de los nutrientes y la fertilidad de los suelos

Las propiedades químicas tienen estrecha relación con el uso y manejo de los suelos, y por tanto con su producción sostenible. Son de especial relevancia las características relacionadas con la retención de los nutrientes por los coloides del suelo, con la solubilidad de estos nutrientes y con las formas iónicas en que se encuentren estos para ser o no asimilados por las plantas. Las principales características físico-químicas son: el intercambio iónico, el pH y el potencial Redox. (Garavito 2012)

1.3.1 pH

El cambio iónico es un proceso reversible mediante el cual se intercambian cationes y aniones entre las fases líquida y sólida o entre las fases sólidas, sí están en contacto una con otra. Este cambio se debe a la fracción arcilla (menor de 2 micras) y a la materia orgánica; es decir, a la fracción coloidal del suelo.

En general el suelo tiene carga neta negativa, que aumenta con el pH. A pH muy ácido la carga positiva puede ser mayor que la negativa. Existe un valor de pH en que las cargas positivas y negativas son iguales. A este valor de pH se llama «punto isoeléctrico» o punto de carga cero y se encuentra en la parte ácida (pH alrededor de 4).

Las arcillas de relación 1:1 (caolinita y halloysita), alófana, sílice amorfa y los óxidos e hidróxidos hidratados, cristalinos y no cristalinos de hierro, aluminio, titanio y manganeso y la materia orgánica, presentan cargas negativas o positivas de acuerdo al pH del medio. (Garavito 2012)

La acidez en los suelos los afecta en la reducción del crecimiento de las plantas, disminución de la disponibilidad de algunos nutrientes como Ca, Mg, K y P, favorece la solubilización de elementos tóxicos para las plantas como el Al y Mn.

Tabla 1.5: Calificación de la reacción del suelo

Valor pH	Interpretación
< 4.5	Extremadamente ácido
4.6 a 5.0	Muy fuertemente ácido
5.1 a 6.0	Medianamente ácido
6.1 a 6.5	Ligeramente ácido
6.6 a 7.3	Casi neutro
7.4 a 7.8	Ligeramente alcalino
7.9 a 8.4	Medianamente alcalino
8.5 a 9.0	Fuertemente alcalino
> 9.0	Muy fuertemente alcalino

Fuente. Garavito 2012

1.3.2 Fosforo Disponible:

Entre los tres elementos principales (N-P-K), el fósforo es requerido por las plantas generalmente en menores cantidades; sin embargo, a su estudio se le ha dado gran importancia a causa de la baja disponibilidad de este elemento en la mayoría de los suelos agrícolas del mundo, debido no solo a su contenido total bajo, sino a las múltiples reacciones que ocurren en el suelo que lo llevan a formas no asimilables.

El fósforo tiene un papel fundamental en la vida de las plantas; es constituyente de ácidos nucleicos, enzimas, vitaminas, fosfolípidos, fitina y además es indispensable en procesos donde hay transformaciones de energía. Desempeña un papel importante en fotosíntesis, respiración, almacenamiento y transferencia

de energía, división y crecimiento celular y otros procesos llevados a cabo en la planta. Promueve la rápida formación y crecimiento de raíces; mejora la calidad de la fruta, hortalizas y granos y es vital para formación de semillas. Como componente de los ácidos nucleicos es importante en la transferencia de características hereditarias (Garavito 2012)

La cantidad total de fósforo en la capa arable varía ampliamente, dependiendo sobre todo del tipo de material de origen del suelos; generalmente es más alto en suelos calcáreos y bajo en suelos de alto grado de intemperismo provenientes de rocas ácidas. Las cantidades van de 0.01 a 0.15% (200-3.000 Kg./Ha), con promedio de cerca de 0.06% (1-200 Kg./Ha).

1.3.3 Capacidad de Intercambio Catiónico – CIC

La capacidad de intercambio catiónico - CIC se puede definir como la medida de las cargas negativas que se encuentran en el suelo. Pinzón 2010. Se entiende como intercambio catiónico los procesos reversibles por los cuales las partículas solidas del suelo adsorben iones de la fase acuosa y desadsorben al mismo tiempo cantidades equivalentes de otros cationes y establecen un equilibrio entre las dos fases.

Los cationes más importantes en los procesos de intercambio catiónico, por las cantidades de ellos que participan en dichos procesos, son Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ (las bases del suelo) y NH_4^+ ; en suelos ácidos, a partir de ciertos valores de pH, como se verá más adelante, el Al^{3+} juega un papel muy importante en el complejo de intercambio catiónico del suelo constituyendo, junto con el H^+ , la acidez intercambiable del mismo.

1.3.4 Bases

Las bases totales BT, expresan la sumatoria de las cargas eléctricas ocupadas por las bases intercambiables. Estos elementos no debe sobrepasar el valor de la CIC.

Tabla 1.6: Contenidos óptimos de Ca^{++} , Mg^{++} y K^+ , de acuerdo a la CIC.

CIC	Ca^{++}	Mg^{++}	K^+
Meq/100g de suelo			
5	2	1	0,25
10	4	2	0,50

20	8	4	1,00
30	12	6	1,50
40	16	8	2,00

Fuente. Garavito 2012

Existen grandes diferencias entre las capacidades de diversos suelos para liberar potasio de las formas no intercambiables. Suelos con iguales cantidades de potasio total presentan distinta tasa de liberación, debido a las diferencias en el tipo de minerales potásicos. El potasio fijado, oriundo de fertilizantes recientemente aplicados, es liberado más rápidamente que el potasio original del suelo.

Garavito (2012) reporta que en suelos tropicales altamente evolucionados y lavados como los Oxisoles y Ultisoles contienen muy bajos contenidos de Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺; igual ocurre en los Espodosoles de las zonas templadas.

1.3.5 Carbono Orgánico

La materia orgánica, en todas sus diferentes formas, tiene efectos marcados en casi todas las propiedades del suelo. Otros beneficios notables de la materia orgánica son los que tienen que ver con su influencia en la nutrición vegetal. Está ampliamente demostrado que la aplicación de abonos orgánicos incrementa la producción de los cultivos, inclusive cuando son aplicados en suelos que presentan altos contenidos de materia orgánica nativa.

El contenido de materia orgánica se calcula a partir del carbono orgánico determinado en el laboratorio a partir de la ecuación (1)

$$MO = \% C \times 1,724 \quad (1)$$

Se recomienda que cuando el contenido de carbono orgánico da valores mayores a 8%, no debe ser tenido en cuenta y que, el contenido de materia orgánica del suelo en cuestión debe ser evaluado por el método de calcinación a 400°C.

1.4 Suelos de la Altillanura

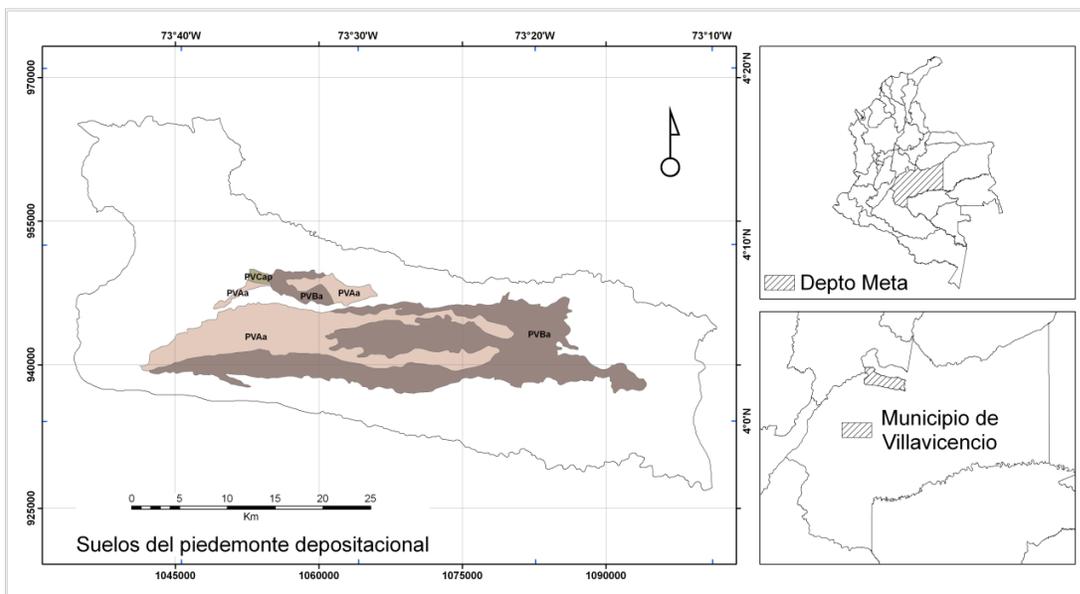
Los suelos con que se cuenta en la altillanura se encuentran dentro del orden de los oxisoles, que es para Colombia el dominante en la zona de los Llanos Orientales.

Presentan bajos niveles de fertilidad, su mayor uso es el de ganadería extensiva, aunque en los últimos tiempos se viene trabajando en su mejoramiento productivo y en la actualidad se pueden observar cultivos como la palma de aceite y caña.

Según Camacho-Tamayo et al. (2008), dado los requerimientos nutricionales de estos cultivos y la baja fertilidad del suelo, hacen necesario el uso de correctivos y fertilizantes por los bajos contenidos de materia orgánica, P, micronutrientes y saturación de bases, alta acidez y aluminio intercambiables.

Por otro lado, presentan una pendiente entre 0 – 3%, una susceptibilidad a la degradación debido al inadecuado manejo, compuesto de Fe y Al, de fuertemente ácidos a extremadamente ácidos, agregación adecuada, baja aireación y retención de humedad.

Figura 1-3: Unidades de suelos del piedemonte depositacional



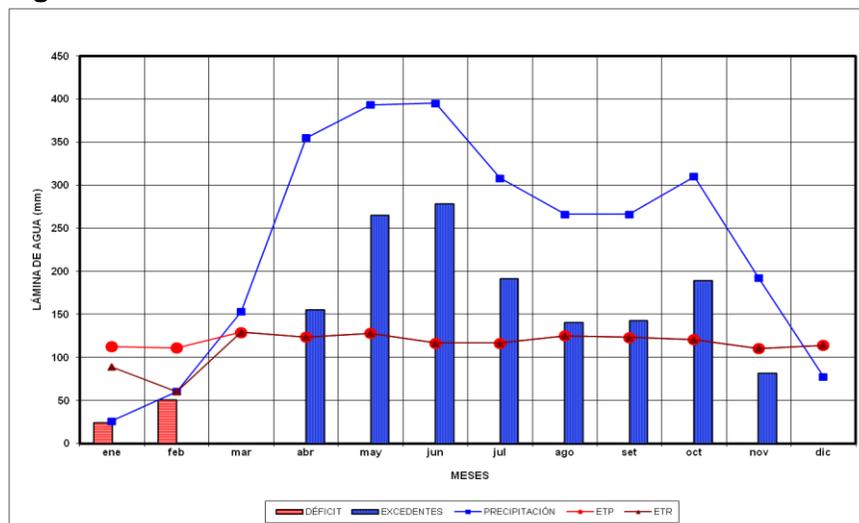
Fuente. IGAC 2004

2. Materiales y métodos

2.1 Características del Área de Estudio

El estudio se realizó en el Centro de Investigación La Libertad perteneciente a la Corporación Colombiana Agropecuaria CORPOICA, ubicado en el departamento del Meta entre los 4° 04' de latitud Norte 73° 30' longitud Oeste a 330 m.s.n.m, en el kilómetro 25 de la vía Villavicencio Puerto López; cuyo clima es tropical con temperatura promedio de 26 °C, una precipitación anual promedio de 2700 mm y una humedad relativa promedio de 85%. La granja cuenta con una superficie de 1342 hectáreas conformada por terrazas aluviales de topografía ligeramente plana en donde se han desarrollado suelos Oxisoles con predominio de arcillas caolinitas y cuarzo, provenientes de sedimentos del pleistoceno reciente al holoceno antiguo. La vegetación natural corresponde al bosque húmedo tropical de acuerdo al sistema Holdridge y actualmente se ha eliminado en su gran mayoría para establecer distintos sistemas agropecuarios productivos característicos del piedemonte llanero. Los suelos bajo praderas naturales son muy fuertemente ácidos ($\text{pH} < 4.5$), con una alta saturación de aluminio ($>70\%$) y una baja saturación de bases ($< 25\%$), presenta baja disponibilidad de fósforo (1 ppm), calcio, magnesio y potasio, y una deficiencia de elementos menores a excepción del hierro (Rincón y Caicedo, 2010).

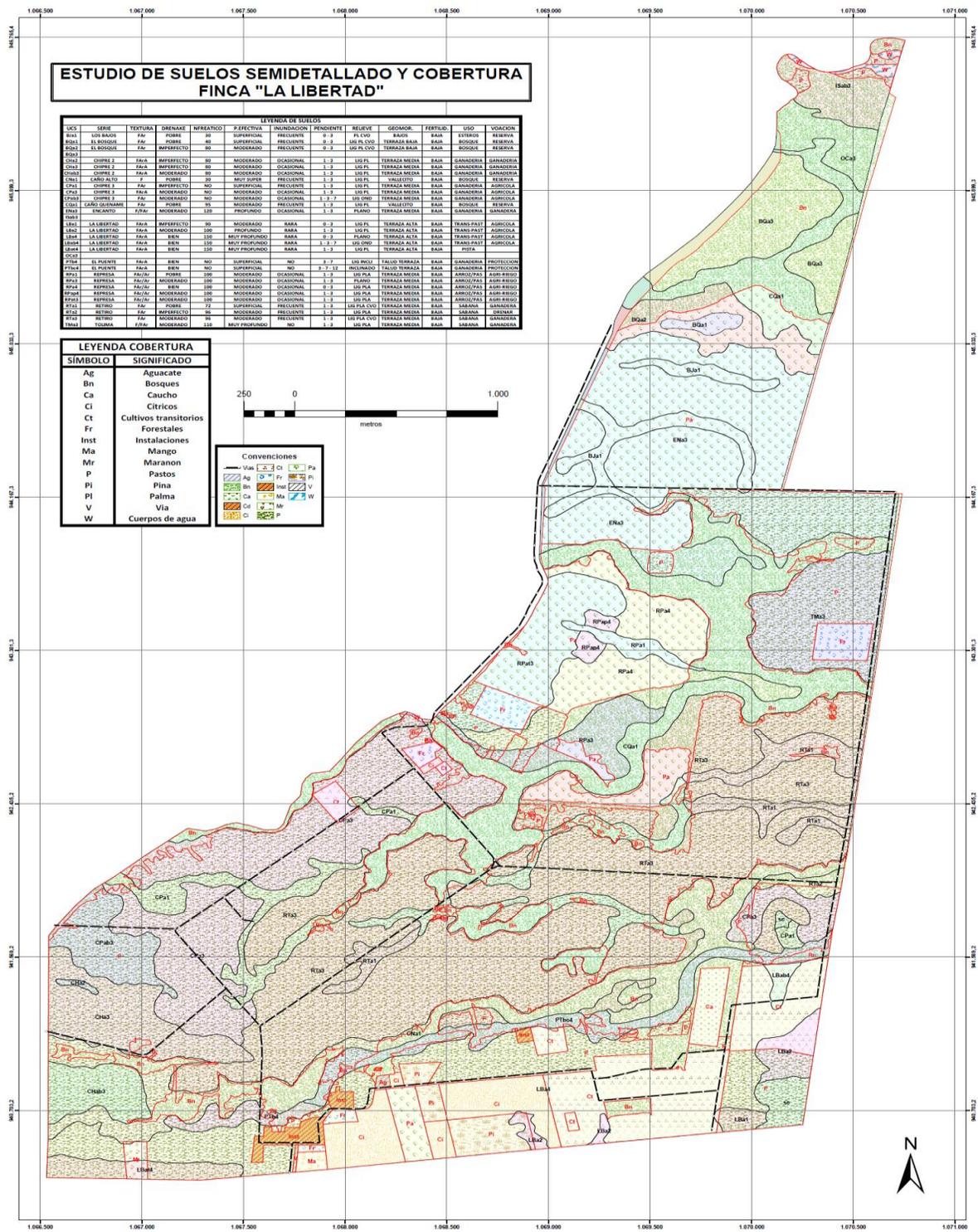
Figura 2-1: Balance Hídrico La Libertad



Fuente; IGAC 2014.

Los suelos de la libertad geomorfológicamente se encuentra divididos en terrazas altas, medias y bajas. La terraza alta y media en un principio fueron sabanas tropicales con pastos nativos y la terraza baja incluyendo la zona de influencia del río Ocoa y de los caños estaban cubiertas por bosque de galería. Esta condición fue cambiando a medida que los suelos se incorporaban a la producción agropecuaria. En la terraza baja y parte de la media se sembraron cultivos de arroz y en las terrazas alta y media se establecieron praderas con pastos del género *Brachiaria*. Posteriormente los cultivos de arroz se reemplazaron por pasturas de *Brachiaria decumbens* y después de que estas empezaron a degradarse con el pasar del tiempo por el uso y la falta de manejo, se inició con un proceso de renovación de las pasturas a través de la incorporación de cultivos agrícolas transitorio (maíz, sorgo dulce, yuca, frijol caupí y soya) y abonos verdes. El proceso es cíclico, es decir, primero es una pastura, luego se reemplaza por cultivos transitorios y después de 4 a 5 años vuelve hacer una pastura. Durante este proceso de renovación el pasto *Brachiaria decumbens* ha sido reemplazado por especie más promisoría para la región como el pasto llanero, el pasto toledo y el pasto mulato II. Además Algunas pasturas se han asociado con leguminosas. Aparte de este proceso también se han establecido plantaciones forestales, cultivos de palma de aceite y cítricos.

Figura 2-2: Mapa de Suelos La Libertad



Fuente; IGAC 2014.

2.2 Selección de los usos y ocupaciones del suelo y sitios de muestreo

Para la realización de la presente investigación se seleccionaron 10 usos y ocupaciones del suelo típico del piedemonte llanero y en cada uno de ellos se tomaron cuatro (4) sitios representativos, en los cuales se hicieron calicatas de muestreo, cuyas dimensiones fueron 60 cm de largo por 100 cm de ancho y 125 cm de profundidad. Las calicatas se característicamente morfológicas y se tomaron muestras en los dos primeros horizontes para llevar al laboratorio y determinar las propiedades físicas, mineralógicas y químicas. Además se realizaron pruebas en campo de resistencia a la penetración con un penetrógrafo (Eijkelkamp) y de infiltración mediante anillos infiltrómetros.

Tabla 2-1. Usos/Ocupaciones seleccionados.

Identificación Punto de Muestreo	Profundidad (cm)	Uso/ocupación	Ubicación	
			Latitud	Longitud
L1 - 1 - H1	0 - 40	Cultivos Transitorios	4°-03,445'	73°-28,074'
L1 -2 - H 2	40 - 64			
L1 -2 - H 1	0 - 36		4°-03,998'	73°-26,674'
L1 -2 - H 2	36 - 60			
L1 - 3 - H1	0 - 36		4°-03,949'	73°-26,726'
L1 - 3 - H2	36 - 60			
L1 - 4 - H 1	0 - 36		4°-03,944'	73°-26,793'
L1 - 4 - H 2	36 - 69			
L2 - 1 - H1	00 - 44	Caucho	4°-03,845'	73°-26,874'
L2 - 1 - H2	44 - 69			
L2 - 2 - H1	0 - 51		4°-03,888'	73°-26,960'
L2 - 2 - H2	51 - 78			
L2 - 3 - H1	0 - 33		4°-03,868'	73°-26,960'
L2 - 3 - H2	33 - 54			
L2 - 4 - H1	0 - 35		4°-03,836'	73°-26,939'
L2 - 4 - H2	35 - 58			
L3 - 1 - H1	0 - 34	Plátano - Maíz	4°-03,617'	73°-27,693'
L3 - 1 - H2	34 - 55			
L3 -2 - H1	0 - 30		4°-03,615'	73°-27,702'
L3 -2 - H2	30 - 43			
L3 - 3 - H1	0 - 35		4°-03,613'	73°-27,717'

L3 – 3 – H2	35 - 48				
L3 – 4 – H1	0 - 34		4°-03,606'	73°-27,719'	
L3 – 4 – H2	34 - 51				
L4 – 1 – H1	0 – 37	Palma (18 años)	4°-03,613'	73°-27,755'	
L4 – 1 – H2	37 - 53				
L4 – 2 – H1	0 – 38		4°-03,568'	73°-27,757'	
L4 – 2 – H2	38 - 50				
L4 – 2 – H1	0 – 24		4°-03,529'	73°-27,750'	
L4 – 2 – H2	24 - 56				
L4 – 4 - H1	0 – 30		4°-03,493'	73°-27,727'	
L4 – 4 – H2	30 - 56				
L5 – 1 – H1	0 -18		Pasto Toledo	4°-03,439'	73°-28,430'
L5 – 1 – H2	18 - 32				
L5 - 2 – H1	0 -31	4°-03,474'		73°-28,440'	
L5 - 2 – H2	31 - 64				
L5 – 3 – H1	0 - 23	4°-03,499'		73°-28,398'	
L5 – 3 – H2	23 - 40				
L5 – 4 – H1	0 - 30	4°-03,439'		73°-28,387'	
L5 – 4 – H2	30 - 59				
L6 – 1 – H1	0 - 19	Pasto bachearía	4°-03,445'	73°-28,196'	
L6 – 1 – H2	19 - 48				
L6 - 2 – H1	0 - 40		4°-03,397'	73°-28,189'	
L6 - 2 – H2	40 - 67				
L6 – 3 – H1	0 - 24		4°-03,401'	73°-28,227'	
L6 – 3 – H2	24 - 60				
L6 – 4 – H1	0 - 55		4°-03,400'	73°-28,161'	
L6 – 4 – H2	55 - 80				
L7 – 1 – H1	0 - 29	Cultivo de Cítricos	4°-03,649'	73°-27,446'	
L7 – 1 – H2	29 - 55				
L7 - 2 – H1	0 – 54		4°-03,641'	73°-27,485'	
L7 - 2 – H2	54 - 72				
L7 – 3 – H1	0 - 48		4°-03,626'	73°-27,568'	
L7 – 3 – H2	48 - 67				
L7 – 4 – H1	0 – 34		4°-03,617'	73°-27,605'	

L7 - 4 - H2	34 - 48			
L8 - 1 - H1	0 - 32	Cultivo de Mango	4°03,423'	73°28,036'
L8 - 1 - H2	32 - 58			
L8 - 2 - H1	0 - 39		4°03,444'	73°28,034'
L8 - 2 - H2	39 - 58			
L8 - 3 - H1	0 - 40		4°03,448'	73°28,001'
L8 - 3 - H2	40 - 62			
L8 - 4 - H1	0 - 43		4°03,423'	73°27,998'
L8 - 4 - H2	43 - 64			
L9 - 1 - H1	0 - 28		Plantación Forestal	4,084221
L9 - 1 - H2	28 - 44			
L9 - 2 - H1	0 - 24	4,084221		73,44323
L9 - 2 - H2	24 - 40			
L9 - 3 - H1	0 - 23	4,084468		73,443133
L9 - 3 - H2	23 - 34			
L9 - 4 - H1	0 - 26	4,084461		73,442986
L9 - 4 - H2	26 - 56			
L10 - 1 - H1	0 - 26	Cultivo de Marañón	4,056426	73,474354
L10 - 1 - H2	26 - 50			
L10 - 2 - H1	0 - 24		4,056377	73,474184
L10 - 2 - H2	24 - 53			
L10 - 3 - H1	0 - 28		4,056592	73,474097
L10 - 3 - H2	28 - 53			
L10 - 4 - H1	0 - 33		4,056554	73,47421
L10 - 4 - H2	33 - 52			

2.3 Mediciones y toma de muestras

En cada uno de los lotes con los usos establecidos se describió la calicata en cuanto a estructura, consistencia, color, porosidad, profundidad de raíces y textura organoléptica. Se tomaron muestras alteradas y muestras inalteradas en anillos para llevar al laboratorio de 5,00 cm de diámetro y 3,00 cm de alto aproximadamente, y bloques de 10 X 10 X 10 cm para la determinación de la Estabilidad Estructural del suelo. En campo se realizaron las pruebas de infiltración y resistencia a la penetración.

2.3.1 Infiltración

Se determinó mediante el método de los anillos infiltrómetros, el cual consiste en incrustar dos anillos concéntricos, de diámetros diferentes en el suelo una profundidad aproximada de 15 cm, el anillo interior cuenta con una regla con el fin de realizar las mediciones. El espacio entre los dos anillos se llena de aguay en el anillo interior se coloca un plástico que cuba las paredes y el fondo, se llena de agua se verifica que el espacio entre los anillos este lleno de agua y se retira el plástico siendo este el tiempo cero de medición tomándose la lectura con la regla, se continua tomando lectura en los tiempos 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 120, 180, 150 minutos teniendo en cuenta que el agua no se puede agotar por debajo de los 5 cm. Se registra la información de llenado antes y después para ni perder la información de la lámina infiltrada y así simular correctamente la infiltración en forma vertical descendente (forero 2000).

Figura 2-3: Prueba de infiltración



Los datos obtenidos en campo se ajustaron al modelo de infiltración de Kostiakov (1932), mediante optimización de variables en el programa Curve Expert v. 1,3 (Daniel G. Hyams., Chattanooga, TN).

3. Modelo de Kostiakov

El modelo de Kostiakov se define como:

$$i = a \cdot t^b \quad (2)$$

Donde,

i : Infiltración acumulada (cm)

t : Tiempo (h)

a : Parámetro asociado a la infiltración inicial e influenciado por condiciones del horizonte superficial del suelo

b : Refleja las condiciones intrínsecas del suelo, tales como textura, estructura y estabilidad del espacio poroso.

La velocidad de infiltración del suelo expresada en (cm h^{-1}), se define como la primera derivada de la infiltración acumulada en función del tiempo, expresada en la ecuación:

$$I = \frac{di}{dt} = 60 \cdot a \cdot b \cdot t^{b-1} \quad (3)$$

La infiltración básica se define como el valor de la velocidad de infiltración que permanece aproximadamente constante en el tiempo. Según el método del servicio nacional de suelos, el tiempo en el cual la velocidad de infiltración es igual a la infiltración básica, se encuentra cuando la derivada de la velocidad de infiltración (dI/dt) es igual a $-10/100$ de la velocidad de infiltración (Ecuación 4)

$$\frac{dI}{dt} = 60 \cdot a \cdot b \cdot (b - 1) \cdot t^{b-2} \quad (4)$$

$$\frac{dI}{dt} = 0,1 \cdot I = 60 \cdot a \cdot b \cdot (b - 1) \cdot t^{b-2} = 0,1 (60 \cdot a \cdot b \cdot t^{b-1}) \quad (5)$$

El tiempo básico se obtiene despejando la Ecuación (6)

$$-600(b - 1) = t \Rightarrow t_{\text{Básico}} \quad (6)$$

Así, reemplazando el tiempo básico en la ecuación 3, se obtiene finalmente la infiltración básica I_b (cm h^{-1}).

$$I_b = 60 \cdot a \cdot b \cdot t_{\text{Básico}}^{b-1} \quad (7)$$

2.3.2 Resistencia a la Penetración

Para realizar la medición de la resistencia a la penetración se utilizó un penetrómetro de cono Eijkelkamp de 20 cm de base y ángulo de 60°, en cuatro puntos diferentes del cada uno de los lotes con diferentes usos, con lecturas cada 5 cm hasta que una profundidad promedio de 50 cm.

Figura 2-4: Medición resistencia a la penetración



Los datos obtenidos de resistencia a la penetración (RP) se analizaron estadísticamente, obteniendo un valor promedio para cada punto de muestreo. Además se determinó la media, el máximo, el mínimo y coeficiente de variación (CV), para cada punto de muestreo.

Luego mediante la estadística multivariada con el software SPSS V. 17 para realizar un estudio del comportamiento por profundidad y por punto de la RP mediante la utilización del análisis de agrupamiento jerárquico (AAJ) y de componentes principales (ACP). Las gráficas fueron procesadas y tabuladas para su análisis correspondiente.

2.4 Análisis de laboratorio

Las muestras que fueron recolectadas en campo se procesaron en el Laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, caracterizándose desde el punto de vista químico, físico y mineralógico.

2.4.1 Propiedades físicas

2.4.1.1 Granulometría por pipeta

A través de este ensayo se determina la clase textural del suelo conociendo 5 fracciones de la arena fina, las fracciones de limos finos y limos gruesos y la fracción arcilla.

Se toma 30 gramos de suelo, se coloca en un vaso de precipitado de 1000 cm⁻³ forma alta se le agrega 5 ml de peróxido de hidrogeno al 30%, 5 ml de agua destilada se tapa el vaso con un vidrio de reloj y se deja toda la noche, al día siguiente se somete a calor en plancha de calentamiento para acelerar el proceso de oxidación de la materia orgánica. Se debe controlar que la temperatura de la suspensión no supere los 80°C. Se continúa agregando el peróxido y seguir calentando la muestra hasta que la materia orgánica se haya destruido, que se verifica, cuando desaparece el color oscuro y la muestra toma otra coloración. Se adiciona agua destilada hasta un volumen de 200 mililitros y seguir el proceso de calentamiento hasta reducir el volumen a 100 mililitros; con el fin de eliminar el exceso de peróxido. Luego se trasvasa a tubo de centrifuga y adicionar agua destilada hasta completar un volumen de 200 mililitros; centrifugar a 1500 rpm durante 5 minutos. Al sacra el tubo de la centrifuga se elimina el liquido sobrenadante. Se pasa la muestra frascos tetero de 6 onzas y se le agrega agua destilada hasta 200 mililitros del volumen y 10 ml de dispersante se lleva a agitador reciproco y agitar por 12 horas. Se sacan los frascos teteros y se dejan en reposo durante 60 minutos para verificar la dispersión homogénea de la muestra.

Se coloca sobre un cilindro de 1000 cc un tamiz No. 270 (0.053 mm) con el fin de separar la fracción gruesa (partículas mayores a 50 micrones) de la fracción fina. Lo retenido en el tamiz se lleva a un a un vaso de precipitado de 50 mililitros y pone a secar en estufa a 105 °C por 24 horas. Lo que paso al cilindro se lleva a volumen con agua destilada. La mezcla en el cilindro se agita vigorosamente con agitador manual durante un minuto para homogenizar, se toma inmediatamente con la pipeta lowy de 10 ml a una profundidad de 15 cm aproximadamente, una alícuota en una capsula de aluminio se lleva a estufa para secar por 18 horas. Se toma la temperatura de la mezcla y de acuerdo al dato se mira en la tabla establecida el tiempo que debe transcurrir después de agitar un minuto para tomar la segunda alícuota con la pipeta lowy de 25 ml a una profundidad de 10 cm, en capsula de aluminio que se lleva a secado. Transcurridas 6 horas y de acuerdo a la temperatura se toma la tercera alicuota de 25

ml y a la profundidad de acuerdo a la temperatura, en capsula de aluminio que se lleva a secado.

La fracción gruesa ya seca se pasa por un juego de tamices de 1, 0.50, 0.25, 0.105 y 0.053 milímetros, se somete a 500 vibraciones por minuto, durante tres (3) minutos, lo que se retiene en cada tamiz se pesa en balanza analítica, se pesa lo retenido y ya seco en las capsulas de aluminio, se hacen los cálculos respectivos y se determina la case textural del suelos. (IGAC 2006)

2.4.1.2 Conductividad Hidráulica

Esta determinación se realizó mediante el método de cabeza constante, la cual se desarrolla:

Se toma la muestra de suelo inalterada en anillo y en uno de sus extremos colocar papel de filtro o gasa y una malla metálica, sujetándolo con una banda de caucho, se coloca el anillo en un cilindro, el cual está provisto de una malla, alrededor del anillo con la muestra de suelo se pone papel periódico húmedo hasta una altura de 2 cm del anillo, se cubre el papel periódico con una mezcla de dos partes de arena por una de bentonita dejar a ras con la muestra de suelo, sobre esta mezcla se agrega parafina líquida dejando libre la superficie del suelo, asegurándose que las paredes entre el cilindro y el anillo queden completamente selladas para evitar flujo de agua en zonas diferentes a la muestra que afecten la determinación de la conductividad, se lleva a saturación por capilaridad,

Colocar el cilindro en el permeámetro, agregar agua hasta obtener una carga igual a la altura del cilindro (carga hidráulica) y mantener constante mediante el uso de un sifón (tubo flexible en forma de U), se procede inmediatamente a hacer las lecturas a los diferentes intervalos de tiempo, registrar en cada uno de ellos el volumen de agua recolectada, medir la altura de la lámina de agua sobre la muestra. Realizar los cálculos requeridos. (IGAC 2006).

$$iK = \frac{V \times \Delta L}{tA \Delta H} \quad (8)$$

Donde:

- K = Conductividad Hidráulica cm/h
- v = Volumen de agua en cc
- t = Tiempo en minutos
- A = Área de la columna del suelo en cm²

$$\Delta L / \Delta H = \text{Gradiente hidráulico}$$

2.4.1.3 Retención de Humedad

Posterior a la determinación de la conductividad hidráulica, se toma los cilindros con anillos saturados y se llevan a las ollas de presión para determinar la curva de retención de humedad en los puntos de succión 0, 10, 30, 50, 100 500 1000 y 1500 KPa.

Figura 2-5: Equipo Retención de Humedad



Colocar los anillos sobre las platos de cerámica, debidamente identificados, por capilaridad saturar las muestras con agua y luego dejar reposar 24 horas con exceso de agua sobre el plato de cerámica, eliminar el exceso de agua, llevar a la olla de presión, colocar una pinza en el cierre del tubo extractor de agua de cada plato, tapar bien la olla y aplicar presión deseada durante 48 horas o más hasta cuando cese el escurrimiento de agua, transcurrido éste tiempo suspender la presión, colocar antes una pinza que cierre el tubo extractor de agua de cada placa para evitar el movimiento de agua hacia las muestras de suelo, sacar los platos de cerámica y pesar cada anillo, llevar a estufa a 105°C y secar. Sacar de la estufa y colocar en desecador (15 minutos) las muestras, pesar y registrar el dato.

Repetir el procedimiento para cada una de las presiones utilizadas. Calcular el contenido de humedad de cada uno de los puntos.

$$\% \text{ Humedad gravimétrica} = \frac{(M(\text{suelos humedo}) - M(\text{suelo seco estufa}))}{(M(\text{suelo seco en estufa}))}$$

$$H(\%) = \frac{M_{shc} - M_{ssc}}{M_{ssc} - M_c} \quad (11)$$

Donde:

H (g) = Porcentaje de humedad gravimétrica del suelo.

Mshc = Masa de suelo húmedo + Cápsula.

Mssc = Masa de suelo seco + Cápsula.

Mc = Masa de la cápsula vacía.

2.4.1.2 Densidad Aparente

Para su determinación se utilizó el método del cilindro:

Se pasa el suelo contenido en el cilindro a un vaso de precipitado, se lleva a estufa a 105°C por 18 horas, se toman las demersiones de altura y diámetro del cilindro, después de transcurridas las 18 horas sacar de estufa el suelo en desecador dejar por una hora y pesar el suelo seco, realizar las cálculos correspondientes. Sacar la muestra de la estufa, dejar enfriar, pesar y tener en cuenta que lo hace con o sin tara y registrar el dato.

Cálculos

a. Volumen

$$V = H \times r^2 \times 3,1416 \quad (12)$$

b. Densidad

$$db = \frac{M}{V} \quad (13)$$

Donde:

db = Densidad Aparente

M = Masa g

V = Volumen cm^{-3}

2.4.1.3 Densidad Real

Mediante el método del picnómetro se determinó esta propiedad:

Se toma el suelo y se seca a 105°C por 18 horas se muele y se pasa por tamiz No. 10, se toman los picnómetros y se pesan vacíos, toman 2 g aproximadamente de suelo y colocan en el picnómetro, se toma el peso del picnómetro más el suelo, se agrega agua desionizada hasta un $\frac{1}{3}$ del picnómetro, se lleva el picnómetro destapado a una campana de vidrio y se aplica vacío por dos horas, se saca y se agrega más agua hasta $\frac{2}{3}$ partes del volumen y se lleva a la campana de vacío nuevamente y se paica más vacío por una hora, hasta que no se vea burbujas dentro del picnómetro, sacar de la campana, llenar completamente los cálculos correspondientes. con el agua desionizada y tapar, pesar el picnómetro tapado con suelo y agua, vaciar el contenido total del picnómetro, lavar y secar convenientemente y enseguida llenar con el agua desaireada, tapar bien el picnómetro lleno de agua, pesar, realizar los cálculos correspondientes.

$$D_s = \frac{M_{pss} - M_{pv} - D_w}{(M_{pw} - M_{pv}) - (M_{pssw} - M_{pss})} \quad (14)$$

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_{wn} - V_{wcs}} \quad (15)$$

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_{ss}} \quad (16)$$

Donde:

D_s = Densidad específica, en g/cm^{-3}

M_{pss} = Masa del picnómetro + suelo seco a 105°C , en g

M_{pv} = Masa del picnómetro vacío y seco, en g

M_{pw} = Masa del picnómetro + agua, en g

M_{pssw} = Masa del picnómetro + agua + suelo seco, en g

D_w = Densidad del agua.

M_{ss} = Masa de suelo seco, en g

V_{wn} = Volumen del agua sin suelo, en cm^{-3}

V_{wcs} = Volumen del agua con suelo, en cm^{-3}

V_{ss} = Volumen del suelo seco, en cm^{-3}

2.4.1.4 Estabilidad Estructural

Se utilizó el método de Yoder para determinar qué tan estable es el suelo trabajado:

Se toma el bloque de suelo de 10 X 10 X 10 cm y se pone a secar al aire, después de pasados dos días se toma una muestra para determinar la humedad gravimétrica del suelo, y se pasa por tamiz de 8 mm, por medio del cuarteo se toman 100 g de suelo y se pasan por un juego de tamices de 6, 3, 4, 2, 1 y 0,425 mm, mediante agitación manual, y se pesa lo que se retiene en cada tamiz, se calcula la distribución de agregados en seco, se toma la misma muestra de 100 g y lleva al juego de tamices que hace parte del equipo de yoder, se verifica que el tamiz superior este a ras con el nivel del agua del cilindro externo, se deposita el suelo en el tamiz superior y se pone a funcionar el equipo por media hora a una velocidad de 30 RPM, transcurrido este tiempo se saca el juego de tamices y se trasvasa lo retenido en cada tamiz, se lleva a estufa a secado a 105°C por 18 horas.

Al día siguiente se saca de estufa el suelo se pesa y se lleva a frascos tetero de 8 onzas, se le agrega agua y 10 ml de dispersante y se coloca en el agitador reciproco por media hora, Se pasa cada fracción por el tamiz correspondiente con el fin de determinar las partículas primarias, lo que quede retenido en el tamiz (partículas primarias) se lleva secado por 18 horas, se saca y se pesa, se realizan los cálculos correspondientes.

Figura 2-6: Equipo Yoder



Calculos

Calculo tamizado en Seco:

$$\%Retenido_s = \frac{100 * (Masa\ retenido\ seco)}{\theta_g(\%)} \quad (17)$$

$\%Retenido_s$ = Porcentaje de agregados de suelo retenido en el tamizado en seco

Masa retenido seco (g) = Masa de agregados de suelo retenido en el tamizado en seco

Calculo tamizado en húmedo:

$$Prom.Tamiz (mm) = \frac{Tamiz_ant + Tamiz_actual}{2} \quad (18)$$

Prom.Tamiz (mm) = Valor promediado del tándem de tamices (8 mm a 0.425 mm)

Tamiz_ant (mm) = Valor de abertura de malla del tamiz inmediatamente anterior al evaluado.

Tamiz_actual (mm) = Valor de abertura de malla del tamiz actual o evaluado.

$$Masa\ Suelo\ Corregido\ \theta_g(\%) = \frac{\sum\ Peso\ retenido\ seco}{\left(1 + \frac{\theta_g(\%)}{100}\right)} \quad (19)$$

$$\%Retenido_h = \frac{(Peso\ retenido\ humedo - Peso\ particulas\ primarias) * 100}{Masa\ Suelo\ Corregido\ \theta_g(\%)} \quad (20)$$

$\%Retenido_h$ = Porcentaje de agregados de suelo retenido en el tamizado en húmedo

Peso retenido húmedo (g) = Peso de agregados de suelo retenido en el tamizado en húmedo

Peso partículas primarias (g) = Peso de las partículas primarias

$$X(mm) = \frac{Prom.Tamiz (mm) * \%Retenido_h}{Masa\ Suelo\ Corregido\ \theta_g\%} \quad (21)$$

X (mm) = diámetro medio de una clase de tamaño dada

$$D.P.M(mm) = \sum X$$

Estado de agregación:

$$Estado_{agregación} = \sum \%Retenido_h (6.3mm\ a\ 0.425mm) \quad (22)$$

2.4.1.5 Porosidad

Esta propiedad se determina mediante cálculo,

Porosidad total, es la diferencia entre la humedad a punto de saturación y el volumen total de la muestra.

Macroporosidad, es la diferencia entre humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Microporosidad, la diferencia entre la porosidad total y macroporosidad.

2.4.2 Propiedades Químicas

2.4.2.1 pH

Método, Potenciométrico en relación suelo: agua 1:1, 1:2, 1:3 y pasta de saturación.

Se pesan 20.0 g de suelo seco y tamizado por 2 mm se colocan en un vaso de precipitados o frasco de vidrio de 100 mL; Verter 20 mL de agua destilada y agitar con varilla de vidrio para formar una suspensión homogénea. Si se forma la suspensión seguir con el paso 6. Si se forma una pasta saturada agregar 20 mL adicionales de agua y agitar; si se forma la suspensión, dejar la muestra en reposo durante 30 minutos. Calibrar el electrodo de vidrio del potenciómetro, con las soluciones buffer de pHs 7.00 y 4.00 y medir el pH de la muestra.

2.4.2.2 Acidez intercambiable

Método, Extracción con KCl 1N .

Para la extracción, Pesar 10.0 g de suelo seco y tamizado por 2 mm y ponerlos en un frasco de extracción de 100 mL, agregar 30 mL de solución de KCl 1N y tapar el frasco con tapón de caucho, llevar las muestras al agitador recíproco y agitar por 30 minutos., dejarlas reposar por 10 minutos.

En el equipo de filtración instalar los erlenmeyers de 500 mL con su correspondiente embudo Buchner y papel de filtro de 9 cm de diámetro. Encender la bomba de vacío, abrir el paso del vacío y transvasar la muestra cuantitativamente con ayuda de frasco lavador que contiene solución de KCl 1N, lavar la muestra con pequeñas porciones de solución de KCl 1N, hasta obtener un volumen de aproximadamente 150 mL.

En la cuantificación, agregar al erlenmeyer que contiene el extracto 3 gotas de solución de fenolftaleína y proceder a efectuar la titulación, titular el blanco de proceso (Bp) y la muestra de suelo con hidróxido de sodio 0.2N hasta que el viraje a rosado pálido de la solución se sostenga como mínimo 30 segundos. Anotar el volumen de titulante gastado en cada solución en la hoja de registro de datos como V1., Realizar los cálculos correspondientes.

CÁLCULOS

$$A_i \text{ meq/100 g de suelo} = \frac{(V_1 - V_{Bp}) \times N \times (100 + p_w)}{p_m}$$

Donde:

A_i = Acidez intercambiable en miliequivalentes por 100 g de suelo.

V_1 = mL de NaOH gastados en la titulación de la muestra.

V_{Bp} = mL de NaOH gastados en la titulación del blanco de proceso.

N = Normalidad del NaOH.

p_w = Porcentaje de humedad en el suelo seco a 105°C (factor de corrección por humedad).

p_m = Peso muestra en gramos.

2.4.2.3 Carbono Orgánico

Método, Digestión vía húmeda (Walkley – Black).

En la extracción, pesar exactamente entre 0.10 y 1.0 g de suelo seco y tamizado por 2mm y ponerlos en un erlenmeyer de 250 ó 125 mL. Agregar con dispensador la solución de dicromato de potasio 1N y 5 mL de ácido sulfúrico. Bajo campana de extracción agregar lentamente con dispensador la solución de dicromato de potasio 1N y agitar la muestra suavemente para obtener una mezcla homogénea; agregar rápidamente el ácido sulfúrico concentrado y agitar vigorosamente la mezcla de reacción al menos durante 30 segundos. Dejar en reposo la mezcla por 30 minutos bajo campana de extracción. Agregar lentamente entre 50 y 100 mL de agua destilada por las paredes del erlenmeyer con ayuda de un frasco lavador, para obtener una solución en la que se pueda observar claramente el punto final de la titulación. Dejar enfriar la solución.

Para la cuantificación, agregar con pipeta 1 mL de ácido fosfórico concentrado y agitar la solución; adicionar 5 gotas de indicador de fenantrolina y proceder a efectuar la titulación. Valorar los blancos de proceso (Bp) con la solución de sulfato ferroso amónico 0.5N (o sulfato ferroso 1N) hasta que el viraje de la solución de verde a marrón. Anotar el volumen gastado para cada blanco de proceso (Bp) en la hoja de

registro. Realizar la titulación de la muestra control y de la muestra de suelo; anotar el volumen gastado en la hoja de registro. Efectuar los cálculos correspondientes.

CÁLCULOS

$$C.O\% = \frac{(B_p - M) \times N \times 0.003 \times (100 + p_w)}{p_m}$$

Donde:

B_p = mL de sulfato ferroso amónico o sulfato ferroso gastados en la titulación del blanco correspondiente.

M = mL de sulfato ferroso amónico gastados en la titulación de la muestra correspondiente.

V = ml de dicromato de potasio agregados al blanco correspondiente.

N = Normalidad del sulfato ferroso amónico o sulfato ferroso, como resultado de la titulación de los blancos implementados = V/B_p.

0.003 = Peso en gramos de un meq de carbono.

p_w = Porcentaje de humedad en el suelo seco a 105°C (factor de corrección por humedad).

p_m = Peso muestra en gramos.

2.4.2.4 Fosforo Disponible

Olsen Modificado. Extracción con solución de bicarbonato de sodio 0.5N a pH 8.5 y cuantificación colorimétrica del azul de molibdeno.

Pesar 2.85g de suelo seco al aire y tamizado por 2 mm, adicionar 25mL de solución de bicarbonato de sodio 0.5N y agregar 0.3 g de carbón activado, tapar los frascos e inmediatamente agitar exactamente por 10 minutos, filtrar inmediatamente a través de papel filtro.

Etapa de Cuantificación

Preparar las condiciones instrumentales del espectrofotometro . Longitud de onda 635 nm, tomar en tubos de ensayo una alícuota de 5 mL del extracto, de la serie de estándares para construir la curva de calibración del blanco de proceso y de las muestras, gregar 15 mL de agua y mezclar, agregar 5 mL de reactivo para desarrollo de color agitando suavemente, dejar en reposo por 1 hora para el desarrollado del color, transvasar las soluciones a las celdas de colorimetría, ajustar el 100% con agua destilada y realizar la lectura de %T de la serie de estándares para construir la curva de calibración, del blanco de proceso (B_p) y de las muestra; anotar en la hoja de registro.

Cálculos

$$P \text{ (ppm)} = \frac{(L_m - LB_p) \times F_d \times 20}{p_m}$$

Donde:

P (ppm) = Fósforo en la muestra en partes por millón

L m = Lectura muestra en ppm en curva de calibración. Se obtiene interpolando en la curva de calibración el valor de absorbancia de la muestra.

LBp = Lectura blanco de proceso en ppm en la curva de calibración.

Fd = Factor de dilución

p_m = peso de la muestra en g

2.4.2.5 Capacidad de intercambio catiónico - CIC

Método, Acetato de amonio 1N, pH 7.0 (Método IGAC).

Para la etapa de extracción, pesar 5.0 g de suelo seco y tamizado por 2 mm y ponerlos en un vaso de precipitados o frasco de vidrio 100 mL; anotar el código de la muestra en la hoja de registro, agregar por las paredes del recipiente 40 mL de acetato de amonio 1N pH 7,0; en suelos orgánicos agitar con una varilla para lograr una suspensión óptima. Dejar en contacto durante la noche, o agitar las muestras que están en los frascos de vidrio, previamente tapados con tapón de caucho, en agitador recíproco durante 30 minutos, instalar el sistema de filtración con erlenmeyer de 250 mL, embudos Buchner y papel filtro, Encender la bomba de vacío, abrir el paso de vacío y transvasar la muestra cuantitativamente con ayuda de frasco lavador que contiene solución de acetato de amonio N, pH:7; lavar las paredes del embudo con porciones de 5 mL de acetato de amonio sin dejar que la muestra de suelo se seque, hasta completar un volumen del extracto de aproximadamente 100 mL, cerrar el paso de vacío, desmontar el embudo y el Erlenmeyer, transferir cuantitativamente el extracto con agua destilada a un balón de 200 mL y completar a volumen

En la etapa de cuantificación, al erlenmeyer con el extracto agregarle 20 mL de formaldehído al 50% bajo campana de extracción; esperar mínimo 5 minutos para asegurar la eliminación de los gases generados, agregar a la solución 2 gotas de fenolftaleína, preparar las condiciones instrumentales del titulador, o, instalar la bureta de 25 mL en el soporte universal para titular NaOH 0.2N, titular las soluciones del blanco de proceso (Bp), de la muestra control y de la muestra de suelo con hidróxido de sodio 0.2N, hasta que el viraje de la solución a color rosa tenue se mantenga como mínimo 30 segundos. Anotar la cantidad de titulante gastado en cada solución en la hoja de registro de datos.

CÁLCULOS

Para este procedimiento realizar el siguiente cálculo; se requiere tener el pw de la muestra:

$$\text{C.I.C meq/100 gramos} = \frac{(V-Bp) \times N \times (100 + pw)}{pm}$$

Donde:

C.I.C = Capacidad de intercambio catiónico en miliequivalentes por 100 g de suelo.

V = mL de NaOH gastados en la titulación de la muestra.

Bp = mL de NaOH gastados en la titulación del blanco de proceso.

N = Normalidad del NaOH.

pm = Peso muestra en gramos.

pw = Porcentaje de humedad en el suelo seco a 105°C (factor de corrección por humedad).

2.4.2.6 Bases

Método, Cuantificación por espectrofotometría de absorción y emisión atómica.

Figura 2-7: Equipo Absorción Atómica



En la extracción, pesar 5.0 g de suelo seco y tamizado por 2 mm y llevar a un vaso de precipitados o a un frasco de vidrio de 100 mL, anotar el código de la muestra en la hoja de registro. Llevar muestra control y blanco de proceso, verter lentamente por las paredes del vaso 40 mL de acetato de amonio 1N pH 7.0; en suelos orgánicos agitar con una varilla para lograr una suspensión óptima. Dejar en contacto durante la noche,

instalar el sistema de filtración con los erlenmeyers de 250 mL, el correspondiente embudo Buchner y el papel de filtro, prender la bomba de vacío, abrir el paso de vacío y transvasar la muestra cuantitativamente al embudo Buchner con ayuda del frasco lavador que contiene solución de acetato de amonio; lavar por las paredes del embudo con porciones de 5 mL de acetato de amonio sin dejar que la muestra se seque, hasta completar un volumen del extracto de 100mL, cerrar el paso del vacío, desmontar el embudo y el erlenmeyer. Transferir cuantitativamente el filtrado a un balón de 200 mL y completar a volumen con agua destilada.

Realizar diluciones del extracto para la lectura de Ca y Mg con base en el pH de la muestra.

Cuantificación por absorción atómica (Ca y Mg), Preparar las condiciones instrumentales del espectrofotómetro para absorción atómica, realizar la lectura de calcio en la solución de la muestra; anotar el valor en la hoja de registro,

Si la lectura en ppm de la solución de la muestra se sale del rango superior de la curva de calibración, realizar una dilución apropiada y leer la concentración del elemento. Anotar en la hoja de registro el valor de la dilución y el de la lectura. Realizar los cálculos para hallar los meq/100 g de Ca de las muestras de acuerdo con el ítem cálculos. Verificar y corroborar los cálculos y anotar los resultados con dos decimales en la hoja de registro.

Cuantificación por emisión atómica (Na y K), preparar las condiciones instrumentales del espectrofotómetro para emisión atómica, preparar el método para cuantificar sodio, realizar la lectura de sodio en la solución de la muestra; anotar el valor en la hoja de registro.

CÁLCULOS

$$\text{Ca}^{2+} \text{ meq/100g de suelo} = \frac{\text{Lcx200x(100+PW)}}{5 \times 1000 \times 20}$$

$$\text{Mg}^{2+} \text{ meq/100g de suelo} = \frac{\text{Lcx200x(100+PW)}}{5 \times 1000 \times 12.16}$$

$$\text{Na}^+ \text{ meq/100g de suelo} = \frac{\text{Lcx200x(100+PW)} \times \text{Fd}}{5 \times 1000}$$

$$\text{K}^+ \text{ meq/100g de suelo} = \frac{\text{Lcx200x(100+PW)} \times \text{Fd}}{5 \times 1000}$$

Donde:

- Lc = lectura de concentración (ppm) en el equipo para Ca y Mg.
Lc = lectura de concentración (meq/L) en el equipo para K y Na.
200 = volumen (mL) final del extracto.
pw = factor de corrección por humedad de la muestra.
5 = peso (g) de la muestra.
1000 = factor de conversión a meq.
12.16 = peso equivalente del catión Mg^{2+} .
20 = peso equivalente del catión Ca^{2+} .
25 = volumen (mL) final de la dilución.
5 = alícuota de extracto (mL) en la dilución 5:25.
2 = alícuota de extracto (mL) en la dilución 2:25.
1 = alícuota de extracto (mL) en la dilución 1:25
Fd = factor de dilución para Na y K.

2.4.3 Propiedades Mineralógicas

2.4.3.1 Fracción Arcilla

Mediante la Difracción de Rayos X se determinó la fracción arcilla de los suelos, Para la extracción se pesa 20 g de muestra de suelos, si se requiere destruir materia orgánica y carbonatos se lleva a un vaso de precipitado de 100mL, si no se requiere se lleva el suelo a un tubo de centrifuga grande adicionando 150mL de agua destilada, homogenizar la suspensión con varilla de vidrio

Colocar el tubo de centrifuga en el portamuestras metálico correspondiente, balancear de a par de portamuestras con agua destilada en la balanza de platillos y someter la muestra a centrifugación durante 15 minutos y velocidad de 3500 rpm.

Sobre un cilindro de 1000 mL colocar un embudo plástico y un tamiz de malla de 50 micras y verter cuantitativamente la suspensión, lavar cuidadosamente la muestra en el tamiz hasta que solamente transvase al cilindro agua cristalina. Lo que se retuvo en el tamiz pasarlo a un vaso de precipitados de 100 mL y poner a secar a temperatura ambiente.

Para el montaje de la muestra en los tubos de centrífuga de 100 ml se rotula uno con Mg y otro con K (indica tratamientos con magnesio y potasio), se les introduce una bola de cristal de dos cm de diámetro y luego de ajustar la balanza digital a las condiciones normales de operación se pesan. Anotar posteriormente el peso de los tubos con cada uno de los tratamientos respectivos.

Introducir los tubos en el portamuestras metálico correspondiente, balancear de a par de portamuestras con agua destilada en la balanza de platillos y centrifugar durante 15 minutos a 3500 rpm. Retirar el tubo del portamuestras y disponer del sobrenadante acuoso. Añadir al tubo 20 mL de alcohol etílico, taparlo con tapón No. 6,5 y homogenizar la suspensión con ayuda del vortex;

Realizar los cálculos pertinentes para determinar el peso de la fracción arcilla. Si el peso de la fracción arcilla es inferior a 1g, se realiza una dilución arcilla – alcohol de 1:2 y se indica el valor de la dilución y la cantidad de líquido añadido; si el peso es mayor a 1g, se realiza una dilución 1:3, 1:4 o mayor y se indica el valor de la dilución y la cantidad de líquido que añadió. El valor de la dilución depende, necesariamente, de lo espeso que quede la suspensión.

Con una varilla de vidrio de 0,5 cm de diámetro esparcir uniformemente la alícuota de la suspensión arcillosa sobre el portamuestras de vidrio; este proceso se realiza varias veces antes de que la suspensión pierda el líquido por evaporación, para asegurar un adecuado montaje (distribución y adherencia) de la película de fracción arcillosa. La placa montada se denomina “arcilla orientada” Al secarse la película en el portamuestras, en un borde de la placa marcar con un lápiz de punta fina el respectivo código de laboratorio asignado a la muestra seguido del símbolo del tratamiento: Mg o K, según sea el caso. Al día siguiente abrir la clavija cuidadosamente para terminar la operación de vacío, en este momento la muestra ha quedado solvatada con etilen glicol y esta lista para el proceso instrumental de difracción de rayos X, el cual se debe realizar de inmediato. Llevar una de las placas del tratamiento con K a la mufla y ponerla a calentar a 550°C durante cuatro horas o durante la noche. Posteriormente apagar la mufla, esperar que esta se enfríe y trasladar la placa a una cámara de desecación con cloruro de calcio, en la que debe permanecer hasta el momento en que se someta al proceso de difracción de rayos X.

Finalmente se someten cada una de las muestras con sus respectivos tratamientos (Mg, K, etilen glicol y K calentado) al proceso de difracción de rayos X. El resultado final del análisis queda plasmado en un difractograma, donde cada pico de difracción tiene un valor determinado que corresponde a un mineral arcilloso específico. A cada tratamiento aplicado a la muestra (Mg, K, etilen glicol y K calentado) le corresponde una gráfica de un color determinado, así por ejemplo: al tratamiento con potasio (K) le

corresponde la grafica verde de picos de difracción, al tratamiento con magnesio (Mg) la gráfica azul, al tratamiento con etilen glicol (previamente impregnada con Mg) la gráfica de color negro y al tratamiento calentado a 550°C (previamente impregnado con K) la gráfica de color rojo.

Figura 2-8: Equipo Difracción de rayos x

2.4.3.2 Fracción Arena

Esta determinación se realizó mediante el método del Análisis Óptico de Arenas. Para separar la fracción arena se procede así: en un frasco tetero depositar alrededor de 20 gramos de muestra de suelo, agregar agua hasta la mitad del recipiente y 10 mL de solución dispersante; poner a agitar por 2 horas en agitador recíproco. Sobre un vaso de precipitado pasar la muestra por tamiz de malla 50 micras (No 270) y con ayuda de una varilla de vidrio y agua lavar cuidadosamente la muestra en el tamiz hasta que el agua que percola el tamiz sea cristalina. Transvasar posteriormente la muestra retenida en el tamiz de malla 50 micras (No. 270) a un vaso de precipitados de 100 mL, colocar sobre el tamiz No. 270 el tamiz de malla de 250 micras (No.60) y tamizar la muestra del vaso de precipitados con la ayuda del chorro de agua destilada. Depositar luego en un vaso de precipitados de 100 mL la muestra de arena (fracción entre 50 y 250 micras) retenida en la malla No. 270 y poner a secar a temperatura del medio ambiente. La muestra retenida e la malla No. 60 se dispone para su eliminación.

Para separar la fracciones densas de la livianas se pesar 0,5g o la cantidad existente si es inferior a este peso; si hay cantidad considerable de granos negros, si hay poca cantidad de granos negros, pesar 1,0 g o la cantidad existente si es inferior a este peso. En una gradilla de madera colocar un embudo separador de 125 mL y agregar

alrededor de 10 mL de bromoformo de densidad 2,85 g/cc, verter la fracción de arena pesada sobre el reactivo, agitar con varilla de vidrio y lavar la varilla con un chorro de bromoformo. Posteriormente tapar el embudo y dejar en reposo por 30 minutos. Ubicar luego el vaso con el papel filtro con sigla FD debajo del embudo separador, abrir la llave de paso y recoger sobre el papel la porción de arena acumulada por la separación densimétrica en el cuello del embudo y cerrar la llave. Retirar el vaso y colocar el otro con el papel filtro rotulado con FL y abrir nuevamente la llave de paso hasta recoger sobre el papel filtro la porción de arena que sobrenada en el bromoformo. La primera muestra corresponde a la fracción densa (FD) o pesada y la segunda a la liviana (FL). Luego que el bromoformo se ha filtrado en las dos muestras se devuelve al empaque y se cierra herméticamente. Colocar nuevamente el vaso de la segunda muestra (FL) debajo del embudo separador y lavar las paredes del embudo con alcohol etílico hasta que no queden partículas de arena adheridas a estas. El vaso de precipitados que tiene el papel filtro con la muestra de arena densa, se lava varias veces con alcohol etílico para eliminar el bromoformo que se adhiere a las partículas de arena. Cerrar luego el papel filtro con la muestra y dejarlo en la cámara de gases hasta que, tanto el papel, como la muestra de arena, se sequen. Luego de ajustar la balanza digital a las condiciones normales de operación, se traslada la fracción densa rotulada con la sigla F.D a una cápsula pesa sustancias y se pesa; se debe anotar el peso de la cápsula más el peso de la fracción densa. Posteriormente se devuelve la fracción al papel filtro y se apaga la balanza. Finalmente se realizan los cálculos pertinentes para hallar el peso de las fracciones densa (F.D) y liviana (F.L.) y los porcentajes de las mismas. En este momento las dos fracciones están listas para el análisis en el microscopio petrográfico. La muestra de arena se monta para el análisis óptico así: sobre un portaobjetos de vidrio rectangular verter con gotero 3 gotas de salicilato de metilo R.A y se distribuyen en un área no mayor a 2 cm² con un palillo de madera. Se abre el papel en el que se encuentra la muestra y se esparce uniformemente sobre él mismo con el dedo índice, frotar luego sobre la muestra el palillo humedecido con salicilato y los granos que queden adheridos a este se distribuyen homogéneamente en el líquido del portaobjetos. Cubrir luego la muestra con cubreobjetos presionándolo suavemente para eliminar las burbujas que se formen. Finalmente se coloca el portaobjetos en la platina del microscopio petrográfico y se procede a realizar la identificación y cuantificación de los constituyentes minerales de la fracción arena

2.5 Análisis estadístico

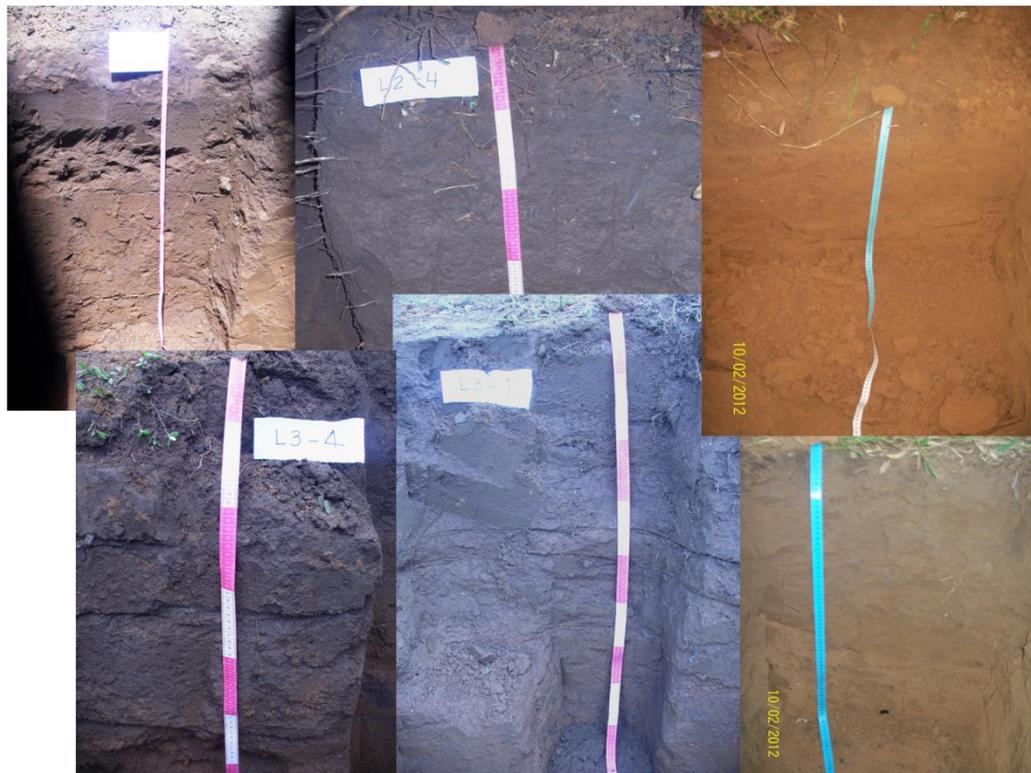
Los resultados obtenidos fueron analizados mediante análisis de varianza (ANOVA) para comprobar los efectos sobre las medias de las variables de respuesta medidas. Para detallar la diferencia entre usos/ocupaciones se utilizaron comparaciones o pruebas de rango múltiples, por la prueba de Duncan, comparando la diferencia entre medias de los usos/ocupaciones. De igual forma se halló una correlación de Pearson entre las propiedades en estudio y por último se sometieron los datos a análisis Cluster y de Componentes Principales. Estos análisis se obtuvieron utilizando el programa estadístico SPSS v.17 (SPSS Inc., Chicago, IL).

3. Análisis de resultados y discusión

3.1 Descripción morfológica de los usos/ocupaciones evaluados para los dos primeros horizontes del suelo

Con base en la descripción realizada en campo en cada uno de los lotes estudiados y en los el Estudio Reconocimiento Semidetallado de Suelos del C. I. La Libertad (Departamento del Meta)-1974 y del Estudio General de suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Meta-2000, realizados por Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC se detallan los suelos encontrados para cada uso/ocupación:

Figura 3-1: Perfiles de los suelos estudiados



Uso Agrícola - Cultivos Transitorios: Suelos de la serie Libertad franco arcilloso – arenoso, bien drenado, pendiente 0-3%, relieve plano a casi plano, dedicados a ensayos de pasto, yuca y cultivos transitorios.

Horizonte 1

Profundidad entre 0 - 45

Color 7,5 YR

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa

Horizonte 2

Profundidad entre 45 - 75

Color 7,5 YR

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa

Uso Forestal – Caucho: Libertad franco arcilloso –arenoso, bien drenado, pendiente 0-3%, relieve plano a casi plano.

Horizonte 1

Profundidad entre 0 - 50

Color 5 YR 2/3

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa, plástica

Horizonte 2

Profundidad entre 50 - 75

Color 7,5 YR

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa, plástica

Uso Agrícola – Platano, Maíz (Salpicon): Libertad franco arcilloso –arenoso, bien drenado, pendiente 0-3%, relieve plano a casi plano

Horizonte 1

Profundidad entre 0 - 33

Color 5 YR 3/3

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa, plástica

Horizonte 2

Profundidad entre 33 – 58

Color 5 YR 4/4

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa, plástica

Uso Agrícola – Palma (18 años); Libertad franco arcilloso –arenoso, bien drenado, pendiente 0-3%, relieve plano a casi plano

Horizonte 1

Profundidad entre 0 - 35

Color 7,5 YR 2/3

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa, plástica

Horizonte 2

Profundidad entre 35 – 56

Color 7,5 YR 4/6

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa, plástica

Uso Ganadería – Pasto Toledo: Suelos serie Chipre, Franco, ligeramente ondulado; pendiente 1-3-7 % moderadamente bien drenado; cultivado en pastos para ganadería, intensiva con prácticas de manejo adecuadas.

Horizonte 1

Profundidad entre 0 - 30

Color 7,5 YR 3/3

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa, plástica

Horizonte 2

Profundidad entre 30 – 64

Color 7,5 YR 4/6

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina
Consistencia friable, pegajosa, plástica

Uso Ganadería - Pasto Bachearía: Suelos serie Chipre, franco y franco arcilloso, moderadamente bien drenado, relieve ligeramente plano con pendientes 1-3 %.. Su uso recomendable es la ganadería con pastos mejorados

Horizonte 1

Profundidad entre 0 - 34

Color 7,5 YR 3/4

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina
Consistencia friable, pegajosa, plástica

Horizonte 2

Profundidad entre 34 – 72

Color 7,5 YR 4/6

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina
Consistencia friable, pegajosa, plástica

Uso Agrícola – Cultivo de Cítricos: Libertad franco arcilloso –arenoso, bien drenado, pendiente 0-3%, relieve plano a casi plano

Horizonte 1

Profundidad entre 0 - 30

Color 7,5 YR 3/4

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina
Consistencia friable, pegajosa, plástica

Horizonte 2

Profundidad entre 30 – 50

Color 7,5 YR 4/6

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina
Consistencia friable, pegajosa, plástica

Uso Agrícola – Cultivo de Mango; Libertad franco arcilloso –arenoso, bien drenado, pendiente 0-3%, relieve plano a casi plano

Horizonte 1

Profundidad entre 0 - 32

Color 7,5 YR 2/3

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina
Consistencia friable, pegajosa, plástica

Horizonte 2

Profundidad entre 32 – 64

Color 7,5 YR 4/6

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa, plástica

Uso Forestal – Cultivo Forestal: Tolima franco, moderadamente bien drenado, ligeramente plano, con pendiente 0-3%

Horizonte 1

Profundidad entre 0 - 25

Color 7,5 YR 4/4

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa, plástica

Horizonte 2

Profundidad entre 25 – 40

Color 7,5 YR 4/6

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa, plástica

Uso Agrícola – Cultivo de Marañón: Libertad franco arcilloso –arenoso, bien drenado, pendiente 0-3%, relieve plano a casi plano

Horizonte 1

Profundidad entre 0 - 24

Color 7,5 YR 3/3

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa, plástica

Horizonte 2

Profundidad entre 24 – 53

Color 7,5 YR 4/4

Estructura bloques subangulares de grado débil y clase media a fina

Consistencia friable, pegajosa, plástica

Encontrándose en general suelos con relieve ligeramente plano con pendientes entre 3-7%, moderadamente profundos, drenaje moderado, texturas entre franco arcilloso a franco arcillo arenoso. Los colores predominantes pardos y pardos oscuros, con reacción a la acidez de fuerte a muy fuertemente ácido y baja fertilidad.

3.2 Análisis de las propiedades de los suelos

3.2.1 Propiedades Físicas de los Suelos

3.2.1.1 Textura

La textura es la distribución por tamaño de las partículas, está relacionada con varias otras propiedades como son, retención de agua, porosidad y retención de nutrientes entre otras.

Los suelos estudiados, presentan altos contenidos de arena, con porcentajes de esta fracción alrededor del 45%, de acuerdo al análisis de granulometría por pipeta (ver tabla 3-1).

Tabla. 3-1. Comportamiento de la Fracción Arena de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	45,92abc	17,83	46,96bc	15,12
Caucho	48,70abc	13,52	45,30abc	11,52
Plátano - Maíz	44,08ab	7,42	48,85c	5,77
Palma (18 años)	53,64c	9,62	48,14bc	10,63
Pasto Toledo	44,52ab	6,87	43,15abc	12,82
Pasto Bachearía	51,73bc	5,20	45,71abc	8,03
Cultivo de Cítricos	46,18abc	15,42	41,86abc	13,97
Cultivo de Mango	44,87ab	8,05	39,27ab	3,65
Plantación Forestal	42,30a	5,02	36,93a	7,64
Cultivo de Maraón	43,30a	6,21	44,44abc	21,26

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

Presenta variabilidad baja para los casos de la plantación Forestal, Pasto Bachearía, Pasto Toledo y Plátano-Maíz; tanto en el horizonte uno como en el dos.

Para el caso de la fracción limo el coeficiente de variación oscila entre 3,01% Pasto Toledo hasta el 53,31 cultivo transitorio, para el horizonte uno, en el dos varía entre 3,63% Cultivo de cítricos y 32,39% cultivo de marañón, para este ultimo la variación en los dos horizontes es similar; en el caso de los cultivos de cítricos y transitorios y pasto bachearía en el horizonte uno es mayor que en el horizonte dos.

En general la fracción arena, predomina más en el horizonte 2 frente al horizonte uno, y los porcentaje para el horizonte 1 está en los lotes con cultivos transitorios y cultivo de cítricos.

Tabla. 3-2 Comportamiento de la Fracción Limo de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	22,01a	53,31	16,10a	13,74
Caucho	16,40a	11,16	15,43a	19,48
Plátano - Maíz	16,55a	3,01	16,17a	7,79
Palma (18 años)	15,55a	9,63	16,30a	13,75
Pasto Toledo	17,82a	3,53	18,50a	14,62
Pasto Bachearía	18,68a	32,15	17,04a	8,93
Cultivo de Cítricos	21,07a	40,00	16,90a	3,63
Cultivo de Mango	14,72a	15,54	17,06a	16,56
Plantación Forestal	24,39a	29,55	23,58b	17,22
Cultivo de Marañón	18,69a	33,13	18,37a	32,39

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

En la fracción limo no se encuentran diferencias para el horizonte 1, en el 2 forestal difieren de los demás usos/ocupaciones. Se presenta mayor variabilidad de la fracción limo para el horizonte 1 que para el horizonte 2.

Los porcentajes de arcilla hallados en el análisis (ver tabla 3-3), se encuentran entre el 35 y 40%, para el horizonte 1 y del 36 al 43% para el horizonte 2, típico para los suelos de esta zona.

Tabla. 3-3. Comportamiento de la Fracción Arcilla de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	32,08abc	20,02	36,94a	13,24
Caucho	34,90abc	14,39	39,27a	7,96
Plátano - Maíz	39,38bc	7,22	34,99a	6,10
Palma (18 años)	30,81ab	15,62	35,57a	8,56
Pasto Toledo	37,66abc	6,65	38,35a	13,96
Pasto Bachearía	29,59a	27,32	37,26a	12,31
Cultivo de Cítricos	32,75abc	23,09	41,24a	15,09
Cultivo de Mango	40,41bc	5,22	43,67a	8,63
Plantación Forestal	33,31abc	15,99	39,50a	4,90
Cultivo de Marañón	38,01abc	14,88	37,20a	39,98

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

De este modo, la clase textural predominante en todos los perfiles es la Franco arcillo arenosa FArA y franco arcillosa FAr. Los contenidos de arcilla y de arena están presentes en todos los horizontes del perfil y no existe patrón de distribución o tendencia de aumentar o disminuir con la profundidad, que es normal en los suelos con características oxicas, tal como aquí se presentan. Debido esto al desarrollo y evolución de estos suelos

3.2.1.2 Densidad Aparente

Tabla. 3-4. Comportamiento de la Densidad Aparente de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	1,66a	4,17	1,70b	0,82
Caucho	1,65a	2,73	1,68ab	3,75
Plátano - Maíz	1,62a	3,65	1,61ab	2,53
Palma (18 años)	1,65a	4,02	1,63ab	3,66
Pasto Toledo	1,62a	4,37	1,65ab	3,57
Pasto Bachearía	1,65a	2,62	1,60a	4,43
Cultivo de Cítricos	1,61a	3,42	1,64ab	3,67
Cultivo de Mango	1,65a	2,84	1,64ab	5,06
Plantación Forestal	1,66a	4,63	1,68ab	2,29
Cultivo de Marañón	1,65a	2,84	1,64ab	5,06

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

Los datos para la densidad aparente oscilan entre y $1,66 \text{ g.cm}^{-3}$ para el horizonte uno en el dos varía entre $1,60$ y $1,68 \text{ g.cm}^{-3}$, presentando coeficientes de variación menores del 10%. En algunos suelos los valores para los horizontes superiores son menores, debido a la influencia de la materia orgánica, mientras que aumenta levemente para el horizonte dos.

El promedio del valor de la densidad aparente para el primer horizonte es de $1,64 \text{ g.cm}^{-3}$, lo que indica que pueden ser propensos a problemas de compactación por lo que es necesario manejarlos con abonos orgánicos. En el horizonte dos el promedio es de $1,65 \text{ g.cm}^{-3}$.

3.2.1.3 Densidad Real

Tabla. 3-5. Comportamiento de la Densidad Real de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	2,62d	0,92	2,64	1,06a
Caucho	2,64d	0,75	2,58	5,96a
Plátano - Maíz	2,63d	0,37	2,68	1,69a
Palma (18 años)	2,62cd	0,64	2,63	0,63a
Pasto Toledo	2,60abcd	0,53	2,62	0,68a
Pasto Bachearía	2,62cd	0,49	2,56	5,86a
Cultivo de Cítricos	2,58a	1,44	2,62	0,74a
Cultivo de Mango	2,61bcd	0,45	2,63	0,98a
Plantación Forestal	2,58ab	0,62	2,64	0,50a
Cultivo de Marañón	2,59abc	0,89	2,60	1,86a

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

La densidad real del suelo está relacionada con las especies mineralógicas presentes; y la aparente (D_a), que tiene en cuenta el volumen total del suelo, incluyendo sus poros. Para este estudio varía entre 2,58 y 2,68 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para el horizonte uno y de 2,56 a 2,64 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para el horizonte dos. Con coeficientes de variación menores del 5%, lo que muestra la homogeneidad de los datos.

Los promedios de densidad real en el horizonte uno es de 2,61 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y de 2,62 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para el horizonte dos, concordando con los hallados para la densidad aparente

La diferencia entre densidad real y aparente viene dada por la porosidad del suelo y por lo tanto es una medida del grado de compactación y facilidad para la penetración radicular.

3.2.1.4 Retención de Humedad

Se realizó la curva de retención para ocho puntos de tensión 0, 10, 30, 50, 100 500 1000 y 1500 KPa y se determinó el agua útil de suelo a partir del valor de la humedad a capacidad de campo y la de punto de marchitez permanente, tal como se muestra en la tabla 3-6.

Tabla 3-6. Datos de retención de Humedad para el horizonte 1, acuerdo al uso y ocupación.

Uso	Humedad gravimétrica (%) a varias tensiones (Kpa)								Humedad aprovechable (%)
	0	10	33	50	100	500	1000	1500	
Cultivos Transitorios	19,22	12,73	10,03	8,81	7,40	6,17	5,07	4,76	7,97
Caucho	22,44	16,27	13,52	12,59	11,34	9,92	8,81	7,98	8,29
Plátano - Maíz	25,72	19,35	17,01	15,83	14,05	12,48	11,43	11,24	8,12
Palma (18 años)	21,87	15,46	12,83	11,67	10,33	8,62	7,55	6,96	8,50
Pasto Toledo	40,92	35,60	32,46	31,38	29,60	27,31	26,50	25,71	9,88
Pasto Bachearía	46,60	42,41	39,97	38,46	36,74	35,03	33,94	32,89	9,52
Cultivo de Cítricos	24,35	17,30	15,20	17,03	12,59	10,96	10,13	9,42	7,88
Cultivo de Mango	26,25	21,15	19,50	17,62	15,60	14,78	13,21	12,11	9,03
Plantación Forestal	20,65	16,76	14,30	13,14	9,62	9,82	8,59	7,84	8,92
Cultivo de Marañón	17,30	13,01	10,61	9,38	8,10	6,89	5,57	2,59	10,41

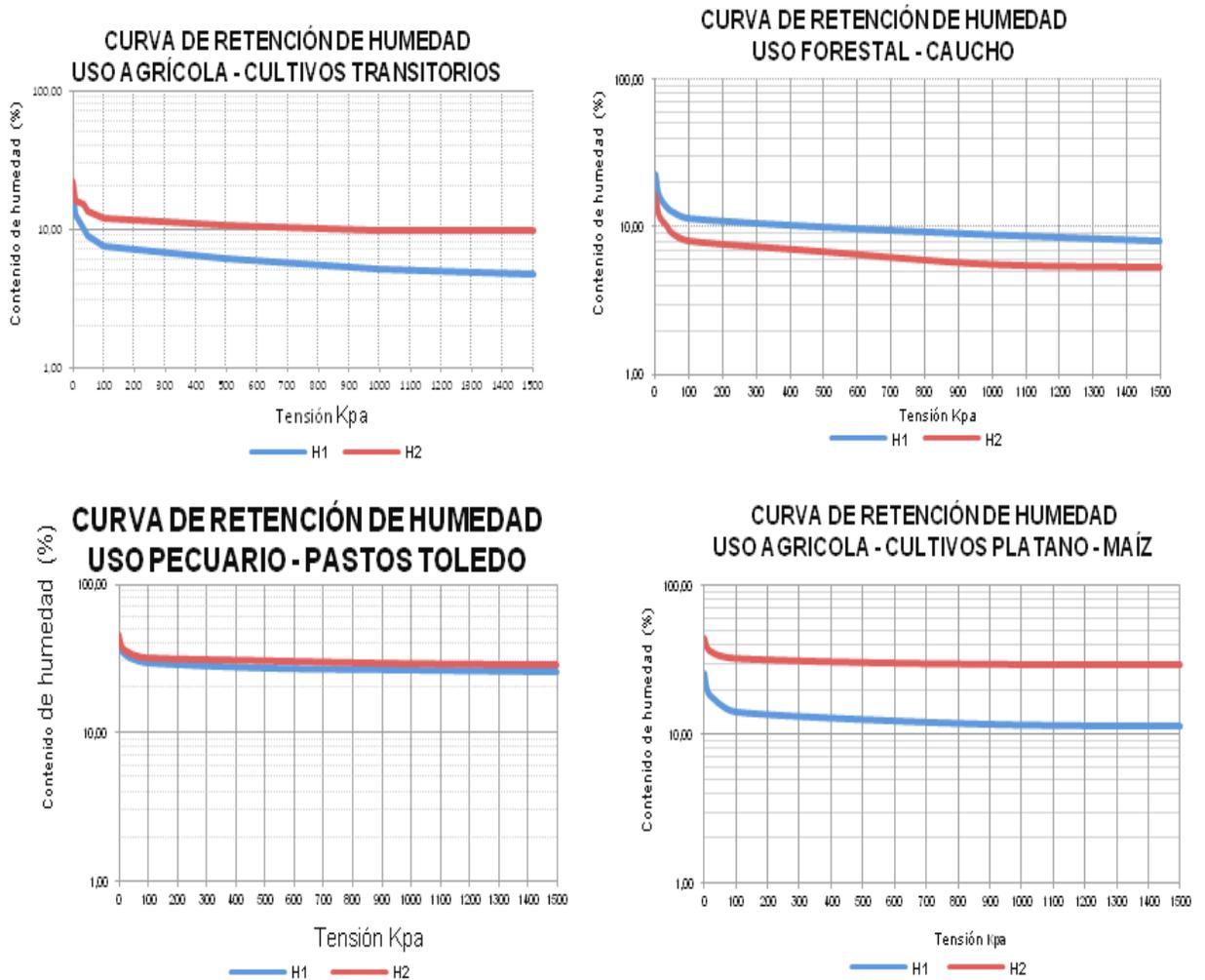
Al revisar los datos de retención de humedad de los suelos estudiados (Tabla 3-6) se puede determinar que presentan baja capacidad de retención de agua, entre 7,88 y 10,41%, por otro lado, como lo menciona Pinzón 2009, a valores bajos de succión (0 a 100 Kpa) depende principalmente del efecto capilar y de la distribución del tamaño de poros y por lo tanto es fuertemente afectada por la estructura del suelo; sin embargo, a succiones mayores de 300 KPa, la retención de humedad se debe a la adsorción, de tal manera que la influencia de la estructura es mínima mientras que la textura y la superficie específica del suelo es mayor.

Tabla 3-7. Datos de retención de Humedad para el horizonte 2, acuerdo al uso y ocupación.

Uso	Humedad gravimétrica (%) a varias tensiones (Kpa)								Humedad aprovechable (%)
	0	0,1	0,3	0,5	1	5	10	15	
Cultivos Transitorios	21,85	16,20	17,17	13,46	11,96	10,71	9,87	9,63	6,57
Caucho	16,50	12,09	10,28	9,15	8,13	6,89	5,65	5,40	6,69
Plátano - Maíz	43,85	37,55	34,68	33,63	32,28	30,37	29,45	29,34	8,21
Palma (18 años)	37,59	31,75	28,85	28,02	26,45	24,47	23,77	23,23	8,51
Pasto Toledo	45,19	37,94	35,02	33,73	32,23	30,93	29,72	29,08	8,86
Pasto	53,40	45,39	43,04	41,60	40,05	38,83	37,56	36,52	8,87
Bachearía	24,35	16,93	14,33	12,89	11,36	10,17	9,18	8,67	8,26
Cultivo de Cítricos	37,01	29,23	26,75	25,60	23,95	22,58	21,50	20,66	8,57
Cultivo de Mango	26,10	20,03	18,37	16,59	14,38	12,89	11,67	10,83	9,21
Plantación Forestal	21,50	14,33	12,38	10,82	9,47	8,66	7,51	6,73	7,60
Cultivo de Marañón									

En el horizonte 2, el agua disponible no es mayor del 10% al igual que en el horizonte 1, lo que puede indicar que la disponibilidad de agua en estos suelos es un limitante para el establecimiento de cultivos,

A causa que la estructura del suelo influye en la forma de la curva característica de humedad del suelo primariamente en rangos de baja succión, se puede esperar que el efecto de compactación reduzca la porosidad total y especialmente el volumen de los poros grandes interagregados; como resultado de la compactación, el contenido de agua disminuye. (Pinzón 2009).

Figura 3-2: Curva de retención de humedad para diferentes usos/ocupaciones

La Lámina de agua (L) es una forma de expresión de mucha utilidad por que no depende del área. La unidad de medida más frecuente para expresar la lámina es el mm, que equivale al volumen de 1 litro de agua distribuido en una superficie de 1 metro cuadrado

Tabla. 3-8. Comportamiento de la Lámina aprovechable de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	52,57a	17,02	37,19a	65,40
Caucho	54,45a	18,49	26,42a	21,08
Plátano - Maíz	44,23a	45,56	20,41a	4,82
Palma (18 años)	45,47a	23,74	30,35a	47,08
Pasto Toledo	41,89a	35,02	35,39a	50,65
Pasto Bachearía	55,90a	62,98	42,67a	47,55
Cultivo de Cítricos	54,77a	50,62	26,73a	44,01
Cultivo de Mango	55,42a	26,90	33,25a	28,66
Plantación Forestal	37,90a	26,11	28,07a	43,03
Cultivo de Marañón	47,16a	50,06	27,43a	41,51

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

La lámina de agua varía entre 55,90 y 37,90 cm para el primer horizonte y en el segundo está entre 20,41 y 42,67 cm, con un coeficiente de variación por encima del 40% para el 20% de suelos analizados en el primer horizonte y para un 70% en el horizonte dos.

Lo que se traduce en que la cantidad de agua en el suelo puede estar un tiempo apropiado para que la planta pueda adsorber los nutrientes aplicados y se pueda desarrollar de manera adecuada.

3.2.1.5 Infiltración

Tabla. 3-9. Comportamiento de la Infiltración básica del horizonte 1 por uso/ocupación

Uso	Media (cm.hr ⁻¹)	C.V.(%)
Cultivos Transitorios	0,26abcd	12,47
Caucho	0,26abcd	9,43

Plátano - Maíz	0,29d	3,41
Palma (18 años)	0,28abcd	5,18
Pasto Toledo	0,26abcd	11,29
Pasto bachearía	0,25abc	10,29
Cultivo de Cítricos	0,27abcd	12,38
Cultivo de Mango	0,23a	2,91
Plantación Forestal	0,24ab	11,20
Cultivo de Marañón	0,27acb	3,17

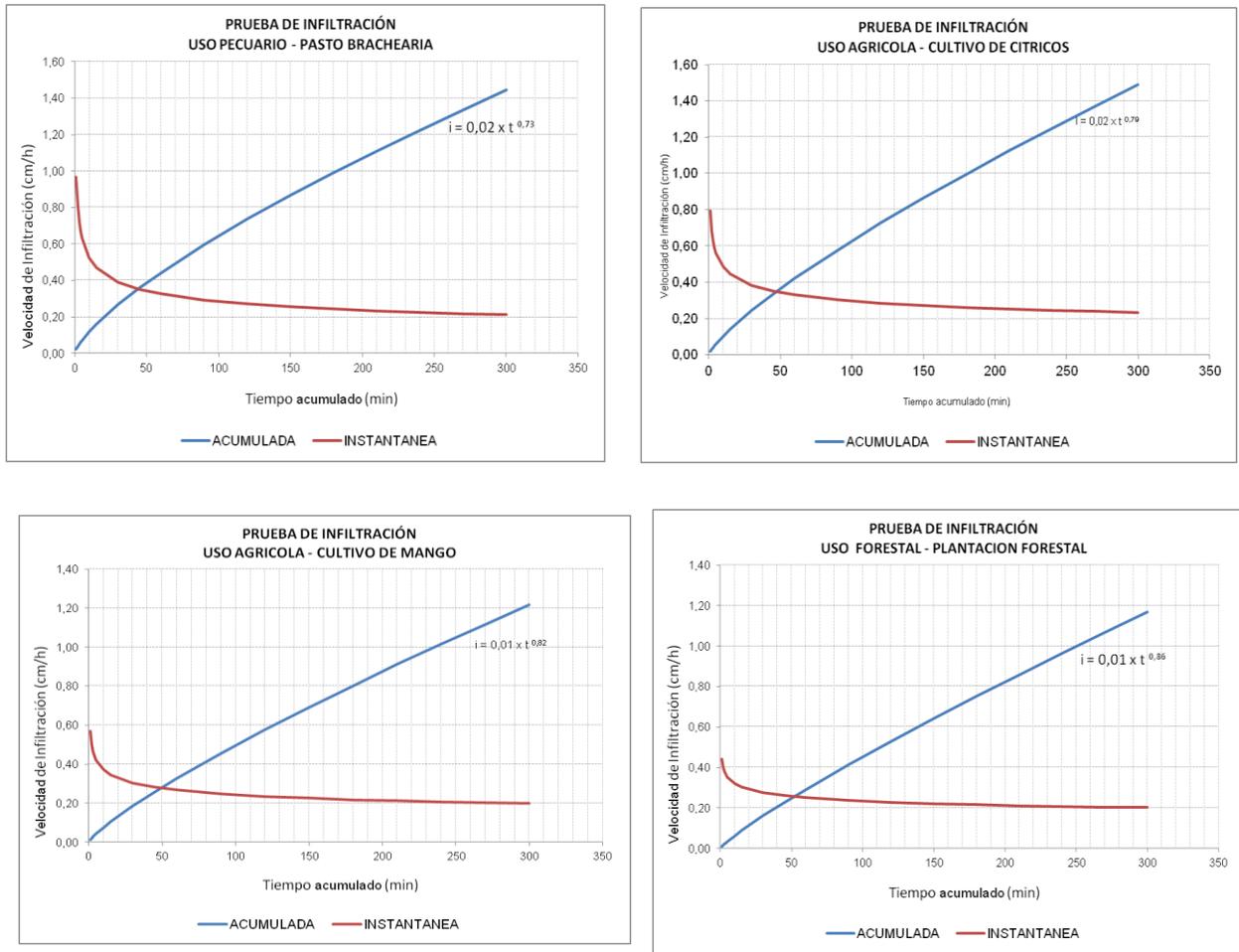
CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

Los valores de infiltración básica están variando entre 0,20 y 0,27 $\text{cm}\cdot\text{hr}^{-1}$, con un coeficiente de variación no mayor al 3%, permitiendo deducir que hay homogeneidad entre los puntos de muestreo por uso/ocupación. La infiltración no presenta mayor variación entre los suelos estudiados.

En general se observa que para los suelos que requieren más preparación por su uso (cultivos transitorios, plátano-maíz, cultivo de cítricos), la infiltración básica es mayor, esto porque permite aireación y que los agregados del suelo mejoren la aireación mejorando la velocidad de infiltración

Los valores de infiltración acumulada obtenidos en las diferentes pruebas se analizaron estadísticamente y mediante regresiones potenciales se obtuvieron las ecuaciones de la infiltración acumulada, instantánea y básica propuestas y se clasificó en general todos los suelos como una velocidad lenta.

Figura 3-3. Infiltración básica y acumulada para diferentes usos/ocupaciones



Con base en lo que expone Hillel 1998, la infiltración del suelo y su variación con el tiempo, se sabe que dependerá de la humedad inicial y de la succión, así como en la textura, la estructura, y la uniformidad (o secuencia de capas) del perfil.

3.2.1.6 Conductividad Hidráulica

La Tabla 3-10 presenta los resultados obtenidos para K_s por el método de cabeza constante y se clasifica por medio de Konke, (tabla XXX). Presenta valores mayores de $100 \text{ cm}\cdot\text{hr}^{-1}$, con coeficientes mayores de 100% o que permite inferir que existe heterogeneidad en los datos, en el primer horizonte

Tabla 3-10. Comportamiento de la Conductividad Hidráulica de los horizontes 1 y 2 por Uso

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media (cm.hr ⁻¹)	CV (%)	Media (cm.hr ⁻¹)	CV (%)
Cultivos Transitorios	43,47a	103,27	33,19ab	75,74
Caucho	22,65a	32,91	59,40ab	95,08
Plátano - Maíz	43,94a	161,88	3,21a	134,52
Palma (18 años)	14,90a	95,75	3,17a	134,84
Pasto Toledo	13,98a	62,23	2,03a	79,31
Pasto Bachearía	8,19a	117,51	3,08a	63,81
Cultivo de Cítricos	9,50a	54,95	6,62a	77,20
Cultivo de Mango	13,60a	109,81	14,52a	157,00
Plantación Forestal	119,26a	164,64	13,15a	53,92
Cultivo de Marañón	59,26a	49,69	5,39a	88,24

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

De acuerdo a los valores determinados en el laboratorio se cuenta con conductividades entre moderadas a moderadamente rápidas para los usos de caucho, palma (18 años) pasto toledo, pasto bachearía, cultivo de cítricos y cultivo de mango, para los restantes usos está entre rápida y muy rápida. Lo anterior permite inferir que para las moderadas se pueden presentar problemas de encharcamiento, mientras que para las rápidas a muy rápidas puede presentarse problemas de lavado de nutrientes.

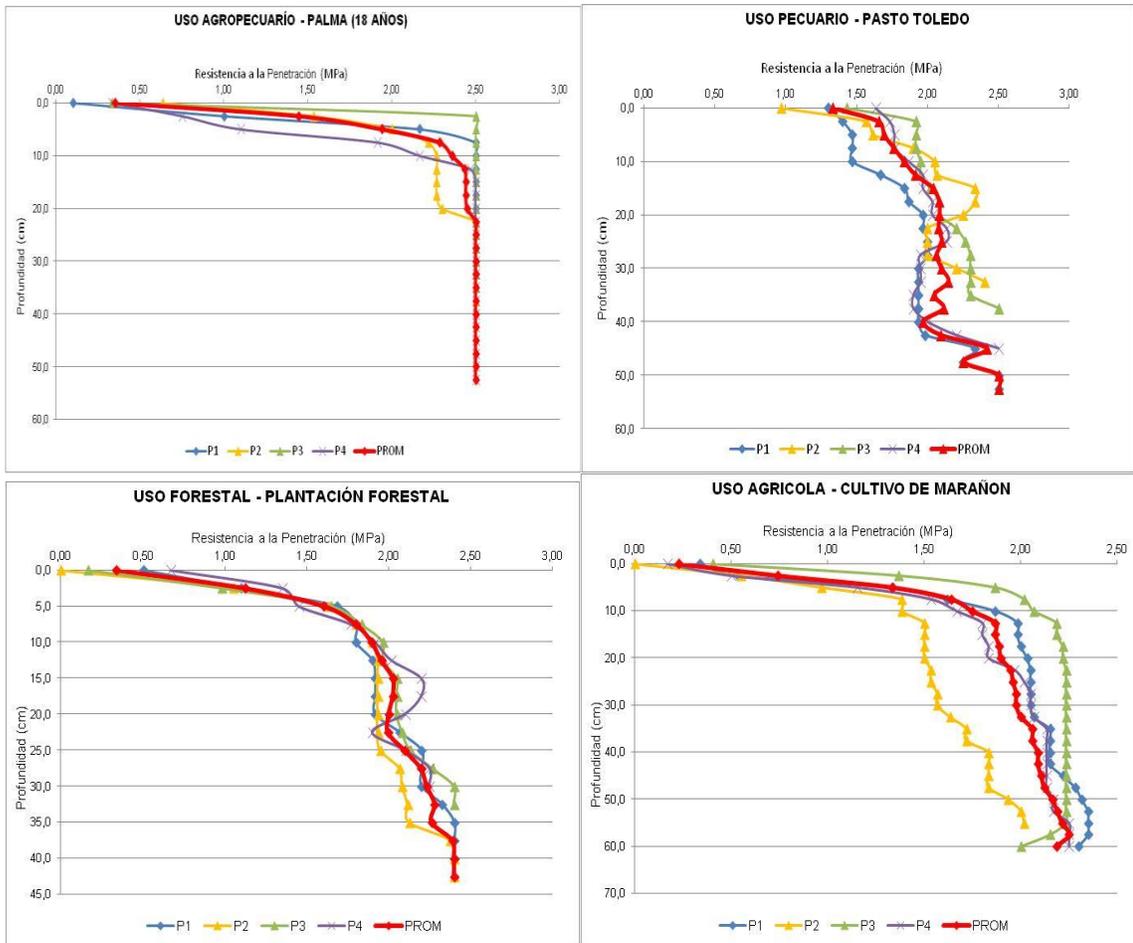
3.2.1.7 Resistencia a la penetración

Tabla. 3-11. Comportamiento de la Resistencia a la Penetración de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media (MPa)	CV (%)	Media (MPa)	CV (%)
Cultivos Transitorios	2,05bc	8,36	2,01ab	6,83
Caucho	2,24abc	5,12	2,36ab	3,61
Plátano - Maíz	2,33bc	2,15	2,38a	6,19
Palma (18 años)	2,45c	2,36	2,40a	0,00
Pasto Toledo	2,33bc	2,15	2,40a	0,00
Pasto Bachearía	2,09ab	7,41	2,43a	3,95
Cultivo de Cítricos	2,43c	6,19	2,50a	0,00
Cultivo de Mango	2,48c	2,02	2,50a	0,00
Plantación Forestal	2,26abc	9,09	2,45a	2,36
Cultivo de Marañón	2,03a	18,64	2,38a	4,03

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

La Resistencia a la Penetración presenta valores mayores de 2,0 MPa, para todos los usos y ocupaciones el coeficiente de variación por debajo del 20%. Los valores son mayores en el horizonte dos, que varía entre 2,10 y 2,50 MPa que en el horizonte uno.

Figura 3-4: Resistencia a la penetración para diferentes usos/ocupaciones

Los valores de la resistencia a la penetración en los diferentes usos/ocupaciones, como se ve en la Figura 3-4, están por encima de 2,0MPa, ligeramente superior a lo que Amezcuita, 2013, refiere para estos suelos de 2,0 MPa.

3.2.1.8 Distribución de Poros

3.2.1.8.1 Macroporosidad

Se denomina macroporos, los poros mayores de 60 micras siendo los responsables de la aireación y del drenaje de los suelos.

Tabla. 3-12. Comportamiento de la Macroporosidad de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	10,75a	62,09	9,56a	25,95
Caucho	10,13a	61,69	7,42a	25,77
Plátano - Maíz	10,30a	33,97	10,16a	17,68
Palma (18 años)	10,59a	16,10	9,47a	20,58
Pasto Toledo	8,65a	8,44	11,96a	33,04
Pasto Bachearía	6,96a	42,14	12,65a	67,57
Cultivo de Cítricos	11,20a	59,54	12,09a	23,77
Cultivo de Mango	8,39a	8,64	12,57a	44,16
Plantación Forestal	6,38a	52,02	10,23a	8,47
Cultivo de Marañón	7,11a	110,21	11,60a	27,34

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

Los suelos estudiados presentan una macroporosidad por debajo del 12% y con una variación alta por encima del 100% para el caso del cultivo de marañón.

3.2.1.8.2 Mesoporosidad

Los mesoprosos son los responsable de almacenar el agua disponible del suelo, para que sea absorbida por las plantas.

Tabla. 3-13. Comportamiento de la Mesoporosidad de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	13,23a	11,94	11,15a	58,21
Caucho	13,65a	22,09	11,26a	29,66
Plátano - Maíz	13,11a	42,94	13,24a	20,29

Palma (18 años)	14,02a	4,82	13,84a	16,18
Pasto Toledo	16,10a	15,76	14,62a	19,42
Pasto Bachearía	15,67a	19,81	14,09a	32,88
Cultivo de Cítricos	12,60a	25,58	13,45a	22,32
Cultivo de Mango	14,89a	13,27	13,94a	23,31
Plantación Forestal	14,86a	19,87	15,52a	7,67
Cultivo de Marañón	17,24a	53,33	12,31a	32,28

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

El porcentaje de mesoporos de los suelos estudiados se encuentran por encima del 10% en los dos horizontes, siendo menor para el segundo frente al primero, con un coeficiente de variabilidad.

3.2.1.8.3 Microporosidad

Los poros menores de 60 micras son denominados micro poros, los cuales tiene como función el movimiento capilar del agua.

Tabla. 3-14. Comportamiento de la Microporosidad de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	7,45a	191,15	16,28ab	70,78
Caucho	12,87a	135,48	9,10a	105,71
Plátano - Maíz	17,89a	70,32	47,34cd	22,03
Palma (18 años)	11,58a	45,87	37,86bcd	34,26
Pasto Toledo	41,11b	47,28	47,52cd	41,05
Pasto Bachearía	54,36b	20,37	58,48d	18,59
Cultivo de Cítricos	15,15a	102,65	14,50ab	118,21

Cultivo de Mango	19,66a	86,71	34,53bc	55,83
Plantación Forestal	12,80a	97,23	18,05ab	111,31
Cultivo de Marañón	4,25a	89,98	10,92a	78,76

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

Los valores de microporosidad están entre 4,25 y 54,36% para el horizonte uno, en el dos oscilan entre 9,10 y 58,48%, siendo el uso/ocupación de pasto bachearía el de los datos mayores, lo que implica que estos suelos presentan una mala aireación y problemas de drenaje. De acuerdo con Pinzón 2009, los datos encontrados para los microporos son típicos en los suelos arcillosos.

3.2.1.8.4 Porosidad Total

Tabla. 3-15. Comportamiento de la Porosidad Total de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	31,43a	54,31	36,99ab	34,84
Caucho	36,65a	52,10	27,78a	50,57
Plátano - Maíz	41,29ab	46,22	70,73cd	19,24
Palma (18 años)	36,19a	15,48	61,17bcd	25,11
Pasto Toledo	65,86bc	26,57	74,09cd	22,61
Pasto Bachearía	76,99c	15,27	85,22d	6,60
Cultivo de Cítricos	38,95ab	48,85	40,04a	35,13
Cultivo de Mango	42,95ab	42,12	61,04ab	24,38
Plantación Forestal	34,05a	33,29	43,80a	44,26
Cultivo de Marañón	28,60a	66,28	34,83ab	42,31

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

La mayoría de los suelos estudiados presentan porosidad total menor del 50%, a excepción de los usos/ocupaciones pasto Toledo y pasto bachearía que están por encima del 60% en sus dos horizontes. Lo que implica que los suelos presentan mala aireación y el drenaje está entre moderado y malo.

3.2.1.9 Estabilidad de Agregados

La estabilidad de agregados permite determinar la susceptibilidad de los agregados a

Para los suelos del estudio la tabla 3-16, presenta los valores encontrados en el laboratorio, mediante el ensayo de yoder.

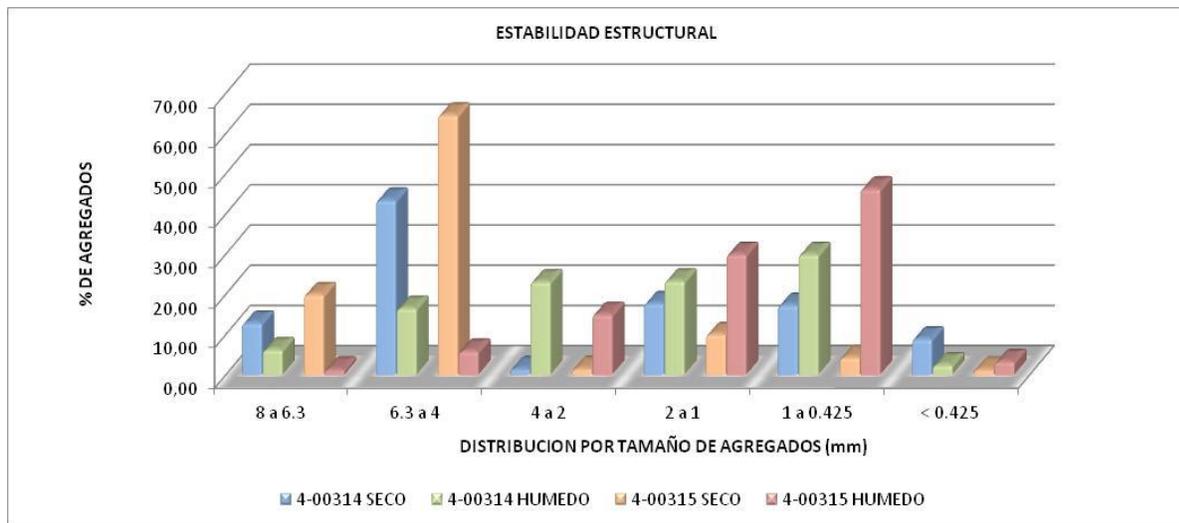
Tabla 3-16. Comportamiento de la Estabilidad de Agregados de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	89,10a	12,12	85,80ab	8,87
Caucho	82,05a	11,74	76,44ab	4,86
Plátano - Maíz	79,52a	7,66	67,12a	30,62
Palma (18 años)	83,38a	13,54	78,69ab	15,87
Pasto Toledo	90,24a	5,07	85,16ab	8,65
Pasto Bachearía	87,45a	4,58	82,62ab	5,00
Cultivo de Cítricos	78,97a	9,84	73,61a	24,52
Cultivo de Mango	84,92a	9,86	80,50ab	13,44
Plantación Forestal	91,95a	2,07	92,84a	2,05
Cultivo de Marañón	86,32a	9,41	82,42ab	13,17

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

Para el primer horizonte la estabilidad de agregados esta variando entre moderadamente estable en su mayoría y para el segundo horizonte se encuentran entre moderadamente estable y estables, alguno ligeramente estables, lo que concuerda con Jamioy 2011 y Rubiano 2005.

Figura 3-5: Distribución de los agregados



3.2.1.10 Diámetro Ponderado Medio – DPM

Otra manera de presentar los valores de Estabilidad Estructural es el DPM, lo que nos permite visualizar la homogeneidad de los agregados,

Tabla. 3-17. Comportamiento del DPM de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	43,47b	103,27	33,19ab	75,74
Caucho	22,65b	32,91	59,40ab	95,08
Plátano - Maíz	43,94a	161,88	3,21ab	134,52
Palma (18 años)	14,90b	95,75	3,17ab	134,84
Pasto Toledo	13,98b	62,23	2,03ab	79,31
Pasto Bachearía	8,19b	117,51	3,08ab	63,81

Cultivo de Cítricos	9,50b	54,95	6,62a	77,20
Cultivo de Mango	13,60b	109,81	14,52ab	157,00
Plantación Forestal	119,26b	164,64	13,15a	53,92
Cultivo de Marañón	59,26b	49,69	5,39ab	88,24

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

Los datos DPM para el primer horizonte se encuentran entre 119,26 y 8,19 mm siendo el más alto para la plantación forestal, para el segundo horizonte varía entre 59,40 y 2,03, es de anotar que los valores disminuyen para el horizonte más profundo lo que

3.2.2 Propiedades Químicas

De acuerdo a Malagón et,al 1995, quien afirma que el estudio de las características y propiedades químicas del suelo involucra la determinación y cuantificación de la composición de las sustancias tanto inorgánicas como orgánicas, y la evaluación de las transformaciones a que están sujetas en todas y cada una de las fases de formación del suelo y desarrollo del perfil, desde el material parental hasta su etapa final y lo expuesto por Hillel 1998, la condición química del suelo afecta las relaciones suelo-planta, calidad del agua, disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo para plantas y otros organismos, movilidad de contaminantes, condiciona también algunas características físicas y la actividad de algunos organismos del suelo, se analiza los resultados obtenidos para los suelos estudiados.

3.2.2.1 pH

La reacción se refiere al carácter ácido, neutro o alcalino que se puede presentar en el suelo; es decir, a su pH. La escala de valores para el pH va de 0 a 14, pero en los suelos los valores comúnmente están entre 4,0 y 10,0 aproximadamente. En la Tabla 3-18 se muestran valores de pH de los suelos.

Tabla. 3-18. Comportamiento del pH de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	4,73d	4,69	4,63bcd	2,07

Caucho	4,20ab	3,89	4,53abc	2,12
Plátano - Maíz	4,43abcd	5,01	4,48abcd	2,81
Palma (18 años)	4,65ad	2,78	4,65bc	2,78
Pasto Toledo	4,58bcd	7,86	4,58bcd	1,09
Pasto Bachearía	4,23ab	7,86	4,78ab	2,64
Cultivo de Cítricos	4,35abcd	8,07	4,68cd	2,69
Cultivo de Mango	4,13a	4,14	4,68cd	1,07
Plantación Forestal	4,05a	4,28	4,38a	1,14
Cultivo de Marañón	4,33abc	4,38	4,53abc	1,10

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

Para el horizonte 1 el pH presenta valores que se pueden clasificar (ver tabla 3-18) entre ácidos y extremadamente ácido y para el horizonte dos extremadamente ácidos, datos lo que ratifica lo encontrado por Jamoy 2013.

Al ser pH una de la propiedades químicas más importante del suelo ya que él controla la actividad microbiana y la mineralización de la materia orgánica, estos suelos al contar con pHs ácidos se ve afectada la disponibilidad de nutrientes.

Los valores encontrados son consecuentes con los reportados por Muñoz (1985) de 4.4 para suelos oxisoles de la libertad

3.2.2.1 Acidez intercambiable

Tabla. 3-19. Comportamiento de la Acidez Intercambiable de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	1,19a	53,08	1,60a	10,21
Caucho	2,03abc	16,32	1,73ab	5,55
Plátano - Maíz	1,55bcd	17,07	1,72ab	44,85

Palma (18 años)	1,78abc	10,66	1,70ab	10,74
Pasto Toledo	1,95abc	23,87	2,65d	4,87
Pasto Bachearía	2,48bcd	32,72	1,93abc	27,28
Cultivo de Cítricos	2,55bcd	30,80	1,92abc	35,61
Cultivo de Mango	3,45d	7,67	2,25bcd	5,74
Plantación Forestal	2,08abcd	57,04	2,70abc	6,76
Cultivo de Marañón	2,68cd	26,68	2,48cd	11,61

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

Los suelos evaluados presentaron valores de acidez intercambiable por encima de 2 Cmol (+)/kg de suelo en un 87.27% de los sitios muestreados. Los menores valores los presentaron palma18 (0.00) y cultivos transitorios (0.00) y los mayores palma30 (4.85 Cmol (+)/kg de suelo) y pasto llanero más maní forrajero (4.70 Cmol (+)/kg de suelo). El menor nivel promedio de acidez intercambiable lo presentó cultivos transitorios y el mayor pasto llanero asociado con maní forrajero. El rango más alto fue para palma18 (0.00 – 3.78) y el más bajo para pasto llanero más maní forrajero (4.12 – 4.70).

Los resultados obtenidos para acidez intercambiable (valores > 2 Cmol (+)/kg suelo) sugieren que probablemente en el complejo de cambio esta predominando el aluminio intercambiable, por lo tanto se puede afirmar que los suelos de los sistemas productivos pueden presentar problemas de toxicidad que dificultaría el normal crecimiento de las plantas, a excepción del suelo del sistema cultivos transitorios.

Con base en los resultados obtenidos, se percibe probables problemas de la precipitación del fósforo de manera de fosfatos de aluminio.

3.2.2.1 Carbono Orgánico

Este elemento proviene del material parental está compuesto por sedimentos orgánicos.

Tabla. 3-20. Comportamiento del Carbono Orgánico de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	1,12ab	9,34	0,71a	14,65
Caucho	1,15ab	5,02	0,80a	4,48
Plátano - Maíz	1,18ab	4,26	0,80a	12,89
Palma (18 años)	1,16ab	37,09	1,63b	39,04
Pasto Toledo	1,25ab	13,86	0,80a	17,98
Pasto Bachearía	1,09a	31,94	0,48a	52,55
Cultivo de Cítricos	1,19ab	30,26	0,87a	21,20
Cultivo de Mango	1,50b	9,43	0,80a	15,18
Plantación Forestal	1,43ab	15,56	0,68a	9,79
Cultivo de Marañón	1,35ab	9,56	0,86a	23,48

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan (P<0,05)

Los suelos presentaron contenidos de carbono bajos que varían entre 1,09 y 1,50 % para el horizonte 1 y de 0,48 a 1,63%; los valores más bajos lo presentó el pasto bachearía y los más altos la plantación forestal. Esto datos están por debajo a lo citado por Jamioy 2011, que reporto Guerrero (1990) que en materia orgánica para suelos de la libertad de 2.1% es decir 1.22% de carbono orgánico

3.2.2.1 Fosforo Disponible

Tabla. 3-21. Comportamiento del fosforo disponible de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	13,02ab	160,06	11,58a	193,72
Caucho	5,35a	115,76	0,04a	200,00

Plátano - Maíz	16,80ab	81,04	0,29a	115,47
Palma (18 años)	2,42a	176,31	4,77a	185,15
Pasto Toledo	23,80b	63,58	1,32a	85,69
Pasto Bachearía	3,05a	140,70	0,00a	0,00
Cultivo de Cítricos	9,55ab	72,55	2,35a	116,77
Cultivo de Mango	4,65a	30,84	0,17a	80,01
Plantación Forestal	0,55a	115,47	0,00a	0,00
Cultivo de Marañón	6,32a	71,11	0,14a	200,00

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

Los valores de fósforo disponible son bajos (IGAC), < 15 ppm, para el horizonte 2 y en el horizonte 1 oscila entre bajo y medio 15 y 40 ppm (plátano-maíz, pasto Toledo).

Estos datos están relacionados con los de pH y acidez intercambiable, ya que pueden provocar la precipitación del fósforo en forma de fosfatos de fósforo.

El fósforo tiene un papel fundamental en la vida de las plantas; es constituyente de ácidos nucleídos, enzimas, vitaminas, fosfolípidos, fitina; además es indispensable en procesos donde hay transformaciones de energía, Garavito 2012.

3.2.2.1 Capacidad de Intercambio Catiónico – CIC

Esta característica muestra la disponibilidad de nutrientes del suelo para que sea adsorbida por las plantas.

Tabla. 3-21. Comportamiento de la Capacidad de Intercambio Catiónico de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	6,30ab	8,65	6,98b	11,43

Caucho	8,63ab	5,71	9,95a	42,90
Plátano - Maíz	8,33a	4,53	7,55ab	7,84
Palma (18 años)	9,58abc	17,32	10,15ab	9,12
Pasto Toledo	10,98cd	15,00	9,68b	6,11
Pasto Bachearía	10,00bc	8,08	9,00ab	12,34
Cultivo de Cítricos	10,48c	10,53	9,78ab	14,06
Cultivo de Mango	12,20d	5,31	9,03ab	6,36
Plantación Forestal	10,55c	12,63	8,50a	4,99
Cultivo de Marañón	12,43d	6,28	10,08ab	8,40

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

La CIC depende del pH que presente el suelo, para los del estudio el pH es altamente ácido por lo que se esperaría valores bajos de CIC.

Lo encontrado muestra que para el primer horizonte se encuentra en un grado medio (10-20 meq/100g) con tendencia a bajos (<10 meq/100g); para el horizonte 2 la CIC es baja entre 6,98 a 10,15 meq/100g y en el horizonte 1 el cultivo de marañón y de mango se clasifican en medio con valores de 12,43 y 12,20 meq/100g respectivamente.

3.2.2.1 Calcio

Tabla. 3-22. Comportamiento del Calcio (C) de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	1,26b	39,71	0,33a	18,76
Caucho	0,28a	15,28	0,22a	8,30
Plátano - Maíz	0,65ab	19,83	0,30a	7,06
Palma (18 años)	0,83ab	71,91	1,22b	100,10
Pasto Toledo	1,25b	23,47	0,37a	18,06

Pasto Bachearía	0,87ab	71,14	0,55ab	46,45
Cultivo de Cítricos	0,61ab	22,52	0,76ab	108,24
Cultivo de Mango	0,71ab	7,63	0,33a	14,19
Plantación Forestal	0,29a	19,30	0,24a	20,69
Cultivo de Marañón	0,94ab	73,71	0,41a	32,41

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

Los valores obtenidos de Ca^{++} se encuentran por debajo de los valores óptimos para las plantas.

3.2.2.1 Magnesio

Tabla. 3-24. Comportamiento del Magnesio (Mg) de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	0,35cd	47,72	0,10a	29,46
Caucho	0,07a	19,86	0,03a	15,38
Plátano - Maíz	0,27abcd	24,94	0,06a	21,88
Palma (18 años)	0,12ab	98,76	0,15a	111,86
Pasto Toledo	0,44d	58,30	0,10a	29,46
Pasto Bachearía	0,06a	34,82	0,03a	0,00
Cultivo de Cítricos	0,19abc	39,62	0,18a	141,72
Cultivo de Mango	0,16abc	3,08	0,04a	16,50
Plantación Forestal	0,14ab	31,63	0,06a	38,56
Cultivo de Marañón	0,28acd	74,67	0,09a	48,51

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

El contenido de magnesio de los suelos estudiados se encuentra por debajo de los valores ideales para el desarrollo de las plantas.

3.2.2.1 Potasio

Tabla. 3-25. Comportamiento del Potasio (K) de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	0,17ab	37,98	0,11a	11,18
Caucho	0,13ab	30,42	0,09a	9,07
Plátano - Maíz	0,20b	28,90	0,11a	4,44
Palma (18 años)	0,12a	29,66	0,13a	22,54
Pasto Toledo	0,18ab	16,36	0,13a	13,39
Pasto Bachearía	0,29ab	14,75	0,20a	7,07
Cultivo de Cítricos	0,29c	22,28	0,30b	63,84
Cultivo de Mango	0,28c	3,64	0,17a	12,71
Plantación Forestal	0,20b	15,38	0,14a	4,28
Cultivo de Marañón	0,28c	12,71	0,17a	35,54

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

Los bajos contenidos de potasio de acuerdo a los resultados de Laboratorio ya que se encuentran por debajo de 0, 2 meq/100g, lo que se puede deber a lo extremadamente ácidos de los suelos y concuerda los datos obtenidos para CIC.

Los usos/ocupaciones trabajados presentan bajos niveles de bases intercambiables, lo que se puede explicar a partir de los bajos valores de CIC, a partir de los minerales de origen caolinita y a que los suelos oxisoles has sido sometido a un avanzado proceso de intemperismo lo que afecta los nutrientes.

Es de interés para el manejo de los suelos las relaciones entre Ca, Mg y K, debido a que el contenido de Ca afecta los contenidos de Mg y K, es como si el contenido de Ca es alto induce a valores bajos de Mg y/o k.

Se obtuvo para la relación Ca/Mg, deficiencia de Mg para el uso/ocupación pasto bachearía, en la relación Mg/K deficiencias de Mg en los usos/ocupaciones, caucho, pasto bachearía, cultivos de cítricos, mango y plantación forestal.

3.2.2.1 Sodio

Tabla. 3-26. Comportamiento del Sodio (Na) de los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación

Uso	Horizonte 1		Horizonte 2	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Cultivos Transitorios	0,05ab	58,88	0,03a	40,00
Caucho	0,08abcd	53,89	0,03a	88,38
Plátano - Maíz	0,06abc	79,25	0,06ab	10,50
Palma (18 años)	0,04a	73,60	0,06abc	80,51
Pasto Toledo	0,08abcd	85,83	0,07abc	86,50
Pasto Bachearía	0,11bcd	8,91	0,13cd	20,13
Cultivo de Cítricos	0,12d	34,23	0,10cd	14,63
Cultivo de Mango	0,11cd	8,51	0,08bcd	6,06
Plantación Forestal	0,12d	26,35	0,10cd	20,11
Cultivo de Marañón	0,11bcd	16,50	0,09bcd	5,71

CV: Coeficiente de variación. Valores seguidos de letras minúsculas distintas en filas o de letras mayúsculas en columnas, indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P < 0,05$)

3.2.3 Propiedades Mineralógicas de los suelos

Cuando el intemperismo es muy fuerte, desaparecen los minerales primarios y las arcillas 2:1, y queda una composición mineralógica, que puede considerarse como el residuo de todo el proceso, formada principalmente por óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, caolinita y cuarzo. En este estado, el suelo ha llegado a los estados finales de su evolución; es un suelo maduro.

Las especies minerales regulan características físicas relacionadas con porosidad, aireación, erosión, riegos y drenajes, obras de ingeniería, uso de maquinaria, etc. Las arcillas y los óxidos controlan la disponibilidad de nutriente, que poseen cargas eléctricas tanto positivas como negativas, capaces de retener los nutrientes contra la acción del lavado.

Mejia, 1980 citado por Sánchez 2010 afirma que el conocimiento de la composición mineralógica de los suelos permite determinar la capacidad potencial que tienen para suministrar nutrientes a las plantas, la acción de los factores y procesos de formación dentro del proceso evolutivo y la intensidad de los procesos de meteorización de alteración que han afectado los materiales originales. La fracción mineral del suelo está compuesta por la fracción gruesa (arena y limo) y la fracción fina (arcilla). La fracción gruesa constituye una reserva potencial de nutrientes y la fracción arcillosa determina el comportamiento físico-químico del suelo, dado por su actividad

De la proporción, composición y estructura de los minerales de la arcilla depende en gran parte: 1) la capacidad de los suelos para intercambiar, fijar, o retener los iones de la solución del suelo y de los fertilizantes, y 2) un gran número de importantes propiedades físicas como la estabilidad estructural, la capacidad de retención de humedad, la consistencia (plasticidad y pegajosidad), la conductividad hidráulica, la susceptibilidad a la expansión y contracción y en general, las condiciones de labranza. Estas características químicas y físicas son responsables de la fertilidad de los suelos (Sanchez, 2010).

3.2.3.1 Mineralogía de la fracción arena

La fracción arena está constituida principalmente por minerales primarios, que incluyen también agregados microcristalinos como silicio y fragmentos líticos o pequeños pedazos de rocas que contienen varios minerales.

En la tabla 3-27 se observa que en la mineralogía de la fracción arena los valores reportados son mayores del 90% de contenido de cuarzo en todos los lotes estudiados. lo que indica que la presencia de minerales fácilmente intemperizables como son: hematita, circón, biotita y magnetita que aparecen en muy pequeñas cantidades, lo cual permite diagnosticar suelos ácidos, pobres en calcio, magnesio, potasio, fósforo y además en general son suelos con una fertilidad actual y potencial baja

Tabla. 3-17. Minerales que componen la Fracción Arena para los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación IGAC.

Uso/ Minerales (%)	H1					H2				
	Cuarzo	Hemati ta	Circon	Biotita	Magne tita	Cuarzo	Hemati ta	Circon	Biotita	Magne tita
Cultivos Transitorios	100	tr				100	tr			
Caucho	99	tr	tr			100	-			
Plátano - Maíz	97	3	-	-	-	98	2	-	-	-
Palma (18 años)	94	6	-	tr	-	95	5	-	-	-
Pasto Toledo	96	4	-	-	-	97	3	tr	-	-
Pasto Bachearía	98	2	-	-	-	100	tr	-	-	-
Cultivo de Cítricos	92	8	-	-	-	93	7	-	-	-
Cultivo de Mango	97	3	-	-	-	98	2	-	-	-
Plantación Forestal	100	tr	tr	-	-	98	1	1	-	-
Cultivo de Marañón	99	1	tr	-	tr	98	2	tr	-	tr

3.2.3.2 Minerales Fracción Arcilla

Los minerales componentes de la fracción arcilla, partículas menores de 2 micras, son de suma importancia en los suelos, ya que son los que intervienen en algunas propiedades físicas y químicas; a la vez, que su presencia puede explicar la génesis y evolución de los suelos. Las arcillas de los suelos tienen diversos orígenes: Las arcillas heredadas que se han preservado del material parental y representa la arcilla original;

En el estudio la arcilla dominante es la caolinita, en cantidades mayores del 50% (Tabla 3-28); por lo que al ser la caolinita un mineral muy estable, resultante de la alteración de los productos primarios; su formación está determinada por el ambiente que prevalece en el suelo. En el caso del área estudiada, la mayoría de los suelos están formados a partir de areniscas y tienden hacia contenidos bajos de bases, poca reserva de nutrientes y valores bajos de pH. Procesos simultáneos de solubilización y lixiviación de sílice y la liberación de hierro y aluminio en el perfil, producen un predominio de óxidos muchas veces cristalinas, tales como gibsita, bohemitita, lepidocrita sobre la caolinita.

Tabla. 3-18. Minerales que componen la Fracción Arcilla para los horizontes 1 y 2 por uso/ocupación – Difracción de rayos X

Uso/ Minerales (%)	H1							H2						
	Caolinita	Goetita	Cuarzo	Cloritas	Pirofilitas	Gibsita	Integrados	Caolinita	Goetita	Cuarzo	Cloritas	Pirofilitas	Gibsita	Integrados
Cultivos Transitorios	++++	++	+	tr			+	++++	++	+		+		+
Caucho	++++	++	+				+	++++	++	+		tr		+
Plátano - Palma (18 años)	++++	++	+				+	++++	++	+	tr			+
Pasto Toledo	++++	++	+				++	++++	++	+			tr	tr
Pasto Bachearía	++++	++	+				+	++++	++	+				+
Cultivo de Cítricos	++++	++	+				+	++++	++	+				+
Cultivo de Mango	++++	++					+	++++	++	+		tr		+
Plantación Forestal	+++	+	++				++	+++	+	+				++
Cultivo de Maraón	++++	++	+		+		+	++++	+	+				+

También se presentan minerales integrados en 5 a 15%, producto de la alternancia de dos o más láminas silicatados de naturaleza diferente; su presencia reafirma la posibilidad de etapas verdaderamente intermedias o manifiesta la ocurrencia de reacciones, alteraciones y transformaciones dinámicas durante la evolución de los suelos.

En conclusión, se observa que la fracción fina tiende siempre a mostrar cierta homogeneidad en una predominancia de la arcilla caolinita asociada con goetita, cuarzo y minerales integrados en bajas proporciones.

La mineralogía arcillosa es poco favorable respecto del comportamiento químico de los suelos, dado que el predominio de minerales caoliníticos propicia baja capacidad para absorción y almacenamiento de elementos nutrientes para las plantas, si estos llegaran a ser transferidos al complejo absorbente por la alteración de los escasos minerales intemperizables que se encuentran en los perfiles.

3.3 Análisis de Correlación

Con el fin de analizar el comportamiento entre las propiedades determinadas y su relación, se sometió los datos al análisis de correlación por medio del coeficiente de Pearson para cada uno de los suelos y usos/ocupaciones estudiados, para los dos horizontes trabajados.

Tabla 3-19. Correlaciones de Pearson de las propiedades Físicas para el horizonte 1

	A	L	Ar	Da	Dr	La	Ib	Ks	Rp	Ma	Ms	Mi	Pt	Ea	DPM
A	1	-0,467**	0,470**	0,009	0,26	-0,067	-0,067	-0,164	-0,079	-0,092	-0,051	0,220	0,176	-0,379	0,277
L		1	-0,561**	0,301	0,017	-0,185	-0,103	0,321*	0,175	0,025	-0,077	-0,184	-0,181	0,317	0,151
Ar			1	0,008	0,248	-0,031	-0,166	-0,101	0,062	0,124	0,022	0,016	0,038	-0,096	
Da				1	0,207	0,014	0,093	0,141	0,083	-0,138	0,191	-0,332*	-0,304	0,334	0,277
Dr					1	0,092	0,004	-0,035	-0,040	0,134	-0,100	0,014	0,024	0,650	-0,259
La						1	-0,133	-0,154	0,004	0,292	0,638**	0,096	0,271	0,173	0,085
Ib							1	-0,154	0,004	0,292	0,638**	0,096	0,271	0,173	0,085
Ks								1	0,149	-0,246	0,007	-0,254	-0,285	0,059	-0,058
Rp									1	0,167	-0,111	-0,154	-0,125	-0,025	0,048
Ma										1	0,304	-0,061	0,216	-0,154	0,025
Ms											1	0,146	0,388	-0,022	0,014
Mi												1	0,096	-0,022	0,014
Pt													1	0,021	0,089
Ea														1	0,650**
DPM															1

A=arena; L=limo; Ar=arcilla; Da=densidad aparente; Dr=densidad real La=lamina aprovechable; Ib=infiltración básica; Ks=conductividad hidráulica; Rp=resistencia a la penetración; Ma=macroporosidad; Ms=mesoporosidad; Mi=microporosidad; Pt=porosidad total; Ea=estabilidad de agregados; DPM=diámetro ponderado medio. **La correlación es significativa al nivel 0,01; *La correlación es significativa al nivel 0,05.

La tabla 3-29, muestra el análisis de correlación entre las propiedades físicas para el horizonte 1, encontrándose relaciones positivas con altos valores significativo entre la densidad aparente y la estabilidad de agregados, entre el limo la conductividad hidráulica y la estabilidad de agregados, entre la lamina aprovechable y la mesoporosidad; entre la mesoporosidad y la porosidad total y la estabilidad de agregados y el diámetro ponderado medio. Estas correlaciones altas de Pearson resultan lógicas, debido a que los valores de densidad aparente, los de estabilidad de agregados y los diámetro ponderado medio, aumentan directamente proporcional; los valores de mesoporosidad afectaría directamente la cuantificación de la porosidad total y por ende la disponibilidad del agua en el suelo lo que se en altos niveles de conductividad hidráulica. Para Fernández-Ugalde et al. (2009) señala que suelos sin labores de preparación presentan un mayor porcentaje de microporos

Para el caso de las relaciones negativas, se encuentra relación significativa entre, la arena, el limo y la arcilla, la densidad aparente y la microporsidad, siendo de relación inversa a medida que la densidad aumenta la microporosidad disminuye. Este comportamiento se debe a que el contenido de arcilla es inferior a los contenidos de arena y limo como lo reportó Ramírez-López et al. (2008).

En la tabla 3-30, se presenta las correlaciones para los propiedades físicas en el horizonte 2, encontrándose un comportamiento similar al del horizonte 1, donde la arena presenta relaciones altamente significativas negativas con la arcilla, la densidad aparente con la macroporosidad, demostrándose en que la textura del suelo afecta el valor de la densidad aparente que a su vez se relaciona directamente. la que ha sido observada por Raczkowski et al. (2012).

Tabla 3-20. Correlaciones de Pearson de las propiedades Físicas para el horizonte 2

	A	L	Ar	Da	Dr	La	Ks	Rp	Ma	Ms	Mi	Pt	Ea	DPM
A	1	-0,302	-0,831**	-0,094	-0,027	0,110	-0,130	-0,195	-0,268	-0,371*	0,259	0,143	-0,311	-0,045
L		1	-0,302	0,263	0,007	0,164	-0,004	0,205	0,105	0,401*	0,056	0,132	0,249	-0,018
Ar			1	-0,094	-0,027	0,110	0,133	0,077	0,209	0,140	-0,293	-0,221	0,168	0,056
Da				1	0,049	-0,045	0,284	-0,308	-0,405**	-0,186	-0,173	-0,261	0,124	0,002
Dr					1	-0,382*	-0,286	0,023	0,219	-0,204	0,018	0,023	0,060	0,189
La						1	0,213	-0,072	0,222	0,673**	0,080	0,217	0,079	-0,249
Ks							1	-0,274	-0,049	0,096	-0,252	-0,233	0,046	-0,031
Rp								1	0,235	0,208	0,200	0,261	-0,080	0,060
Ma									1	0,259	0,015	0,222	0,092	-0,002
Ms										1	0,108		0,185	-0,101
Mi											1		0,051	-0,048
Pt												1	0,093	-0,061
Ea													1	0,442**
DPM														1

A=arena; L=limo; Ar=arcilla; Da=densidad aparente; Dr=densidad real La=lamina aprovechable; Ks=conductividad hidráulica; Rp=resistencia a la penetración; Ma=macroporosidad; Ms=mesoporosidad; Mi=microporosidad; Pt=porosidad total; Ea=estabilidad de agregados; DPM=diámetro ponderado medio. **La correlación es significativa al nivel 0,01; *La correlación es significativa al nivel 0,05.

Para las propiedades físicas en cuanto a la correlación coinciden en los dos horizontes, la densidad aparente, la macroporosidad y la microporosidad y la textura del suelo tal como lo indica Dexter et al., 2007 y Whalley et al., 2007

Con relación a las propiedades químicas, de los suelos estudiados para los diferentes usos/ocupaciones para los dos horizontes se encontró:

Tabla 3-21. Correlaciones de Pearson de las propiedades químicas para el horizonte 1

	pH	Ai	CO	Pdisp	CICA	Ca	Mg	K	Na	A	L	Ar
pH	1	-0,650**	-0,463**	0,453**	-0,436**	0,600**	0,595**	-0,278	-0,512**	0,001	0,204	-0,204
Ai		1	0,346*	-0,300	0,586**	-0,407**	-0,377*	0,428**	0,450**	0,053	-0,363*	0,313*
CO			1	-0,154	0,676**	0,109	0,055	0,223	0,388*	-0,206	-0,225	0,417**
Pdis				1	-0,188	0,393*	0,556**	-0,114	-0,320*	-0,028	-0,073	0,099
CICA					1	0,111	0,046	0,495**	0,505**	-0,241	-0,133	0,358*
Ca						1	0,719**	0,138	-0,124	0,013	0,066	-0,078
Mg							1	0,088	-0,066	-0,319*	0,093	0,206
K								1	0,394*	-0,194	-0,074	0,256
Na									1	0,026	-0,039	0,015
A										1	-0,467**	-0,470**
L											1	-0,561**
Ar												1

pH=pH; Ai=acidez intercambiable; CO=carbono orgánico; Pdis=fosforo disponible; CICA=capacidad de intercambio catiónico; Ca=calcio; Mg=magnesio; K=potasio; Na=sodio; A=arena; L=limo; Ar=arcilla;. **La correlación es significativa al nivel 0,01; *La correlación es significante al nivel 0,05.

Las relaciones altamente significativas positivas se encuentran entre el pH y fosforo disponible, calcio y magnesio, entre acidez intercambiable, sodio, el potasio y la arcilla; entre carbono orgánica la capacidad de intercambio catiónico, y la arcilla; entre fosforo disponible y magnesio, entre capacidad de intercambio catiónico y potasio y entre el calcio y el magnesio. Lo que concuerda con lo definido por Jamioy 2011, en cuanto a que el pH y la acidez intercambiable son afectados positivamente cuando se aplica cal dolomita. El pH se incrementa reduciéndose la acidez intercambiable y por consiguiente el nivel de toxicidad del aluminio para las plantas disminuye, lo que permite un aumento significativo en la productividad. El carbono orgánico y el hierro disminuyen con el uso y el manejo, por tanto son afectados negativamente.

Entre las negativas con alta relación significativa se encuentran, el pH con la acidez intercambiable, la capacidad de intercambio catiónico, el carbono orgánico y el sodio; la acidez intercambiable con el calcio y el magnesio y la arena con el limo y la arcilla. De acuerdo con Ávila 2005, en suelos de alta superficie específica de los minerales arcillosos característicos de estos suelos (alófanos) y los coloides producto de la descomposición de los materiales orgánicos que fueron incorporados al suelo en la transición bosque-cultivo. Los valores de CICA

superan en aproximadamente 16 meq/100g a los de bosque y en casi 20 meq/100g a los de 60 años

Para el horizonte 2, las correlaciones de Pearson son muy similares a las del horizonte 1, las cuales se presentan en la tabla 3-32.

Tabla 3-22. Correlaciones de Pearson de las propiedades químicas para el horizonte 2

	pH	Acl	CO	Pdisp	CICA	Ca	Mg	K	Na	A	L	Ar
pH	1	-0.512**	0,036	0,205	0,094	0.433**	0,266	0.406**	0,176	0,118	-0,292	0,052
Acl		1	-0,152	-0,273	0,175	-0,548**	-0,455**	-0,176	-0,150	-0,264	.380*	0,044
CO			1	0,064	0,237	0,389*	0,303	0,010	-0,228	0,265	-0,101	-0,209
Pdis				1	-0,145	0,265	0,235	-0,032	-0,120	0,328*	-0,189	-0,221
CICA					1	0,276	0,239	0,267	0,287	-0,027	0,035	0,007
Ca						1	0,833**	0,519**	0,307	0,067	0,004	-0,069
Mg							1	0,700**	0,212	-0,008	0,021	-0,005
K								1	0,488**	-0,111	0,093	0,057
Na									1	-0,418**	0,267	0,265
A										1	-0,302	-0,831**
L											1	-0,278
Ar												1

pH=pH; Ai=acidez intercambiable; CO=carbono orgánico; Pdis=fosforo disponible; CICA=capacidad de intercambio catiónico; Ca=calcio; Mg=magnesio; K=potasio; Na=sodio; A=arena; L=limo; Ar=arcilla;. **La correlación es significativa al nivel 0,01; *La correlación es significativa al nivel 0,05.

Las relaciones positivas encontradas para este horizonte se asemejan a las discutidas previamente para el horizonte 1. El pH presenta una alta relación significativa con el calcio y el potasio; el calcio, el magnesio y el potasio;

Dentro de las negativas altamente significativas están, pH con acidez intercambiable, con calcio y magnesio; la arena con el sodio y con la arcilla, lo que se podría explicar debido a los materiales de origen de estos suelos.

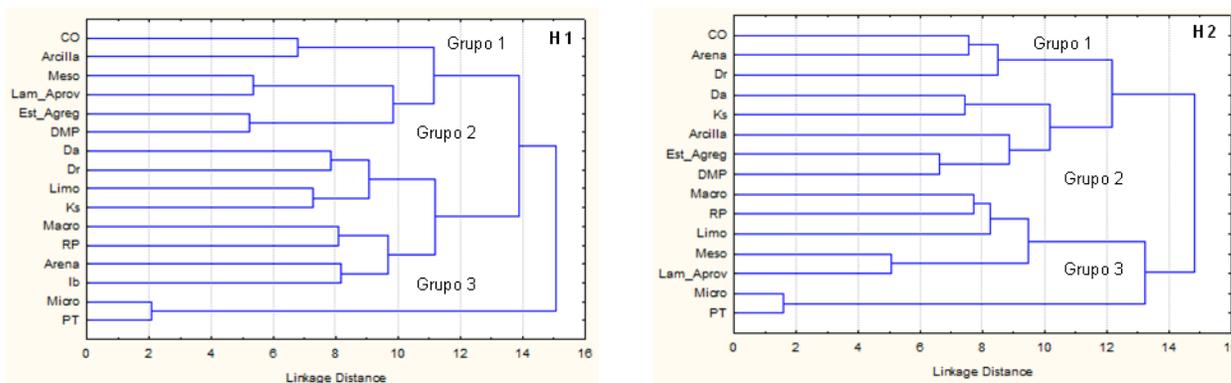
3.4 Análisis clúster

De acuerdo con Stelluti et al., 1998, el análisis clúster permite identificar y aclarar la relación junto con el comportamiento de las variables descrito inicialmente, con el análisis de correlación de Pearson, mediante el uso de estadística multivariada,

que permite realizar este agrupamiento de variables en pocos intervalos significativos.

Para las propiedades físicas de los suelos estudiados presentan estas agrupaciones:

Figura 3-5. Dendograma de agrupamiento de las propiedades físicas por uso/ocupación para los horizontes 1 y 2



En la Figura 3-6, se muestra el agrupamiento que mediante técnicas multivariadas se obtuvo, para los dos horizontes trabajados en los diferentes usos/ocupaciones, donde se definen tres grupos para cada profundidad, utilizando una distancia Euclidiana de 16 en el horizonte 1 y de 15 en el horizonte 2.

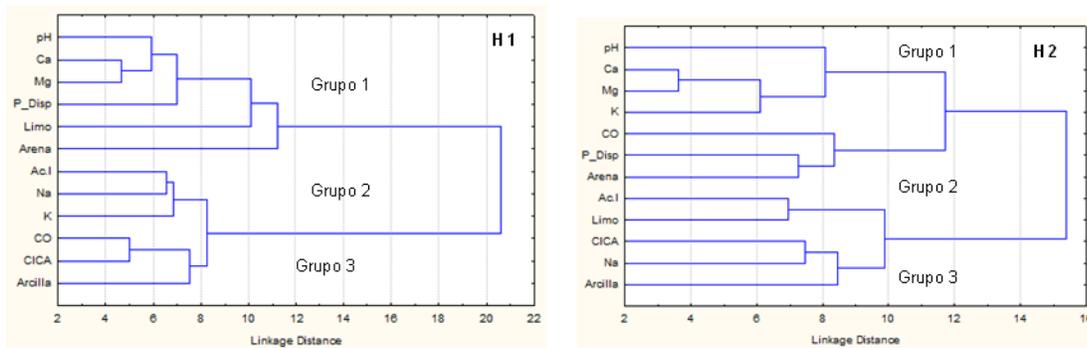
Para el horizonte 1, el grupo 1 se compone por el carbono orgánico, arcilla, mesoporos y lamina aprovechable, obtuvieron coeficiente de correlación de 0,124 y 0,638 respectivamente; para el grupo dos conformado por estabilidad de agregados, diámetro ponderado medio, densidad aparente, densidad real, limo y conductividad hidráulica, los coeficientes de correlación obtenidos son, 0,650, 0,334, -0,034, 0,317 y 0,059. En el grupo 3 se agrupan el restante de la propiedades macroporos, resistencia a la penetración, arena, infiltración básica, microporos y porosidad total, con correlaciones en general negativas y que se acercan a cero.

En el horizonte dos las agrupaciones se formaron, para el grupo 1 carbono orgánico, arena y densidad real, con correlaciones de -0,027; el grupo 2 densidad aparente, conductividad hidráulica, arcilla, estabilidad de agregados, diámetro ponderado medio, macroporosidad, resistencia a la penetración y limo, las correlaciones obtenidas 0,284, -0,094, 0,124, 0,002, 0,405,-0,308 y 0,253 respectivamente y para el grupo 3 las restante propiedades macroporosidad, lamina aprovechable, microporosidad y porosidad total.

Se anota que en el grupo para los dos horizontes coincidieron las propiedades de densidad aparente, estabilidad de agregados, diámetro ponderado medio y conductividad hidráulica, las cuales se relacionan directamente en lo que se refiere a los espacios para el movimiento de agua y nutrientes.

La Figura 3-7 muestra el resultado de la aplicación de técnicas multivariadas en la agrupación de las propiedades químicas de los suelos estudiados en cada uno de los usos/ocupaciones para los dos horizontes trabajados, definiéndose tres grupos para cada horizonte, utilizándose una distancia Euclidiana de 15, para las dos profundidades.

Figura 3-6. Dendograma de agrupamiento de las propiedades químicas por uso/ocupación para los horizontes 1 y 2



Las características químicas de los suelos estudiados para el horizonte agrupo las variables en el grupo1 el pH, el calcio, el magnesio el fósforo disponible y el limo, con coeficientes de correlación de 0,433, 0,266, 0,205 y -0,292, respectivamente; el grupo 2 las variables arena, acidez intercambiable, sodio y potasio, los coeficientes de correlación de 0,053, 0,026 y 0,194 y para el grupo 3 la variables restantes carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico, arcilla.

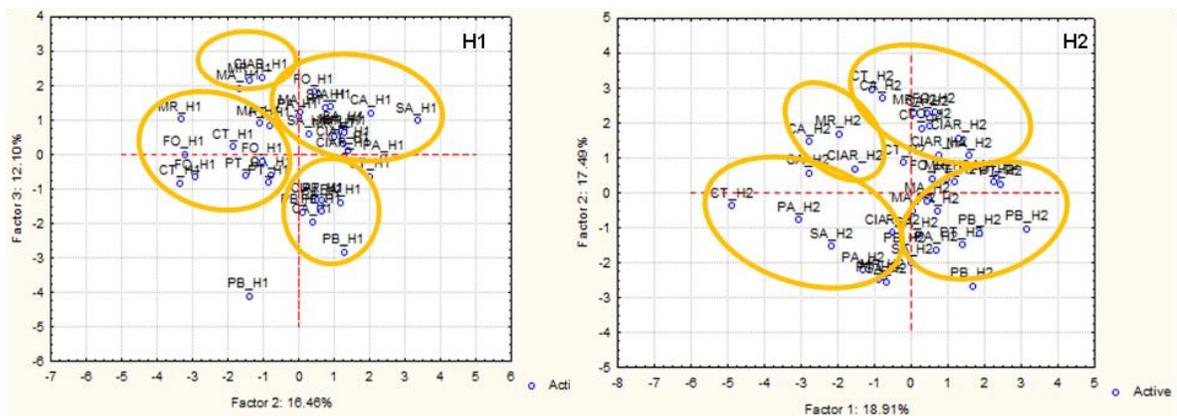
En el horizonte 2, las propiedades químicas se agruparon de la siguiente manera, grupo 1 pH, calcio, magnesio y potasio, donde presento coeficientes de correlación de 0,053, 0,026 y -0,194; para el grupo 2 las características de carbono orgánico, fósforo disponible, arena, acidez intercambiable, limo, con valores de 0,433, 0,266, 0,205 y 0 292 de coeficientes de correlación y para el grupo 3 se unieron las características restantes capacidad de intercambio catiónico, sodio y arcilla.

Con el fin de definir las áreas homogéneas en la zona de estudio a partir de los diferentes usos/ocupaciones y por horizonte, se realizó análisis de componentes principales ACP.

En el análisis de componentes principales (ACP) se relacionan los componentes que presentaron valores propios superiores a 1 y representan más del 75% de la varianza total.

La tabla 3-36, presenta los valores para las propiedades físicas en el horizonte 1, y la (Figura 3-7), muestra la agrupación.

Figura 3-7. Componentes principales obtenidos para las propiedades física por uso/ocupación para los horizontes 1 y 2



En la delimitación de las unidades homogéneas por uso/ocupación en el horizonte uno arrojo 4 zonas. Estas zonas representan donde los usos/ocupaciones son similares, por lo que definen los manejos de los suelos.

Tabla 3-23. Valores del análisis de componentes principales de las propiedades físicas para el horizonte 1

Atributo	CP1	CP2	CP3	CP 4	CP5	CP6	CP7	Comunalidad
	Horizonte 1							
CO	-0,3565	-0,1781	0,5374	-0,2698	-0,2437	0,1999	-0,1246	0,6353
Da	0,4355	-0,4423	-0,2152	0,3440	-0,2805	-0,2692	0,0893	0,7091
Dr	0,0755	0,1218	-0,1401	0,4739	0,5213	-0,4032	0,2510	0,7620
Macro	-0,3213	-0,0628	0,1740	0,6333	0,1342	0,4071	-0,2173	0,7695
Meso	-0,5228	-0,6165	-0,0773	0,2543	-0,1248	-0,1838	-0,3067	0,8674
Micro	-0,6858	0,1409	-0,5279	-0,2822	0,2316	0,1112	0,1666	0,9422
PT	-0,8056	0,0031	-0,4685	-0,0786	0,2216	0,1576	0,0511	0,9513
Lam_Aprov	-0,5348	-0,3598	0,0949	0,4270	0,0792	-0,2336	-0,2683	0,7396
Arena	-0,1377	0,4904	-0,5429	0,0843	-0,5290	-0,1255	-0,2392	0,9142
Limo	0,5655	-0,4467	-0,2699	0,0272	0,3761	0,3703	-0,0172	0,8717
Arcilla	-0,4355	-0,0134	0,7781	-0,1061	0,1201	-0,2521	0,2413	0,9427
Est_Agreg	0,0211	-0,8326	-0,1269	-0,1071	-0,0119	-0,1358	0,3677	0,8750
DMP	-0,1033	-0,7123	-0,1689	-0,1203	-0,4306	0,1567	0,2013	0,8115

Ks	0,4674	-0,2076	-0,0192	-0,3171	0,2501	-0,2367	-0,5684	0,8041
lb	0,1538	0,3998	0,0787	0,4805	-0,3329	0,0685	0,2686	0,6082
RP	0,1814	-0,1214	0,1188	0,2218	0,0571	0,6316	-0,0069	0,5132
Valor propio	2,9188	2,6340	1,9365	1,5753	1,3503	1,2854	1,0169	
Var. Total%	18,2425	16,4622	12,1031	9,8454	8,4391	8,0336	6,3557	
Var. Acumulada%	18,2425	34,7048	46,8079	56,6533	65,0924	73,1260	79,4817	

Para el primer componente (CP1), representa el 18,24% de la varianza total y muestra que la microporosidad y la porosidad total representan una correlación directa, situación que concuerda con lo establecido Jaminiy 2013, el segundo componente (CP2) tiene un peso de 16.46% donde la correlación de la estabilidad de agregados y el diámetro medio ponderado es directa, tal como lo encontró Orjuela 2011, en los suelos del Chicamocha.

Para CP3, CP4 y CP6 muestran las propiedades arcilla, macroporosidad y resistencia a la penetración. Se determina que CP5 y CP7 no presenta variables significativas.

Tabla 3-24. Valores del análisis de componentes principales para el horizonte 2

Atributo	CP1	CP2	CP3	CP 4	CP5	CP6	Comunalidad
CO	-0,3466	-0,1814	-0,1636	0,1294	0,4246	-0,5319	0,6597
Da	-0,3191	0,3441	0,2915	0,6016	0,1164	0,2128	0,7259
Dr	-0,2113	-0,1711	-0,6227	0,1957	0,2014	-0,0925	0,5491
Macro	0,5248	-0,0556	-0,3828	-0,2234	0,1697	-0,3486	0,6252
Meso	0,7923	0,0371	0,2076	0,0981	0,2413	-0,2709	0,8133
Micro	0,2987	-0,8069	0,0996	0,1447	-0,3446	0,1379	0,9090
PT	0,4930	-0,7687	0,0615	0,1145	-0,2612	0,0305	0,9200
Lam_Aprov	0,6575	0,1194	0,5185	-0,0628	0,0010	-0,2880	0,8022
Arena	-0,5953	-0,6234	0,3193	-0,0310	-0,0448	-0,2661	0,9188
Limo	0,4068	-0,0071	0,1100	0,6259	0,4919	0,2624	0,8803
Arcilla	0,3627	0,6322	-0,3858	-0,3335	-0,2416	0,1152	0,8631
Est_Agreg	0,3096	0,2008	-0,2687	0,6311	-0,3934	-0,1481	0,7833
DMP	-0,0905	0,0747	-0,5250	0,4444	-0,3483	-0,2568	0,6741
Ks	0,0211	0,5117	0,4368	0,0861	-0,14180	-0,2444	0,5404
RP	0,3816	-0,2929	-0,3880	-0,1304	0,3453	0,3026	0,6098
Valor propio	2,8357	2,6234	1,9236	1,6385	1,2262	1,0268	
Var. Total%	18,9051	17,4895	12,8241	10,9233	8,1744	6,8453	
Var. Acumulada%	18,9051	36,3946	49,2187	60,1420	68,3164	75,1617	

Para el horizonte 2, (tabla 3-34), se observa que se determinaron seis componentes principales.

El primer componente (CP1), es el 18,91% de la varianza, mostrando relación significativa directa entre la mesoporosidad y la lamina aprovechable lo que está

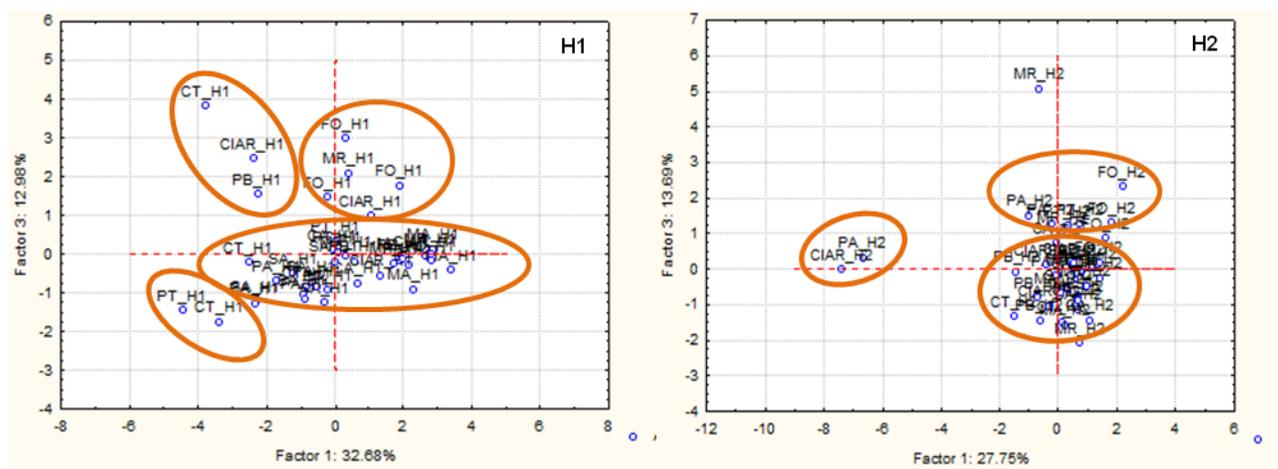
de acuerdo al comportamiento del agua en el suelos, debido a que en los mesoporos se encuentra el agua disponible para las plantas y sobre la cual se calcula la lamina de agua aprovechable para las plantas.

Para el segundo componente (CP2) la varianza es del 17,49% determina relación directa entre la microporosidad y porosidad total e inversa con la arcilla, lo que se traduce en que la porosidad total y la microporosidad depende de manera inversa del tipo de arcilla de los suelos y que la microporosidad y influye en el cálculo de la porosidad total.

El componente tres (CP3) con un 12,82% de varianza define la variable densidad real. Para CP4 la varianza es del 10,92% determina relación significativa de manera directa entre la densidad aparente, limo y estabilidad de agregados, lo que se demuestra en que a mayor sea la microporosidad la densidad aparente es mayor y pueden presentarse problemas de compactación.

Los componentes CP5 y CP6 no presentan propiedades con significancia

Figura 3-8. Componentes principales obtenidos para las propiedades químicas por uso/ocupación para los horizontes 1 y 2



Con relación a las propiedades químicas de los suelos estudiados y a partir de los diferentes usos/ocupaciones se encontraron cuatro unidades para el horizonte 1 y tres para el horizonte 2 (Figura 3-8).

En la tabla 3-35, se pueden observar los componentes principales resultantes para las propiedades químicas de los diferentes usos/ocupaciones de los suelos estudiados.

Tabla 3-25. Valores del análisis de componentes principales de las propiedades químicas

Atributo	CP1	CP2	CP3	CP 4	Comunalida d	CP1	CP2	CP3	CP 4	Comunalida d
	Horizonte 1					Horizonte 2				
pH	-0,8609	0,2748	-0,0483	-0,0858	0,8264	-0,6254	0,0310	-0,3826	0,1136	0,5514
Ac.I	0,8346	-0,0499	-0,1481	-0,0429	0,7228	0,6463	-0,3547	0,4359	-0,0716	0,7386
CO	0,6161	0,4508	-0,0035	-0,0390	0,5844	-0,3682	0,3151	0,3343	-0,6275	0,7404
P_Dis	-0,5069	0,4489	-0,3454	0,0298	0,5786	-0,3380	0,4496	-0,1297	0,3521	0,4572
CICA	0,7142	0,4841	0,1430	-0,1740	0,7952	-0,2956	-0,3063	0,4208	-0,5074	0,6157
Ca	-0,4421	0,6744	0,0010	-0,4766	0,8774	-0,9074	-0,0777	0,1107	-0,0219	0,8422
Mg	-0,4384	0,8137	0,0177	-0,0902	0,8628	-0,8629	-0,1562	0,1272	0,0048	0,7854
K	0,4942	0,4061	0,1746	-0,2268	0,4911	-0,6878	-0,4427	0,1180	0,1771	0,7143
Na	0,6412	0,0855	0,2705	-0,4296	0,6761	-0,2669	-0,7395	0,0998	0,2423	0,6867
Arena	-0,0751	-0,4992	-0,5332	-0,6715	0,9902	-0,1876	0,8510	0,2728	0,0767	0,8397
Limo	-0,3436	-0,0671	0,9138	0,0633	0,9616	0,1688	-0,3780	0,6618	0,4094	0,7770
Arcilla	0,4134	0,5347	-0,4128	0,5658	0,9473	0,0906	-0,6371	-0,6605	-0,3158	0,9501
Valor propio	3,9220	2,5460	1,5577	1,2881		3,3304	2,5683	1,6431	1,1569	
Var. Total%	32,683 1	21,216 3	12,9808	10,7347		27,7536	21,4026	13,6922	9,6411	
Var. Acumulada%	32,683 1	53,899 4	66,8802	77,6148		27,7536	49,1562	62,8484	72,4894	

En el horizonte 1 se determinaron cuatro componentes principales de la siguiente forma, en el primer componte CP1 con una varianza de 32.68%, la relación significativa se encontró entre las variables la acidez intercambiable, el carbono orgánico, la capacidad de intercambio catiónico y el sodio de forma directa y de manera inversa con el pH.

En el componente dos CP2 con una varianza del 21,21% las características que presentan relación directa son el calcio y el magnesio, lo que es consistente con lo establecido en la definición de las enmiendas a aplicar a los suelos.

Para el tercer componente CP3 la varianza es del 12,98% la variable definida es el limo y en el cuarto componente CP4 la variable es la arena y la varianza del 10,73%.

Lo que muestra la tabla 3-36, en el horizonte 2 es la definición de cuatro componentes principales; para el primer componente la relación significativa directa está entre las características de pH, calcio, magnesio y potasio y de estas en forma indirecta con la acidez intercambiable, con una varianza del 27,75%.

En el segundo componente la varianza es del 21,40% y la relación significativa es directa entre el sodio y la arcilla y de manera indirecta con la arena, Para el tercer componente CP3 la relación es indirecta entre la arcilla y el limo y en el cuarto componente CP4, la variable es el carbono orgánico.

3.5 Propuesta Indicadores

A partir de los análisis estadísticos de las propiedades físicas y químicas evaluadas se propone los siguientes indicadores para ser evaluados los suelos de la zona de estudio.

3.5.1 Físicos

- Densidad aparente: Con el conocimiento de este indicador se puede determinar la cantidad de espacios vacíos permitiendo prever la presencia de superficies compactadas o endurecidas, que afectan la salud del suelo y impiden el buen desarrollo radicular de las plantas, el movimiento del agua y de nutriente y su aireación.
- Porosidad, Este indicador permite conocer la cantidad de poros y su tamaño, y a partir de esto definir la relación agua-aire y acercarse al conocimiento del movimiento de la agua en el suelo su aireación y como puede ser el desarrollo de las raíces de las plantas y la absorción de los nutrientes. Es un parámetro importante porque de él depende el comportamiento del suelo frente a las fases líquida y gaseosa, y por tanto vital para la actividad biológica que pueda soportar.

La calidad de los suelos de la zona de estudio se puede calificar como buena.

3.5.2 Químicos

- pH: El conocimiento de este indicador uno de los parámetros más importantes que influyen en la fertilidad del suelo. Indica si contiene niveles tóxicos de aluminio y manganeso, si es bajo el contenido elementos básicos como el calcio y el magnesio, y si se le puede regular con la adición de sustancias como el óxido de calcio. La disponibilidad de otros nutrientes esenciales para la planta depende de los valores de pH. Conociendo el valor de pH del suelo es posible diagnosticar problemas de nutrientes para un buen desarrollo de las plantas.
- Carbono orgánico: permite conocer la materia orgánica de los suelos, en todas sus diferentes formas, tiene efectos marcados en casi todas las propiedades del suelo. Otros beneficios son los que tienen que ver con su influencia en la nutrición vegetal. Está ampliamente demostrado que la aplicación de abonos orgánicos incrementa la producción de los cultivos, inclusive cuando son aplicados en suelos que presentan altos contenidos de materia orgánica nativa.
- Capacidad de intercambio catiónico, este indicador es una medida importante de la fertilidad a la productividad potencial de los suelos, controla la disponibilidad de nutrientes para la planta , hace parte del proceso de floculación y dispersión de las arcillas y por lo tanto en el desarrollo de la estructura y de los agregados y como depurador natural de los suelos.

4 Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Determinar la calidad de los suelos permite un manejo adecuado de ellos, mejoramiento si lo requiere y su conservación.

Al caracterizar los suelos de la zona de estudio, se encuentra que su oferta es baja ya que presentan, bajos niveles de retención de agua, valores medio a altos de densidad aparente que lleva a pensar en la susceptibilidad a la compactación, fuertemente ácidos, baja CIC, bajos niveles de bases.

Para el monitoreo de la calidad de suelos, las variables que mayor información del suelo pueden aportar son las físicas ya que su relación con el uso y manejo de los suelos es directa. Para el caso del estudio se determinaron la densidad aparente y la porosidad.

La utilización de la estadística como herramienta de decisión es de gran ayuda debido a que permite identificar el comportamiento de las propiedades del suelo y la relación entre ellas, aportando elementos para una mejor planeación en el desarrollo de proyectos agrícolas.

Para la zona de estudio se encontró que existe una relación directa entre los diferentes usos/ocupaciones de los suelos estudiados y los cambios de las características de los suelos, influyendo en la variación de la calidad de los suelos.

Al ser las características físicas y químicas afectadas por los usos/ocupaciones del suelo, los indicadores seleccionados son susceptibles de cambio.

Los indicadores propuestos son adecuados para monitorear la calidad química y física del suelo, porque son fácil de medir y son sensibles a variaciones de manejo y clima. Además con la clasificación cuantitativa realizada la valorización es muy sencilla de hacer tanto para científicos como para agricultores.

4.2 Recomendaciones

Estas investigaciones son de tipo regional, por lo que se hace necesario ser replicadas en otras zonas del país.

Los indicadores determinados para este estudio se deben hacer seguimiento y evaluación anual, para definir su permanencia.

Las pruebas físicas en lo posible se deben realizar en campo cuando sea pertinente, por lo que la prueba de conductividad hidráulica se sugiere realizarla en campo.

Bibliografía

Abid M.; Lal R. 2008. Tillage and drainage impact on soil quality I. Aggregate stability, carbon and nitrogen pools. *Soil & Tillage Research* 100 (2008) 89–98

Abid M.; Lal R. 2009. Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Original Research Article Soil and Tillage Research*, Volume 103, Issue 2, May 2009, Pages 364-372.

Abid M.; Lal R. 2009.

Allington G.R.H.; Valone T.J. 2010. Reversal of desertification: The role of physical and chemical soil properties. *Journal of Arid Environments* 74 (2010) 973–977

Altieri M. A.; Nicholls C. I. Sistema agroecológico rápido de evaluación de calidad de suelo y salud de cultivos en el agroecosistema de café. Universidad de California, Berkeley

Agnes D.; Sainato C.; Landini A.; Martínez D.; Días H.; Soza E.; 2007. Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ci. Suelo (Argentina)* 25(2): 123-131, 2007

Amézquita E.; Thomas R.J.; Rao I.M.; Molina D.L.; Hoyos P. 2004. Use of deep-rooted tropical pastures to build-up an arable layer through improved soil properties of an oxisol in the eastern plains (Llanos Orientales) of Colombia. *Agriculture Ecosystems and Environment* 103 (2004) 269–277

Amézquita E.; Idupulapati M.; Rao I.; Rivera M.; Corrales I.; Bernal J. H. 2010. Sistemas Agropastoriles: Un enfoque integrado para el manejo sostenible de oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia. Documento de Trabajo CIAT No. 223

Andrade R. da S.; Stone L. F. 2009. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.13, n.4, p.382–388

Andrade R. da S.; Stone L. F. 2009. Uso do índice S na determinação da condutividade hidráulica não-saturada de solos do cerrado brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.13, n.4, p.376–381.

Andrews S.S.; Karlen D.L.; Mitchell J.P. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90 (2002) 25–45

Andrews S.S.; Flora C.B.; Mitchell J.P.; Karlen D.L. 2003. Growers' perceptions and acceptance of soil quality indices. *Geoderma* 114 (2003) 187–213

Aoki, A. M.; Sereno R. 2006. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *Agriscientia*, 2006, VOL. XXIII (1): 23-31

Araújo R.; Goedert W. J.; Coelho L. M.P. 2007. Qualidade de um solo sob diferentes Usos e sob cerrado nativo. *Revista Brasileira de la ciencia do solo*, 31:1099-1108, 2007

Arshad M.A.; Martin S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88 (2002) 153–160

Ávila P. E. A. 2005. Determinación de indicadores para evaluar la calidad de suelos dedicados al cultivo de papa. Tesis de maestría en Ciencias Agrarias, área de énfasis en suelos y aguas, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá Colombia.

Barrios E.; Cobo J. G.; Rao I. M.; Thomas R. J.; Amezcua E.; Jimenez J. J.; Rondon M. A. 2005. Fallow management for soil fertility recovery in tropical andean agroecosystems in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 110 (2005) 29–42

Bastida F.; Zsolnay A.; Hernández T.; García C. 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147 (2008) 159–171

Bautista Cruz A.; Etchevers Barra J.; Del Castillo R.F.; Gutiérrez C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13 (2): 90-97. Mayo 2004.

Bastida F.; Zsolnay A.; Hernández T.; García C. 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147 (2008) 159–171

Bertol I.; Beutler J. F.; Leite D.; Batistela O. 2001. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. *Scientia Agrícola*, v.58, n.3, p.555-560, jul./set.

Blair N.; Faulkner R.D.; Till A.R.; Poulton P.R. 2006. Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility Part I: Broadbalk experiment. *Soil & Tillage Research* 91 (2006) 30–38

Blair N.; Faulkner R.D.; Till A.R.; Korschens M.; Schulz E. 2006. Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility Part II: Bad Lauchstadt static and extreme FYM experiments. *Soil & Tillage Research* 91 (2006) 39–47

Blair N.; Faulkner R.D.; Till A.R.; Crocker G.J. 2006. Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility Part III: Tamworth crop rotation experiment. *Soil & Tillage Research* 91 (2006) 48–56

Bohn H, 1993. *Química del suelo*. Primera edición. ISBN. 968-18-4431-9. México D. F

Bronick C.J.; Lal R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124 (2005) 3 –22

Camacho T. J. H.; Luengas C. A.; Leiva F. R. 2008. Effect of agricultural intervention of the spatial variability of some soils chemical properties in the eastern plains of Colombia. *Chilean Journal of Agricultural Research* 68(1):42-55 (January-March 2008).

Camacho T. J. H.; Garzón G. C. A.; Cortes C. A. R. 2010. Variabilidad espacial de algunas propiedades químicas en un entisol. *Revista U. D. C. A. Actualidad e Divulgación científica* 13 (1): 87-95, 2010.

Camacho T. J. H.; Molin J. P.; Leiva F. R. 2010. Tecnología de la agricultura de precisión en el contexto de la sostenibilidad. *agricultura de precisión en cultivos transitorios*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Agronomía. Grupo de Desarrollo Sostenible y Gestión Ambiental p. 13-41.

Camacho-Tamayo J. H.; Luengas-Gómez C.; Leiva F. R. 2010. Análisis multivariado de propiedades químicas en Oxisoles con diferentes niveles de intervención agrícola. *Acta agronómica*. 59 (3) 2010, p 273-284

Carter, M.R., 2002. Soil Quality for Sustainable Land Management: Organic Matter and Aggregation Interactions that Maintain Soil Functions. *Agronomy Journal*. 94: 38 – 47.

Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT, 2004. Taller Nacional sobre indicadores de calidad de suelo. Conceptos y principios aplicados a la evaluación de la degradación de las tierras. *Memorias*. Palmira Valle del Cauca.

Chefetz, B., Tarchitzky, J., Deshmukh, A.P., Hatcher, P.G., y Chen Y. 2002. Structural Characterization of Soil Organic Matter and Humic Acids in Particle-Size Fractions of an Agricultural Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:129–141

Chowdary V.M.; Damodhara R. M.; Jaiswal C.S. 2006. Study of infiltration process under different experimental conditions. *agricultural water management* 83 (2006) 69 – 78.

Coelho Filho M. A.; Coelho R. D.; Gonçalves A. C.A. 2001. Variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas do solo em um pomar de lima ácida Tahiti, irrigado por microaspersão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.2, p.239-246, 2001.

Da Silva P. C. M.; Chaves L. H. G. 2001. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em Alissolos1 *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.3, p.431-436, 2001.

Da Silva M. A. L.; Gomes de Moura E.; Camacho T. J. H. 2010. Variabilidad espacial de la Infiltración y su relación con algunas propiedades físicas. *Revista Ingeniería E Investigación* Vol. 30 No. 2, August 2010 (116-123)

De Araújo Motomiya A. V.; Corá J. E.; Pereira G. T. 2006. Uso da krigagem indicatriz Na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, 30:485-496, 2006.

De Mello G.; Bueno C. R. P.; Pereira G. T. 2006. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.10, n.2, p.294–305, 2006

De Souza Z. M.; Alves M. C. 2003. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.1, p.18-23.

Durán García H. M. 2002. Efecto de la humedad en la resistencia mecanica de un suelo franco. *Terra* volumen 20 numero 3.

Dexter A. R. 2003. Calidad física del suelo. Parte I. Teoría, efectos de la textura del suelo, densidad, y la materia orgánica, y los efectos sobre el crecimiento de raíces. *Soil and Tillage Research*, Volume 87, *Issue* 2, June 2006, Pages 194-204.

Dexter A.R. 2004. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120 (2004) 201–214

Dexter A.R. 2004. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. *Geoderma* 120 (2004) 215–225

Dexter A.R. 2004. Soil physical quality Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma* 120 (2004) 227–239

Duiker, Sjoerd W., Rhoton, Fred E., Torrent, Jose., Smeck, Neil E., y Lal, Rattan.. 2003. Iron (Hydr) Oxide Crystallinity Effects on Soil Aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:606–611

FAO. 1997. Indicadores de la calidad de la tierra: aspectos del uso de la tierra, del suelo y de los nutrimentos de las plantas. *Land and Water Bulletin* ISSN: 1024-6703

FAO. 1997. Indicadores de los sistemas de producción agrícola para un manejo sostenible de los recursos naturales. *Land and Water Bulletin* ISSN: 1024-6703
Fuentes M.; Govaerts B.; De León F.; Hidalgo C.; Dendooven L.; Sayre K. D.; Etchevers J. 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *Original European Journal of Agronomy*, Volume 30, Issue 3, April 2009, Pages 228-237.

Forero J., *Parámetros Hidrodinámicos para Riego*. 2000, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Galvis J. H.; Amézquita, E.; Madero E. 2008. Evaluación del efecto de la intensidad de labranza en la formación de costra superficial de un oxisol de sabana en los Llanos Orientales de Colombia: III. Caracterización micromorfológica en superficie. *Acta Agronómica*, vol. 57, núm. 1, 2008, pp. 19-29, Universidad Nacional de Colombia.

Garavito Neira F. 2012. *Introducción a los Suelos*. IGAC. Bogotá D.C.

Garten Jr. C. T.; Kanga S.; Bricea D. J.; Schadta C. W., Zhoua J. 2007. Variability in soil properties at different spatial scales (1 m–1 km) in a deciduous forest ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry* 39 (2007) 2621–2627.

George A. 2006. Estudio comparativo de indicadores de calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica. Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza como requisito para optar por el grado de *Magister Scientiae* en Agricultura Ecológica. Turrialba, Costa Rica, 2006

González R. D.; Dalurzo H. C.; Vázquez S. Variaciones de atributos físicos como indicadores de calidad en suelos rojos tabacaleros del sur de Misiones (Argentina). *Facultad de Cs. Agrarias - UNNE*.

Gómez R. K. 2011. Incidencia de la Compactación Ocasionada por el Tractor en las Propiedades Físicas en un Andisol. Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola, Línea de Investigación Adecuación de tierras y manejo sostenible, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Palmira Colombia.

Gomez J.A.; Giraldez J.V.; Pastor M.; Fereres E. 1999. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. *Soil & Tillage Research* 52 (1999) 167±175

Guatibonza M.; Álvarez H. J. G.; Sanabria J. E. 2009. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tinguavita (Paipa, Colombia). *Agronomía Colombiana* 27(2), 261-271.

Guber A. K.; Rawls W. J. Shein E. V.; Pachepsky Y. A. 2003. Effect of soil aggregate size distribution on water retention. *Soil Science* Vol. 168, No. 4

Govaerts B.; Sayre K. D.; Deckers J. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil & Tillage Research* 87 (2006) 163–174

Henríquez M.; Rodríguez O.; Montero F.; Hernández A. 2003. Efecto de acondicionadores naturales y sintéticos sobre los cationes solubles y la infiltración del agua en un A

Hartemink A. E. 1998. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. *Geoderma* 85 1998. 283–306

Hernández Z.; Bello A.; Gómez Sal A.; Almendros G. Indicadores de calidad de suelo y control de la Erosión en agricultura ecológica y convencional

Hillel D. 1998. *Environmental soil physics*. Segunda edición. ISBN. 0-12-348525-8. San Diego-California. Estados Unidos.

Homburg J. A.; Sandor J. A. 2011. Anthropogenic effects on soil quality of ancient agricultural systems of the American Southwest. *Catena* 85 (2011) 144–154

Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC, 1974. *Propiedades Químicas de los Suelos*

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, 1974. Reconocimiento semidetallado de Suelos del C.I La Libertad (Departamento del Meta). Bogotá. Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. – IGAC, 1990., Propiedades físicas de los suelos. Colombia

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. – IGAC, 1995. Suelos de Colombia. Primera edición. Bogotá Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. – IGAC, 2004. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Meta. Primera Edición. Bogotá.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, 2006 Métodos Analíticos para Laboratorio de Suelos. Imprenta Nacional. Sexta edición. Bogotá D. C.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2012, Curso Levantamientos Agrologicos. Memorias. Bogotá D. C.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA 2005, Indicadores de calidad física de los suelos. Boletín técnico No. 4. Argentina.

Jamioy O. D. D. 2001. Propuesta de indicadores de calidad edafológicos para valorar la influencia de los sistemas productivos sobre algunas propiedades físicas y químicas en suelos oxisoles del piedemonte Llanero Colombiano Tesis de maestría en Ciencias Agrarias, área de énfasis en suelos y aguas, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Palmira Colombia.

Jiménez Ballesta R.; González-Quiñones V. 2006. La Calidad de Suelos como Medida para su Conservación. Edafología, Vol 13. (3), Pp 125-138 2006

Kaihura F.B.S; Kullaya I.K.; Kilasara M.; Aune J.B.; Singh B.R.; Lal R. 1999. Soil quality effects of accelerated erosion and management systems in three eco-regions of Tanzania. Soil & Tillage Research 53

Karlen D. L.; Ditzler C. A.; Andrews S. S. 2003. Soil quality: why and how?. Geoderma 114 (2003) 145– 156

Lal R. 1994. Métodos y Normas para Evaluar el Uso Sostenible de los Recursos Suelo y Agua en el Trópico. SMSS Monografía Técnica No. 21. CORPOICA. Bogotá. Colombia

Lal R. 2006. Shukla M.K Ebinger M. 2006 Determining soil quality indicators by factor analysis. Soil & Tillage Research 87 (2006) 194–204

Lepore B. J.; Morgan C.L.S.; Norman J. M.; Molling C. C. 2009. Mesopore and Matrix infiltration model based on soil structure, *Geoderma* 152 (2009) 301–313
Liebig M.A.; Tanaka D.L.; Wienhold B.J. 2004. Tillage and cropping effects on soil quality indicators in the northern Great Plains. *Soil & Tillage Research* 78 (2004) 131–141

Liu Z.; Zhou W.; Shen J.; Li S.; He P.; Liang G. 2014. Soil quality assessment of Albic soils with different productivities for eastern China. *Soil & Tillage Research* 140 (2014) 74–81

Lu tzowa M.; Ko I. Knabnera gel; Ekschmittb Kl.; Flessac H.; Guggenbergerd G.; Matznere E.; Marschner B. 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology & Biochemistry* 39 (2007) 2183–2207

Lucieta G.; Martorano H; Bergamaschi G A.; Dalmago, R. T.; de Faria J.; Mielniczuk; Comiran F. 2009. Indicadores da condição hídrica do solo com soja em plantio direto e preparo convencional. *De Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.13, n.4, p.397–405.

Mabagwu J.S.C. 1995. Testing the goodness of fit of infiltration models for highly permeable soils under different tropical soil management systems. *Soil & Tillage* (1995) 199-205

Machiwal D.; Jha M. K.; Mal B.C. 2006. Modelling Infiltration and quantifying Spatial Soil Variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering* (2006) 95 (4), 569–582

Malagón C, D. 2000, *Suelos de Colombia*.

Mandal U. K.; Warrington D.N.; Bhardwaj A.K. Bar-Tal A.; Kautsky L.; Minz D.; Levy G.J. 2008. Evaluating impact of irrigation water quality on a calcareous clay soil using principal component analysis. *Geoderma* 144 (2008) 189–197

Martorano L. G.; Bergamaschi H.; Dalmago G. A.; de Faria R. T; Mielniczuk J.; Comiran F. 2008. Indicadores da condição hídrica do solo com soja em plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e ambiental* v.13, n.4, p.397–405.

McHugha A.D.; Tullberg J.N.; Freebairn D.M. 2009. Controlled traffic farming restores soil structure *Soil & Tillage Research* 104 (2009) 164–172

Mello De G.; Bueno C.; Pereira G. 2005. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.10, n.2, p.294–305.

Mogollón L. M. R. 2012. Comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en áreas con diferentes usos y ocupaciones en la Sabana de Bogotá. Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola, Línea de Investigación Adecuación de tierras y manejo sostenible, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Palmira Colombia.

Molin1 J. P.; Gimenez L. M.; Pauletti V.; Schmidhalter U.; Hammer J. 2005 Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. eng. agríc., jaboticabal, v.25, n.2, p.420-426, maio/ago. 2005.

Mueller L.; Schindler U.; Fausey N. R.; Lal R. 2003. Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability. Soil & Tillage Research 72 (2003) 9–20

Navarro Bravo A.; Figueroa Sandoval B.; Martínez Menes M.; González Cossio F.; Salvador E. 2008. Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos. Agricultura Técnica en México Vol. 34 Núm. 2 Abril-Junio 2008 p. 151-158

Neves J. A. F. 2005 Avaliação da Qualidade física do solo em pastagens degradadas da Amazonia. Dissertação apresentada obtencão do título mestre em Agronomia. Area de Concentração; Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de Sao Paulo, Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. Brazil.
Neves Junior A. F. 2008. Qualidade física do solo com horizonte antropico (Terra Preta do Indio) da Amazonia Central. Tese apresentada para obtencão do título doutor em Agronomia. Area de Concentração; Solos e Nutrição de Plantas. Universidade de Sao Paulo, Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

Noellemeyer E.; Quiroga A.R.; Estelrich D. 2006. Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. Journal of Arid Environments 65 (2006) 142–155

NRCS, 2001. Guidelines for Soil Quality Assessment in Conservation Planning. United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service - Soil Quality Institute. Editor: Betty Joubert, Public Affairs Specialist,

NRCS, Albuquerque, NM. Obando M. F. H.; Villegas H. A. M.; Betancur P J. H. : Echeverri T. L. 2004. Variabilidad Espacial De Propiedades Químicas Y Físicas En Un *Typic Udivitrands*, Arenoso De La Región Andina Central Colombiana

Orjuela M. H. M.; Rubiano S. Y.; Camacho T. J. H. Comportamiento de la infiltración en un oxisol. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 13 (2): 31-39

Orjuela O. I. R. 2009. Generación De La Línea Base De Indicadores Para El Monitoreo De Calidad De Suelos En El Área De Influencia Del Distrito De Riego Del Alto Chicamocha. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias, área de énfasis en suelos y aguas, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá Colombia.

Panettieri M.; Carmona I.; Melero S.; Madejón E.; Gómez-Macpherson H. 2013. Effect of permanent bed planting combined with controlled traffic on soil chemical and biochemical properties in irrigated semi-arid Mediterranean conditions. *Catena* 107 (2013) 103–109

Pilatti M. A.; Imhoff S.; Ghiberto P.; Marano R.P. 2006. Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma* 133 (2006) 431–443

Pinzón P. A. 2009. Apuntes sobre física de suelos. Primera edición. ISBN. 978-958-33-9085-2. Bogotá Colombia.

Pinzón P. A. 2010. Edafología. Primera edición. ISBN. 978-958-44-6297-8. Bogotá Colombia.

Poulsen T. G.; Moldrup Per; Wösten H.; Jacobsen O. H. 2004. Predicting three-region unsaturated hydraulic Conductivity from three soil-water retention points. *Soil Science* Vol. 169, No. 3

Ramirez, L. Reina, S., Camacho, J. 2008. Variabilidad espacial de los atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colombia. *Eng. Agríc., Jabolicabal*, v.28, n.1, p.55-63

Raj K. S., Rattan L. 2011. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. *Geoderma* 161 (2011) 168–176.

Ramos M. C.; Cots-Folch RMartínez-Casasnovas.; J. A. 2007. Effects of land terracing on soil properties in the Priorat region in Northeastern Spain: A multivariate analysis. *Geoderma* 142 (2007) 251–261

Rasmussen K.J. 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil & Tillage Research* 53 (1999) 3±14

Reeves D. W. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems Original Research Article *Soil and Tillage Research*, Volume 43, Issues 1-2, 1 November 1997, Pages 131-167.

Reynolds W.D.; Bowman B.T.; Drury C.F.; Tan C.S.; Luc X. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110 (2002) 131– 146

Reynolds W.D.; Drury C.F.; Tan C.S., Fox C.A.; Yang X.M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. Original Research Article *Geoderma*, Volume 152, Issues 3-4, 15 September 2009, Pages 252-263

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

Rivas L.; Hoyos P.; Amezcua E.; Molina D. L. 2004. Manejo y uso de los suelos de la altillanura colombiana. Análisis económico de una estrategia para su conservación y mejoramiento. Construcción de la capa arable. Centro Internacional de Agricultura Tropical.

Rodríguez N.; Florentino A.; Torres D.; Yendis H. Y.; Zamora F. 2009. Selección de indicadores de calidad de suelo en tres tipos de uso de la tierra en la planicie de Coro estado Falcón. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 2009, 26: 340-361

Rodríguez V. A. F.; Aristizábal C. A. M., Camacho T. J. H. 2008. Variabilidad Espacial de los Modelos de Infiltración de Philip y Kostiakov en un Suelo Ándico *Eng. Agríc., Jabolicabal*, v.28, n.1, p.64-75, jan./mar. 2008

Romero E.; Gens A.; Lloret A. 1999. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay. *Engineering Geology* 54 (1999) 117–127

Rubiano, Y. 2005. Sistema georreferenciado de indicadores de calidad del suelo. Herramienta SIG para apoyo a la planificación, uso y manejo del suelo. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Palmira.

Rubiano S. Y.; Amézquita C E.; Beaulieu N. 2005. Sistema georreferenciado de indicadores de calidad de suelos para los Llanos Orientales de Colombia. Estudio de caso: Municipio de Puerto López, Meta. *Acta Agronómica*, vol. 54, núm. 3.

Rubiano Y.; Bernal R. J. 2010. Informe Anual de Avance de Ejecución Proyecto 2008P5661- 3698. Línea base de indicadores de calidad de suelo para monitorear los efectos del cambio climático sobre los sistemas de producción agrícolas en el

piedemonte llanero. Universidad Nacional, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – CORPOICA, FUNDALLANURA

Sang Il Hwang and Susan E. Powers. 2003 Lognormal distribution model for estimating soil water retention curves for sandy soils. *Soil Science* Vol. 168, No. 3

Shukla M.K.; Lal R., Ebinger M. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. Original Research Article

Shukla M.K.; Lal R.; Ebinger M.; Meyer C. 2006. Physical and chemical properties of soil under some piñon-juniper-oak canopies in a semi-arid ecosystem in New Mexico Original Research Article *Journal of Arid Environments*, Volume 66, Issue 4, September 2006, Pages 673-685.

Shukla M.K.; Lal R.; Ebinger M. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research* 87 (2006) 194–204

Shrestha R. K.; Lal R. 2011. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. *Geoderma* 161 (2011) 168–176

Siavosh S Kh.; Alveiro S. J.; Diego A., Cardona C. 2008. Indicadores de la calidad del suelo en algunos agroecosistemas de la zona cafetera colombiana. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Chinchiná, Caldas, Colombia.

Six, J., Paustian, K., Elliott, E. T., y Combrink, C. 2000. Soil Structure and Organic Matter: I. Distribution of Aggregate-Size Classes and Aggregate-Associated Carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:681–689

Shukla M.K.; Lal R.; Ebinger M.; Meyer C. 2006. Physical and chemical properties of soils under some piñon-juniper-oak canopies in a semi-arid ecosystem in New Mexico. *Journal of Arid Environments* 66 (2006) 673–685

United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Services – USDA, 1993. Soil Survey Division Staff. Soil Survey Manual. Handbook No 18.. 437p

Tormena C. A.; da Silva A.; Libardic P. L. 1999. Soil physical quality of a Brazilian oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil & Tillage Research* 52 (1999) 223±232

Torres D.; Florentino A.; López M. 2006. Indicadores e Índices de Calidad del suelo en un ultisol bajo diferentes prácticas de manejo conservacionista en Guárico, Venezuela *Biagro* 18(2):75-82.2006. ISSN 1316-3361. Redalyc Red de Revistas científicas de América Latina y el Caribe España y Portugal.

USDA. 1999. Departamento de Agricultura Servicio de Investigación Agrícola. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo servicio de conservación de recursos naturales instituto de calidad de suelos

Vianey Czycza R. 2009. Qualidade e qualidade da materia organicado solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-acucar. Dissertação apresentada obtencão do titulo mestre em Ciencias. Area de Concentráo; Solos e Nutricão de Plantas. Universidade de Sao Paulo, Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.Piracicaba. Brazil.

Vieira Cavarieli K. M. 2007. Aspectos metodológicos da pesquisa sobre compactacao e qualidade física do solo. Tese apresentada para obtencão do título doutor em Agronomia. Area de Concentráo; Solos e Nutricão de Plantas. Universidade de Sao Paulo, Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. Brazil.

Vieira F.C.B.; Bayer C.; Zanatta J.A.; Dieckow J.; Mielniczuk J.; He Z.L. 2007. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. Soil & Tillage Research 96 (2007) 195–204

Viola M. R.; de Mello C.R.; Acerbi Jr F. W.; da Silva A. M. 2009. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca. Engenharia Agrícola e Ambiental v.13, n.5, p.581–590, 2009

Wander, M.M., Walter, G.L., Nissen, T.M., Bollero, G.A., Andrews, S.S., y Cavanaugh-Grant, D.A. 2002. Soil Quality: Science and Process. Agron. Journal. 94: 23–32

Wilson M. G.; Tasi H.; Garciarena N.; Indelángelo N. Y.; Sasal M. C. 2008. Indicadores de Calidad de Suelo. INTA. Buenos Aires, Argentina.

Wilson, M.G.; Tasi, H.A; Paz G, A.; Indelángelo, N. y Díaz, E. L. 2008. Indicadores de calidad para suelos del área de bosques nativos de Entre Ríos. XXI congreso argentino de la ciencia del suelo. Semiárido: Un desafío para la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes (SL). Argentina.

ZhangCai QI.; Huang Y. 2010. Quantification of soil organic carbon sequestration potential in cropland: A model approach. Science China Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg Vol.53 No.7: 868–884