

**PROPUESTA DE INDICADORES DE CALIDAD EDAFOLÓGICOS PARA  
VALORAR LA INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS SOBRE  
ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS EN SUELOS OXISOLES DEL  
PIEDEMONTES LLANERO COLOMBIANO**

**DIEGO DAVID JAMIOY OROZCO**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
COORDINACIÓN GENERAL DE POSGRADO  
PALMIRA**

**2011**

**PROPUESTA DE INDICADORES DE CALIDAD EDAFOLÓGICOS PARA  
VALORAR LA INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS SOBRE  
ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS EN SUELOS OXISOLES DEL  
PIEDEMONTES LLANERO COLOMBIANO**

**DIEGO DAVID JAMIOY OROZCO**

**Tesis de grado presentada como requisito parcial para  
Optar el título de Magister en Ciencias Agrarias con  
énfasis en Suelos**

**DIRECTORES**

**Juan Carlos Menjivar Flores Ph D.**

**Yolanda Rubiano Ph D.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
COORDINACIÓN GENERAL DE POSGRADO**

**PALMIRA**

**2011**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE PALMIRA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

ACTA DE JURADO DE TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS  
LINEA DE INVESTIGACIÓN SUELOS

En Palmira a los 27 días del mes de abril de 2011, se reunió en esta Sede el Jurado Calificador de Tesis, integrado por los doctores EDGAR MADERO MORALES y ELENA VELASQUEZ IBANEZ

Para calificar la Tesis de Grado de:

**DIEGO DAVID JAMIOY OROZCO**

Titulada:

“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” bajo la dirección de los profesores Juan Carlos Menjivar Flores, Ph.D. y Yolanda Rubiano Sanabria, Ph.D.

Después de oír el informe del jurado evaluador compuesto por los docentes EDGAR MADERO MORALES y ELENA VELASQUEZ IBANEZ, y de haber cumplido con el proceso de evaluación, la tesis fue calificada como:

APROBADA

REPROBADA

EDGAR MADERO MORALES

ELENA VELASQUEZ IBANEZ

## DEDICATORIA

Dedico:

A Dios por estar siempre a mi lado.

A la memoria de mi padre David Jamioy, a quien nunca olvidare, pero hoy día he comprendido que existen otros caminos para llegar a la cima.

A mi madre **Fabiola Orozco** símbolo de amor, sacrificio y comprensión.

A mi hermana **Diana Milena** por su apoyo incondicional, símbolo de tenacidad, fortaleza, confianza y cariño.

A mi sobrina **Nicoll Dayana** símbolo de ternura, respeto y simpatía.

A dos hermosas criaturas con probabilidad de ser de mi descendencia.

A todas aquellas personas que han estado a mi lado en algunos instantes de mi recorrido por la universidad de la vida.

A la memoria mi primo **Edward Alirio** con quien tanto discutí, y hoy, ya no tengo con quien competir.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis más sinceros agradecimientos:

Al profesor Juan Carlos Menjivar por su orientación en la escritura de la presente tesis y por su valiosa colaboración durante mi estadía en la escuela de posgrado.

A la profesora Yolanda Rubiano por darme la oportunidad de formar parte de su equipo investigador, fruto de lo cual hoy puedo presentar el presente documento.

A Sista, don Cristóbal, Wilder, Camilo y Mercedes por su colaboración en la fase de campo.

A Jaime Bernal por sus correcciones durante la escritura del presente documento.

A Elena Velásquez por sus valiosas asesorías.

A Édgar Madero por sus valiosos consejos.

Al profesor Nelson por su colaboración en la elaboración del abstract.

A mis profesores del posgrado por sus valiosos aportes a mi formación profesional.

A los investigadores de Corpoica la Libertad por la información suministrada.

La facultad y los jurados de tesis  
no se harán responsables de las ideas  
emitidas por el autor.  
Artículo 24, resolución 04 de 1974

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	14
1. MARCO DE REFERENCIA.....	17
1.1 GENERALIDADES DEL PIEDEMONTES LLANERO.....	17
1.2 SUELOS DEL PIEDEMONTES LLANERO.....	18
1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS DEL PIEDEMONTES LLANERO.....	19
1.4 CALIDAD DEL SUELO.....	21
1.4.1 Calidad de suelo y sostenibilidad agrícola.....	22
1.4.2 Indicadores de calidad del suelo.....	23
1.5 INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN LAS PROPIEDADES QUIMICAS Y FISICAS DE LOS SUELOS .....	26
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	28
2.2 SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS Y SITIOS DE MUESTREO.....	29
2.2.1 Palma de aceite ( <i>Elaeis guineensis</i> ) de 30 años de edad .....	29
2.2.2 Palma de aceite ( <i>Elaeis guineensis</i> ) de 18 años de edad .....	30
2.2.3 Pastura degradada de <i>Brachiaria decumbens</i> .....	30
2.2.4 Cultivo de piña golden ( <i>Ananas sativus</i> ).....	31
2.2.5 plantaciones forestales de acacia ( <i>Acacia mangium</i> ), yopo ( <i>Anadenanthera peregrina</i> ) y melina ( <i>Gmelina arborea</i> ).....	31
2.2.6 Cultivos transitorios de sorgo dulce ( <i>Sorghum vulgare</i> ), maíz ( <i>Zea mays</i> ) y soya ( <i>Glycine max</i> ) .....	32
2.2.7 Plantación forestal de caucho ( <i>Hevea brasiliensis</i> ).....	32
2.2.8 Pasto llanero ( <i>Brachiaria dictyoneura</i> ) asociado con maní forrajero ( <i>Arachis pintoi</i> ).....	33
2.2.9 Pasto llanero ( <i>Brachiaria dictyoneura</i> ).....	34
2.2.10 Pasto mulato II ( <i>Brachiaria</i> híbrido CIAT 36087).....	34
2.2.11 Cultivos de cítricos específicamente naranja valencia ( <i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck).....	35
2.3 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	35

2.4 VARIABLES DE RESPUESTA Y METODOLOGIA PARA SU DETERMINACIÓN .....	36
2.4.1 Variables asociadas a descripción morfológica. ....	36
2.4.2 Variables asociadas a propiedades físicas. ....	36
2.4.3 Variables asociadas a propiedades químicas. ....	36
2.5 CONDUCCIÓN DEL EXPERIMENTO EN CAMPO Y TOMA DE MUESTRAS .....	36
2.6 PROCESAMIENTO ESTADÍSTICOS DE LA INFORMACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE INDICADORES Y PARA ESTABLECER LA INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO. ...	37
2.7 CONSTRUCCIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD PARA VALORAR LA INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LOS SUELOS.....	39
3. RESULTADOS Y DISCUSION .....	41
3.1 DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA DE LOS DOS PRIMEROS HORIZONTES DEL SUELO DE LOS SISTEMAS EVALUADOS .....	41
3.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA DE LOS SISTEMAS EVALUADOS .....	44
3.3 PROPUESTA DE SELECCIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO MEDIANTE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. ....	61
3.3.1 Selección de Indicadores químicos .....	61
3.3.2 Selección de Indicadores Físicos .....	67
3.4 INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO .....	72
3.5 VALORACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS EN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LOS SUELOS.....	80
3.5.1. Construcción de índices de la calidad para valorar la influencia de los sistemas de producción en las propiedades química del suelo .....	81
3.5.2 Construcción de índices de calidad para valorar la influencia de los sistemas de producción en las propiedades físicas de los suelos. ....	83
3.6 PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD QUÍMICA Y FÍSICA DE LOS SUELOS DEL PIEDEMONTES LLANERO COLOMBIANO .....	85
4. CONCLUSIONES .....	88
BIBLIOGRAFÍA.....	89
ANEXOS.....	99

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variables asociadas a propiedades químicas de los diferentes sistemas productivos con su respectiva interpretación.....	44
Tabla 2. Clasificación del nivel de fertilidad de los suelos para el establecimiento de especies de plantas tolerantes a la acidez.....	52
Tabla 3. Relación de las bases y porcentaje de saturación de bases y aluminio en los diferentes sistemas productivos.....	55
Tabla 4. Variables físicas asociadas al comportamiento y distribución de la fase sólida y gaseosa del suelo.....	57
Tabla 5. Variables físicas asociadas al almacenamiento del agua en el suelo.....	59
Tabla 6. Contribución de cada variable química a la construcción de los factores 1 y 2.....	66
Tabla 7. Contribución de cada variable física a la construcción de los factores 1 y 2.....	71
Tabla 8. Análisis de varianza para indicadores químicos asociados a la calidad del suelo.....	73
Tabla 9. Prueba de Duncan para indicadores químicos asociados a la calidad del suelo.....	74
Tabla 10. Análisis de varianza para indicadores físicos asociados a la calidad del suelo.....	75
Tabla 11. Prueba de Duncan para indicadores físicos asociados a la calidad del suelo.....	76
Tabla 12. Índices de la calidad química del suelo de los diferentes sistemas productivos evaluados.....	81
Tabla 13. Índices de la calidad física del suelo de los diferentes sistemas productivos evaluados.....	83
Tabla 14. Clasificación de la calidad del suelo con los indicadores químicos.....	85
Tabla 15. Clasificación de la calidad del suelo con los indicadores físicos.....	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Resistencia a la penetración del suelo de los diferentes sistemas productivos.....	60
Figura 2. Distribución de los sitios evaluados en función del aporte de las variables químicas a la conformación del factor 1 y 2.....	62
Figura 3. Circulo de correlaciones para las variables químicas en función de sus aportes a la conformación del factor 1 y 2.....	63
Figura 4. Agrupación de los sistemas de uso en función del aporte de las variables químicas a la conformación del factor 1 y 2 y de sus similitudes.....	64
Figura 5. Distribución de los sitios evaluados en función del aporte de las variables físicas a la conformación del factor 1 y 2.....	68
Figura 6. Circulo de correlaciones para las variables físicas en función de sus aportes a la conformación del factor 1 y 2.....	69
Figura 7. Agrupación de los sistemas de uso en función del aporte de las variables físicas a la conformación del factor 1 y 2.....	70

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Descripción morfológica.....	99
Anexo B. Análisis estadístico descriptivo de variables físicas y químicas.....	103
Anexo C. Análisis estadístico de correlación de variables físicas y químicas.....	109

## RESUMEN

Con la finalidad de proponer indicadores de calidad edafológicos para valorar la influencia de los sistemas productivos en algunas propiedades físicas y químicas en oxisoles del piedemonte llanero colombiano, se realizó un muestreo aleatorio (diseño completamente al azar) en 11 sistemas de uso, mediante cajuelas de observación de 40 cm<sup>2</sup> por 50 cm de profundidad, describiendo 5 cajuelas morfológicamente por sistema productivo y tomando muestras sin disturbar para determinaciones físicas y disturbadas para determinaciones químicas. Con los datos físicos y químicos que resultaron del muestreo se elaboró una base de datos, la cual se trató estadísticamente con análisis descriptivo, para caracterizar los suelos de los diferentes sistemas productivos. Posteriormente se realizó un análisis de componentes principales para seleccionar los indicadores químicos y físicos. El ACP unido a un criterio técnico permitió seleccionar como indicadores: carbono orgánico, pH, acidez intercambiable, calcio intercambiable, magnesio intercambiable, hierro, saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente, estabilidad estructural, textura y resistencia a la penetración. Los anteriores indicadores fueron procesados con análisis de correlación y de varianza con prueba de Duncan a excepción del calcio y el magnesio. Los resultados sugieren que los sistemas productivos influyen en la calidad de los suelos a través de sus prácticas de manejo principalmente. Para valorar esta influencia con los anteriores indicadores se construyó una matriz a partir de la cual se generaron índices químicos y físicos de la calidad de los suelos por sistema productivo, presentando los sistemas pasto mulato II y cultivos transitorios una alta calidad química, pero la más baja calidad física, lo contrario sucede con la palma30 y la pastura degradada. Los índices indican que las prácticas de manejo implementadas para mejorar las propiedades químicas del suelo con el fin de adaptarlo a las necesidades nutricionales del cultivo probablemente están conllevando a la degradación física del suelo.

Palabras claves. Análisis de componentes principales, Indicadores, índices, Calidad de suelo.

## ABSTRACT

In order to propose quality edaphic indicators to assess influence of production systems on some physical and chemical properties of Oxisols Piedmont llanero colombian, a random sampling was conducted (completely randomized design) in 11 systems of use, by observation trunks of 40 cm<sup>2</sup> by 50 cm in depth, describing 5 trunks morphologically by production system and by taking undisturbed samples for physical determinations and disturbed ones for chemical determinations. A data base was elaborated from the physical and chemical data collected from sampling which was treated statistically using descriptive analysis to characterize the soils of different production systems. Subsequently, an analysis of the main components was selected in order to choose the physical and chemical indicators. PCA joined the technical criteria allowed to select as indicators: organic carbon, pH, exchangeable acidity, exchangeable calcium, exchangeable magnesium, iron, saturation, field capacity, permanent wilting point, apparent density, structural stability, texture and resistance to penetration. The above indicators were processed using correlation and analysis of variance with Duncan's test, except for calcium and magnesium. The results suggest that production systems influence soil quality through management practices mainly. In order to assess this influence with the indicators mentioned above a matrix was constructed from which chemical and physical indices were generated of soil quality by production system, where systems mulatto II pastures and seasonal crops presented high quality chemistry, but the lowest physical quality. The opposite happens with the palm30 and the degraded pasture. The indices indicate that the management practices implemented to improve soil chemical properties as to adapt it to the nutritional needs of the crop are likely leading to physical soil degradation.

Keywords: Principal component analysis, Indicators, Indices, Soil Quality.

## INTRODUCCIÓN

La utilización de la Orinoquia colombiana y principalmente del piedemonte llanero con fines agropecuario comenzó hace más de un siglo (Cortes, 1982), lo que ha ocasionado una transformación de los sistemas de sabanas naturales en sistemas productivos (pasturas introducidas con la intensificación de la ganadería, cultivos agrícolas y plantaciones forestales). Los sistemas de producción con frecuencia provocan alteraciones en las propiedades físicas y químicas del suelo, debido principalmente al cambio y/o la intensificación del uso y a las prácticas agrícolas utilizadas con el fin de transformar las condiciones edáficas reinantes a los requerimientos físicos y químicos del cultivo a establecer. En consecuencia, el suelo puede experimentar una pérdida o un mejoramiento de su calidad.

El deterioro y degradación progresiva del recurso suelo es un importante problema ambiental, que se debe principalmente a cambios en su uso y a prácticas inapropiadas de manejo agrícola. Lo anterior ha conllevado a la comunidad científica a buscar metodologías que permitan evaluar la influencia y los efectos que los sistemas productivos establecidos en zonas que antes eran bosques o sabanas naturales, han generado sobre el sistema suelo. Naciendo por tanto la necesidad de establecer parámetros que permitan valorar la magnitud del impacto ambiental que los sistemas productivos generan en este importante recurso. Para ello es necesario contar con una sólida concepción de la calidad y con indicadores para poder evaluar la misma, tal como se cuenta para dar seguimiento a variables sociales y económicas (Valenzuela y Torrente, 2010).

La calidad del suelo se puede definir como la capacidad de un suelo de funcionar (Karlen *et al.*, 1997) de tal forma que presente aptitud para el uso (Larson y Pierce, 1994).

Los indicadores de calidad deberán cumplir con una serie de requisitos como son ser fácil de medir, interpretar, evaluar, entre otros, los cuales dan una noción del estado actual del suelo y permiten valorar dicha condición, y en conjunto dan una visión de su calidad.

De acuerdo a García (2008), “dentro de los estudios más avanzados de la ciencia del suelo, aquellos encaminados a conocer su calidad y salud son hoy en día prioritarios”. Por lo tanto la cuantificación y monitoreo de la calidad de los suelos cobra gran importancia debido al riesgo de degradación por prácticas agrícolas inapropiadas a través del tiempo.

Con la concepción de que no existen suelos de mala calidad si no suelos mal manejados, con prácticas agrícolas inapropiadas que conllevan a su degradación, afectado su funcionalidad y aptitud para el uso y por lo tanto su calidad, se plantea la necesidad de valorar los posibles efectos positivos o negativos que pueden

ocasionar los diferentes sistemas de uso sobre este recurso, principalmente aquellos que no son acordes a su vocación natural. En este sentido la generación de indicadores de calidad de suelo se convierte en una herramienta fundamental al momento de estimar tanto el estado actual de las propiedades físicas y químicas del suelo como para valorar la influencia de los sistemas de producción en dichas propiedades; lo cual es de vital importancia para la toma de decisiones enfocadas a conservar y garantizar la sostenibilidad y productividad del suelo y de los sistemas productivos que en él se desarrollan.

Aunque el suelo es un recurso de vital importancia que sostiene y permite el desarrollo de la vida, solo en la época reciente ha venido recibido de la sociedad la atención que se merece, debido principalmente a que su degradación es una seria amenaza para el futuro de la humanidad.

En Colombia y específicamente en la región de los Llanos Orientales ha existido un gran esfuerzo por parte de entidades privadas y públicas (Corpoica, Universidad Nacional de Colombia, CIAT y la Universidad del Llano principalmente) para desarrollar investigaciones tendientes a conocer los procesos, las condiciones y la dinámica de los suelos de esta importante región del país. Producto de este compromiso investigativo se han desarrollado algunos trabajos relacionados de cierto modo con la calidad de los suelos (Rubiano, 2005; Phiri *et al.*, 2001; Decaens *et al.*, 2002; Basamba *et al.*, 2006; Amezcua *et al.*, 2004; Camacho *et al.*, 2010). Sin embargo es necesario generar nueva información base a partir de la cual se pueda empezar hacer estimaciones referentes a valorar los impactos positivos o negativos que se ocasionan en los suelos, como consecuencia de los cambios en su uso y de las prácticas de manejo utilizadas. La nueva información permitirá establecer y valorar la influencia que pueden generar los sistemas de uso en las propiedades de los suelos y por consiguiente en su calidad, de tal manera que se cuente con criterios para la toma de decisiones.

Contar con una línea base de indicadores de estado permitirá evaluar el grado de vulnerabilidad de los suelos y las acciones correctivas a tomar de acuerdo con el sistema productivo. Igualmente se podrá establecer un mecanismo de monitoreo continuo que permita en un futuro evaluar los efectos que pueden ocasionar los cambios en el uso del suelo en su capacidad funcional.

Por otro lado los indicadores de calidad del suelo serán de gran utilidad al momento de establecer prácticas de manejo y de estimar la vulnerabilidad o la adaptación de los sistemas productivos, de tal manera que servirán como mecanismos de alerta temprana, ayudando a prevenir o mitigar procesos de degradación progresiva de los suelos debido a prácticas agropecuarias inadecuadas.

De acuerdo a lo anterior, se hizo necesario el desarrollo de la presente investigación, que fue cofinanciada por el Ministerio de Agricultura, la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, el Centro de Investigación CORPOICA la Libertad y FUNDALLANURA. La cual tuvo como objetivo general: Proponer indicadores de calidad edafológicos para valorar la influencia de los sistemas productivos sobre algunas propiedades físicas y químicas en oxisoles del piedemonte llanero colombiano. Para el cumplimiento de este propósito se diseñaron tres objetivos específicos a saber:

- Determinar el estado actual del suelo (físico y químico) en 11 sistemas productivos representativos del piedemonte llanero.
- Seleccionar indicadores de calidad edáficos (físicos y químicos) para los suelos del piedemonte llanero bajo diferentes sistemas de uso.
- Establecer y valorar la posible influencia de los sistemas productivos sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos.

## 1. MARCO DE REFERENCIA

### 1.1 GENERALIDADES DEL PIEDEMONTE LLANERO

El piedemonte llanero está ubicado en la región de la Orinoquia Colombiana, en la base de la cordillera oriental con alturas que van desde los 200 a 700 msnm. Es un paisaje depositacional, correspondiente a una planicie ligeramente inclinada (Corpoica, 2007).

El piedemonte es una zona de transición entre la vertiente de la cordillera oriental y la llanura y se extiende desde la sierra de la macarena, al sur del departamento del meta, hasta Arauca, en los límites con Venezuela, tiene una extensión total de 2.010.000 hectáreas (Rincón *et al.*, 2010).

De acuerdo con el sistema de clasificación de Koeppen, el clima es tropical húmedo y seco, clima de sabana, con épocas bien definidas de lluvia y de sequía, con temperaturas bastante uniformes a través del año. Con una precipitación promedio de 2800 mm y temperatura promedio de 26 °C.

Las temperaturas máximas se registran en marzo y abril y las temperaturas mínimas se registran al final de la temporada de lluvias. Los registros sobre la dirección y velocidad de los vientos son muy variables y la predominante es E-NE.

La humedad relativa promedia es del 82% durante los meses de invierno y 70 a 75% durante el verano.

En relación con las lluvias, en el año existen dos periodos diferenciados: un periodo de lluvias que va de abril hasta noviembre y un periodo seco que va desde diciembre hasta finales de marzo (Corpoica, 2007), los meses de mayo, junio y julio son los de mayor precipitación y por lo general en agosto se presenta un veranillo volviendo aumentar la lluvia en los meses de septiembre y octubre (Rincón *et al.*, 2010).

Durante el periodo seco se presentan las temperaturas máximas más altas y las temperaturas más mínimas se presentan en los últimos meses de lluvia.

La cobertura vegetal en el piedemonte presenta actualmente pocas áreas en bosque y pasto nativo, lo que se observa es un predominio de pastos introducidos del genero *Brachiaria*, manejados en sistemas de producción intensivos, dedicados principalmente a la ceba y en menor proporción al doble propósito (Rincón *et al.*, 2010)

Con respecto al resto de la Orinoquia el piedemonte es uno de los paisajes más productivos económicamente y el de mejor manejo agrícola y pecuario.

## 1.2 SUELOS DEL PIEDEMONTE LLANERO

El suelo es un recurso natural no renovable, tridimensional dinámico y trifásico que sostiene y permite el desarrollo de la vida, producto de sus factores de formación (clima, material parental, relieve, organismo y tiempo) que le han inferido propiedades físicas, químicas y biológicas, cuya condición y funcionamiento es vital para la producción de alimentos, fibras, y para la conservación de la calidad ambiental local, regional y global.

Según Phiri *et al.* (2001) los suelos de los Llanos Orientales son caracterizados por su alta acidez y baja fertilidad cuya mineralogía dominante son caolinitas y óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio.

En el piedemonte llanero “Los materiales litológicos constitutivos son arcillas y conglomerados, provenientes de la denudación de la cordillera oriental. Este piedemonte básicamente está conformado por una serie de abanicos de diferente edad, que han sido modelados por los cauces que descienden de la cordillera; en el ápice de los abanicos dominan en la superficie cantos rodados de diferente tamaño.” (Sánchez, 2010)

Los suelos del piedemonte son altamente evolucionados predominando el cuarzo en la fracción arena y caolinita, óxidos de hierro y aluminio en la fracción arcilla. Son suelos que presentan contenidos bajos de bases intercambiables, pH fuertemente ácido, baja disponibilidad de fósforo, baja capacidad de intercambio catiónico, altos niveles de hierro y predominio del aluminio en el complejo de cambio. Físicamente son suelos con estructuras estables, de texturas moderadas, con una capacidad de almacenamiento de agua muy baja, con conductividad hidráulica lenta y con densidades aparentes que fluctúan entre 1.3 – 1.4 g/cm<sup>3</sup>, taxonómicamente son suelos clasificados como oxisoles en su gran mayoría (Guerrero, 1990; Corpoica, 2007, Sánchez, 2010).

Los suelos del piedemonte llanero pertenecen a las clases taxonómicas Typic Hapludox, Oxic Dystrudept, Plinthic Tropaquet, Typic Udorthent cartografiados a escala 1:100000 por IGAC (2004).

Según Rincón *et al.* (2010) los suelos del piedemonte son físicamente frágiles, lo que limitan el uso de maquinaria agrícola. Son suelos relativamente recientes y por tanto de un nivel de fertilidad superior al resto de los suelos de los Llanos Orientales, además son poco lixiviados y reciben nutrimentos de la zona alta de la cordillera.

### 1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS DEL PIEDEMONTTE LLANERO.

En el piedemonte llanero la vegetación natural de bosques y sabanas ha sido desplazada por sistemas productivos como: pasturas introducidas y mejoradas las cuales pueden estar en producción o degradadas, predominando las del genero *Brachiaria* dedicadas al pastoreo de vacunos de ceba y doble propósito; cultivos transitorios de maíz, soya, arroz, yuca y plátano; cultivos permanentes de palma africana, cítricos (naranja, limón, mandarina) y frutales (papaya, maracuyá, piña y marañón); plantaciones forestales de pino, eucalipto, acacia y melina; y especies arbóreas que subsisten en relictos de bosque de galería, los cuales han sido sometidos a un fuerte proceso de intervención antrópica.

En general para el establecimiento de los sistemas de producción se realiza siempre la preparación de los lotes utilizando implementos de discos e implementos de labranza vertical (cincales rígidos y vibratorios).

La labranza se inicia con un pase de rastra de discos con el fin de reducir las coberturas de gramíneas naturales, incorporar parte del material vegetal en el suelo y brindar mejores condiciones para la acción del cincel, el cual actúa a una profundidad de 0 – 20 cm cuando se van a establecer sistemas agropastoriles, de 0 – 45 cm para los cultivos permanentes y de 0 - 30 cm en el caso de cultivos transitorios, lo anterior se hace con el fin de mantener la estabilidad física del sistema, porque se mejora propiedades como infiltración de agua, capacidad de aireación, distribución de los elementos nutritivos y penetración de raíces.

Por lo general durante este mejoramiento físico se aplica 2000 kg/ha de cal dolomítica para incrementar la saturación de bases y reducir los problemas de acidez, los cuales se incorporan al suelo mediante un pase de rastra y posteriormente se realizan dos pases de pulidor para iniciar las siembras.

Las fertilizaciones incluye la aplicación de nitrógeno, fósforo, potasio, boro, cobre y zinc acordes a los análisis de suelos y a los requerimientos del cultivo.

Como fertilizantes en los cultivos permanentes, transitorios y anuales, normalmente se utilizan: roca fosfórica, urea, SFT (46%  $P_2O_5$ ), KCl (60%  $K_2O$ ), borozinco, sulfato de zinc y en los cultivos transitorios se aplica molibdato como fuente de molibdeno. Las dosis dependen del análisis del suelo y de las necesidades nutricionales del cultivo a establecer.

En las pasturas lo más común es el encalamiento con cal dolomítica (200–300 kg/ha), se fertilizan con roca fosfórica (200 – 300 kg/ha), cloruro de potasio (50–75 kg/ha) y flor de azufre (25 kg/ha). Igualmente se realiza una fertilización de mantenimiento anual, que consiste en aplicar el 25% del nivel inicial.

Las pasturas se manejan bajo un sistema de pastoreo rotacional flexible, con periodos de ocupación-descanso de 14 a 28 días. La carga animal promedio es 2 animales por hectárea.

Los cultivos perennes (palma de aceite, plantaciones forestales y cítricos) se manejan con cobertura vegetal sobre el suelo principalmente con *Arachis pintoii*, con la finalidad de retener humedad y evitar el estrés hídrico durante la temporada seca. Durante el establecimiento por lo general se siembran en las calles cultivos transitorios de maíz, soya, millo o sorgo.

Los suelos del piedemonte llanero probablemente se encontraban bajo bosque nativo y sabanas nativas. Las praderas nativas fueron utilizadas para el pastoreo de animales y el bosque en su mayor parte fue tumbado para establecer pasturas con pastos nativos y posteriormente cultivos de arroz. Luego con la finalidad de aumentar la productividad de las pasturas se empezó con un proceso de renovación de las sabanas nativas por *Brachiaria decumbens*, las cuales con el tiempo debido a la falta de fertilización y la alta carga animal comenzaron a degradarse.

“Las principales causa de degradación de las praderas se atribuye a la perdida de fertilidad de los suelos, porque no se aplica los nutrientes necesarios para suplir las deficiencias naturales de estos, o para suplir la extracción que hace la planta y los animales en el sistema productivo” (Rincón, 2007).

Las pasturas degradadas son sistemas agropastoriles, sin ningún tipo de manejo (fertilización). Como no se fertilizan el suelo no es capaz de suplir las necesidades nutricionales de las especies de pastos introducidos, que por lo general son muy demandantes en nutrientes, y por tanto la pastura se va extinguiendo a medida que los nutrientes en el suelo van disminuyendo, principalmente las bases, ya sea por extracción por parte de la misma pastura o por lixiviación. Lo anterior facilita la colonización por parte de las plantas nativas de la zona adaptadas a estas condiciones edáficas, empezando una sucesión natural.

El principio de recuperación de las praderas degradadas y de incorporación de las sabanas nativas a la producción agropecuaria ha consistido en un mejoramiento químico del suelo con enmiendas y fertilizantes, mediante un sistema rotacional donde el cultivo capitalizador es el arroz, posteriormente se siembra un cultivo de soya y luego un abono verde, después del segundo año se empieza con una rotación de soya-maíz y posiblemente sorgo. Con este sistema se logra a través de las fertilizaciones y enmiendas que se aplican para establecer los cultivos un mejoramiento del suelo, incorporándolo a la producción agrícola por unos años, para llegar después de 4 o 5 años a sistemas de producción ganadera con pastos mejorados. Los niveles de enclamiento varían dependiendo del estado de incorporación de la sabana y al mejoramiento de los suelos. El sistema de labranza comprende rastra - cincel – rastra.

Otro sistema utilizado para la renovación y establecimiento de praderas consiste en asociar el pasto a sembrar con cultivos de soya, maíz o arroz. La siembra del pasto y el cultivo agrícola se realiza de forma simultánea, después de la cosecha del cultivo, el pasto se deja descansar por 30 días y luego se somete la pradera a pastoreo.

El riego no es una práctica muy común en la zona, ya que el periodo de lluvias es de 9 meses (Marzo – Noviembre) tiempo durante el cual las altas precipitaciones superan la evapotranspiración, lo que permite que cultivos como los cítricos por ejemplo no requieran de riego. En la temporada seca (diciembre – febrero), los vientos son muy fuertes, lo que hace que la evapotranspiración sea muy alta, lo que conlleva que durante estos meses la producción se reduzca, por lo que se necesita suplemento de riego, pero por su alto costo no se implementan.

#### 1.4 CALIDAD DEL SUELO

La calidad del suelo no es fácil de definir, pues depende del uso que se le vaya a dar a dicho suelo (agrícola, forestal, urbano, industrial) (García, 2008).

El concepto de calidad del suelo puede tener diferentes significados dependiendo del contexto, ya sea científico o social. Para algunos sugiere una relación ética o emocional con la tierra, para otros la calidad del suelo es una integración de los procesos del suelo y proporciona una medida del cambio de las condiciones del mismo y está relacionada a factores tales como el uso de la tierra, los patrones climáticos, las secuencias de cultivos y los sistemas de labranza (Doran y Parkin, 1994).

Larson y Pierce (1994), definen la calidad del suelo como la aptitud para el uso.

De acuerdo a Carter *et al.* (1997) la calidad del suelo es “el comportamiento del suelo en el cual las funciones del mismo operan en óptimos niveles dentro del ecosistema”

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 (Wilson *et al.*, 2008).

Según la USDA-NRCS (2011), la calidad del suelo se expresa como la capacidad del suelo de realizar sus funciones en el momento actual, pero garantizando su preservación para que en el futuro pueda desempeñar estas mismas funciones sin ningún inconveniente.

Doran y Parkin (1994) la definen como: la capacidad de un suelo de funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sosteniendo la productividad biológica (plantas y animales), manteniendo y/o aumentando la calidad medioambiental, y promoviendo la salud de las plantas, los animales y el hombre. Es decir, es la capacidad del suelo de ejercer sus funciones (Karlen *et al.*, 1997) en la naturaleza.

De acuerdo a Karlen *et al.* (1997) y Larson y Pierce (1994) las funciones del suelo son:

- Servir de medio para el soporte y crecimiento de las plantas.
- Captar y permitir la entrada de agua.
- Suplir las necesidades de agua de las plantas y recargar los acuíferos subterráneos.
- Promover el ciclaje de nutrientes.
- Mantener condiciones edáficas adecuadas para el desarrollo de la actividad biológica.
- Servir como amortiguador de los cambios.
- Servir de soporte estructural y medio en donde se puedan filtrar y degradar compuestos nocivos para el ambiente.
- Responder a un manejo presentando resistencia a la degradación.

En lo relacionado con la producción de cultivos, las funciones del suelo están orientadas en alimentar y mantener el crecimiento de las plantas. Estas funciones están asociadas a la eficiencia con que el suelo suministra nutrientes esenciales y al ambiente necesario para lograr la conversión del dióxido de carbono usando la energía de la luz solar (vía fotosíntesis) (Wilson *et al.*, 2008).

Según Carter (2002) la definición de calidad de suelo involucra dos conceptos: la calidad inherente del suelo para el crecimiento de los cultivos y la calidad dinámica influenciada por el uso o manejo. De esta manera, se diferencian las propiedades estáticas de las de comportamiento del suelo.

#### 1.4.1 Calidad de suelo y sostenibilidad agrícola.

En el contexto de la producción agrícola la calidad del suelo se define como la capacidad o aptitud del suelo de sostener el crecimiento de los vegetales, sin que esto resulte en la degradación del mismo o en un impacto ambiental negativo (Gregorich y Acton, 1995).

Según Smyth y Dumanski, (1995) La sostenibilidad se basa en cinco pilares fundamentales: productividad, seguridad, protección, viabilidad y aceptación.

De acuerdo a lo anterior y al concepto de desarrollo sostenible, la sostenibilidad agrícola se podría definir como la capacidad de un agroecosistema de producir alimentos y fibras (productividad), sin comprometer las funciones y condiciones del suelo (seguridad y protección) que permiten el desarrollo sin contratiempos (viabilidad) de tal proceso de producción, es decir que el sistema agrícola no afecte negativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, procurando siempre que su aptitud para el uso y su capacidad funcional perdure en el tiempo (aceptabilidad).

La calidad del suelo está determinada por funciones simultáneas tales como sostener la productividad de los cultivos, mantener la calidad del agua y del aire, y proporcionar condiciones saludables para plantas, animales y el hombre dentro de los límites de un ecosistema. Por lo tanto la relación entre calidad de suelo y sostenibilidad agrícola es la producción de alimentos en un suelo con capacidad para funcionar, en un proceso producción económicamente viable, ambientalmente seguro y socialmente aceptable. En este contexto la calidad del suelo se convierte en un indicador de manejo del suelo (Herrick, 2000).

Al emplear la calidad y la salud del suelo como herramientas para evaluar la sostenibilidad es necesario tener en cuenta las escalas espacio temporales, las cuales dependen de las propiedades inherentes (asociadas con los factores formadores) y de las propiedades dinámicas (que pueden ser afectadas por acciones humanas), ya que el recurso suelo y los ecosistemas que soporta son dinámicos en el espacio y en el tiempo, lo cual acarrea limitaciones e incertidumbres acerca del conocimiento que de éstos suelos se tenga (García, 2008).

#### 1.4.2 Indicadores de calidad del suelo.

Para la medición de la calidad dinámica del suelo se utilizan indicadores que son representados por aquellas variables sensibles al deterioro o a la recuperación. Estos indicadores permiten expresar el estado actual del recurso suelo y su tendencia (Wilson *et al.*, 2007)

Los indicadores de calidad del suelo son propiedades físicas, químicas y biológicas que pueden ser medidas cualitativa o cuantitativamente y que proveen pistas acerca de que tan adecuadamente un suelo funciona. De modo que los mejores indicadores serán aquellas propiedades que influyan significativamente sobre la capacidad del suelo para proveer cada función.

Las propiedades de los suelos no son estáticas sino que varían con el tiempo debido a factores que determinan su formación como el clima, el material parental, los organismos que lo habitan, las actividades humanas, etc. Dichos cambios sobre el suelo se producen de manera progresiva en el tiempo (García, 2008). Por

lo tanto, no existe una sola medida física, biológica o química para valorar el estado de salud y calidad de un suelo (Doran, 2002).

Los estudios actuales sobre la calidad del suelo están centrados en la identificación de indicadores que permitan evaluar la calidad del suelo en un momento determinado, así mismo como existen indicadores para calidad del aire y del agua. Sin embargo las investigaciones indican que la temática es sumamente complicada, ya que se necesita de la integración de propiedades físicas, químicas y biológicas, además de su dinámica en tiempo y espacio, así como el nivel de escala donde se aplicará (finca, cuenca, región, etc.). Siendo por tanto un poco complejo seleccionar un conjunto de propiedades que permitan establecer indicadores con los cuales se cubran todas las condiciones para valorar adecuadamente la calidad del suelo. No obstante los investigadores en suelos, agricultores y las instituciones gubernamentales tienen interés en obtener indicadores de la calidad del suelo para la evaluación de tierras, en relación con la degradación, estimar las necesidades de investigación y financiación y juzgar las prácticas de manejo, a fin de monitorear los cambios en las propiedades y procesos del suelo, en la sostenibilidad y calidad ambiental, que se producen a través del tiempo en respuesta al uso del suelo y a las prácticas agrícolas.

De acuerdo Barrios *et al.* (2001) y Astier *et al.* (2002) un indicador de la calidad del suelo debe identificar un conjunto de propiedades del suelo, de acuerdo a los siguientes criterios: aclarar los procesos del ecosistema, integrar propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo y sus procesos; ser sensible a los cambios de manejo en un período de tiempo relativamente corto y a variaciones climáticas; y cuando sea posible formar parte de una base de datos ya existe. Además deben ser relativamente económicos, precisos, fácil de medir e interpretar; prácticos y de utilidad para ser aplicados en diferentes condiciones de campo y en una amplia clase de situaciones ecológicas y socioeconómicas tanto por científicos como por agricultores, extensionistas, ambientalistas, instituciones gubernamentales y responsables de definir políticas de manejo.

Para Barrios *et al.* (2006) una evaluación cualitativa de la calidad del suelo a través de la percepción personal, especialmente de los agricultores, puede ser el método más adecuado para determinar el indicador de calidad del suelo. La propuesta consiste en identificar y clasificar indicadores locales de la calidad del suelo, y relacionarlos con parámetros técnicos del suelo, y así desarrollar un lenguaje común entre agricultores, extensionistas y científicos.

Para seleccionar las propiedades del suelo que puedan servir como indicadores la calidad debe ser evaluada con respecto a funciones específicas de éste. Dado que las funciones del suelo están claramente interrelacionadas, la calidad de un suelo en particular puede evaluarse otorgando mayor o menor peso a cada una de ellas o a las propiedades que las integran. Por consiguiente la calidad del suelo está determinada en última instancia por los usos a los cuales se destine éste y por el

ecosistema en el cual se está realizando la evaluación. Los criterios para seleccionar indicadores de calidad serán diferentes para los diversos usos del suelo y son dinámicos en el tiempo.

Doran y Parkin (1994) de acuerdo a las funciones del suelo, presentaron un conjunto básico de indicadores de orden biológico, físico y químico. Entre los indicadores físicos incluyeron: textura, profundidad efectiva, densidad aparente, infiltración del agua en el suelo, temperatura del suelo, contenido de agua en el suelo, capacidad de almacenamiento y retención de agua. En los químicos plantearon el contenido de carbono orgánico y nitrógeno total, pH, conductividad eléctrica, nitrógeno mineral ( $\text{NH}_4$  y  $\text{NO}^{-3}$ ). Como indicadores biológicos propusieron el fósforo, potasio, carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana, nitrógeno potencialmente mineralizable, respiración del suelo, carbono en la biomasa en relación con el carbono orgánico total y respiración microbiana en relación a la biomasa.

Larson y Pierce (1994) propusieron como propiedades del suelo que deberían integrar un conjunto mínimo de datos la disponibilidad de nutrientes, carbono orgánico total y lábil, textura, agua disponible para las plantas, estructura, densidad aparente y/o resistencia del suelo a la penetración, profundidad efectiva, pH y conductividad eléctrica.

Con el fin de recopilar indicadores y facilitar la evaluación de la calidad del suelo en el campo, la USDA desarrollo en 1999 una guía en la cual se recomienda determinar atributos biológicos, físicos y químicos. Las propiedades físicas caracterizadas incluyen densidad aparente, estabilidad de agregados, contenido de agua, velocidad de drenaje, desleimiento y estimaciones morfológicas. Entre las propiedades biológicas estudiadas se encuentran respiración del suelo y lombrices. Las propiedades químicas incluyen pH, conductividad eléctrica (CE) y niveles de nitratos.

Los indicadores de calidad de suelos son utilizados para identificar áreas con problemas, ya que permiten monitorear cambios en la calidad ambiental, relacionados al uso y manejo agrícola, mostrando la dinámica de los procesos que ocurren en el recurso (Doran y Parkin, 1994 y Larson y Pierce, 1994).

Monitorear los cambios en el indicador de calidad del suelo es la clave para poder determinar en el tiempo si la calidad de un suelo bajo un determinado tipo de uso y sistema de manejo está mejorando, permanece estable o está decreciendo (Shukla *et al.*, 2006).

Por último es importante mencionar que la materia orgánica al incidir directamente sobre propiedades edáficas, como en la estructura y en la disponibilidad de carbono y nitrógeno, se convierte en el principal indicador e indudablemente el que

posee la más significativa influencia sobre la calidad del suelo y su productividad (Gregorich *et al.*, 1994 y Quiroga y Funaro, 2004).

La materia orgánica del suelo es un indicador de suma importancia de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas como ambientales. La materia orgánica del suelo es el principal determinante de su actividad biológica. La cantidad, la diversidad y la actividad de la biota del suelo están directamente relacionadas con la materia orgánica. La materia orgánica y la actividad biológica que esta genera tienen gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos (FAO, 2002). La agregación y la estabilidad estructural del suelo aumentan con el contenido de materia orgánica. Estas a su vez, incrementan la tasa de infiltración y la capacidad de agua disponible en el suelo así como la resistencia contra la erosión hídrica y eólica. La materia orgánica del suelo también mejora la dinámica y la biodisponibilidad de los principales nutrientes de las plantas (FAO, 2002).

Por otro lado el contenido de materia orgánica del suelo (MOS) es un buen indicador de la capacidad del suelo de secuestrar carbono de la atmósfera terrestre. El suelo puede actuar como sumidero del CO<sub>2</sub> de la atmósfera y retardar su retorno, cuando se utilizan prácticas de manejo apropiadas como la siembra directa y la rotación de cultivo. Estas prácticas pueden conducir a un aumento de la materia orgánica del suelo, lo que se traduce en un mejoramiento de la productividad y la calidad ambiental. Además, aumentar los contenidos de MOS puede reducir las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, lo que contribuye a reducir considerablemente los costos financieros de fenómenos naturales, como la sequía, inundaciones y enfermedades que son consecuencia del cambio climático. Por lo tanto la forma más práctica y común para mejorar la calidad del suelo y del ambiente es promover un mejor manejo de la MOS (USDA-NRCS, 2011).

## 1.5 INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LOS SUELOS

Las propiedades de los suelos se pueden ver afectada por el manejo que se le dé al mismo a través del uso de maquinaria, riego, utilización de fertilizantes, agroquímicos y enmiendas orgánicas, tipo de cultivo y variedad a cultivar. Por lo tanto las propiedades de un suelo son dinámicas y está asociadas al uso del suelo y su función, comúnmente la conservación ambiental y la producción agropecuaria y forestal.

Para Velásquez (2004) en los sistemas naturales e intervenidos, el funcionamiento y las características físicas, químicas y biológicas del suelo están establecidas por una jerarquía de factores que actúan a diferentes escalas: el clima a escala más grande, la naturaleza del sustrato que determina el almacenamiento de nutrientes, y la cantidad y calidad de las arcillas, la comunidad vegetal que define la

abundancia y calidad de la materia orgánica producida, los organismos ingenieros del ecosistema. En agroecosistemas la calidad del suelo está afectada por muchos factores externos como el tipo de uso y manejo de los suelos, así como la interacción entre ecosistemas y medio ambiente, prioridades socioeconómicas, entre otras.

En una investigación realizada por Govaerts *et al.* (2005) para determinar un conjunto mínimo de datos que les permitiera evaluar la calidad de los suelos en las tierras altas de México bajo cultivos de trigo y maíz, encontraron que la cero labranza o la no perturbación del suelo unida a un adecuado manejo de los residuos de cosecha mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Con el avance de la agricultura, los suelos han comenzado a degradarse a una tasa alarmante debido a la implementación de prácticas inapropiadas. La deforestación, el sobrepastoreo, el abuso en el uso y la conversión de tierras vírgenes a la agricultura han resultado en la disminución de la calidad física, química y biológica de los recursos del suelo en todo el mundo. Los incrementos en las últimas décadas de la superficie cultivada, las prácticas de monocultivo y de aplicación de fertilizantes y pesticidas químicos, han provocado pérdidas en los contenidos de materia orgánica, incrementos en la erosión, compactación y contaminación del agua superficial y subterránea (Giuffré *et al.*, 2008).

Las prácticas agrícolas convencionales como el arado, el uso de enmiendas, fertilizantes y plaguicidas no sólo han tenido influencia en el suelo donde se aplican dichas prácticas, sino sobre la calidad del agua y de la atmósfera, ya que han generado cambios en la capacidad del mencionado suelo para producir y consumir gases como dióxido de carbono, óxido nitroso y metano (García, 2008).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La presente investigación se desarrolló en el centro de investigación Corpoica la libertad, el cual está 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 (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).

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 promisorias 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.

## 2.2 SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS Y SITIOS DE MUESTREO

Para la realización de la presente investigación se seleccionaron 11 sistemas productivos característicos del piedemonte llanero y en cada uno de ellos se ubicaron cinco sitios representativos, en los cuales se hicieron cajuelas de muestreo, cuyas dimensiones fueron 40 cm de largo por 40 cm de ancho y 50 cm de profundidad. Las cajuelas se hicieron con el fin de evaluar química, física y morfológicamente el medio edáfico.

Los sistemas productivos seleccionados fueron:

### 2.2.1 Palma de aceite (*Elaeis guineensis*) de 30 años de edad

El sitio en donde se encuentra ubicada la palma<sup>30</sup> era en un principio un bosque nativo, el cual fue tumbado para establecer cultivos de arroz que posteriormente se reemplazaron por praderas de pasto braquiaria (*Brachiaria decumbens*) y en 1979 se estableció el cultivo de palma.

Antes de establecer el cultivo de palma de aceite el lote fue preparado mediante tres pases de rastra, posteriormente se ahoyo y se le agregó a cada hueco 250 gramos de calfos, y luego se sembró la palma.

La distancia de siembra utilizada fue de 9 metros entre plantas sembradas en triangulo, para una densidad de siembra de 143 plantas por hectárea.

El lote se ha mantenido con cobertura vegetal, inicialmente de *Brachiaria decumbens* y hace veinte años se reemplazó por kudzu (*Pueraria phaseoloides*).

Hace aproximadamente 9 años se encaló todo el lote con cal dolomita, la cual se incorporó con pases de rastra y cincel fijo. La productividad promedio del lote es de 15 toneladas por hectárea.

Las fertilizaciones iniciales consistieron principalmente en aplicación de urea, cloruro de potasio (KCl) fosfato diamónico (DAP) y bórax. La fertilización actual consiste en una mezcla de nitrax, roca fosfórica, KCl, kieserita y bórax al 48% en una cantidad de 7 a 8 kilogramos por árbol, que se aplican al voleo cada cuatro meses.

### 2.2.2 Palma de aceite (*Elaeis guineensis*) de 18 años de edad

El lote está ubicado en la terraza alta, inicialmente se encontraba en praderas de *Brachiaria decumbens* degradadas, luego se sembró con frijol caupí (*Vigna unguiculata*) y posteriormente se estableció la palma.

El lote durante los primeros tres años estaba conformado por 4 parcelas experimentales, en donde se utilizó con factor de variación diferentes niveles de cal dolomita (0, 1, 2 y 3 toneladas por hectárea)

La preparación del sitio consistió en un pase de rastra de 15 a 20 cm de profundidad, luego se encaló con cal dolomítica, la cual se incorporó con rastra.

La distancia de siembra es de 9 metros entre plantas, sembradas en triángulo para una densidad de 143 plantas por hectárea. Como cobertura se ha empleado maní forrajero (*Arachis pintoï*) y kudzu (*Pueraria phaseoloides*).

La fertilización inicial fue con urea y DAP, y a partir del primer año se empezó a fertilizar con una mezcla de nitrox, roca fosfórica, KCl, kieserita y bórax fraccionada en tres aplicaciones al año. Aplicando en el primer año 1.5 kg, en el segundo 2.5 kg, en el tercer 3.5 kg, en el cuarto 4.5 kg, en el quinto 6 kg y del séptimo año hacia adelante entre 7 y 8 kilogramos de la mezcla. Para la aplicación se realiza un plateo hasta la gotera del árbol y se aplica el fertilizante al voleo.

Hace aproximadamente 9 años se encaló nuevamente todo el lote y se incorporó la cal dolomita con rastra y cincel fijo.

La productividad promedio del sistema está alrededor de 18 toneladas por hectárea

### 2.2.3 Pastura degradada de *Brachiaria decumbens*

El suelo en donde se encuentra la pastura degradada probablemente en un principio estuvo bajo bosque nativo, el cual se tumbó para establecer cultivos de arroz que luego fueron reemplazados por praderas de *Brachiaria decumbens*. Esta pastura fue abandonada hace más de 20 años, tiempo durante el cual ha permanecido sin ningún tipo de manejo y uso.

La causa principal de degradación de la pastura ha sido el exceso de humedad durante la temporada invernal.

Actualmente se encuentra invadida en un 50 a 60% por gramíneas y arbusto nativos, sobresaliendo el rabo de zorro (*Andropogon bicornis*).

De acuerdo a las características anteriores se decidió trabajar con esta pastura como el sistema de referencia.

#### 2.2.4 Cultivo de piña golden (*Ananas sativus*)

El sitio en donde estaba el cultivo de piña primero era una sabana nativa, posteriormente se establecieron praderas de pasto braquiaria, las cuales fueron reemplazadas por cultivos transitorios de arroz, soya y maíz. Antes del establecimiento de la piña estuvo sembrado en soya. La piña se sembró con una densidad de 50000 plantas/hectárea, en surcos triples, con una distancia entre calle de 70 cm. Como el lote había sido mejorado químicamente durante el establecimiento de los cultivos transitorios solamente se encaló con 1 tonelada de cal dolomita por hectárea y la fertilización del cultivo fue foliar. En las fertilizaciones foliares se aplicaba nitrógeno, potasio, magnesio, azufre, zinc y boro con una frecuencia quincenal. Al momento del muestreo la piña ya había sido cosechada. El lote llevaba solamente dos años con uso en piña.

#### 2.2.5 Plantaciones forestales de acacia (*Acacia mangium*), yopo (*Anadenanthera peregrina*) y melina (*Gmelina arborea*).

El lote en donde se encuentra el bosque plantado antes era una pradera degradada de *Brachiaria decumbens* invadida por gramas y arbusto nativos. Para el establecimiento del bosque se quemó la vegetación existente y posteriormente se labró el terreno con un pase de rastra, se le aplicó 1.5 toneladas de cal dolomítica y 500 kg de roca fosfórica por hectárea, y se incorporó con otro pase de rastra.

El bosque se comenzó a plantar en diciembre del 2005 y se terminó de plantar en mayo del 2006. Se establecieron 12 parcelas de 100 por 50 metros y 24 parcelas de 100 por 25 metros, con dos distancias de siembra, una de 2m entre planta por 3m entre surco y la otra de 3m entre planta por 4m entre surco.

El área de la plantación es de 6 hectáreas y la finalidad del bosque es la obtención de leña y carbón. Además es un lote experimental en donde los factores de variación son las especies sembradas, la densidad de siembra y los niveles de fertilización.

Las dosis de fertilización se aplicaron en el primer y tercer año y consistieron en dos mezclas: una de 75 gramos de DAP más 7 gramos de sulphomag y 5 gramos de boro y la otra estaba compuesta por 150 gramos de DAP más 150 gramos de sulphomag y 10 gramos de boro. El control de arvenses se realiza con guadaña y glifosato.

### 2.2.6 Cultivos transitorios de sorgo dulce (*Sorghum vulgare*), maíz (*Zea mays*) y soya (*Glycine max*)

El sitio en donde se encuentran ubicados los cultivos transitorios originalmente estaba en pasto nativo, el cual se eliminó en la década de los 80 para establecer praderas de *Brachiaria decumbens*. Para la década de los noventa las pasturas se habían degradado y fueron remplazadas en 1996 por cultivos transitorios.

Antes de iniciar la siembra de los cultivos se realizó dos pases de rastra al lote para destruir la cepa de la pastura e incorporar parte del material vegetal en el suelo. Se esperaron dos semanas y luego se aplicaron 2000 kg/ha de cal dolomita, los cuales fueron incorporados con un pase de rastra, luego de lo cual se realizaron dos pases de pulidor para iniciar las siembras.

El cultivo inicial fue soya (experimentos de variedades y cepas de rizobio) la cual se fertilizó con SFT (46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), KCl (60% K<sub>2</sub>O) y elementos menores (B, Cu y Zn).

Las dosis utilizadas fueron 50 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 60 kg/ha de K<sub>2</sub>O y 10 kg/ha de borozinco.

Los dos primeros años el área estuvo con soya y posteriormente se roto con maíz, millo y sorgo dulce.

Para el establecimiento de los cultivos se realiza siempre la preparación de los lotes que ha consistido en la utilización de implementos de discos e implementos de labranza vertical (cincales rígidos y vibratorios) para romper capas compactadas. La fertilización ha incluido la aplicación de N-P-K-B-Cu-Zn acordes a las necesidades del cultivo y a los aportes del suelo, cada 3 a 4 años se han realizado aplicaciones adicionales de cal dolomita (entre 1000 a 2000 kg/ha) dependiendo de los niveles de saturación de bases (mantener una saturación de bases en un 50%).

### 2.2.7 Plantación forestal de caucho (*Hevea brasiliensis*).

El sitio en donde se encuentra el cultivo de caucho antes era una pradera degradada de *Brachiaria decumbens*, la cual se fumigó con 4 litros de glifosato por hectárea y posteriormente se quemó, luego se labró el terreno con un pase de rastra y se aplicó 1.5 toneladas de cal dolomita por hectárea, la cual se incorporó con un cincel fijo.

La plantación se estableció en 1999 como con un diseño experimental en bloques completamente al azar con arreglo en el espacio. Se sembraron tres clones de Asia y tres de Brasil.

Con el fin de establecer cultivos en arreglos agroforestales el caucho se plantó en surcos dobles a 3 por 2.5 metros en triángulo, dejando 13 metros entre cada surco doble, de tal manera que se manejan 560 árboles por hectárea. La idea es que en el espacio que queda entre los surcos dobles se asocie algún cultivo.

El caucho se asoció durante el primer semestre con cannavalia, en el segundo y tercer semestre con soya, en el cuarto y quinto con maíz, en el sexto con cannavalia y en el séptimo semestre con maíz finalizando el ciclo, ya que los arboles habían llegado a la edad adulta. La fertilización de los cultivos dependía de los requerimientos nutricionales de cada cultivo y de los análisis de suelos.

El cultivo de caucho se manejó en un principio con una cobertura de *Desmodium ovalifolium* c.v.

La fertilización del caucho se realiza con una solución nutritiva de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, zinc, cobre y boro. Las dosis dependen de los análisis de suelos y de un análisis de extracción de nutrientes, realizado a los dos años de haber trasplantado el cultivo a sitio definitivo. La solución nutritiva se aplica en la zona de gotera en tres huecos a 30 cm de profundidad, tres veces al año. En la etapa inmadura del cultivo del caucho se preparó y se aplicó la siguiente fórmula nutritiva: urea (75g) + cloruro de potasio (70g) + óxido de magnesio (45g) + superfosfato triple (40g) + boro agrícola (5g) + sulfato de zinc (5g) por árbol.

La productividad ha variado entre 2.4 y 1.2 dependiendo del clon. El control de malezas se realiza con guadaña.

#### 2.2.8 Pasto llanero (*Brachiaria dictyoneura*) asociado con maní forrajero (*Arachis pintoi*).

El terreno en donde se encuentra el pasto llanero asociado con maní forrajero fue renovado en 1995. Antes se encontraba sembrado en *Brachiaria decumbens* con un estado de degradación avanzado.

La labranza del lote consistió en un pase de rastra para reducir la cobertura de pasto, luego un pase de cincel rígido a una profundidad de 20 a 25 centímetros, posteriormente se aplicó la cal dolomita a razón de 500 kg/ha y se incorporó con otro pase de rastra. Finalmente, se hizo un pase pulidor para dejar el terreno en condiciones adecuadas para la siembra.

El pasto más el maní forrajero se asoció en un principio con arroz, este último cultivo se cosechó a los 120 días después de la siembra con una productividad de 3.5 toneladas por hectárea. Después de la cosecha del arroz la pastura se dejó en descanso durante un mes y posteriormente fue sometida a pastoreo.

El pasto llanero más el maní forrajero asociado con arroz se sembró con maquinaria en forma simultánea.

La fertilización durante la siembra del pasto más el arroz consistió en: 150 kg/ha de DAP + 150 kg/ha de KCl + 150 kg/ha de urea + 20 kg/ha de borozinco. Después de esta primera fertilización no se ha vuelto aplicar nada.

La productividad de la pastura se encuentra alrededor de 600 kg/ha debido principalmente al sobrepastoreo, ya que la carga animal es de 3 a 4 animales por hectárea, por lo que el pasto tarda en recuperarse favoreciendo la densidad del maní forrajero.

#### 2.2.9 Pasto llanero (*Brachiaria dictyoneura*).

El sitio en donde se encuentra el pasto llanero antes estaba sembrado en *Brachiaria decumbens*, pero en el 2006 se renovó mediante un sistema de siembra simultánea de arroz y pasto empleando un sembradora.

La preparación del terreno y la fertilización fue igual que en el sistema anterior, la única diferencia es que en este se aplicó 1000 kg de cal dolomítica.

Después de la cosecha de arroz se dejó en descanso durante 30 días y desde ese momento se viene manejando con pastoreo a razón de 2 animales por hectárea.

La productividad de la pastura es de 1200 kg/ha.

#### 2.2.10 Pasto mulato II (*Brachiaria* híbrido CIAT 36087).

El terreno en donde está el pasto mulato estuvo durante 10 años en cultivo transitorios de arroz, soya, maíz y frijol caupí. Por consiguiente su manejo era similar al del sistema cultivos transitorios que se evaluó en esta investigación. Antes de los cultivos era una pastura degradada de *Brachiaria decumbens*.

La pastura se estableció en el 2007, la preparación del sitio consistió en un pase de vertedera. El pasto se sembró al voleo y se incorporó con un pase de rastra.

Como el suelo venía de cultivos transitorios y había sufrido un mejoramiento químico no se le aplicó ninguna enmienda ni fertilizante.

La productividad de la pastura es de 1600 kg/ha y se maneja con una carga de 3 a 4 animales por hectárea.

2.2.11 Cultivos de cítricos específicamente naranja valencia (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck).

El lote donde se encuentra el cultivo de naranja primero era una sabana nativa, luego se establecieron praderas de *Brachiaria decumbens* y posteriormente se incorporó a la producción agrícola con cultivos de yuca, arroz y soya. En 1996 se sembraron los cultivos de cítricos.

La labranza del sitio para la siembra de los cítricos consistió en un pase de rastra y después se aplicó cal dolomita (3 toneladas/hectárea) más escorias thomas (1.5 toneladas/hectárea) con una encaladora mediante el sistema de franjas alternas. Posteriormente sobre la superficie encalada se aplicó yeso agrícola (1 tonelada/Hectárea), dejándolo sobre la superficie para ser incorporado por la precipitación hacia las capas inferiores del perfil del suelo que no son corregidas por la cal.

El sistema de franjas alternas consiste en corregir un área de 3.5 metros de ancho por pase de la encaladora. El espacio entre franjas encaladas es de 4.5 metros, entre surcos es de 8 metros y entre plantas es de 6 metros, para una densidad de siembra de 208 árboles por hectárea. Con este sistema el área corregida es de 4375 m<sup>2</sup>/ha.

Las fertilizaciones han consistido en la aplicación de nitrógeno, fosforo y potasio en una relación de 3:1:3., además de boro, zinc, cobre y materia orgánica. Las dosis dependen del análisis de suelos y de los requerimientos nutricionales de la naranja valencia. La mezcla de los fertilizantes se aplica a cada árbol en corona.

La productividad después del quinto año ha estado alrededor de 16 toneladas por hectárea.

## 2.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental fue completamente al azar, empleando como tratamiento y fuente de variación los sistemas de producción (11) y como repeticiones (5) los sitios de muestreo (unidad experimental).

## 2.4 VARIABLES DE RESPUESTA Y METODOLOGÍA PARA SU DETERMINACIÓN

Como variables de respuestas se emplearon, variables asociadas a descripción morfológica, propiedades físicas y químicas.

### 2.4.1 Variables asociadas a descripción morfológica.

Las variables evaluadas fueron: Textura al tacto, Espesor de los horizontes (metro), Estructura (método de campo), Consistencia en húmedo y mojado (método de campo), pH (colorimetría) y Color (tabla de munsell).

### 2.4.2 Variables asociadas a propiedades físicas.

Las variables evaluadas fueron: Textura (bouyoucos); Densidad aparente (método del núcleo pequeño (cilindro) graduado), Densidad real (método del picnómetro), Porosidad (formula:  $(1-(DA/DR)*100)$ ); Humedad gravimétrica (método gravimétrico, estufa), Saturación en agua; Curva de retención de humedad (ollas de presión; estufa), Resistencia a la penetración (penetrografo), Conductividad hidráulica (permeámetro de carga constante), y Estabilidad estructural (método de tamizado en húmedo o de Tiulin modificado por Yoder).

### 2.4.3 Variables asociadas a propiedades químicas.

Las variables evaluadas fueron: pH (Suspensión suelo : agua (p/v) 1:1; potenciometría), Capacidad de Intercambio Catiónico (Desplazamiento del amonio intercambiado con NaCl, valoración volumétrica), Carbono orgánico oxidable (walkley – Black; colorimetría), Fósforo disponible (Bray II; colorimetría), Calcio, Potasio, Magnesio y Sodio (Extracción con Acetato de amonio 1M, pH 7, absorción atómica); acidez intercambiable (extracción con KCl 1N; valoración volumétrica), Cobre, Hierro, Manganeso y Zinc (Extracción con DTPA; absorción atómica) y Boro (extracción con fosfato monocálcico; Colorimetría).

## 2.5 CONDUCCIÓN DEL EXPERIMENTO EN CAMPO Y TOMA DE MUESTRAS

Para el desarrollo de la presente investigación se procedió a hacer 5 muestreos aleatorios mediante observación con cajuela y profundización con barreno por sistema productivo, con el fin de caracterizar física, química y morfológicamente el suelo de cada sistema. El muestreo se realizó en la época de lluvia específicamente en el mes de julio del 2009. De acuerdo a la estación

meteorológica de Corpoica la libertad la precipitación en este mes fue de 432.8 mm y la temperatura promedio fue de 24.4 °C.

En cada unidad experimental se realizó una descripción morfológica de los primeros dos horizontes del suelo, posteriormente se tomaron muestras del primer horizonte, sin disturbar para determinar las propiedades físicas y disturbadas para determinar propiedades químicas en los laboratorios de CORPOICA la libertad y de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá respectivamente.

En total se muestrearon 55 sitios, tomando en bolsas plásticas rotuladas 55 muestras disturbadas del horizonte A para determinaciones químicas y 55 sin disturbar (terrones) para determinaciones físicas, pero para estas últimas también se tomaron 110 muestras conformadas por 55 muestras en cilindros de acero inoxidable de 2 pulgadas de diámetro y 5 cm de altura y 55 en anillos de 2.5 cm de altura por 2 pulgadas de diámetro. La resistencia a la penetrabilidad se determinó con un penetraógrafo tomando lecturas cada 2.5 cm hasta una profundidad de 50 cm y evaluado tres sitios alrededor de cada cajuela.

Con la información de campo, se generó una base de datos (Anexo A); teniendo en cuenta esta información se describió morfológicamente los dos primeros horizontes, de acuerdo a la tendencia y comportamiento de los atributos descritos en las 5 cajuelas de cada sistema productivo.

## 2.6 PROCESAMIENTO ESTADÍSTICOS DE LA INFORMACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE INDICADORES Y PARA ESTABLECER LA INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO.

El procesamiento estadístico de los datos se realizó con la ayuda de los paquetes estadístico SAS y ADE-4

Para el tratamiento de los datos de resistencia a la penetración se procedió a promediar las tres lecturas realizadas en cada cajuela a cada profundidad. Para el análisis descriptivo se trabajó con un promedio general de las 5 cajuelas por sistema productivo hasta los 50 cm de profundidad, pero para los análisis de correlación y multivariados se tuvo en cuenta el coeficiente de variación de las lecturas realizadas en las cinco cajuelas construidas en cada sistema productivo, el cual era menor al 25%, por lo tanto se decidió trabajar con rangos de profundidad promediando las lecturas. Los rangos empleados fueron de 0 a 2.5 cm de 5 a 15 cm y de 17.5 a 30 cm de profundidad. Solo se tuvo en cuenta la resistencia a la penetración hasta los 30 cm porque en general este es el espesor promedio del primer horizonte del suelo de cada sistema productivo.

Con los datos de laboratorio de propiedades químicas se hizo un análisis estadístico de tipo descriptivo (frecuencias, rangos y medias) con el fin de

establecer tendencias y la posible variabilidad de los parámetros químicos. Con las frecuencias se reporta el estado general actual de los suelos y con el rango y la media el de cada sistema, desde el punto de vista de su aptitud química para el uso agrícola, especialmente en la producción de alimentos, de acuerdo a los niveles de interpretación estándar, reportados por diferentes autores entre ellos Estrada (1990), Menjivar (2009) y Castro y Gómez (2010).

Los promedios de cada variable química por sistema fueron comparados con la clasificación de los suelos según el nivel de fertilidad para el establecimiento de especies forrajeras tolerantes a la acidez realizada por Salinas y García (1985) y adaptada por Rincón *et al.* (2010), con el fin de determinar el nivel de fertilidad de los suelos evaluados.

Igualmente los resultados de la caracterización química se compararon con las propiedades químicas de algunos suelos del piedemonte llanero colombiano reportadas por Rincón *et al.* (2010). Para la conformación de los rangos los autores en mención utilizaron como fuente la base de datos de análisis de suelos de Corpoica la libertad.

Los resultados de la caracterización física se procesaron en primer lugar con un análisis descriptivo (rangos y medias) y las medias de cada sistema se compararon con valores de referencia para interpretar análisis físicos reportados por Guerrero (1990); Montenegro (1990); Montenegro y Malagón (1990); Narro (1994) Jaramillo (2002) y Gaona (2007).

Del mismo modo los datos promedios obtenidos en cada sistema productivo para propiedades físicas y químicas se compararon con el estudio del IGAC (1973) de acuerdo a su posición geomorfológica y a la serie de suelo.

Posteriormente los resultados de la caracterización química y física fueron tratados estadísticamente con un análisis de componentes principales (ACP), el cual permitió reducir el grupo de variables originales a un conjunto mínimo de datos (CMD), eliminando de esta manera aquellas variables que aportaban poco al estudio, es decir se seleccionaron solo aquellas variables que retenían la mayor variabilidad contenida en los datos, de acuerdo al aporte (peso) de cada variable a la conformación de los dos primeros componentes (factor 1 y 2 del ACP) que son lo que manejan la mayor variabilidad.

Para la selección de las variables de mayor aporte se tuvo en cuenta la contribución de cada variable a la construcción de los dos primeros componentes del ACP. Se dividió por dos el mayor valor y se retuvieron las variables con valores iguales o superiores a este. (Velásquez, 2010).

Las variables de mayor peso fueron seleccionadas como posibles indicadores de calidad del suelo, porque son las que manejan la mayor variabilidad y

posiblemente serán las más afectadas por las variaciones que sufra el sistema suelo por cambios en su uso.

Los indicadores seleccionados fueron procesados con análisis de varianza complementado con prueba de Duncan, con el fin de interpretar la influencia de los sistemas de producción en las propiedades físicas y químicas del suelo.

Igualmente se realizaron análisis de correlación entre las variables químicas y entre las variables físicas, con la finalidad de establecer relaciones entre ellas e identificar asociaciones en los diferentes sistemas de uso del suelo.

Los indicadores seleccionados fueron agrupados de acuerdo al análisis de correlación y ACP, teniendo en cuenta sus atributos, de la siguiente forma: indicadores de acidez, indicadores fertilidad, indicadores de agua en el suelo, indicadores de compactación e indicadores de arquitectura del suelo.

## 2.7 CONSTRUCCIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD PARA VALORAR LA INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LOS SUELOS

Para valorar la influencia de los sistemas de producción en las propiedades físicas y químicas del suelo y por ende en su calidad, con las variables seleccionadas se construyeron índices, de la siguiente manera:

Los indicadores se redujeron a valores comprendidos entre 0.1 y 1 mediante transformación homotética recomendada por Velásquez (2010), utilizando las siguientes formulas:

Para el caso de lo que más le conviene al sistema suelo en las condiciones actuales es que la propiedad física o química evaluada presente valores altos, se empleó la fórmula:

$$y = 0.1 + \left( \frac{X - b}{a - b} \right) * 0.9$$

Donde “Y” es el valor de la variable después de transformada; “X” es el valor de la variable a transformar; “b” es el mínimo valor obtenido para la variable en el muestreo y “a” es el máximo valor alcanzado por la variable.

Para el caso de lo que más le conviene al sistema suelo en las condiciones actuales es que la propiedad física o química evaluada presente valores bajos, se empleó la fórmula:

$$y = 1.1 - (0.1 + \left(\frac{X - b}{a - b}\right) * 0.9)$$

Las variables transformadas se multiplicaron una a una por su respectivo aporte (peso) a la formación de los dos primeros componentes y a la explicación de la varianza en el análisis de componentes principales, es decir la variable reducida se multiplicó por su aporte a la formación del factor uno y luego la variable reducida se multiplicó por su aporte a la formación del factor dos y después se sumaron los resultados de dichas multiplicaciones, por cada variable. Posteriormente se sumaron todas las variables correspondientes a un mismo sitio y el resultado obtenido se volvió a reducir aplicando la primera fórmula. De esta manera se obtuvo los índices de calidad del suelo por sitio (cajuela), que al ser promediados los pertenecientes a cada uso, se obtuvieron los índices de calidad promedio por sistema productivo.

Por último con los indicadores seleccionados y empleando los datos del muestreo, tomando como sistema de referencia la pastura degradada, teniendo en cuenta la clasificación de la fertilidad de los suelos para plantas tolerantes a la acidez realizada por Salinas y García (1985) y adaptada por Rincón *et al.* (2010) y los rangos reportados por Rincón *et al.* (2010), se procedió con un criterio técnico a realizar una propuesta de clasificación de la calidad química para suelos del piedemonte llanero.

En lo referente a la parte física también se planteó con un criterio técnico una propuesta de la calidad de los suelos del piedemonte llanero con los indicadores seleccionados, teniendo en cuenta los datos del muestreo e interpretaciones de análisis físicos reportadas por Montenegro (1990), Valenzuela y torrente (2010), IGAC y CVC (2004).

La clasificación de la calidad de los suelos se realizó con la finalidad de facilitar el monitoreo de la misma, ya que los futuros evaluadores solo tendrán que tomar las muestras pertinentes, realizar los análisis de laboratorio respectivos y observar en la tablas que clasificación tiene cada dato obtenido para las variables que se esté evaluando.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA DE LOS DOS PRIMEROS HORIZONTES DEL SUELO DE LOS SISTEMAS EVALUADOS

De acuerdo al estudio semidetallado de suelo realizado por el IGAC (1973) en la libertad, los sistemas pasto mulato II, cítricos, palma18, piña, cultivos transitorios y caucho se encuentra en la terraza alta; los sistemas pasto llanero más maní forrajero, pasto llanero, bosque plantado y palma30 están sobre una terraza media y el sistema pastura degradada en un valle estrecho (Vallecito).

Los datos de campo referentes a la descripción morfológica realizada mediante cajuelas de observación se reportan en tablas consignadas en el anexo A. A continuación se presenta la descripción morfológica de los dos primeros horizontes del suelo de cada sistema productivo de acuerdo al comportamiento y la tendencia de los parámetros descritos en las 5 cajuelas evaluadas por sistema.

El sistema palma30 presentó para el primer horizonte espesores comprendidos en un rango entre 29 y 37 cm con colores dominantes pardo oscuro; textura al tacto franco arcillosa; estructura en bloques subangulares medios y moderadamente desarrollados, consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente plástica y pegajosa; pH entre 4.5 y 5. En el segundo horizonte el espesor varió en un rango entre 31 y 59 cm con colores dominantes pardo amarillento oscuro; textura al tacto franco arcillosa y franco arcillosa limosa; estructura en bloques subangulares medios y moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente plástica y pegajosa; pH entre 4.8 y 5.

El sistema palma18 presentó un espesor en un rango entre 35 y 47 cm para el primer horizonte con un color dominante pardo oscuro; textura al tacto franco arcillosa arenosa; estructura en bloques subangulares medios y finos y moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo muy friable y en mojado pegajosa y ligeramente plástica; pH entre 4.5 y 5. Para el segundo horizonte el espesor osciló en un rango entre 58 y 95 cm con colores dominantes pardo amarillento oscuro y pardo fuerte; textura al tacto franco arcillosa limosa; estructura en bloques subangulares medios y finos moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente plástica y pegajosa; pH entre 4 y 5.5.

El sistema pastura degradada presentó un espesor comprendido en un rango entre 24 y 42 cm con un color dominante pardo oscuro; textura al tacto franco arcillosa arenosa; estructura en bloques subangulares medios y moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; pH entre 4.2 y 4.5. El segundo horizonte se caracterizó por

presentar un espesor en un rango entre 51 y 66 cm con colores pardo fuerte y pardo amarillento oscuro; textura al tacto arcillosa limosa; estructura en bloques subangulares medios y moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente plástica y pegajosa; pH entre 4.2 y 4.8. En este sistema después del segundo horizonte se encuentra el nivel freático debido principalmente a su cercanía a un desagüe natural.

Para el sistema bosque plantado el primer horizonte presentó un espesor comprendido en un rango entre 31 y 46 cm con un color dominante pardo amarillento oscuro; textura al tacto franco arcillosa; estructura en bloques subangulares medios y moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente plástica y pegajosa; pH entre 4.2 y 4.8. En el segundo horizonte presentó un espesor en un rango entre 10 y 79 cm con un color dominante pardo amarillento oscuro; textura franco arcillosa limosa; estructura en bloques subangulares medios y tanto débil como moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado plástica y pegajosa; pH entre 4.2 y 5.

Para el sistema piña el primer horizonte presentó un espesor comprendido en un rango entre 28 y 40 cm con un color dominante pardo oscuro; textura al tacto franco arcillosa y franco arcillosa arenosa; estructura en bloques subangulares medios y débilmente desarrollados; consistencia en húmedo muy friable y en mojado ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; pH entre 4.8 y 5. En el segundo horizonte el espesor osciló en un rango entre 38 y 100 cm con un color dominante pardo fuerte; textura franco arcillosa limosa; estructura en bloques subangulares medios y débilmente desarrollados; consistencia en húmedo friable y mojado ligeramente plástica y pegajosa; pH entre 4.5 y 5.

Para el sistema cultivos transitorios el primer horizonte presentó un espesor comprendido en un rango entre 23 y 47 cm con un color dominante pardo oscuro; textura al tacto franca; estructura en bloques subangulares medios y débilmente desarrollados, consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; pH entre 4.8 y 5. En el segundo horizonte el espesor osciló entre 21 y 73 cm con colores dominantes pardo fuerte y pardo oscuro; textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares medios y moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente plástica y pegajosa; pH entre 4.5 y 4.8.

Para el sistema caucho el primer horizonte presentó un espesor comprendido en un rango entre 31 y 41 cm con colores pardo grisáceo muy oscuro y pardo muy oscuro; textura al tacto franca; estructura en bloques subangulares medios y débilmente desarrollados; consistencia en húmedo muy friable y en mojado ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; pH entre 4.2 y 4.8. En el segundo horizonte el espesor varió en un rango entre 59 y 98 cm con colores que variaron entre pardo, pardo oscuro, pardo rojizo oscuro y rojo amarillento; textura franca y

franco arcillosa; estructura en bloques subangulares medios y moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo muy friable y en mojado ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; pH entre 4.2 y 4.8.

Para el sistema pasto llanero asociado con maní forrajero el primer horizonte presentó un espesor comprendido en un rango entre 31 y 42 cm con colores pardo amarillento oscuro y pardo oscuro; textura al tacto franco arcillosa; estructura en bloques subangulares medios y grandes bien desarrollados en algunos sitios y débilmente desarrollados en otros; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; pH entre 4.5 y 5. En el segundo horizonte el espesor osciló en un rango entre 46 y 71 cm con colores dominantes pardo fuerte y pardo amarillento oscuro; textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares medios y moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado plástica y pegajosa; pH entre 4.5 y 5.

Para el sistema pasto llanero el primer horizonte presentó un espesor comprendido en un rango entre 25 y 38 cm con colores pardo amarillento oscuro y pardo; textura al tacto franco arcillosa; estructura en bloques subangulares medios y grandes bien desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente plástica y pegajosa; pH entre 4.5 y 5. En el segundo horizonte el espesor osciló en un rango entre 12 y 65 cm con colores dominantes pardo fuerte, rojo amarillento y pardo amarillento oscuro; texturas franco arcillosa, francas y arcillosa limosa; estructura en bloques subangulares medios y moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente plástica y pegajosa; pH entre 4.8 y 5.

Para el sistema pasto mulato II el primer horizonte presentó un espesor comprendido en un rango entre 21 y 37 cm con un color dominante pardo oscuro; textura al tacto franco arcillosa y franco arcillosa arenosa; estructura en bloques subangulares medios y bien desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado plástica y ligeramente pegajosa; pH entre 4.2 y 4.8. En el segundo horizonte el espesor osciló en un rango entre 15 y 62 cm con colores dominantes pardo fuerte; texturas franco arcillosa y arcillosa; estructura en bloques subangulares medios y moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado plástica y pegajosa; pH entre 4.8 y 5.

Para el sistema cítrico el primer horizonte presentó un espesor comprendido en un rango entre 16 y 36 con colores dominantes pardo y pardo oscuro; textura al tacto franca; estructura en bloques subangulares medios y moderadamente desarrollados en algunos sitios y en otros débilmente desarrollados; consistencia en húmedo friable en algunos sitios y muy friable en otros y en mojado ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; pH entre 4.5 y 5. En el segundo horizonte el espesor varió entre 22 y 100 cm con colores dominantes pardo fuerte y pardo; textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares medios y

moderadamente desarrollados; consistencia en húmedo friable y en mojado ligeramente plástica y pegajosa; pH entre 4.5 y 5.

### 3.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA DE LOS SISTEMAS EVALUADOS

El análisis descriptivo para propiedades químicas y físicas se reporta en el anexo B.

Según el análisis descriptivo las propiedades químicas de los suelos evaluados presentaron una gran variabilidad (C.V >40%), especialmente en calcio, magnesio, potasio, sodio, fósforo y manganeso. Sin embargo para facilitar el análisis de los datos y su interpretación se decidió trabajar con valores promedios. Teniendo en cuenta que para un análisis de suelos de un lote se toman submuestras al azar de varios sitios, que luego se homogenizan para mandar al laboratorio. Además la mayoría de los datos muestran una tendencia a hacer todos bajos, o medios o altos de acuerdo a los niveles de interpretación estándares. No obstante también los resultados se presentan en rangos.

En la tabla 1 se muestran los valores promedios de las principales propiedades químicas del primer horizonte de los diferentes sistemas productivos, clasificados de acuerdo a los niveles de interpretación estándares para suelos de uso agrícola.

Tabla 1. Variables asociadas a propiedades químicas de los diferentes sistemas productivos con su respectiva interpretación.

SISTEMA	PROPIEDADES QUÍMICAS														
	pH	CO %	Ca	K	Mg	Na	Ac.I	CIC	P	Cu	Fe	Mn	Zn	B	
		Cmol(+)/Kg							mg/Kg						
Palma30	4.29	1.78	1.42	0.16	0.29	0.06	3.97	10.97	1.71	0.42	242.9	7.49	0.58	0.25	
Palma18	4.88	1.72	2.17	0.11	0.30	0.06	2.73	10.06	9.21	0.30	94.53	2.38	0.38	0.22	
Pastura degradada	4.44	1.84	0.35	0.07	0.07	0.05	3.97	10.99	0.83	0.45	152.59	2.57	0.42	0.14	
Bosque plantado	4.31	1.19	0.51	0.07	0.14	0.06	3.65	9.48	1.28	0.66	104.45	5.80	0.66	0.16	
Piña	4.54	1.46	0.52	0.06	0.07	0.03	3.28	12.55	32.30	0.55	92.89	0.67	1.27	0.28	
Cultivos transitorios	5.17	1.43	1.99	0.09	0.51	0.08	1.65	11.36	23.74	0.43	53.51	0.56	1.13	0.24	
Caucho	4.65	1.48	0.44	0.06	0.08	0.14	3.03	11.21	7.26	0.40	77.63	1.26	0.46	0.26	
Pasto llanero + maní	4.66	1.59	0.60	0.18	0.07	0.18	4.42	9.32	2.27	0.79	172.19	2.30	0.51	0.16	
Pasto llanero	4.80	1.57	0.78	0.09	0.07	0.17	3.18	8.48	3.45	0.89	151.14	4.66	0.42	0.18	
Pasto mulato II	5.19	1.52	1.53	0.08	0.54	0.02	2.15	9.49	12.51	0.79	91.26	1.81	0.66	0.26	
Cítricos	4.55	1.72	0.88	0.11	0.30	0.20	2.94	9.20	44.41	0.68	146.48	2.50	1.48	0.26	

Interpretación:

Rojo: alto

Amarillo: medio

Verde: bajo

De manera general se observó que los suelos de los sistemas producción evaluados presentaron valores promedios de pH muy fuertemente ácidos a fuertemente ácidos, niveles bajos de bases y niveles medios de carbono orgánico a excepción de la pastura degradada que mostró un nivel alto. Los niveles promedios de fósforo disponible variaron entre bajos y altos; en referencia a los micronutrientes se presentaron niveles promedios bajos de cobre, zinc y boro, altos y medios de hierro y bajos de manganeso a excepción del sistema palma30 y bosque plantado que presentaron niveles medios

El pH del suelo fue muy fuertemente ácido en un 83.64%, fuertemente ácido en un 14.55% y moderadamente ácido en un 1.81% de los sitios evaluados. El menor valor lo presentó bosque plantado (4.03) y el mayor cultivos transitorios (5.88). El rango más bajo fue para pasto llanero más maní forrajero (4.62 – 4.73) y el más alto para cultivos transitorios (4.79 – 5.88). El valor promedio más alto lo presentó pasto mulato II y el más bajo la palma30.

Los valores de pH muy bajos son una limitante para la disponibilidad de los macronutrientes y para la actividad microbiana de vital importancia en el ciclo de los nutrientes, principalmente de las bacterias que están relacionadas con procesos de fijación simbiótica y asimbiótica del nitrógeno, con la solubilización del fósforo y las que están involucradas en los procesos de nitrificación, las cuales por lo general, para su normal funcionamiento necesitan que el medio edáfico presente un pH mayor a 5.5. Por otro lado las condiciones extremas de acidez ( $\text{pH} < 5$ ) en el suelo inhiben la actividad del género *Thiobacillus* muy importantes en procesos de oxidación del hierro, del ácido sulfhídrico, del azufre elemental, de la pirita y del cobre (Jaramillo, 2002).

Lotero *et al.* (1971) y Guerrero (1990) determinaron en estos mismos suelos un valor de pH de 4.7, el cual es semejante a los valores promedios presentados por los sistemas palma18, caucho, pasto llanero asociado con maní forrajero y pasto llanero.

Muñoz (1985) y Sánchez (1980) reportaron valores de pH de 4.4 para suelos oxisoles de la libertad, valor que es similar a los promedios presentados por la pastura degradada, bosque plantado, piña y cítricos.

El pH promedio del suelo del sistema palma30 está por debajo del rango (4.4 – 4.9) reportado por Rincón *et al.* (2010), mientras que el de los sistemas pasto mulato II y cítrico se encuentra por encima de este y el de los demás sistemas se halla dentro de este rango.

Los diferentes valores de pH que presentaron los sistemas muestreados probablemente son el resultado del manejo agrícola que se le da a cada cultivo en lo referente a la utilización o no de cal dolomita y de la cantidad utilizada, para el establecimiento de los cultivos y pasturas. En general la cantidad cal dolomita a

aplicar depende del requerimiento de saturación de bases del cultivo a establecer, por tanto es la cantidad de cal aplicada la que genera cambios en el pH. Para la mayoría de los sistemas de producción a excepción de las pasturas del género *Brachiaria* se requiere elevar en el suelo el porcentaje saturación de bases (determinada con la CICe) a un 50%.

Los suelos presentaron contenidos de carbono altos en un 18.18%, medios en un 74.55% y bajos en un 7.27% de los sitios muestreados. El mayor valor lo presentó palma30 (2.78%) y el menor valor fue para piña (1.04%).

La pastura degradada presentó el valor promedio más alto y el bosque plantado el más bajo. El rango más bajo lo presentó caucho (1.42 – 1.53%) y el más alto palma30 (1.27 – 2.78%).

El contenido promedio de carbono orgánico de los suelos evaluados es bajo si se compara con el reportado por Tobón y León (1971) y Lotero *et al.* (1971) que fue de 2.15%, es decir 3.7% de materia orgánica, en suelos de la libertad.

Guerrero (1990) reporta contenidos de materia orgánica para suelos de la libertad de 2.1% es decir 1.22% de carbono orgánico, valor que se encuentra muy cercano al promedio presentado por el bosque plantado, pero es muy bajo si se compara con los promedios presentados por los demás sistemas.

El bajo contenido de carbono orgánico que presentó el bosque plantado puede ser el resultado de quemar la vegetación para el establecimiento del sistema, lo cual contribuyó acelerar el proceso de mineralización de la materia orgánica. Además las altas temperaturas a que fue sometido el suelo durante la quema posiblemente afectaron negativamente los macros y microorganismos del mismo, sin los cuales el proceso de humificación del material orgánico fresco y el reciclaje de nutrientes son muy lentos o inexistentes.

Los contenidos promedios de carbono orgánico que presentaron los sistemas se encuentran dentro del rango (1.9 - 3% M.O) reportado por Rincón *et al.* (2010) para el piedemonte llanero, a excepción de la pastura degradada que presentó el contenido más alto.

El alto contenido de carbono orgánico que presentó la pastura degradada probablemente sea el resultado de la no intervención, es decir, en este sistema no se realiza ninguna labor agrícola, es un sistema abandonado. Lo cual ha permitido la recuperación tanto de la materia orgánica como de la estructura del suelo, gracias al secuestro del carbono y a la acción de las raíces.

Los sistemas muestreados presentaron niveles promedios muy bajos de bases intercambiables, esto es explicable, ya que en esta zona se presentan intensas precipitaciones unidas a una baja CIC debido a el predominio de arcillas caoliniticas, por lo cual se produce un intenso lavado de las bases. Además estos

suelos de orden oxisol presentan un avanzado proceso de intemperización, por lo que su remanente en elementos nutrientes es muy poco, especialmente de bases.

El 92.73% de los sitios muestreados presentaron niveles bajos de calcio intercambiable y el 7.27% valores medios. Los valores más altos los presentaron palma18 (4.31 Cmol (+)/kg de suelo), cultivos transitorios (4.18 Cmol (+)/kg de suelo) y palma30 (3.72 Cmol (+)/kg de suelo) y los más bajos fueron para pastura degradada (0.30 Cmol (+)/kg de suelo), piña (0.30 Cmol (+)/kg de suelo) y cítricos (0.33 Cmol (+)/kg de suelo).

La palma18, cultivos transitorios y el pasto mulato II presentaron respectivamente los niveles promedios más altos de calcio y la pastura degradada y el caucho los niveles más bajos. El rango más amplio lo presentó cultivos transitorios (0.42 – 4.18 Cmol (+)/kg de suelo) y el más reducido pastura degradada (0.30 – 0.38 Cmol (+)/kg de suelo).

Los niveles promedios de calcio intercambiable de los sistemas pastura degradada, bosque plantado, piña y caucho se encuentran dentro del rango (0.17- 0.54 Cmol (+) Ca/kg suelo) reportado por Rincón *et al.* (2010) para el piedemonte llanero, pero en los suelos de los demás sistemas se presentaron valores por encima de este.

Para magnesio los contenidos en los suelos fueron bajos en un 100% de los sitios evaluados en los diferentes sistemas de producción. El valor más bajo lo presentó piña (0.03 Cmol (+)/kg de suelo) y el más alto cultivos transitorios (1.16 Cmol (+)/kg de suelo).

Los mayores niveles promedios de magnesio intercambiable los presentaron pasto mulato II y cultivos transitorios y los menores pastura degradada, piña, pasto llanero asociado con maní forrajero y pasto llanero. El menor rango fue para pasto llanero más maní forrajero (0.06 – 0.09 Cmol (+)/kg de suelo) y el mayor para cultivos transitorios (0.07 – 1.16 Cmol (+)/kg de suelo).

Solamente los niveles promedios de magnesio intercambiable de los sistemas bosque plantado, caucho, pasto llanero y pasto llanero asociado con maní forrajero se encuentran dentro del rango (0.07 - 0.15 Cmol(+) Mg/kg suelo) reportado por Rincón *et al.* (2010). Los contenidos de magnesio de los suelos en los sistemas pastura degradada y piña estuvieron por debajo de este rango y el de los demás sistemas por encima.

Los altos contenidos promedios de calcio y magnesio en los suelos de los sistemas cultivos transitorios y pasto mulato II se deben principalmente al mejoramiento químico que han sido sometidos con cal dolomita. El encalamiento es una práctica muy común en la zona, realizada con la finalidad de mejorar la disponibilidad de calcio y magnesio para los cultivos a establecer o establecidos,

lo que ocasiona un aumento en la saturación de bases y en el pH, y una disminución o neutralización de la acidez intercambiable y del aluminio intercambiable.

Los suelos presentaron niveles bajos de potasio en un 96.36% y medios en un 3.64% de los sitios evaluados. El mayor rango lo presentó pasto llanero más maní forrajero (0.07 – 0.52 Cmol (+)/kg de suelo) y los menores piña (0.05 – 0.07 Cmol (+)/kg de suelo) y caucho (0.04 – 0.06 Cmol (+)/kg de suelo).

Los niveles de potasio intercambiable oscilaron entre 0.4 y 0.52 Cmol (+)/kg de suelo, presentando el pasto llanero más maní forrajero el mayor valor promedio y la piña y el caucho el menor.

Para potasio intercambiable Lotero *et al.* (1971) en suelos de la libertad determinaron un nivel de 0.13 Cmol(+)/kg suelo, valor que solo es similar al promedio presentado por los sistemas cítricos, palma30 y palma18, y Tobón y León (1971) encontraron en estos mismos suelos un valor de 0.20 Cmol (+)/kg, el cual es mayor a los promedios determinados en esta investigación para los diferentes sistemas evaluados.

Los sistemas pasto mulato II, pastura degradada y bosque plantado presentaron en el suelo niveles de potasio promedios que se encuentran dentro del rango (0.07-0.08 Cmol(+) K/kg suelo) reportado por Rincón *et al* (2010).

En lo referente al sodio el 100% de los sitios evaluados presentaron en sus suelos contenidos bajos. El valor más alto lo presentó cítricos (0.39 Cmol(+)/kg de suelo) y el más bajo pasto mulato (0.01 Cmol (+)/kg de suelo).

El nivel promedio más alto lo presentó el pasto mulato II y el menor el pasto llanero asociado con maní forrajero. El mayor rango fue para caucho (0.05 – 0.29 Cmol(+)/kg de suelo) y el menor para pastura degradada (0.05 – 0.05 Cmol(+)/kg de suelo).

Los niveles promedios de sodio son muy bajos en todos los sistemas, si se comparan al determinado por Tobón y León (1971) que fue de 0.54 Cmol(+)/kg.

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.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el suelo fue baja en el 54.55% y media en el 45.45% de los sitios muestreados. El valor más alto (14.61 Cmol (+)/kg de suelo) y más bajo (6.53 Cmol (+)/kg de suelo) se presentaron en el sistema caucho, por tanto este sistemas presentó el rango más amplio (6.53 – 14.61 Cmol (+)/kg de suelo) y el más reducido fue para pasto llanero (8.19 – 9.00 Cmol (+)/kg de suelo).

La CIC presentó valores promedios clasificados como medios en los sistemas palma30, palma18, piña, pastura degradada, cultivos transitorio y caucho, para los demás sistemas sus valores son bajos, siendo el sistema pasto llanero el que presenta el menor valor (8.48 Cmol (+)/kg suelo) y el sistema piña el mayor valor. Los valores bajos de la CIC pueden estar asociados al tipo de arcilla predominante en la zona (arcilla caolinita), y a los altos porcentajes de arenas, como también a la baja generación de cargas negativas dependientes del pH, ya que este es muy bajo. Por otro lado los valores medios pueden estar relacionados con el contenido de materia orgánica.

En relación con el fósforo los suelos muestreados presentaron contenidos muy bajos en el 70.71%, bajos en el 7.27%, medios en el 16.36% y altos en el 5.45% de los sitios evaluados. El menor valor para fósforo fue de 0.7 ppm presentado por los sistemas palma30, bosque plantado y pastura degradada y los mayores valores los presentaron cítricos (96.22 ppm) y piña (88.61 ppm). Los rangos más amplios fueron para cítricos (4.19 – 96.22 ppm) y piña (10.50 – 88.61 ppm) y el menor para pastura degradada (0.70 – 1.25 ppm).

El fósforo disponible presentó niveles promedios altos en los sistemas cítricos, cultivos transitorios y piña.

En los cítricos se debe a que durante la preparación del sitio se empleó escoria de thomas, la cual es un fuente de lenta solubilidad que bajo condiciones acidas va liberando el fósforo paulatinamente, además durante la fertilizaciones se utilizan fuentes de rápida solubilidad y posiblemente antes del muestreo el cultivo se había fertilizado.

En los cultivos transitorios es debido a fertilizaciones periódicas de fósforo de rápida disponibilidad y/o a una baja acidez intercambiable y un mayor valor de pH.

En la piña probablemente sea el fósforo residual que se aplicó durante los cultivos transitorios. Además de que el cultivo de piña es poco exigente en fósforo.

A pesar que durante las fertilizaciones de las pasturas se aplicó fósforo su bajo valor en los sistemas pasto llanero asociado con maní forrajero y en el pasto llanero se debe principalmente a que las fuentes que se usaron fueron de alta solubilidad y por tanto las plantas ya lo tomaron y/o formó compuestos insolubles con el aluminio y el hierro.

En lo referente al fósforo disponible solamente los suelos de los sistemas palma30 y bosque plantado presentaron contenidos promedios que se encuentran dentro del rango (1 – 2 ppm) reportado por Rincón *et al.* (2010), mientras que la pastura degradada presentó un valor promedio de fósforo por debajo de este rango y en los demás sistemas los contenidos promedios fueron muy superiores a este.

Los niveles de cobre en los suelos fueron todos bajos y variaron entre 0.19 y 0.96 ppm, presentando el pasto llanero el más alto nivel promedio y la palma18 el más bajo. El rango más bajo fue para palma18 (0.26 – 0.35 ppm) y el más alto para palma30 (0.19 – 0.64 ppm).

Para cobre los suelos muestreados de los sistemas pasto mulato II, pasto llanero asociado con maní forrajero y pasto llanero presentaron niveles promedios superiores al rango (0.3 – 0.7 ppm) reportado por Rincón *et al.* (2010) para suelos del piedemonte llanero. En los demás sistemas los niveles presentados se encuentran dentro de este rango.

Para hierro el 56.36% de los sitios muestreados presentaron valores altos, 34.54% valores medios y 9.1% valores bajos. El valor más bajo fue para cultivos transitorios (34.80 ppm) y el más alto para palma30 (409.97 ppm). El mayor rango lo presentó palma30 (112.17 – 409.97 ppm) y el menor cultivos transitorios (34.80 – 68.97 ppm).

El nivel promedio más alto de hierro lo presentó palma30 y el más bajo cultivos transitorios.

Los suelos muestreados presentaron niveles promedios de hierro muy superiores al rango (42 – 46 ppm) reportado por Rincón *et al.* (2010) para suelos del piedemonte llanero.

Los niveles de zinc en los suelos muestreados variaron entre 0.17 y 3.45 ppm siendo bajos en un 98.18% y medios en un 1.82% de los sitios evaluados. El mayor nivel promedio lo presentó cítricos y el menor palma18. El rango más bajo lo presentó pastura degradada (0.36 – 0.59 ppm) y el más alto cítricos (0.19 – 3.45 ppm).

De acuerdo a Rincón *et al.* (2010) los niveles de zinc de los suelos del piedemonte se encuentran entre 0.5 y 1 ppm; dentro de este rango se encontraron los contenidos promedios de los suelos de la palma30, bosque plantado, piña, cultivos transitorios, pasto llanero asociado con maní forrajero pasto mulato II y cítricos.

En lo referente al boro sus niveles en los suelos muestreados variaron entre 0.12 y 0.35 ppm, presentando un 85.45% de los sitios evaluados niveles bajos y un 14.55% niveles medios. El mayor nivel promedio lo presentó piña y el menor pastura degradada. El rango más alto fue para pasto mulato (0.12 – 0.34 ppm) y el más bajo pastura degradada (0.13 – 0.16 ppm).

Los contenidos promedios de boro en los suelos de los sistemas piña, cultivos transitorios caucho, pasto mulato y cítricos se encontraron dentro del rango (0.24 – 0.37 ppm) determinado por Rincón *et al.* (2010). En los demás sistemas los suelos presentaron contenidos promedios por debajo de este rango.

El manganeso en el suelo fue bajo en el 85.45%, medio en el 10.91%, y alto en el 3.64% de los sitios muestreados. El mayor valor lo presentó palma30 (16.25 ppm) y el menor cultivos transitorios (0.19 ppm), presentando estos sistemas el mayor y menor nivel promedio respectivamente. El rango más alto fue para palma30 (1.85 – 16.25 ppm) y el más bajo para piña (0.23 – 0.34 ppm).

Los resultados de la presente investigación muestran una variabilidad apreciable al ser comparados con los de otras investigaciones y con los rangos reportados por Rincón *et al.* (2010). Variabilidad que se puede deber a que estos suelos han sido mejorados químicamente especialmente los de la terraza alta.

Del mismo modo los resultados mostraron que los contenidos de nutrientes de los suelos evaluados es bajo si se comparan con los niveles de interpretación, sin embargo como en los llanos orientales se emplean plantas tolerantes a la acidez y al aluminio, es necesario evaluar el nivel de fertilidad de los suelos para estas especies.

Salinas y García (1985) clasificaron la fertilidad de los suelos ácidos de acuerdo al requerimiento de nutrientes de las especie forrajeras tolerantes a la acidez, esta clasificación fue adaptada por Rincón *et al.* (2010).

En la tabla 2 se muestra el nivel de fertilidad promedio de los suelos de acuerdo a esta clasificación.

En relación al pH se observó que el suelo de los sistemas palma18, piña, cultivos transitorios, caucho, pasto llanero asociado con maní forrajero, pasto mulato II, pasto llanero y cítricos presentaron una fertilidad media y en los demás sistemas su fertilidad fue baja.

En lo referente al contenido de calcio intercambiable la mayoría de los suelos evaluados presentaron una fertilidad alta a excepción de los suelos de la pastura degradada y el caucho cuya fertilidad fue media.

En lo concerniente a el contenido de magnesio intercambiable los sistemas palma30, palma18, bosque plantado, cultivos transitorios, pasto mulato II y cítricos presentaron una alta fertilidad de sus suelos y para los sistemas pastura degradada, piña, pasto llanero asociado con maní forrajero y pasto llanero la fertilidad de sus suelos fue baja, quedado solo el sistema caucho con una fertilidad media.

Tabla 2. Clasificación del nivel de fertilidad de los suelos para el establecimiento de especies de plantas tolerantes a la acidez

SISTEMA	PROPIEDADES QUIMICAS							
	pH	Ca	K	Mg	P	Cu	Zn	B
		Cmol(+)/Kg			mg/Kg			
Palma30	4.29	1.42	0.16	0.29	1.71	0.42	0.58	0.25
Palma18	4.88	2.17	0.11	0.30	9.21	0.30	0.38	0.22
Pastura degradada	4.44	0.35	0.07	0.07	0.83	0.45	0.42	0.14
Bosque plantado	4.31	0.51	0.07	0.14	1.28	0.66	0.66	0.16
Piña	4.54	0.52	0.06	0.07	32.30	0.55	1.27	0.28
Cultivos transitorios	5.17	1.99	0.09	0.51	23.74	0.43	1.13	0.24
Caucho	4.65	0.44	0.06	0.08	7.26	0.40	0.46	0.26
Pasto llanero + maní	4.66	0.60	0.18	0.07	2.27	0.79	0.51	0.16
Pasto llanero	4.80	0.78	0.09	0.07	3.45	0.89	0.42	0.18
Pasto mulato II	5.19	1.53	0.08	0.54	12.51	0.79	0.66	0.26
Cítricos	4.55	0.88	0.11	0.30	44.41	0.68	1.48	0.26

Interpretación: Rojo: Alta                      Amarillo: Media                      Verde: Baja

La fertilidad de los suelos en relación al fósforo disponible fue baja para la palma30, pastura degradada y bosque plantado, mientras que para los suelos de los sistemas pasto llanero y pasto llanero asociado con maní forrajero su fertilidad fue media, y para los demás sistemas fue alta.

Con respecto al cobre la fertilidad de los suelos es baja para los sistemas palma30, palma18, pastura degradada, cultivos transitorios y caucho y media para los demás sistemas.

El nivel de fertilidad de los suelos de acuerdo al zinc es bajo para palma18, pastura degradada, caucho y pasto llanero; es medio para palma30, bosque plantado, pasto llanero asociado con maní forrajero y pasto mulato II y es alto para piña, cultivos transitorios y cítricos.

De acuerdo a los contenidos de boro la fertilidad de los suelos de todos los sistemas productivos es baja (menor de 0.3 ppm).

El bajo nivel de la fertilidad de sus suelos de la pastura degradada se debe principalmente a que después de un tiempo sin ningún tipo de manejo, en estas condiciones edáficas y climáticas, el contenido de elementos nutrientes de estos suelos empieza a disminuir hasta volver a tener valores similares a los presentados en sabanas naturales (Corpoica, 2007, Rincón y Caicedo, 2010).

El IGAC en 1973 realizó un estudio semidetallado de los suelos de la libertad, en dicho estudio los perfiles típicos fueron descritos de acuerdo a su posición geomorfológica. Los perfiles típicos de los suelos de terraza alta se denominaron serie la libertad y el puente; los de terraza media serie tolima, encanto, el retiro, la represa, chipre2 y chipre3; los de terraza baja serie el bosque y Ocoa; los suelos de aluviones recientes serie la isla, serie caño alto y serie caño quenane, y el de bajos serie los bajos.

Los suelos de los sistemas evaluados en la terraza alta fueron descritos por el IGAC (1973) en el perfil típico denominado serie la libertad, los de la terraza media en la serie tolima, encanto y chipre3, y los de aluviones recientes pertenecientes a valles estrechos en la serie caño quenane.

En la serie la libertad quedaron ubicados los sistemas palma18, piña, cítricos, caucho, cultivos transitorios y pasto mulato II. El perfil típico de esta serie en 1973 presentó las siguientes características químicas: pH de 4.7, niveles de calcio intercambiable de 0.4 Cmol(+)/kg suelo, magnesio intercambiable de 0.6 Cmol(+)/kg suelo, potasio intercambiable de 0.2 Cmol(+)/kg suelo, sodio intercambiable de 0.01 Cmol(+)/kg suelo y un contenido de carbono orgánico de 2.04%.

Comparando los valores promedios de los suelos que quedaron en esta serie se observó que los sistemas mostraron a la fecha de evaluación un pH similar al perfil típico, excepto los sistemas cultivos transitorio y pasto mulato II que presentaron un valor superior. En lo referente al calcio solamente el caucho presentó un valor similar al determinado para esta serie, los demás sistemas presentaron niveles muy superiores. Para el caso del magnesio solo los suelos de los cultivos transitorios y pasto mulato presentaron valores similares, en los demás sistemas los niveles son muy inferiores a los presentados por el perfil típico. En lo que respecta al potasio los niveles en los suelos de los sistemas evaluados son muy inferiores al presentado por el perfil típico y en sodio son muy superiores.

Los valores promedios de carbono orgánico que presentaron los suelos de la terraza alta de los sistemas evaluados es bajo si se compara con el determinado por el IGAC (1973).

En la serie tolima se muestrearon los suelos del bosque plantado. El perfil típico de esta serie presentó en 1973 un pH de 5.3, un nivel de calcio intercambiable de 2.8 Cmol(+)/kg suelo, magnesio intercambiable de 0.4 Cmol(+)/kg suelo, potasio intercambiable de 0.1 Cmol(+)/kg suelo, sodio intercambiable de 0.01 Cmol(+)/kg suelo y carbono orgánico de 2.30%. Estos valores son muy superiores a los determinados en los suelos del bosque plantado a excepción del sodio intercambiable.

En la serie el encanto se muestrearon los suelos de la palma30. El perfil modal para estos suelos presentó en 1973 un pH de 4.7, calcio intercambiable de 0.4 Cmol(+)/kg suelo, magnesio intercambiable de 0.4 Cmol(+)/kg suelo, potasio intercambiable de 0.1 Cmol(+)/kg suelo, sodio intercambiable de 0.01 Cmol(+)/kg suelo y carbono orgánico de 2.23%. Los valores de pH, magnesio y carbono orgánico son superiores a los determinados en los suelos de la palma30 y los valores de sodio intercambiable, calcio intercambiable y potasio intercambiable son inferiores.

En la serie quenane se muestrearon los suelos de la pastura degradada. De acuerdo al IGAC (1973) los suelos de esta serie presentaron un pH de 4.5, un nivel de calcio intercambiable de 0.2 Cmol(+)/kg suelo, magnesio intercambiable de 0.2 Cmol(+)/kg suelo, potasio intercambiable de 0.1 Cmol(+)/kg suelo, sodio intercambiable de 0.01 Cmol(+)/kg suelo y carbono orgánico de 2.04%.

Comparando los anteriores valores con los presentados por los suelos de la pastura degradada se observa una cierta similitud, especialmente en pH, potasio intercambiable, sodio intercambiable y carbono orgánico.

La serie chipre3 presentó en el estudio del IGAC (1973) un pH de 4.9, un nivel de calcio intercambiable de 0.4 Cmol(+)/kg suelo, magnesio intercambiable de 0.4 Cmol(+)/kg suelo, potasio intercambiable de 0.1 Cmol(+)/kg suelo, sodio intercambiable de 0.01 Cmol(+)/kg suelo y carbono orgánico de 1.83%.

En la serie chipre3 se muestrearon los suelos de los sistemas pasto llanero y pasto llanero asociado con maní forrajero. El valor de pH del pasto llanero es similar al presentado por el perfil modal, pero el de pasto llanero más maní forrajero es inferior. Los contenidos de carbono orgánico de los dos sistemas son inferiores al presentado por el perfil típico. Los niveles de calcio y sodio intercambiable son superiores y los de potasio y magnesio intercambiables son inferiores en los dos sistemas con respecto a los del perfil modal.

En la tabla 3 se reportan las relaciones de las bases y el porcentaje de saturación de bases y saturación de aluminio. Para la determinación de este último se tuvo en cuenta que 1 Cmol (+) Al/kg es igual a 90 ppm y el de hidrógeno es de 10 ppm. Del mismo modo en suelos tropicales de orden oxisol la mayor parte de la acidez proviene del aluminio (León, 1971; Guerrero, 1990; Castro y Gómez, 2010).

Además La cantidad de H<sup>+</sup> solamente constituye una fracción apreciable de los cationes intercambiables y solubles en suelos sumamente ácidos (pH < 4.0) (Bohn, et al, 1993). De acuerdo a lo anterior en este estudio se consideró la acidez intercambiable como sinónimo de aluminio intercambiable.

Es importante mencionar que las saturaciones se calcularon con la CIC determinada a pH 7 y no con la CICe que es la que emplea los investigadores de Corpoica para realizar estos cálculos en los suelos de los llanos orientales.

Tabla 3. Relación de las bases y porcentaje de saturación de bases y aluminio en los diferentes sistemas productivos.

SISTEMA	RELACIÓN DE LAS BASES			PORCENTAJE DE SATURACIÓN	
	Ca: Mg	Ca + Mg/ K	K :Mg	% SAT DE BASES	% SAT Al.
Palma30	4.85	10.55	0.55	17.58	36.15
Palma18	7.20	21.65	0.38	26.28	27.08
Pastura degradada	5.31	5.54	1.14	4.87	36.12
Bosque plantado	3.72	9.59	0.49	8.19	38.53
Piña	7.46	9.13	0.93	5.43	26.16
Cultivos transitorios	3.90	27.46	0.18	23.47	14.54
Caucho	5.19	9.29	0.67	6.37	27.00
Pasto llanero + maní	8.07	3.67	2.47	11.13	47.40
Pasto llanero	11.09	9.40	1.29	13.01	37.47
Pasto mulato II	2.83	24.65	0.16	22.95	22.68
Cítricos	2.96	10.35	0.38	16.18	31.92

Interpretación: Rojo: problemas de aluminio., Azul: Normal  
Verde: Bajo., Amarillo: carencia de magnesio

De acuerdo a estos resultados se puede afirmar que los suelos de los sistemas que no presentaron problemas debido a carencias inducidas de elementos y saturación de aluminio, son cultivos transitorios y pasto mulato II. En lo que respecta a los demás sistemas presentaron problemas de carencia inducida de magnesio y saturación de aluminio.

Los altos porcentaje de saturación de aluminio (> 25%) se puede deber al bajo pH (< 5.5), que ha permitido su solubilización. Lo anterior es una limitante grave que presentan estos suelos, ya que el aluminio en su forma soluble es toxico para las plantas y contribuye aumentar la acidez. Además los altos niveles de aluminio pueden afectar el crecimiento de las raíces, lo que se convierte en otro problema para la toma de los nutrientes, principalmente del fósforo.

Los sistemas productivos evaluados presentaron un porcentaje de saturación de bases por debajo del 25%, siendo los sistemas más críticos la pastura degradada, caucho, piña y bosque plantado.

Debido a que la pastura degradada se encuentra hace más de 20 años abandonada y está invadida por gramas y arbustos nativos en un 50% aproximadamente, se puede emplear como un sistema de referencia, ya que no se le realiza ningún tipo de manejo, siendo la única diferencia con las sabanas nativas la presencia de *Brachiaria decumbens*. Entonces como el suelo de este sistema presentó problemas de saturación de aluminio y carencia de magnesio, se puede afirmar que estas limitaciones son características de los suelos de la zona, pero en algunos sistemas productivos se ha aumentado esta problemática debido al incremento de la acidez intercambiable y aun desbalance de las bases, causadas posiblemente por las prácticas de manejo y el monocultivo, ya que no se garantiza el aporte diverso de nutrientes.

En las tablas 4 y 5 se reportan los promedios de las principales propiedades físicas de los diferentes sistemas evaluados.

Con respecto a la densidad aparente el menor valor lo presentó la pastura degradada ( $1.12 \text{ g/cm}^3$ ) y el mayor valor cultivos transitorios ( $1.70 \text{ g/cm}^3$ ). El valor promedio más alto lo presentó pasto mulato II y el más bajo pastura degradada. El mayor rango fue para palma30 ( $1.29 - 1.69 \text{ g/cm}^3$ ) y el menor para pasto llanero ( $1.45 - 1.56 \text{ g/cm}^3$ ) y pasto mulato II ( $1.51 - 1.62 \text{ g/cm}^3$ ).

La densidad aparente presentó valores promedios superiores a los rangos normales ( $1.3 - 1.4 \text{ g/cm}^3$ ), reportados por Corpoica, (2007) para este tipo de suelos en la mayoría de los sistemas a excepción de la pastura degradada.

Los valores de densidad aparente que presentaron la mayoría de los sistemas pueden estar asociados a problemas de adensamiento o relacionados con el alto contenido de arenas, como puede ser el caso de los suelos de palma18, cultivos transitorios, piña y cítricos.

Los resultados para densidad aparente sugieren que las plantas podrían tener problemas para la toma del fósforo, ya que este se mueve por difusión.

Para densidad real los mayores valores los presentaron los suelos del pasto llanero ( $2.68 \text{ g/cm}^3$ ) y pasto mulato II ( $2.68 \text{ g/cm}^3$ ) y los menores palma30 ( $2.11$

g/cm<sup>3</sup>) y pastura degradada (2.36 g/cm<sup>3</sup>). El valor promedio más alto lo presentó pasto mulato II y el menor palma30. Los menores rangos fueron para bosque plantado (2.51 – 2.58 g/cm<sup>3</sup>) y pasto mulato II (2.61 – 2.68 g/cm<sup>3</sup>) y los mayores para palma30 (2.11 – 2.42 g/cm<sup>3</sup>) y pastura degradada (2.32 – 2.57 g/cm<sup>3</sup>)

La densidad real en la mayor parte de los sistemas presentó valores promedios por debajo de 2.65 g/cm<sup>3</sup> a excepción del pasto mulato II, lo que da a entender un predominio de la fracción orgánica sobre la mineral, principalmente en los sistemas palma30, palma18 y pastura degradada.

Tabla 4. Variables físicas asociadas al comportamiento y distribución de la fase sólida y gaseosa del suelo.

SISTEMA	Densidad	Densidad	Porosidad	Estabilidad Estructural		TEXTURA			
	Aparente	Real		DPM	Clasificación	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clasificación
	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	%						
Palma30	1.50	2.24	33.88	4.74	Estable	53.20	27.20	19.60	F
Palma18	1.54	2.42	36.22	4.56	Estable	67.20	16.80	16.00	FArA
Pastura degradada	1.36	2.42	43.68	5.90	Muy estable	53.60	28.40	18.00	FA
Bosque plantado	1.52	2.54	39.78	3.72	Estable	48.00	26.00	26.00	FArA
Piña	1.48	2.56	42.30	2.36	Moderada estable	60.60	20.40	19.00	FArA
Cultivos transitorios	1.54	2.56	39.14	2.24	Moderada estable	61.40	17.20	21.40	FArA
Caucho	1.44	2.56	42.76	3.00	Moderada estable	61.60	18.80	19.60	FArA
Pasto llanero + maní	1.44	2.50	41.78	5.20	Muy estable	49.20	28.00	22.80	F
Pasto llanero	1.50	2.60	42.08	4.28	Estable	58.60	22.00	19.40	FA
Pasto mulato II	1.58	2.66	40.14	5.26	Muy estable	54.40	22.40	23.20	FArA
Cítricos	1.52	2.62	41.70	3.18	Estable	59.40	18.80	21.80	FArA

En lo referente a la porosidad los sitios muestreados presentaron valores que variaron entre 27.84 y 51.97%. Presentando el suelo de la pastura degradada el mayor valor promedio y el de palma30 el menor. Los rangos más altos se presentaron en el suelo con piña (33.31 – 51.50%) y pastura degradada (34.83 – 51.97%) y los menores en pasto mulato II (39.35 – 42.02%) y pasto llanero asociado con maní forrajero (38.78 – 43.41%).

La porosidad presentó valores promedios por debajo del 45% siendo un valor crítico los promedios presentados por la palma30 (33.88%) y palma18 (36.22%), lo que indica que volumétricamente el suelo de estos sistemas esta

desproporcionado, es decir presenta más sólidos que poros, lo que sugiere que posiblemente existan problemas de compactación.

Los sitios muestreados presentaron valores de estabilidad estructural altos en bosque plantado (6.87 DMP) y pastura degradada (6.28 DMP) y bajos en cultivos transitorios (1.31 DMP) y piña (1.80 DMP).

El mayor valor promedio lo presentó pastura degradada y el menor cultivos transitorios. El rango más alto fue para bosque plantado (2.39 – 6.87 DMP) y el más bajo para pastura degradada (5.30 – 6.28 DMP)

Los valores promedios para estabilidad estructural variaron entre moderadamente estable y muy estable pasando por estable, esto se puede deber a los altos contenidos de hierro (Tabla 1), ya que este es un cementante, lo que ayuda a la agregación de las partículas del suelo.

El mayor contenido de arena lo presentó el suelo de la palma18 (72,16%) y los menores contenidos los suelos del bosque plantado (44.48%) y el pasto llanero con maní forrajero (44.48%), presentando estos mismos sistemas el mayor y los menores contenidos promedios respectivamente. Los mayores rangos los presentaron pasto llanero (48.96 – 62.48%) y palma18 (60.96 – 72.16%) y los menores bosque plantado (44.48 – 50.489%) y cultivos transitorios (58.48 - 64.48%).

Los suelos de los sistemas muestreados presentaron un contenido de limo que varió entre 14 y 32%. El valor promedio más alto lo presentó pastura degradada y el más bajo palma18. Los mayores rangos fueron para piña (16 – 26%) y cítricos (16 – 26%) y los menores para pasto mulato II (22.00 – 23.64%) y palma18 (16 - 20%).

Los contenidos de arcilla variaron entre 11.84 y 29.84%, presentando el suelo del bosque plantado el mayor valor promedio y el de palma18 el menor. El mayor rango lo presentó pasto llanero (15.04 – 27.04%) y el menor caucho (17.84 – 19.84).

La textura de los diferentes sistemas productivos fue catalogada como franco arcillosa arenosa pasando por franca y llegando hasta franco arenosa.

La textura de los suelos de terraza alta fue la misma que presentó el perfil modal de la serie la libertad en el estudio de IGAC (1973).

En general los suelos evaluados en los diferentes sistemas presentaron igual textura a la determinada por el IGAC (1973) en los perfiles típicos de cada serie.

Los valores para saturación (Tabla 5) en los suelos muestreados variaron entre 24.67 y 46.53%, presentando la pastura degradada el mayor valor promedio y

cultivos transitorios el menor. El rango más bajo fue para caucho (30.71 – 36.345%) y el más alto para palma30 (28.99 – 44.23%)

Los contenidos de humedad retenidos a 0.3 bares de tensión variaron entre 18.56 y 36.54%. El valor promedio más alto lo presentó pastura degradada y el más bajo piña. El mayor rango lo presentó palma30 (23.67 – 36.54%) y el menor pasto mulato II (21.62 – 24.45%).

Tabla 5. Variables físicas asociadas al almacenamiento del agua en el suelo.

SISTEMA	Saturación %	Humedad gravimétrica a varias tensiones (bar)						Agua Aprovechable %	Humedad gravimétrica %	Conductividad Hidráulica	
		0.1	0.3	1.5	3.0	5.0	15.0			cm/h	Clasificación
Palma30	34.46	31.64	27.54	26.78	24.80	24.22	22.62	4.92	28.04	0.36	Lenta
Palma18	32.16	29.12	24.60	23.96	23.08	22.12	20.72	3.88	23.64	0.64	Mod. lenta
Pastura degradada	38.04	35.58	29.56	28.82	27.10	26.00	24.16	5.40	33.34	0.86	Mod. lenta
Bosque plantado	33.14	31.04	26.48	25.62	24.04	23.20	21.58	4.90	27.24	1.52	Mod. lenta
Piña	36.74	26.82	22.80	22.18	20.28	19.78	18.34	4.46	23.34	1.84	Moderada
Cultivos transitorios	31.00	24.84	23.16	22.58	20.78	20.52	19.64	3.52	21.86	0.82	Mod. lenta
Caucho	34.00	28.06	25.08	24.50	23.20	22.70	21.52	3.56	26.28	1.34	Mod. lenta
Pasto llanero + maní	34.92	30.66	28.80	28.24	26.60	26.00	25.14	3.66	27.78	0.80	Mod. lenta
Pasto llanero	29.58	26.78	25.52	24.12	23.40	22.96	22.02	3.50	26.16	0.74	Mod. lenta
Pasto mulato II	30.02	27.76	23.41	21.01	20.27	19.00	17.23	6.17	21.40	2.18	Moderada
Cítricos	30.24	26.06	23.92	21.38	20.90	20.02	18.62	5.30	21.44	1.12	Mod. lenta

Los contenidos de humedad retenidos a 15 bares de tensión variaron entre 13.99 y 30.49%, presentando el suelo del pasto llanero más maní forrajero el mayor valor promedio y el de la piña el menor. El rango más alto lo presentó palma30 (18.61 - 30.49%) y el más bajo piña (17.08 – 18.94%).

La humedad disponible en el suelo para las plantas en general presentó valores por debajo del 10% tanto volumétrica como gravimétrica. Esto indica que la humedad edáfica puede ser un factor limitante para el desarrollo de cultivos agrícolas, lo que puede conllevar que en época seca se requiera de riegos frecuentes, para suplir las necesidades de agua de los cultivos. Aunque hay que tener en cuenta que el movimiento del agua en el suelo es lento, por lo tanto las raíces de los cultivos tolerantes a la acidez tienen la posibilidad de explorar a mayor profundidad para tomar el agua.

De acuerdo a los valores determinados en los suelos muestreados para conductividad hidráulica, está en general se clasifican como muy lenta y moderadamente lenta, esto puede ocasionar que durante fuertes precipitaciones se presenten problemas de erosión hídrica debido a que esta baja conductividad hidráulica favorece la circulación de agua por encima del suelo aumentando la escorrentía (Corpoica, 2007).

La baja capacidad de almacenamiento de agua en todos los sistemas se puede deber a las arcillas caoliniticas, porque su capacidad de retención es muy baja y su expansión es mínima, como a problemas de compactación o a los altos contenidos de arenas unidos a contenidos moderados de materia orgánica.

La humedad gravimétrica promedio en los sistemas palma30, pastura degradada, bosque plantado, piña, caucho y pasto llanero estuvo por encima de capacidad de campo. Lo anterior se puede deber que durante el muestreo se presentaron precipitaciones. En los demás sistemas la humedad promedio se presentó por debajo de capacidad de campo pero muy cercana a esta.

La resistencia a la penetración (Figura 1) presentó valores por encima del valor crítico para la penetración de las raíces (1.5 Mpa), en los sistemas: cítricos entre 7.5 y 40 cm de profundidad; pasto mulato II a los 2.5 cm de profundidad y desde 15 hasta 27.5 cm de profundidad; pasto llanero asociado con maní forrajero entre 10 y 32.5 cm de profundidad; caucho en el rango comprendido entre 10 y 40 cm de profundidad; cultivos transitorios entre 15 y 37.5 cm de profundidad; piña en el rango entre 25 y 35 cm de profundidad; palma18 entre 2.5 y 40 cm de profundidad, siendo este último sistema el que presentó los valores más críticos.

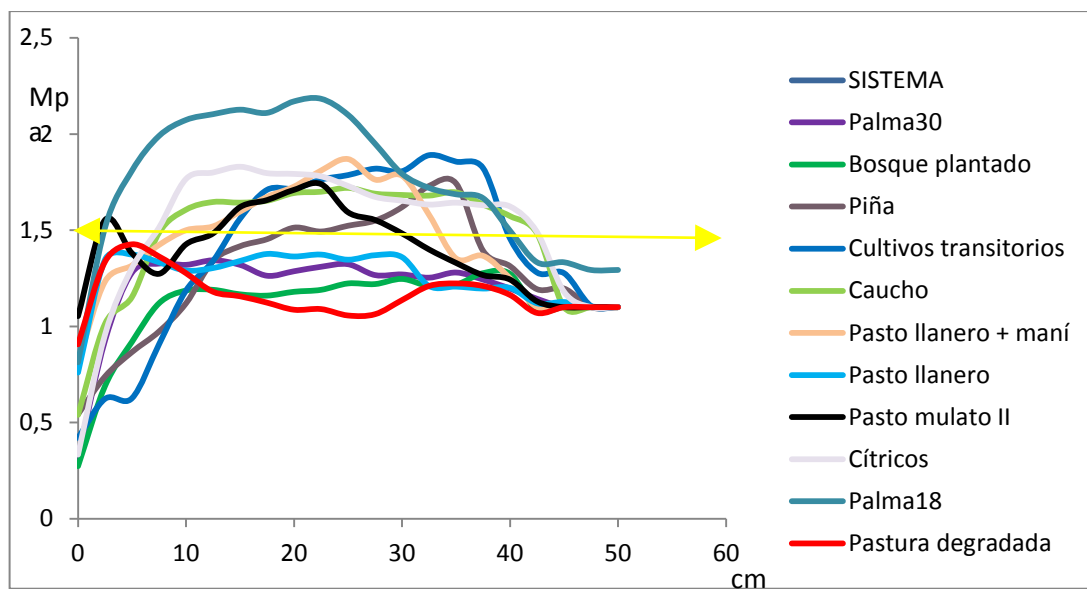


Figura 1. Resistencia a la penetración del suelo de los diferentes sistemas productivos.

Los sistemas que no sobrepasan el valor considerado como criterio son: palma30, pastura degradada, bosque plantado y pasto llanero, lo cual se puede deber a que en estos sistemas no se realiza ninguna actividad agrícola desde hace tiempo y a una baja carga animal en el caso del pasto llanero, además de que son sistemas que presentaron valores de humedad gravimétrica (Tabla 5) por encima de capacidad de campo, por lo tanto esta alta humedad facilita la penetración. Por otro lado a partir de los 40 cm en general la resistencia a la penetración empieza a disminuir, lo cual puede ser el resultado de una mayor humedad y/o mayores contenidos de arcilla y limo.

### 3.3 PROPUESTA DE SELECCIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO MEDIANTE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.

El suelo es un ente dinámico, tridimensional y trifásico producto de sus factores de formación que le han inferido propiedades físicas, químicas y biológicas y por esta última característica expresa cualidades de vida. Ahora bien las plantas emplean el suelo como medio de sostenimiento, fuente de nutrientes y agua para su crecimiento, desarrollo y reproducción, pero cada especie de planta hace un uso diferencial del suelo de acuerdo a sus necesidades nutricionales, de agua y de anclaje y a través de su biomasa que cae le devuelve parte de los nutrientes que le ha extraído, presentándose una dinámica de recirculación de elementos entre el suelo y la vegetación. Por tal razón, es lógico pensar que un cambio en la estructura de la vegetación producirá cambios en las propiedades de los suelos y más aun si las nuevas especies de plantas no son idóneas para este tipo de suelo y por lo tanto se requiere adecuarlo química y físicamente para que los cultivos se desarrollen sin contratiempos. Por consiguiente son estas prácticas de manejo propias para cada tipo de cultivo las que posiblemente pueden llegar a influir en las propiedades del suelo y por tanto en su calidad. De acuerdo a lo anterior se puede deducir que los suelos de cada sistema productivo poseen su propia calidad, que se puede estimar estableciendo indicadores que permitan valorar los impactos positivos o negativos de los cambios en el uso y de las prácticas de manejo.

Congruente con el criterio anterior se procedió a través de un análisis de componentes principales (ACP) seleccionar los posibles indicadores de calidad químicos y físicos de los suelos en diferentes sistemas productivos.

#### 3.3.1 Selección de Indicadores químicos

El análisis multivariado (análisis de componentes principales) separó significativamente ( $p < 0.001$ ) los sitios (Figuras 2 y 3) de acuerdo al pH, la acidez

intercambiable, el contenido de bases (calcio y magnesio principalmente), el carbono orgánico y el hierro.

Los dos primeros componentes explican el 47% de la variabilidad de los datos, explicando el primer factor el 28% de la varianza y el segundo el 19%.

El primer factor separó los sitios en función del contenido de calcio, magnesio, fósforo, boro y a los valores de pH y acidez intercambiable y el segundo factor los separó de acuerdo a los contenidos de hierro, manganeso, carbono orgánico y potasio principalmente (Figura 3). Siendo el pH y la acidez intercambiable variables opuestas.

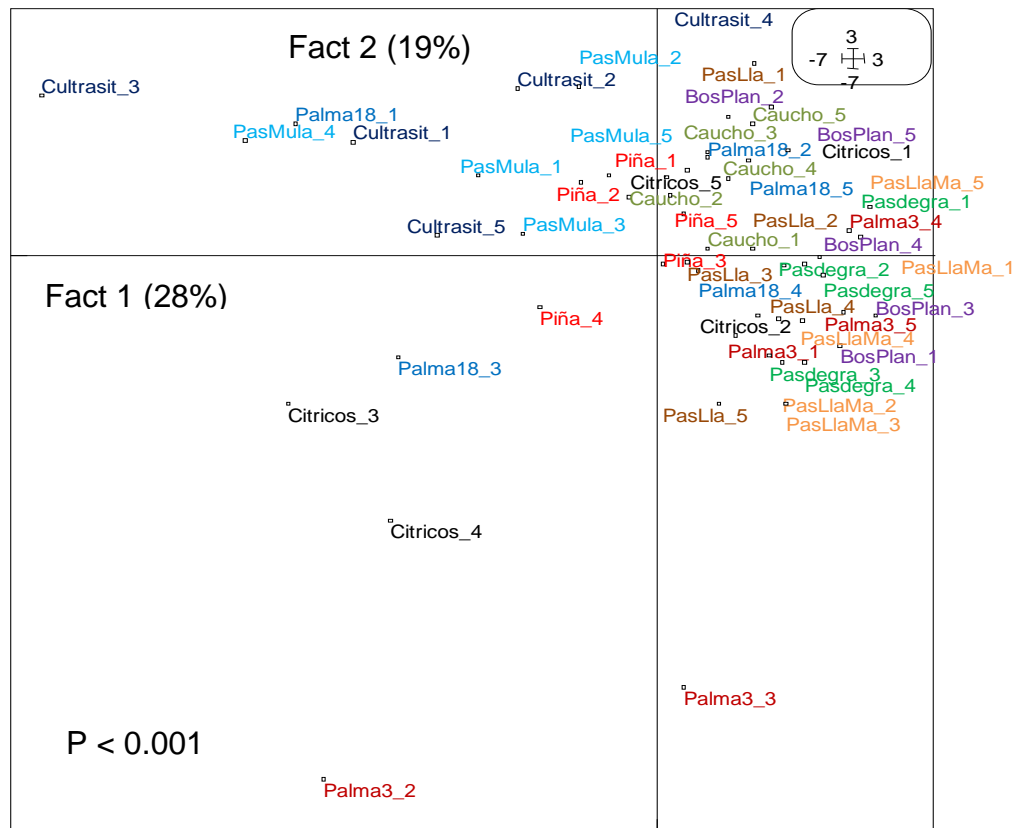


Figura 2. Distribución de los sitios evaluados en función del aporte de las variables químicas a la conformación del factor 1 y 2.

La baja explicación de la varianza menor al 50% de los factores uno y dos se debe a la variabilidad química de los suelos, la cual está relacionada con los diferentes usos del suelo y con el manejo agronómico de los cultivos, principalmente a través de la aplicación al suelo de enmiendas (cal dolomita) para corregir acidez y aumentar la saturación de bases, y de grandes cantidades de fósforo para

incrementar su contenido y disponibilidad. Para poder obtener un mayor manejo de esta variabilidad se debe tener en cuenta los primeros tres factores que en conjunto explican un 60% de la varianza total de los datos.

El primer componente diferenció significativamente los sitios de mayores valores de pH, calcio y magnesio, a saber pasto mulato II y cultivos transitorios principalmente, de los sitios con altos valores de acidez intercambiable como pasto llanero, bosque plantado, pastura degradada y pasto llanero asociado con maní forrajero. El segundo factor separó significativamente los sitios en función del contenido de hierro, manganeso, carbono orgánico y potasio, como el pasto llanero, el pasto llanero asociado con maní forrajero, la palma30, los cítricos y la pastura degradada que presentaron los mayores contenidos de estos elementos, del caucho, piña y cultivos transitorios de menores contenidos (Figura 3 y 4).

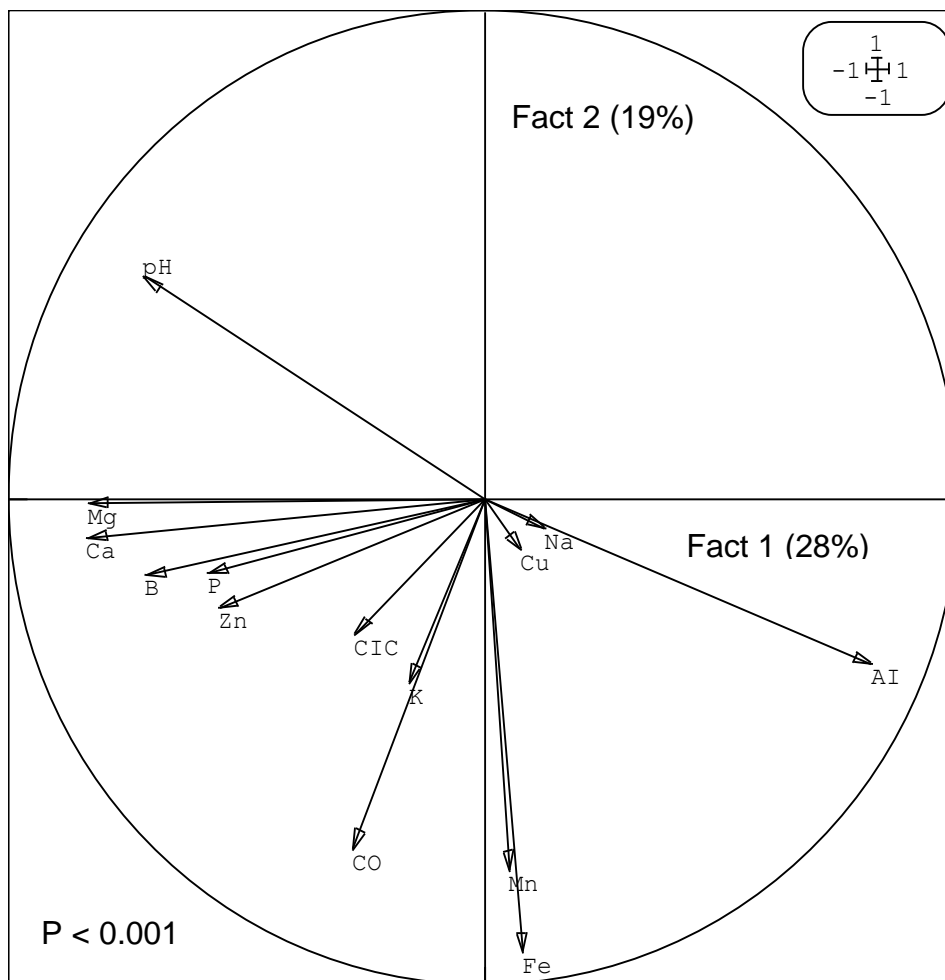


Figura 3. Circulo de correlaciones para las variables químicas en función de sus aportes a la conformación del factor 1 y 2.

De acuerdo a las figuras 2 y 4 las variables químicas dentro de un mismo sistema son muy heterogéneas, esta variabilidad se le puede atribuir al manejo, principalmente a la fertilización que no es homogénea sino que el fertilizante se aplica alrededor de la planta. Otra posible explicación puede ser que como la cal dolomita si se aplica a todo el área a sembrar, pero las plantas solo consumen el calcio y el magnesio cercano a la zona de raíces quedando sitios en donde estos no son extraídos por los cultivos. También se puede deber a que algunos sitios evaluados en un mismo sistema se encontraba en otra serie diferente de suelo a la de la mayoría de sitios del sistema, por ejemplo algunos sitios del pasto llanero asociado con maní forrajero y de la palma30.

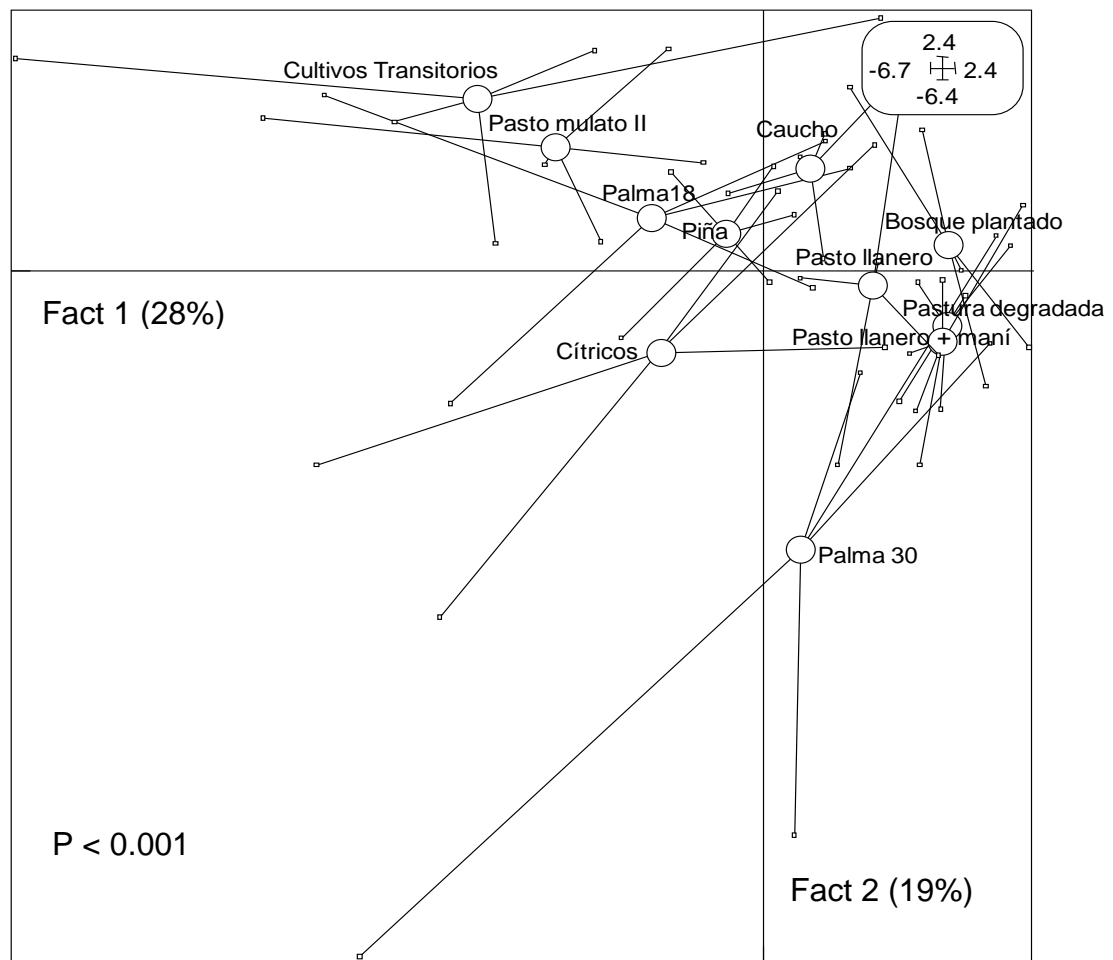


Figura 4. Agrupación de los sistemas de uso en función del aporte de las variables químicas a la conformación del factor 1 y 2 y de sus similitudes.

La heterogeneidad de las variables entre los diferentes sistemas se debe en primer lugar al manejo agronómico diferencial que se le da a cada sistema y a la

posición geomorfológica en donde se localiza los suelos de los sistemas productivos.

El ACP separó los sitios de acuerdo al peso de cada variable y a las variables de mayor aporte que influyen significativamente en su comportamiento, es así como los sitios se agruparon ( $p < 0.001$ ) de acuerdo al sistema de uso y a su similitud en ciertas propiedades químicas (Figura 4), formando un primer grupo conformado por el pasto mulato II, los cultivos transitorios y la palma18 caracterizados por haber presentado los mayores valores de pH, calcio y magnesio y por lo tanto menores valores de acidez intercambiable, así como altos niveles de fósforo y bajos niveles de hierro; un segundo grupo conformado por la piña y el caucho que presentó valores de pH, calcio y magnesio un poco menores que el anterior, pero con mayores niveles de acidez intercambiable y hierro, además de altos niveles boro y fósforo disponible; un tercer grupo representado por los sistemas, pastura degradada, pasto llanero asociado con maní forrajero, pasto llanero y palma30 el cual presentó los mayores valores de carbono orgánico y acidez intercambiable, así como niveles altos de hierro y manganeso; un cuarto grupo conformado por el sistema cítricos caracterizado principalmente por un bajo pH, pero con un alto contenido de fósforo disponible y zinc, además presentó un alto valor de carbono orgánico superado solo por la pastura degradada y palma30. Un quinto grupo conformado por el bosque plantado caracterizado por haber presentado los menores contenidos de carbono orgánico (Figura 3 y 4)

Una explicación a la forma como los sistemas se agruparon de acuerdo a su similitud en ciertas propiedades químicas se debe a su posición geomorfológica y al manejo, es decir los suelos de terraza alta han sido mejorados químicamente mediante un sistema rotacional de cultivos transitorios, especialmente pasto mulato II y cultivos transitorios. Los cítricos a pesar de que se encuentran en la terraza alta no se agruparon con ninguno de los otros sistemas ubicados en esta posición geomorfológica porque su manejo en lo relacionado con la forma de aplicación de la cal dolomita fue diferente (franjas alternas), además de que se aplicó escorias de thomas.

La separación dada por el ACP al ser significativa ( $P < 0.001$ ) indica que los sistemas de uso están influyendo en las propiedades químicas de los suelos, ya que a pesar de que algunos suelos se encuentran en posiciones geomorfológicas iguales presentan una gran variabilidad química, la cual posiblemente sea el producto del manejo químico que se le da a cada sistema, por tanto el tipo uso del suelo y su respectivo manejo influyen en las propiedades del mismo y más en los de terraza alta que han sido sometidos a un mejoramiento químico.

Para la selección de los indicadores químicos se utilizó la contribución de cada variable a la formación de los factores 1 y 2 (Tabla 6), dados por el análisis de componentes principales (ACP)

De acuerdo a los aportes las variables más representativas son: pH, carbono orgánico, calcio intercambiable, magnesio intercambiable, acidez intercambiable y hierro. Las anteriores propiedades podrían ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo, porque son las que más contribuyen a la explicación de la varianza. Además las prácticas agrícolas que conlleven a aumentar la saturación de bases (Ca y Mg) que es lo más común para este tipo de suelos automáticamente causan un aumento en el pH y una disminución de la acidez intercambiable y de la disponibilidad del hierro.

Tabla 6. Contribución de cada variable química a la construcción de los factores 1 y 2

<b>Variables Químicas</b>	<b>Factor 1</b>	<b>Factor 2</b>
<b>pH</b>	1185	1651
<b>Carbono orgánico</b>	465	1781
<b>Calcio</b>	2002	143
<b>Potasio</b>	138	160
<b>Magnesio</b>	2093	50
<b>Sodio</b>	52	150
<b>Acidez Intercambiable</b>	1673	272
<b>Capacidad de Intercambio Cationico</b>	237	158
<b>Fósforo</b>	714	0
<b>Cobre</b>	30	418
<b>Hierro</b>	6	2696
<b>Manganeso</b>	3	1058
<b>Zinc</b>	513	1165
<b>Boro</b>	882	291

En concordancia con lo anterior los indicadores químicos propuestos son representativos de la dinámica edafológica de la zona y podrían en un momento dado dar una idea de la calidad de los suelos. Del mismo modo el carbono orgánico es un buen indicador de la calidad de un suelo, porque es una reserva de nutrientes y su comportamiento en el suelo influye notablemente en sus demás propiedades.

La materia orgánica del suelo ha sido considerada como el factor clave que influye en la calidad del suelo, por su dinámica y participación en procesos fundamentales que ocurren en el mismo (FAO, 2002; USDA-NRCS, 2011). La materia orgánica del suelo es un reservorio de nutrientes y es muy importante en el mantenimiento de las propiedades físicas, principalmente cuando este se somete a actividades de labranza, además ayuda en la infiltración y retención del agua, y en la resistencia a procesos erosivos (Gregorich *et al.*, 1994).

En definitiva los indicadores químicos seleccionados son lo más adecuados para evaluar la calidad química de este orden de suelo, ya que son los más sensibles a cualquier tipo de cambio que sufra el sistema, ya sea de manejo (principalmente encalamiento y fertilización) o climático.

Es importante resaltar que el calcio y el magnesio son indicadores de impacto, es decir, causan efectos sobre algunas propiedades del suelo cuando se aplican, por lo tanto son inherentes al manejo, siendo dependientes del aporte realizado por el hombre mediante cal dolomita, con el fin de corregir la baja saturación de bases que caracteriza a estos suelos. Mientras que el pH, el carbono orgánico, la acidez intercambiable y el hierro son los indicadores que resultan afectados por cambios en el uso y por el manejo. 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.

Los indicadores químicos seleccionados están dentro de los recomendados por USDA (1999), por Doran y Parkin (1994) y Larson y Pierce (1994) a excepción de la acidez intercambiable y el hierro, posiblemente porque en la región donde fueron seleccionados no es muy importante estas variables desde el punto de vista edafológico.

### 3.3.2 Selección de Indicadores Físicos

El análisis multivariado (ACP) separó significativamente ( $p < 0.001$ ) los sistemas productivos de acuerdo a sus características físicas (Figura 5). Los dos primeros factores del ACP explican el 50.48% de la variabilidad de los datos, explicando el primer factor el 31.48% y el segundo el 19%.

El ACP separó los sitios en función del agua en el suelo y la compactación separando el primer factor los sitios caracterizados por presentar altos valores de densidad aparente y de resistencia a la penetración en el rango de 17.5 a 30 cm de profundidad, de los sitios que presentaron los mayores valores de saturación, capacidad de campo y limo. El segundo factor separó los sitios de mayor

contenido de arcilla de los de mayor valor de estabilidad estructural y de resistencia a la penetración en los rangos de 0 a 2.5 y de 5 a 17.5 cm de profundidad (Figura 6).

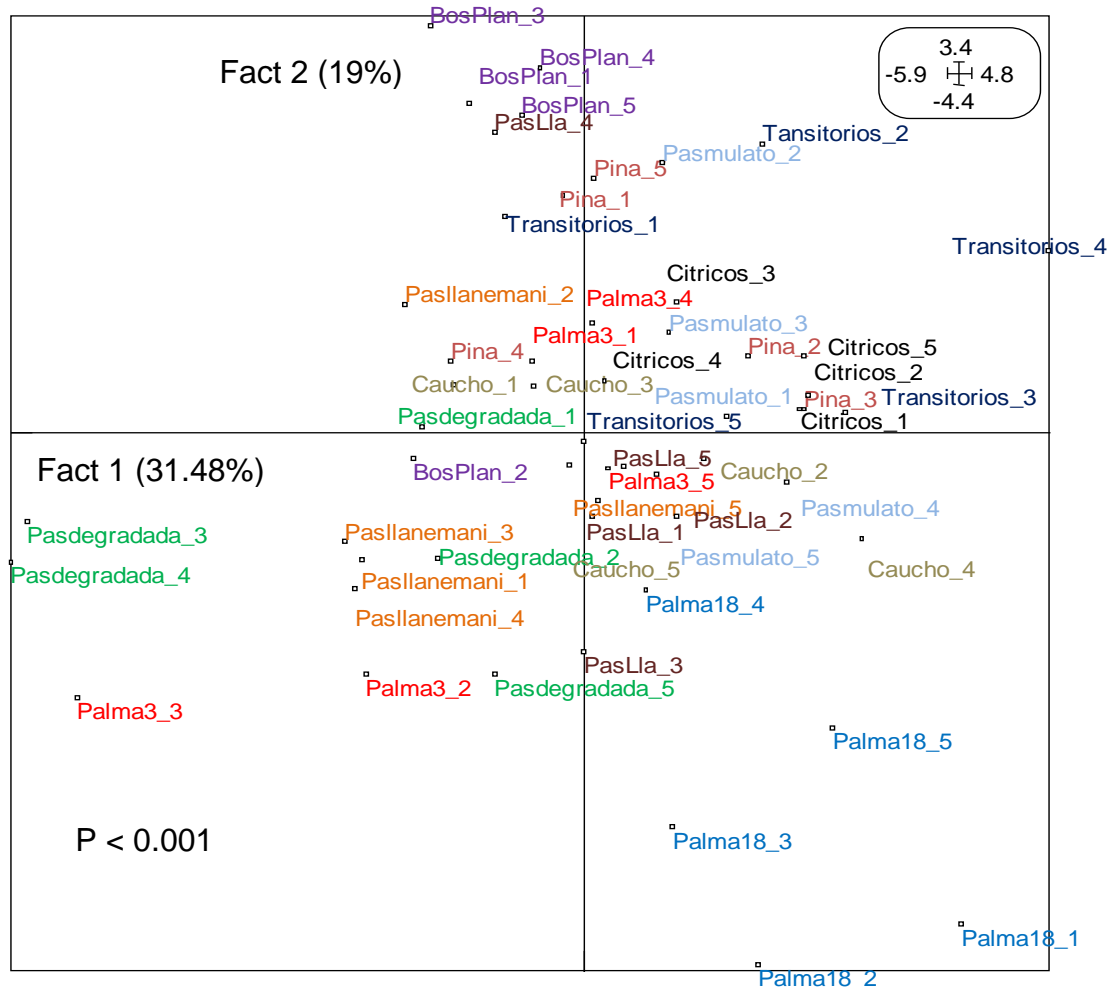


Figura 5. Distribución de los sitios evaluados en función del aporte de las variables físicas a la conformación del factor 1 y 2.

De acuerdo a esta separación dada por el ACP se podrían formar varios grupos ( $p < 0.001$ ) dependiendo de su similitud en sus propiedades físicas (Figuras 6 y 7): un primer grupo conformado por los cítricos, piña, cultivos transitorios y pasto mulato II que se caracterizó por presentar altos valores de densidad aparente y densidad real; un segundo grupo conformado por el bosque plantado que presentó el más alto contenido de arcilla; un tercer grupo conformado por palma30, pastura degradada y pasto llanero asociado con maní forrajero que presentaron los mayores valores de estabilidad estructural, capacidad de campo y saturación; un cuarto grupo conformado por la palma18 que se diferenció por presentar altos contenidos de arena y los mayores valores de resistencia a la penetración

especialmente en los rangos de 5 a 15 cm y de 17.5 a 30 cm de profundidad, un quinto grupo conformado por el caucho y el pasto llanero que se caracterizó por presentar valores alrededor del promedio general de los sitios evaluados y similares entre sí en la mayoría de sus propiedades físicas.

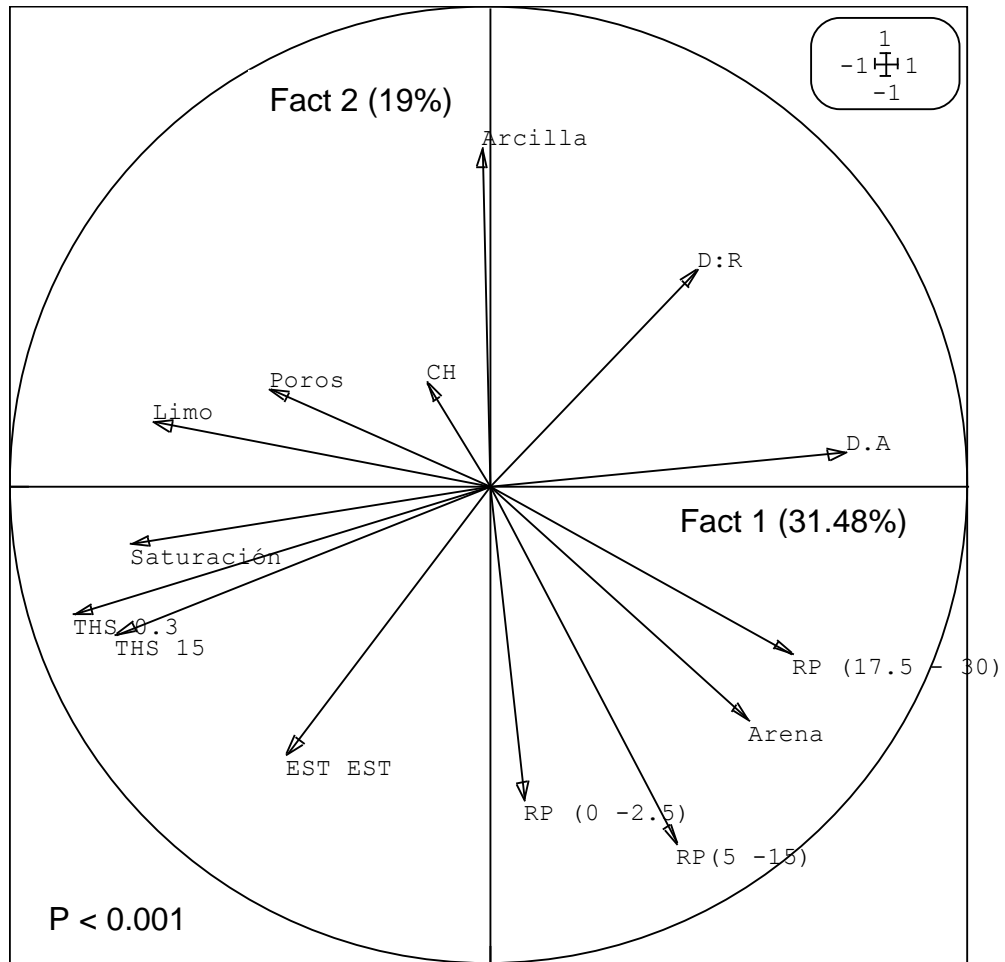


Figura 6. Circulo de correlaciones para las variables físicas en función de sus aportes a la conformación del factor 1 y 2.

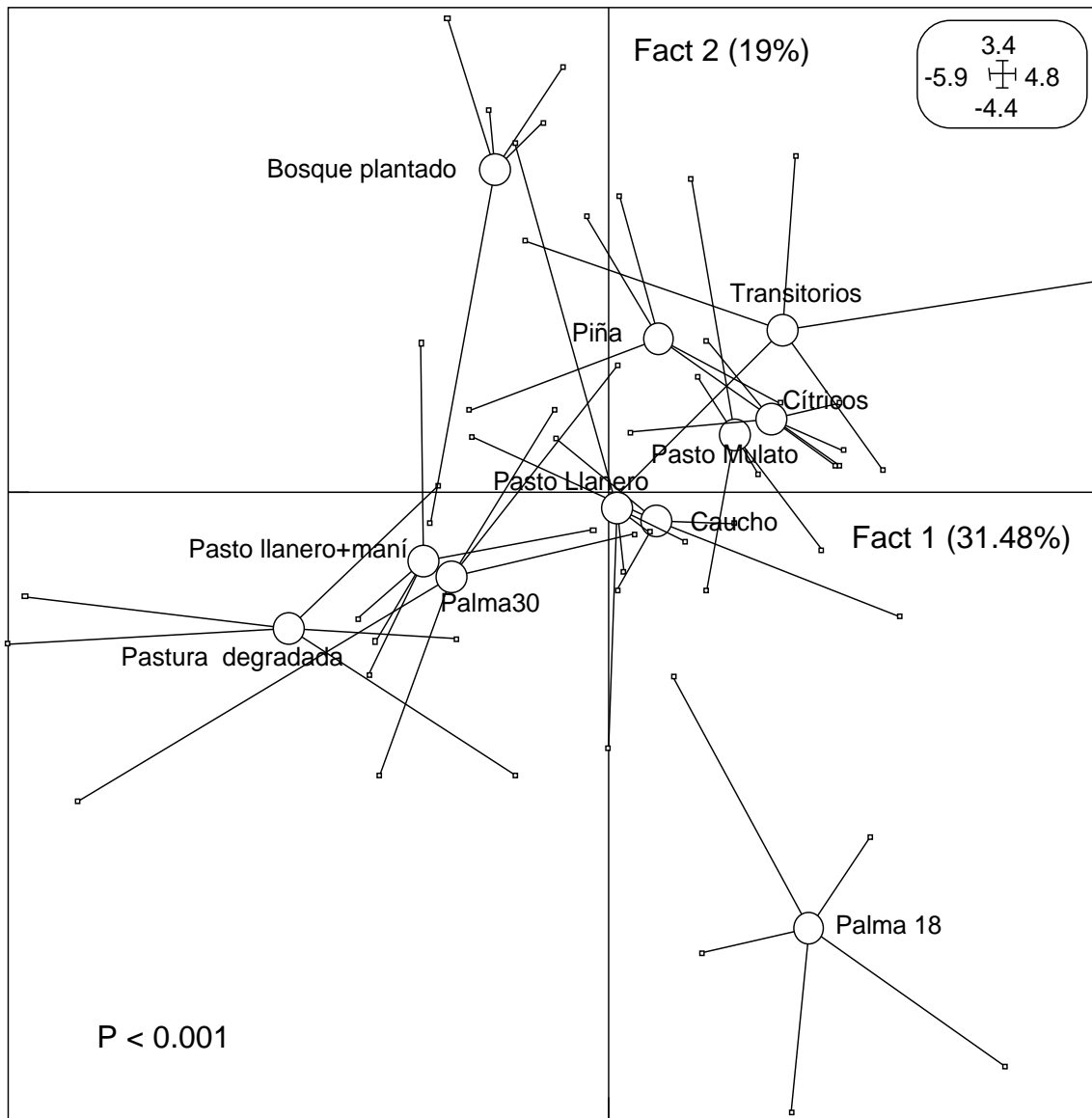


Figura 7. Agrupación de los sistemas de uso en función del aporte de las variables físicas a la conformación del factor 1 y 2.

Para la selección de los indicadores físicos al igual que en los químicos se utilizó la contribución de cada variable a la formación de los factores 1 y 2.

De acuerdo a los aportes (Tabla 7) las variables que más contribuyen a la explicación de la varianza son: saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente, estabilidad estructural, contenido de limo, contenido de arcilla y resistencia a la penetración hasta los 30 cm, por tanto estas variables serían las más propicias para ser empleadas como indicadoras de

la calidad física de los suelos, pero como el contenido de arena presentó un aporte absoluto cercano al límite a partir del cual se empiezan a seleccionar los indicadores y además como su valor es necesario para determinar la textura se decidió vincularla como indicador.

Tabla 7. Contribución de cada variable física a la construcción de los factores 1 y 2.

<b>Variab</b> les	<b>Factor 1</b>	<b>Factor 2</b>
<b>Saturación</b>	1274	55
<b>Capacidad de Campo</b>	1706	272
<b>Punto de Marchitez Permanente</b>	1375	361
<b>Densidad Aparente</b>	1259	17
<b>Densidad Real</b>	426	765
<b>Porosidad</b>	479	152
<b>Conductividad Hidráulica</b>	37	175
<b>Estabilidad Estructural</b>	401	1185
<b>Arena</b>	663	898
<b>Limo</b>	1115	65
<b>Arcilla</b>	0	1860
<b>Resistencia a la Penetración (0-2.5)</b>	12	1626
<b>Resistencia a la Penetración (5-15)</b>	343	2100
<b>Resistencia a la Penetración(17.5-30)</b>	903	462

Los indicadores físicos seleccionados son similares a los propuestos por USDA (1999), por Doran y Parkin (1994) y Larson y Pierce (1994)

Por último es importante mencionar que el análisis de componentes principales ha sido empleado por diversos investigadores para obtener indicadores de calidad de suelo como por ejemplo Velásquez (2004), Tasi *et al.* (2007) y Wilson *et al.* (2008), los cuales han trabajado en suelos de Cauca, Colombia y Entre Ríos, Argentina respectivamente, pero es muy difícil tratar de comparar sus indicadores con los

que se obtuvieron en esta investigación, ya que si se presenta algunos en común (carbono orgánico con los suelos de Entre Ríos, pero no con los de Cauca), otros no han sido seleccionados (hierro y acidez intercambiable tanto en Entre Ríos como en Cauca), o sencillamente han seleccionado otros (conductividad eléctrica para algunos suelos de Entre Ríos). Estas diferencias se deben principalmente a las condiciones edafológicas y climáticas contrastantes de las zonas de estudio como al tipo de sistema de uso y al manejo agronómico. Por lo tanto como ya sea mencionado los indicadores seleccionados no son extrapolables, ni comparables, solo la metodología empleada para su selección puede ser utilizada con igual fin en cualquier lugar del mundo.

### 3.4 INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

Para observar y confirmar estadísticamente la influencia de los sistemas de producción en las propiedades físicas y químicas del suelo, y que tan significativa es esta influencia, se procedió a procesar los indicadores propuestos con un análisis de varianza con prueba de Duncan (Tablas 8, 9, 10 y 11) unido a un análisis de correlación (Anexo C).

Es importante destacar que en este análisis en la parte química solo se tuvo en cuenta los indicadores que resultan afectados por el uso y el manejo (carbono orgánico, acidez intercambiable, pH y hierro) y no los que dependen del aporte del hombre (Ca y Mg).

El análisis de varianza realizado para propiedades químicas (Tabla 8) mostró que existen diferencias significativas para el indicador carbono orgánico, y altamente significativas para los indicadores pH, acidez intercambiable (Ac.I) y hierro. Esto es explicable, ya que en cada sistema de producción se emplean prácticas agrícolas diferentes, dependientes principalmente de la tolerancia a la acidez y del requerimiento de nutrientes de la especie de planta a sembrar.

En el piedemonte llanero es muy común que antes de establecer estos sistemas el suelo sea encalado para aumentar tanto la saturación de bases como el pH y así mismo neutralizar el aluminio; como también la utilización de altas dosis de fertilizantes para suplir las necesidades nutricionales de las plantas cultivadas, ya que la fertilidad natural del suelo es muy baja. El encalado y la fertilización inicial y de mantenimiento son prácticas dependientes de los niveles de tolerancia a la acidez y del requerimiento de nutrientes de cada sistema de producción, teniendo en cuenta el respectivo análisis de suelos. Por tanto son estas prácticas agrícolas las que posiblemente ocasionan la heterogeneidad diferencial de las propiedades químicas entre los sistemas e inclusive por sistema de producción. Esto indica que

más que la especie de planta cultivada, lo que más influye en las propiedades del suelo son las prácticas de manejo.

Tabla 8. Análisis de varianza para indicadores químicos asociados a la calidad del suelo

<b>FV</b>	<b>pH</b>	<b>CO</b>	<b>Ac.I</b>	<b>Fe</b>
		<b>%</b>	<b>Cmol(+)/kg</b>	<b>ppm</b>
<b>Usos del suelo</b>	<b>**</b>	<b>*</b>	<b>**</b>	<b>**</b>
<b>X</b>	4.68	1.57	3.18	125.41
<b>CV</b>	4.83	18.52	26.28	42.88

\* Diferencias significativas

\*\* Diferencias altamente significativas

FV: Factor de variación

X: Media

CV: Coeficiente de variación

El mayor valor para el indicador pH lo presentó el sistema pasto mulato II seguido por el sistema cultivos transitorios, siendo similares de acuerdo a Duncan. Por otro lado el menor valor lo presentó la palma30 seguida del bosque plantado pero difiriendo según Duncan (Tabla 9).

En lo referente al carbono orgánico la prueba de Duncan mostró que el mayor nivel de contenido lo presentó el sistema pastura degradada seguido del sistema palma30 con diferencias marcadas, y el menor nivel de contenido lo presentó el bosque plantado seguido del sistema cultivos transitorios con diferencias notables.

Para el indicador acidez intercambiable (Ac.I) conforme a Duncan el mayor valor lo presentó el sistema pasto llanero asociado con maní forrajero seguido por el sistema palma30 y pastura degradada con diferencias notables, y el menor valor lo presentó el sistema cultivos transitorios seguido por el pasto mulato II, difiriendo entre sus medias de acuerdo a Duncan.

El menor valor del indicador hierro lo presentaron los cultivos transitorios seguido por pasto mulato II y el mayor valor lo presentó la palma30 seguido del sistema pasto llanero asociado con maní forrajero, presentándose en ambos casos diferencias notables según la prueba de Duncan.

Tabla 9. Prueba de Duncan para indicadores químicos asociados a la calidad del suelo

Usos del suelo	pH	CO %	Ac.I Cmol (+)/Kg	Fe ppm
<b>Palma30</b>	4.29E	1.77A	3.97BA	242.86A
<b>Palma18</b>	4.88B	1.72A	2.73DEC	94.53CD
<b>Pastura degradada</b>	4.44ED	1.84A	3.97BA	152.59CB
<b>Bosque plantado</b>	4.31E	1.19B	3.65BAC	104.44CBD
<b>Piña</b>	4.54CED	1.46BA	3.28BDAC	92.89.60CD
<b>Cultivos transitorios</b>	5.17A	1.43BA	1.65E	53.52D
<b>Caucho</b>	4.65CBD	1.48BA	3.03BDC	77.63CD
<b>Pasto llanero + maní</b>	4.66CBD	1.59BA	4.42A	172.19B
<b>Pasto llanero</b>	4.80CB	1.57BA	3.18BDC	151.14CB
<b>Pasto mulato II</b>	5.19A	1.51BA	2.15DE	91.26CD
<b>Cítricos</b>	4.55CED	1.72A	2.94BDC	146.49CB

Promedios con letras iguales en una misma columna no difieren significativamente ( $P < 0.05$ )

Para los indicadores físicos el análisis de varianza (Tabla 10) mostró diferencias significativas para el indicador saturación y altamente significativas para los indicadores capacidad de campo, punto de marchitez permanente, estabilidad estructural, arena, limo, arcilla y resistencia a la penetración y no mostró diferencias significativas para la densidad aparente. Esta variabilidad se puede deber al manejo físico que se le da a los suelos de cada sistema de producción antes de su establecimiento (arado, aflojamiento, entre otras), al uso o no de maquinaria pesada durante la cosecha de los cultivos, a la carga animal y al pisoteo del ganado en el caso de las pasturas, como a los procesos de formación de estos suelos. Así mismo también puede ser debida a que los suelos de algunos sistemas pertenecen a subgrupos y a grandes grupos taxonómicos diferentes.

Tabla 10. Análisis de varianza para indicadores físicos asociados a la calidad del suelo

FV	Saturación	CC	PMP	D.A	EST	ESTR	Arena	Limo	Arcilla	RP (0-2.5)	RP(5-15)	RP(17.5-30)
	%			g/cm <sup>3</sup>	DPM		%			Mpa		
Usos del suelo	*	**	**	NS	**		**	**	**	**	**	**
X	33.12	25.54	21.05	1.5	4.03		57.23	22.32	20.44	0.85	1.4	1.56
CV	13.34	10.95	12.01	7.49	23.35		6.65	13.08	13.14	33.34	14.57	14.74

\* Diferencias significativas

\*\* Diferencias altamente significativas

FV: Factor de variación

X: Media

CV: Coeficiente de variación

El mayor valor para el indicador saturación lo presentó el sistema pastura degradada seguido del sistema piña, y el menor valor lo presentó el sistema pasto llanero seguido del pasto mulato II, sin diferencias notables en ambos casos de acuerdo a Duncan (Tabla 11).

En el indicador capacidad de campo el mayor valor de la media lo presentó el sistema pastura degradada seguido por el sistema pasto llanero asociado con maní forrajero y el menor valor lo presentó el sistema piña seguido del sistema cultivos transitorios, si diferencias marcadas en ambas situaciones conforme a la prueba de Duncan.

De acuerdo a la prueba de Duncan el mayor valor para el indicador punto de marchitez permanente lo presentó el sistema pasto llanero asociado con maní forrajero seguido del sistema pastura degradada, con diferencias notables, y el menor valor lo presentó el sistema pasto mulato II seguido del sistema piña.

El mayor valor para el indicador densidad aparente lo presentó el sistema pasto mulato II seguido del sistema cultivos transitorios y el menor valor lo presentó el sistema pastura degradada seguido del sistema caucho, sin existir diferencias notables en el primer caso, pero sin en el segundo de acuerdo a la prueba de Duncan.

La estabilidad estructural presentó su mayor valor en el sistema pastura degradada seguido por el sistema pasto mulato II, con diferencias marcadas conforme a Duncan, y el menor valor lo presentó el sistema cultivos transitorios seguido de la piña sin diferencias notables entre sus medias según Duncan.

El mayor valor promedio para el contenido de arena lo presentó el sistema palma18 seguido del sistema caucho y el menor valor lo presentó el sistema

bosque plantado seguido del sistema pasto llanero asociado con maní forrajero, con diferencias marcada en ambos casos según Duncan.

Tabla 11. Prueba de Duncan para indicadores físicos asociados a la calidad del suelo

Uso del suelo	Saturación	CC	PMP	DA	EST ESTR	Arena	Limo	Arcilla	RP (0-2.5)	RP(5-15)	RP(17.5-30)
	%			g/cm <sup>3</sup>	DPM	%			Mpa		
Palma30	34.47BAC	27.55BAC	22.62BAC	1.50BA	4.75BAC	53.62ED	27.20A	19.18EDC	0.63DC	1.32CD	1.29ED
Palma18	32.18BAC	24.60DC	20.72BDEC	1.55A	4.54BC	67.28A	16.80D	15.92E	1.16BA	2.02A	2.05A
Pastura degradada	38.06A	29.55A	24.16BA	1.37B	5.90A	53.87ED	28.21A	17.92ED	1.12BA	1.28CD	1.09E
Bosque plantado	33.14BAC	26.47BDAC	21.58BDAC	1.53BA	3.70EDC	48.27F	25.81BA	25.92A	0.48D	1.12D	1.20E
Piña	36.73BA	22.80D	18.34DE	1.47BA	2.35F	60.56B	20.40DC	19.04EDC	0.64DC	1.14D	1.53BCD
Cultivos transitorios	30.99BC	23.15D	19.54DEC	1.56A	2.26F	61.78B	17.20D	21.02BDC	0.52D	1.12D	1.77BA
Caucho	34.01BAC	25.08BDC	21.52BDAC	1.45BA	2.98EF	61.82B	18.80DC	19.38BEDC	0.78BDC	1.51CB	1.69B
Pasto llanero + maní	34.94BAC	28.82BA	25.15A	1.46BA	5.19BA	49.68FE	28.00A	22.32BAC	1.03BAC	1.47CB	1.77BA
Pasto llanero	29.57C	25.53BDC	21.99BDAC	1.50BA	4.29BDC	58.77CBD	22.00BC	19.23EDC	1.05BA	1.33CD	1.36ECD
Pasto mulato II	30.02C	23.41D	17.23E	1.59A	5.24BA	54.56CED	22.33BC	23.11BA	1.30A	1.44CB	1.62BC
Cítricos	30.23BC	23.94DC	18.61DE	1.52BA	3.17EDF	59.36CB	18.80DC	21.84BC	0.65DC	1.64B	1.74BA

Promedios con letras iguales en una misma columna no difieren significativamente ( $P < 0.05$ )

Para el indicador contenido de limo el sistema pastura degradada presentó el valor promedio más alto seguido por el sistema pasto llanero asociado con maní forrajero, siendo sus medias similares según la prueba de Duncan, y el valor más bajo lo presentó la palma18 seguido de los cultivos transitorios sin diferencias notables entre sus medias conforme a Duncan.

Conforme a la prueba de Duncan el contenido de arcilla presentó su valor más alto en el sistema bosque plantado seguido por el sistema pasto mulato II con diferencias notables entre sus medias y el menor valor lo presentó la palma18 seguido de la pastura degradada con diferencias marcadas entre sus medias.

Los indicadores de resistencia a la penetración según la prueba de Duncan presentaron sus valores más altos en los sistemas pasto mulato II seguido de palma18 en el rango de 0 – 2.5 cm, palma18 seguida por los cítricos en el rango de 5 – 15 cm y palma18 seguida por pasto llanero asociado con maní forrajero en el rango de 17.5 – 30 cm, existiendo diferencias notables entre las medias, en los tres casos en cuestión; por otro lado los valores más bajos los presentaron el sistema bosque plantado seguido por los cultivos transitorios para el rango de 0 – 2.5 cm y de 5 - 15 cm y por el sistema pastura degradada seguido por el bosque

plantado en el rango de 17.5 – 30 cm, sin diferencias marcadas entre las medias de los sistemas mencionados para cada rango de evaluación.

Si se compara la pastura degradada que no ha sido intervenida o sometida ninguna clase de manejo agrícola desde hace más de 20 años, con los sistemas de mayor intervención como los cultivos transitorios, la piña, el pasto mulato II, y el bosque plantado, se puede observar (Tablas 9 y 11) una pérdida del carbono orgánico, el hierro, el agua aprovechable y la estabilidad estructural con el uso agropecuario. Además se evidencia un aumento en la densidad aparente, en los contenidos de calcio y magnesio, y una disminución en la acidez intercambiable con la intensificación del uso y las prácticas de manejo.

Las diferencias estadísticas que presentaron los sistemas sugieren que estos y el manejo agrícola que se les da, influyen en las propiedades físicas y químicas del suelo y por lo tanto en su calidad. Por tal motivo los cambios en el uso del suelo así sea de un cultivo a otro afectan la dinámica edafológica. Efectos que se deben principalmente al tipo de manejo agrícola que es sometido el suelo para adecuarlo al cultivo a establecer. Por tanto hay que tener mucho cuidado al momento de seleccionar el tipo de cultivo a sembrar, pues lo más aconsejable es sembrar especies de plantas tolerantes a las condiciones físicas y químicas del suelo, para evitar la perturbación del mismo y su posterior degradación, ya que por mejorar algunas propiedades se perjudican otras y se daña el equilibrio químico, físico y biológico del suelo. Entonces, cada suelo presentara su propia calidad de acuerdo a su manejo agrícola y el tipo de cultivo que sobre él crece. Por consiguiente cada sistema productivo le confiere y modifica las propiedades físicas y químicas del suelo, y si no se tiene cuidado con el manejo agrícola del suelo estas modificaciones puede conllevar a la degradación del mismo, derivando en la pérdida de su calidad. Lo anterior indica que no existen suelos de mala calidad, si no suelos mal manejados y mal utilizados. Son las malas prácticas agrícolas las que conllevan a la degradación del recurso suelo.

Amézquita (1998) menciona que los oxisoles de los llanos orientales son susceptible a la degradación química, física y biológica cuando se cambia su uso natural (sabanas con pasturas naturales) por sistemas de producción artificiales (cultivos agrícolas, plantaciones forestales y pasturas mejoradas), pero el grado de degradación depende del manejo que se le dé a cada sistema productivo.

Para los indicadores químicos el análisis de correlación (Anexo C) mostró correlaciones altamente significativas positivas del pH, con el calcio (0.66), el magnesio (0.62) y negativas con la acidez intercambiable (-0.77) y el hierro (-0.41).

El calcio mostró correlaciones altamente significativas positivas con el magnesio (0.77), y negativas con la acidez intercambiable (-0.70).

La acidez intercambiable presentó correlaciones altamente significativas negativas con el magnesio (-0.64).

El hierro presentó correlaciones significativas positivas con el carbono orgánico (0.66).

El análisis de correlación químico evidenció la dinámica edafológica de la zona al corroborar que si se aumenta los contenidos de calcio y magnesio el pH se incrementa, disminuyendo la acidez intercambiable y la disponibilidad del hierro. Lo anterior es explicable porque la disponibilidad de los nutrientes depende del pH (los micronutrientes por ejemplo están más disponibles a pH bajos a excepción del molibdeno), además si se aumenta los contenidos de calcio y magnesio estos desplazan del complejo de cambio al aluminio y al hidrogeno que son los causante de la acidez intercambiable.

Para los indicadores físicos el análisis de correlación (Anexo C) presentó correlaciones significativas positivas de la variable saturación con capacidad de campo (0.704), y el punto de marchitez permanente (0.552) y negativas con la densidad aparente (-0.680) y resistencia a la penetración en el rango entre 17.5 y 30 cm de profundidad (-0.311).

La variable capacidad de campo mostró correlaciones significativas positivas con punto de marchitez permanente (0.915) estabilidad estructural (0.455) y el contenido de limo (0.501) y negativas con la densidad aparente (-0.542), el contenido de arena (-0.377) y con la resistencia a la penetración en el rango comprendido entre 17.5 y 30 cm de profundidad (-0.368).

El punto de marchitez permanente mostró correlaciones significativas positivas con la estabilidad estructural (0.368), y el contenido limo (0.449) y negativas con resistencia a la penetración en el rango comprendido entre 17.5 y 30 cm de profundidad (-0.272), el contenido de arena (-0.304), y la densidad aparente (-0.488).

La densidad aparente presentó correlaciones negativas con el contenido de limo (-0.278) y positivas con el contenido de arcilla (0.273), y la resistencia a la penetración en el rango comprendido entre 17.5 y 30 cm de profundidad (0.394), además de las correlaciones ya mencionadas.

La estabilidad estructural presentó correlaciones significativas positivas con el limo (0.411) y la resistencia a la penetración en los rangos de 0 a 2.5 cm (0.577) y de 5 a 15 cm de profundidad (0.311), además de las ya mencionadas.

El contenido de arena presentó, además de las ya mencionadas, correlaciones significativas negativas con el limo (-0.837) y la arcilla (-0.660) y positivas con la resistencia a la penetración en los rangos de 5 a 15 cm (0.391) y de 17.5 a 30 cm de profundidad (0.403).

El contenido de limo presentó correlaciones significativas negativas con la resistencia a la penetración en los rangos de 5 a 15 cm (-0.296) y de 17.5 a 30 cm de profundidad (-0.460), además de las ya mencionadas.

La arcilla presentó correlaciones significativas negativas con la resistencia a la penetración en los rangos de 0 a 2.5 cm (-0.309) y de 5 a 15 cm de profundidad (-0.301), además de las ya mencionadas.

La resistencia a la penetración en el rango de 0 a 2.5 cm de profundidad, además de las ya mencionadas, presentó correlaciones positivas con la resistencia a la penetración en el rango de 5 a 15 cm de profundidad (0.551).

La resistencia a la penetración en el rango de 5 a 15 cm de profundidad presentó correlaciones significativas positivas con la resistencia a la penetración en el rango de 15 a 30 cm de profundidad (0.652), además de las ya mencionadas.

Las correlaciones que presentaron las variables físicas son explicables ya que a mayor contenido de agua en el suelo se espera una menor resistencia a la penetración, y a mayor porcentaje de saturación lo más normal es que exista una mayor capacidad de campo. Del mismo modo a mayor densidad aparente menor contenido de agua en el suelo, ya sea por problemas de compactación o por altos contenidos de arena. Por otro lado a mayor contenido de arena se espera un menor contenido de arcilla y limo.

De los análisis de correlaciones se puede inferir que el manejo que se le dé a cada sistema productivo probablemente influya en los indicadores seleccionados, ya que si afecta una propiedad automáticamente se afectan las otras, por ejemplo, si el suelo en su entorno natural posee una saturación de bases del 25%, pero el cultivo a sembrar demanda una saturación de bases mayor o igual al 50% se requerirá aumentar dicha saturación con enmiendas de calcio y magnesio, lo que también ocasionaría un aumento del pH, una disminución de la solubilidad del hierro y el aluminio, y un incremento en la disponibilidad del fósforo natural o el que se aplica como fertilizante.

Por otro lado si el cultivo es demandante en fósforo, pero se desarrolla bien en condiciones de acidez no se requerirá de grandes cantidades de cal dolomita, pero sí de fósforo en forma de fosfato diamónico de alta solubilidad o de roca fosfórica la cual según Sánchez y Salinas (2008) en condiciones de extrema acidez al desintegrarse su contenido de fósforo se hace disponible paulatinamente. Por lo tanto el tipo de cultivo a sembrar determina las prácticas agronómicas a aplicar y estas a su vez influyen en las propiedades químicas del suelo, lo que se refleja en su calidad.

Además, el manejo físico si no es el adecuado puede conllevar a generar problemas de compactación lo que afectaría la disponibilidad del agua en el suelo,

la densidad aparente y la resistencia a la penetración. Así mismo un inadecuado manejo físico podría causar daños en la estructura del suelo afectando principalmente su estabilidad estructural dejándolo propenso a la erosión, al sellamiento superficial y a la formación de costras.

Los indicadores seleccionados se pueden agrupar en función de los análisis estadísticos realizados y aun criterio técnico en: indicadores de acidez ( pH, acidez intercambiable y hierro), indicadores de fertilidad (carbono orgánico, calcio y magnesio); indicadores de agua en el suelo (saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente), indicadores de arquitectura del suelo (contenido de arena, limo y arcilla, y estabilidad estructural) e indicadores de compactación (densidad aparente y resistencia a la penetración).

### 3.5 VALORACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS EN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LOS SUELOS

Hasta el momento los análisis estadísticos han mostrado de que existen diferencias significativas entre las propiedades físicas (a excepción de la densidad aparente) y químicas de los suelos en los diferentes sistemas productivos evaluados, por tanto cada uso del suelo posee sus propias características edáficas, pero para poder determinar que sistemas presentaron las mejores propiedades físicas y químicas, se necesita valorar los datos que presentó durante el muestreo cada propiedad, seleccionada como indicadora, con el fin de determinar cuáles son los más favorables desde el punto de vista de la capacidad del suelo para funcionar y de su aptitud para el uso.

Lo anterior se puede lograr dándole un puntaje a cada dato presentado por cada indicador en los sitios de muestreo, de acuerdo a lo que más le conviene al suelo, es decir construyendo índices.

Es importante tener en cuenta que la calidad del suelo no se puede catalogar como una simple sumatoria de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, sino que es más bien la integración y el equilibrio de estas propiedades, lo que le permite al suelo expresar su calidad o dicho de otra forma la calidad de un suelo está en función de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y se puede llegar a valorar a través de sus propiedades físicas y químicas, ya que son estas, las que permite el surgimiento y el desarrollo de la vida. Es decir, un suelo de malas propiedades físicas y químicas es un suelo que no presenta las características requeridas para expresar vida, entonces es el equilibrio entre propiedades físicas y químicas lo que permite el desarrollado de una gran diversidad de vida.

De acuerdo a lo anterior con las propiedades químicas y físicas del suelo se puede catalogar parcialmente la calidad del suelo cuando no se ha evaluado las propiedades biológicas. Entonces existe una relación directa entre propiedades físicas y químicas del suelo con la calidad del mismo. Por tanto, si se valora la calidad de un suelo también se estaría valorando sus propiedades físicas y químicas.

En concordancia con los criterios anteriores se procedió a valorar la influencia de los sistemas productivos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, a través de índices de calidad construidos utilizando los indicadores de calidad edáficos seleccionados.

La información obtenida con la construcción de los índices, se dividió para clasificar los suelos de los sistemas de producción, de acuerdo a su calificación o puntaje total obtenido, en: <0.20 calidad muy baja; 0.20 - <0.40 calidad baja; 0.40 - <0.60 calidad media; 0.60 - <0.80 calidad alta y >0.80 calidad muy alta.

### 3.5.1 Construcción de índices de la calidad para valorar la influencia de los sistemas de producción en las propiedades química del suelo

En conformidad con la metodología descrita, con los indicadores químicos seleccionados se construyeron índices de calidad del suelo para cada sistema productivo (Tabla 12).

Tabla 12. Índices de la calidad química del suelo de los diferentes sistemas productivos evaluados.

<b>SISTEMA</b>	<b>Índice de Calidad</b>
Palma30	0.22
Palma18	0.49
Pastura degradada	0.21
Bosque plantado	0.31
Piña	0.31
Cultivos transitorios	0.61
Caucho	0.33
Pasto llanero + maní	0.31
Pasto llanero	0.30
Pasto mulato II	0.57
Cítricos	0.29

En la tabla 12 se observa que solo el sistema cultivos transitorios presentó una alta calidad química de su suelo y los sistemas pasto mulato II y palma18 presentaron una mediana calidad. Los suelos de los demás sistemas presentaron una baja calidad química.

Los mayores índices de calidad química que presentaron los sistemas cultivos transitorios, pasto mulato II y palma18 se debe a que estos sistemas son los que presentaron los mayores valores de pH y por tanto los menores de acidez intercambiable, como también bajos niveles de hierro y altos niveles de calcio y magnesio. Este comportamiento está muy relacionado con el manejo, ya que el suelo en donde se encuentra el pasto mulato II fue manejado de igual forma como se maneja hoy día el suelo de los cultivos transitorios, es decir, fue mejorado químicamente. Es importante resaltar que la mediana y alta calidad química que presentaron estos suelos no es prístina es más bien artificial y momentánea dependiente del aporte de nutrientes y del manejo agrícola dado por el hombre.

La baja calidad química de sus suelos que presentaron la pastura degradada y la palma30 se debe a su bajo valor de pH y alta acidez intercambiable como a los altos niveles de hierro.

De manera general de acuerdo a estos índices se podría afirmar que los suelos de la zona evaluada presentaron una baja y mediana calidad química.

Los suelos del piedemonte llanero se caracterizan por su bajo pH, altos niveles de acidez intercambiable, bajos contenidos de bases y altos contenido de hierro como es el caso de la pastura degradada, condiciones que conllevan a una alta retención del fósforo y a toxicidades de hierro, manganeso y aluminio para las plantas cultivadas (Guerrero, 1990), Lo cual no es sinónimo de una buena calidad de los suelos, ya que para que un suelo sea considerado de calidad desde el punto de vista agrícola debe de presentar aptitud para el uso y permitir el mantenimiento y crecimiento de los cultivos.

Debido a lo anterior los suelos son acondicionados para satisfacer las demandas de nutrientes por las plantas cultivadas, mediante encalamientos y fertilizaciones, prácticas que han permitido que en estos crezcan y se desarrollen cultivos con buenas productividades (por ejemplo, piña 150 ton/ha), principalmente de aquellas especies que han desarrollado mecanismos de adaptación que las hacen tolerantes a estas condiciones edafológicas. Entonces, los índices están reflejando de cierto modo que tan productivos son los suelos de los sistemas de acuerdo a las condiciones químicas que presentaron en el momento del muestreo, es decir que tan favorable son estas propiedades para que los cultivos expresen su máxima productividad como también que tan eficaces han sido las prácticas de manejo para contrarrestar los problemas de acidez y pobreza en nutrientes.

En razón a lo anterior en el presente trabajo el término calidad química del suelo es sinónimo de condiciones edafológicas favorables para que los cultivos expresen su máxima productividad.

### 3.5.2 Construcción de índices de calidad para valorar la influencia de los sistemas de producción en las propiedades físicas de los suelos.

El mismo procedimiento (ver metodología) empleado para construir los índices químicos se empleó para los físicos (Tabla 13). Estos índices mostraron que los sistemas de mayor calidad física son la palma30 y la pastura degradada y los de menor calidad son palma18, caucho y cítricos.

Tabla 13. Índices de la calidad física del suelo de los diferentes sistemas productivos evaluados.

<b>Sistema</b>	<b>índice de calidad</b>
Palma30	0.72
Palma18	0.30
Pastura degradada	0.74
Bosque plantado	0.54
Piña	0.48
Cultivos transitorios	0.38
Caucho	0.34
Pasto llanero + maní	0.58
Pasto llanero	0.40
Pasto mulato II	0.38
Cítricos	0.28

Los sistema palma30 y pastura degradada están entre los mejores en cuanto a calidad física se refiere debido principalmente a que presentaron los valores más bajo de densidad aparente, los más altos de estabilidad estructural, los más altos contenidos de arcilla y limo y los más bajos de arena, como también presentaron

los más altos valores de capacidad de campo y saturación y los más bajos valores de resistencia a la penetración en los rangos evaluados.

En general la calidad física de estos suelos está dada principalmente por su buena estabilidad estructural y una adecuada proporción relativa de sus partículas (arena, limo y arcilla).

Como se puede observar en la tabla 13 los sistemas evaluados presentaron una baja y moderada calidad física de sus suelos a excepción de la palma30 y pastura degradada que presentaron una alta calidad, pero si se compara esta tabla con la anterior (Tabla 12) se observa que los sistemas que presentaron la mayor calidad química son los que mostraron la menor calidad física y viceversa, como es el caso de los cultivos transitorios, palma18, y el pasto mulato II que presentaron los índices más altos de calidad química, pero están entre los índices más bajo de calidad física, lo contrario sucede con la palma30 y la pastura degradada.

De manera general en función de estos índices se podría afirmar que la zona evaluada presentó una mayor calidad física que química. Sin embargo, en algunos sistemas las prácticas agrícolas han disminuido dicha calidad, al aumentar la densidad aparente y la resistencia a la penetración principalmente, lo cual ha conllevado a la compactación del suelo, disminuyendo la porosidad y la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo.

El mejoramiento químico a que están siendo sometidos estos suelos podría estar conllevando a la degradación física de los mismos, principalmente en los sistemas agrícolas que no han cumplido con su ciclo de rotación a pasturas. Por tanto es muy importante que después de un tiempo de explotación agrícola los suelos se manejen de nuevo con pastos, para recuperar sus propiedades físicas y evitar su degradación.

Los altos índices de calidad física que presentaron los sistemas pastura degradada y palma30 probablemente están relacionados con el alto contenido de carbono orgánico que presentaron estos sistemas, debido a que la materia orgánica es un estructurante por excelencia, además de que ayuda en la infiltración y retención del agua en el suelo. En concordancia con lo anterior se puede deducir que la materia orgánica juega un papel transcendental en la calidad de los oxisoles del piedemonte llanero, debido a que su dinámica favorece y mejora su fertilidad física. Por consiguiente, en estos suelos es primordial promover, aumentar y conservar la materia orgánica para mantener su calidad. Por lo tanto, prácticas que conlleve a su mantenimiento aumentara la calidad y las que promuevan su pérdida fomentaran la degradación del suelo.

De acuerdo a los resultados para propiedades físicas que presentó la pastura degradada se podría pensar que la mejor técnica para recuperar estos suelos es dejarlos descansar por un tiempo con algún tipo de pastura, sin ningún tipo de

manejo, con la finalidad de aumentar el contenido de materia orgánica que unida a la acción de las raíces mejoraría principalmente la estructura, la densidad aparente, la resistencia a la penetración y la porosidad que se ven seriamente afectadas por la perturbación del suelo durante la labranza y el uso continuo de maquinaria en las labores de campo.

### 3.6 PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD QUÍMICA Y FÍSICA DE LOS SUELOS DEL PIEDEMONTA LLANERO COLOMBIANO

Complementario a la investigación realizada, a continuación se propone una clasificación de la calidad de los suelos del piedemonte llanero (Tablas 14 y 15).

Como se mencionó en la metodología con los indicadores seleccionados, empleando los datos del muestreo y tomando como referencia la pastura degradada, los rangos de variación de las propiedades químicas de los suelos del piedemonte llanero reportados por Rincón *et al.* (2010), los niveles de interpretación estándares, la clasificación de los suelos según el nivel de fertilidad para plantas tolerantes a la acidez realizada por Salinas y García (1985) y adaptada por Rincón *et al.* (2010), a continuación se propone una clasificación para evaluar la calidad química de los suelos del piedemonte llanero.

Tabla 14. Clasificación de la calidad del suelo con los indicadores químicos.

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

La tabla 14 es una herramienta valiosa para establecer niveles críticos si se cruza con los requerimientos nutricionales de los sistemas de producción. Sin embargo solo es aplicable para los suelos evaluados y por lo tanto sus valores y su clasificación no son extrapolables a otras zonas diferentes al piedemonte llanero colombiano, ya que solo responden a las condiciones climatológicas y edafológicas de la región de estudio, inclusive, solo se podrán emplear en lugares del piedemonte llanero con similares características ambientales y con el mismo

orden de suelo muestreado (Oxisol). Además esta valorización depende también del tipo de cultivo y sus requerimientos nutricionales, por lo tanto es importante que en un futuro se valide para cada cultivo que se establezca en la zona.

Del mismo modo que en la parte química, en la física también se realizó una clasificación de la calidad física de los suelos, teniendo en cuenta los datos del muestreo, tomando como referencia la pastura degradada y las interpretaciones estándares de análisis físicos para suelos agrícolas. Los resultados de dicha clasificación se presentan en la tabla 15.

Tabla 15. Clasificación de la calidad del suelo con los indicadores físicos.

Indicador	Calidad física del suelo			Tiempo de medición	Método de medición
	Baja	Media	Alta		
Saturación	<35%	35- 45	>45		
Capacidad de Campo	<25	25 - 30	>30	Anual	Olla de presión
Punto de Marchitez Permanente	>25	25 -18	<18		
Densidad aparente	>1.5	1.4 - 1.5	<1.4 - >1.2	Semestral	Cilindro graduado
Estabilidad Estructural	<1.5	1.5 - 4	>4	Semestral	tamizado en húmedo
Arena	>60	45 -60	<45 - >25	30 Años	
Limo	<20	20 -30	>30 -<50	30 Años	Bouyoucos
Arcilla	<15	15 - 25	>25 -<30	30 Años	
Resistencia a la penetración	>1.5	1 - 1.5	<1 - >0	Semestral	Penetrografo

Las tablas 14 y 15 son muy importantes al momento de tomar decisiones de manejo que conlleven a mejorar la calidad de los suelos de la región. Para programar fertilizaciones tendientes a homogenizar el contenido nutricional de los suelos o para implementar prácticas agrícolas apropiadas que conlleven a generar sistemas de producción sustentables y sostenibles. Además estas tablas facilitarían la interpretación y valorización de la calidad de los suelos por parte de los futuros investigadores y los mismos agricultores.

Las tablas 14 y 15 son una herramienta muy útil para los agricultores, ya que a través de un simple análisis de suelos de las propiedades químicas y físicas del suelo seleccionadas como indicadores podrán valorar la calidad de sus suelos y tomar medidas que conlleve a mejorarla y conservarla.

Por otro lado son de vital importancia para implementar un programa de monitoreo que permita evidenciar alteraciones en la propiedades físicas y químicas de los suelos evaluados, ya sea por cambios en el uso del suelo, por prácticas de manejo agrícola y/o por el cambio climático.

Como reflexión final es importante mencionar que un manejo inadecuado de los oxisoles del piedemonte llanero puede conllevar a su degradación total, afectado la calidad química y física de los mismos, principalmente por problemas de compactación, aumento de la acidez, pérdida de la fertilidad y de la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo. Sin embargo estos suelos podría estas entre los mejores del mundo, si se realizan un buen manejo agrícola, como: utilización de variedades de plantas tolerantes a la acidez que sean eficaces y eficientes en la toma y utilización de los nutrientes principalmente del fosforo, fertilización focalizada de acuerdo a los análisis de suelos y a los requerimientos nutricionales del cultivo, cero labranza, cultivos asociados con abonos verdes, cultivos intercalados, cultivos con coberturas vegetales, praderas con árboles y conservación y aumento de la materia orgánica del suelo.

#### 4. CONCLUSIONES

- Los suelos de la zona de estudio se caracterizaron principalmente por su pobreza en elementos nutrientes, posibles toxicidades de hierro y aluminio, pH fuertemente ácido, contenidos medios de carbono orgánico, bajos contenido de agua aprovechable y posibles problemas de compactación, pero en general son suelos de fertilidad media y alta para el cultivo de especies de plantas tolerantes a la acidez, además son estructuralmente estables y de texturas moderadas.
- Las condiciones edafológicas y climatológicas reinantes en la zona de estudio, permitieron seleccionar las principales propiedades físicas y químicas que podrían ser empleadas para determinar la calidad de suelo, como son: pH, carbono orgánico, calcio intercambiable, magnesio intercambiable, acidez intercambiable, hierro, densidad aparente, saturación en agua, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, estabilidad estructural, resistencia a la penetración y textura.
- Los análisis estadísticos mostraron que los sistemas de producción y las prácticas de manejo probablemente influyen en las propiedades físicas y químicas de los suelos y por tanto en su calidad. Por consiguiente los indicadores físicos y químicos seleccionados son sensibles a cambios en el manejo agrícola, por tal motivo son adecuados para valorar la influencias de los sistema de producción en las propiedades evaluadas.
- En general los índices de calidad contruidos indican que los suelos poseen propiedades físicas más favorables que químicas.
- Los indicadores seleccionados además de ser de utilidad para monitorear el efecto de los sistemas de uso sobre algunas propiedades físicas y químicas de los suelos, pueden ser utilizados para el diseño de sistemas productivos sustentables que prevengan o mitiguen los efectos negativos (compactación y aumento de la acidez) y maximicen lo efectos positivos (aporte de nutrientes) de las prácticas agrícolas empleadas en los suelos del piedemonte llanero.
- 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.

## BIBLIOGRAFÍA

Amézquita, E. 1998. Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza. En: Romero, G.; Aristizábal, D.; Jaramillo, C. (Eds). Encuentro Nacional de labranza de Conservación. Memorias. Villavicencio. Colombia. pp.145-174.

Amézquita, E.; Thomas, R.J.; Rao, I.M.; Molina, D.L. and 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. Elsevier Science B.V; Agriculture, Ecosystems and Environment 103, 269–277. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

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

Astier C., M.; Maass M., M.; y Etchevers, B., J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. Agrociencia Vol. 32. N° 005. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. pp. 605 – 620.

Barrios, E.; Bekunda, M.; Delve, R.J.; Esilaba, A. and Mowo, J. 2001. Identifying and classifying local indicators of soil quality. Eastern Africa Version. Participatory Methods for Decision Making in Natural Resource Management. CIAT-SWNM-TSBF-AHI.

Barrios, E.; Cobo, J.G.; Rao, I.M.; Thomas, R.J.; Amézquita, E; Jiménez, J.J. and Rondón, M.A. 2005. Fallow management for soil fertility recovery in tropical Andean agroecosystems in Colombia. Elsevier Science B.V; Agriculture, Ecosystems and Environment 110, 29–42. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Barrios, E.; Delve, R.J.; Bekunda, M.; Mowo, J.; Agunda J.; Ramisch, J.; Trejo, M.T. and Thomas, R.J. 2006. Indicators of soil quality: A South–South development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. Elsevier Science B.V; Geoderma 135, 248–259. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Basamba, T.A.; Barrios, E.; Amézquita, E.; Rao, I.M. and Singh, B.R. 2006. Tillage effects on maize yield in a Colombian savanna oxisol: Soil organic matter and P fractions. Elsevier Science B.V; Soil & Tillage Research 91, 131–142. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Bautista C., A.; Etcchevers, B.; Castillo, R.F. y Gutiérrez, C. 2004. La Calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13 (2): pp. 90 - 97. En: <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?id=149>

Bohn, H.L.; McNeal, B.L. y O'Connor, G.A. 1993. *Química del suelo*. Editorial Limusa. Mexico. 370 p.

Buol, S.W; Hole, F.D. y Mccracken, R.J. 1983. *Génesis y clasificación de suelos*. Editorial Trillas. México.

Camacho T., J.H.; Luengas G., C. y Leiva, F.R. 2010. Análisis multivariado de propiedades químicas en oxisoles con diferentes niveles de intervención agrícola. *Acta Agronómica* 59 (3), 273 -274.

Campos C., A.; Oleschko L., K.; Etchevers B, J. and Hidalgo M, C. 2007. Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico). *Elsevier Science B.V; Forest Ecology and Management* 248, 174–182. Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Cantu, M.; Becker, A.; Bedano, J. y Shiavo, H. 2007. Evaluación de la calidad de los suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo*. Vol. 25 (2): pp. 172 – 178.

Carter, M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management: Organic Matter and aggregation Interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal*, Vol. 94, 38–47.

Carter, M.R.; Gregorich, E.G.; Anderson, D.W.; Doran, J.W.; Janzen, H.H.; and Pierce, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. Chapter 1. In: Gregorich, E.G., Carter M.R. (Eds). *Soil Quality for crop production and ecosystem health*. Elsevier. 1-19.

Castro F., H.E. y Gómez S., M.I. 2010. Fertilidad de suelos y fertilizantes. En: Burbano O., H. y Silva M., F. (Eds). *Ciencias del suelo principios básicos*. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá. Colombia. pp. 213 – 303.

Cerón R., L.E y Melgarejo M., L.M. *Enzimas del suelo*. 2005. Indicadores de salud y calidad. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. *Acta Biológica Colombiana*, Vol. 10 No. 1, 5. pp. 5 – 18.

CORPOICA (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria). 2007. *Fundamentos biofísicos y socioeconómicos para la formulación de propuestas productivas para la Orinoquia alta Colombiana*. Convenio MADR – Corpoica. Villavicencio, Meta. Colombia. 205 p.

Cortes L., A. Geografía de los suelos de Colombia. 1982. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá.

Daza T., M.C.; Álvarez H., J.G. y Camacho T., J.H. Aplicación de materiales orgánicos e inorgánicos en la adsorción de fósforo en un Oxisol. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* [online]. 2008, vol.12, n.5, pp. 451-457. ISSN 1807-1929.

Decaëns, T.; Asakawa, N.; Galvis, J.H.; Thomas, R.J. and Amézquita, E. 2002. Surface activity of soil ecosystem engineers and soil structure in contrasted land use systems of Colombia. Elsevier Science B.V; *European Journal of Soil Biology* 38, 267–271.

Doran J.W. 2002. Soil health and global sustainability translating science into Practice. *Agriculture Ecosystems Environment*. 88: 119-127.

Doran, J.W. and Parkin, T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicsek, D.F. and Stewart, B.A. (Eds). *defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Science Society of America. Special Publication 35. Madison, Wisconsin, USA. pp. 1-20.

Estrada E., G. 1990. Elementos secundarios: Calcio, Magnesio, Azufre, fundamentos e interpretación del análisis químico. En: *Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego*. Memorias del seminario – taller. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, comité regional de Cundinamarca y Boyacá. pp. 197- 209.

Etchevers B., J.D.; Gómez D., J.D.; Monterroso R., A.I. y Tinoco R., J.A. Formulación de indicadores para evaluar y monitorear la desertificación en México. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Instituto Nacional de Ecología. Colegio de Postgraduados. Universidad Autónoma Chapingo. México. 154 p. En: [www.agua.org.mx/content/view/7277/283/](http://www.agua.org.mx/content/view/7277/283/)

Fassbender H., W. 1986. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José, Costa Rica.

FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Basado en el trabajo de Robert, Michel. *Informes sobre recursos mundiales de suelos*. Institut National de Recherche Agronomique. París, Francia. 65p.

Galiano S., F. 1990. Capacidad de intercambio catiónico y anionico bases de cambio y saturaciones. En: *Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego*. Memorias del seminario – taller. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, comité regional de Cundinamarca y Boyacá. pp.164- 185.

Gaona J., S. 2007. Edafología I. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Colombia.

García I., C. 2008. Enmiendas orgánicas para suelos basadas en residuos orgánicos. Discurso de ingreso leído por el Académico electo en el acto de la Sesión Solemne de su Toma de Posesión como Académico de Número. Academia de Ciencias de la Región de Murcia. Murcia. 78 p. Disponible en internet: <http://www.acc.org.es/docos/de2008/DiscursoInvestiduraCarlosGarcia.pdf>

Giuffré, L.; Ratto, S. y Romina, R. 2008. Indicadores ambientales. Extracto del capítulo "Indicadores ambientales", publicado en el libro Agrosistemas: Impacto ambiental y sustentabilidad. Giuffré, L. EFA-Orientación Gráfica Editora. ISBN 978-950-29-1061-1. 493p. Buenos Aires, Argentina. Disponible en: <http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=1912> Consultado el 14 de julio de 2010.

Gliessman, S.R. 2002. Agroecología: procesos ecológicos en la agricultura sostenible. CATIE: Turrialba, Costa Rica. 359 p.

Gregorich, L. J. and Acton, D.F. 1995. Understanding soil health. In: Acton, D. F. and Gregorich, L. J. (Eds). The health of our soils-towards sustainable agriculture in Canada. Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Ont., Canada. pp. 5- 10.

Gregorich, E.G.; Carter, M.R.; Angers, D.A.; Monreal, C.M. and Ellert, B.H. 1994 Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. Canadian. Journal of Soil Science. 74: 367-385.

Govaerts, B.; Sayre, K.D. and Deckers, J. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. Elsevier B.V, Soil & Tillage Research 87, 163–174. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Guerrero M., R. 1990. La acidez del suelo – su naturaleza, sus implicaciones y su manejo. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Memorias del seminario – taller. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, comité regional de Cundinamarca y Boyacá. Pag 141- 163.

Hanke, F. 1990. Los elementos mayores N, P y K en el suelo. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Memorias del seminario – taller. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, comité regional de Cundinamarca y Boyacá. pp. 187- 196.

Hernández, J.A; Fernández, M.T.; Ortuno, A. y Alarcon M.A. 2010. Influencia del uso del suelo en su calidad ambiental en medio semiárido (Murcia, España). Revista de Ciencias Agrarias. [online]. vol.33, no.1 [citado 08 Febrero 2011], p.199-208. Disponible en internet:

*<http://www.scielo.oces.mctes.pt/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S0871-018X2010000100021&lng=pt&nrm=iso>. ISSN 0871-018X.*

Herrick, J.E. 2000. Soil quality: an indicator of sustainable land management? Elsevier Science B.V; Applied Soil Ecology 15, 75–83.

Hoyos P.; Silva M. y Almanza, E. F. 1999. Impacto de diferentes usos y manejos del suelo en los cambios químicos, físicos y biológicos de la Altillanura bien drenada. 48 p.

Indeángelo, N; Wilson, M.G. y Tasi, H.A. 2007. Indicadores de calidad para dos suelos con características vérticas de Entre Ríos (Argentina). Cuadernos Lab. Xeolóxico de Laxe. Coruña. Vol. 32, pp. 111 – 125. ISSN: 0213 – 4497.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2003. Métodos analíticos de laboratorio de suelos. Bogotá D.C.

IGAC y CVC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca). 2004. Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento del Valle del Cauca. Bogotá Colombia. 541 p.

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

IGAC, 2004. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Meta. Bogotá.

Jaramillo J., D.F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Colombia. 649p.

Karlen, D.L.; Mausbach, M.J.; Doran, J.W.; Cline, R.G.; Harris, R.F.; and Schuman G.E. 1997. Soil Quality: A concept, definition, and framework for evaluation (A Guest Editorial). Published in Soil Science Society of America Journal. Vol. 61: 4-10.

Lal, R. 1994. Methods and Guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Soil Management Support. Soil Conservation Services USDA. Ohio State University. Technical Monography. No. 21.

Larson, W.E. y Pierce, F.J. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F. and Stewart, B.A., (Eds). Defining soil quality for a sustainable environment. Soil Science Society of America. Special Publication 35. Madison, USA. p.37-51.

León S., A. 1971. Teorías modernas sobre la naturaleza de la acidez del suelo. Los iones intercambiables en suelos ácidos. En: Suelos ecuatoriales. Acidez y

encalamiento en el trópico. Primer coloquio de suelos. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Vol 3, N° 1. p. 1 -23.

Liebig, M.A. y Doran, J.W. Evaluation of point-scale assessments of soil quality. 1999. *Soil Water Conserv.* 54: 510- 518.

Liebig, M.A.; Tanaka, D.L. and Wienhold, B.J. 2004. Tillage and cropping effects on soil quality indicators in the northern Great Plains. Elsevier Science B.V; *Soil & Tillage Research* 78, 131–141. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

López R., J. y López M., J. 1978. El diagnóstico de suelos y plantas, métodos de campo y laboratorio. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 337 p.

Lora S., R. 2010. Propiedades químicas del suelo. En: Burbano O., H. y Silva M., F. (Eds). *Ciencias del suelo principios básicos*. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá. Colombia. Pag. 73 – 137.

Lotero C., J.; Monsalve, S.A.; Ramírez, A. y Villamizar, F. Respuesta de gramíneas y leguminosas forrajeras al encalamiento. En: *Suelos ecuatoriales. Acidez y encalamiento en el trópico. Primer coloquio de suelos*. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Vol. 3. N° 1. Pag 210 -239.

Malangón C., D. 1990. Materiales parentales de suelos y su alteración, su relación con génesis y fertilidad. En: *Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Memorias del seminario – taller*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, comité regional de Cundinamarca y Boyacá. Pag 11- 35.

Masto, R.E.; Chhonkar, P.K.; Singh, D. and Patra, A.K. 2007. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. Elsevier Science B.V; *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118, 130–142. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Menjivar, J.C. 2009. Notas de clase. Maestría en Ciencias Agrarias énfasis Suelos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.

Mijangos, I. and Garbisu, C. 2010. Consequences of soil sampling depth during the assessment of the effects of tillage and fertilization on soil quality: a common oversight. Elsevier Science B.V; *Soil & Tillage Research* 109, 169 – 173.

Mohanty, M.; Painuli, D.K.; Misra, A.K and Ghosh, P.K. 2007. Soil quality effects of tillage and residue under rice-wheat cropping on a Vertisol in India. Elsevier Science B.V; *Soil & Tillage Research* 92, 243–250. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Montenegro G, H. 1990. Interpretación de las propiedades físicas del suelo. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Memorias del seminario – taller. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, comité regional de Cundinamarca y Boyacá. Pag 99- 127.

Montenegro, M. y Malagón, D. 1990. Propiedades físicas de los suelos. IGAC. Subdirección de agrología. Bogotá, Colombia. 807p.

Munevar M., F. 1990. Conceptos sobre la materia orgánica y el nitrógeno del suelo relacionados con la interpretación de análisis químicos. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Memorias del seminario – taller. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, comité regional de Cundinamarca y Boyacá. Pag 227- 239.

Muñoz, R. 1985. La acidez y el encalamiento de los suelos. En: Memorias del II seminario de suelos y fertilización de cultivos. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo y secretaria agropecuaria. Neiva, Huila. Pp. 131-150.

Narro F., E. 1994. Física de suelos con enfoque agrícola. Editorial Trillas. México. 195p.

Pavón T, J.C. 2008. Aplicación de los principios del sistema agroforestal Quesungual en Nicaragua caracterización de la calidad física y química del suelo y susceptibilidad a la erosión en la Danta, Somotillo. Tesis de maestría en ciencias agrarias con énfasis suelos. Palmira. Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Escuela de Posgrado. 102 p.

Phiri, S.; Amézquita, E.; Rao, I.M. and Singh, B.R. 2001. Disc harrowing intensity and its impact on soil properties and plant growth of agropastoral systems in the llanos of Colombia. Elsevier Science B.V; Soil & Tillage Research 62, 131 – 143.

PPI (Potash y phosphate institute). 1997. Manual internacional de fertilidad de suelos, versión en español. U.S.A.

Qi, Y.; Darilek, J.L.; Huang, B.; Zhao, Y.; Sun, W. and Gu, Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. Elsevier Science B.V; Geoderma 149, 325–334. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Quiroga, A. y Funaro, D. 2004. Materia orgánica. Factores que condicionan su utilización como indicador de calidad en molisoles, de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 476p.

Ramos, M.E.; Benítez, E.; García, P.A.; Robles, A.B. 2010. Cover crops under different managements vs. frequent tillage in almond orchards in semiarid

conditions: Effects on soil quality. Elsevier Science B.V; Applied Soil Ecology 44, 6–14.

Reynolds, W.D.; Drury, C.F.; Yang, X.M. and Tan, C.S. 2002. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. Elsevier Science B.V; Geoderma 146, 466–474. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

Rincón C., A. 2007. Asociación maíz – pastos para el establecimiento y renovación de praderas en los llanos orientales de Colombia. Corpoica C.I. La libertad. Villavicencio, Meta. Colombia. 69p.

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.

Rincón C., A. y Caicedo G., S. 2010. Monitoreo de las condiciones de los suelos establecidos con la asociación maíz/pastos para la recuperación praderas degradadas en el piedemonte llanero. En: Memorias del XV Congreso colombiano de la ciencia del suelo. El suelo: soporte de la biodiversidad y la producción en los agroecosistemas tropicales. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Comité regional eje cafetero.

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). 26: 340-361. Disponible en: [http://www.revfacagronluz.org.ve/PDF/julio\\_septiembre2009/v26n3a2009340361.pdf](http://www.revfacagronluz.org.ve/PDF/julio_septiembre2009/v26n3a2009340361.pdf)

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 en Ciencias Agropecuarias, Área Manejo de Suelos y Aguas. Palmira. Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. 111 p.

Rucks, L.; García, F.; Kaplán, A.; Ponce de León, J. y Hill, M. 2004. Propiedades físicas del suelo. Universidad de la Republica. Facultad de Agronomía. Departamento de Suelos y Aguas. Montevideo. Uruguay.

Salinas J., G. y García, R. 1985. Métodos químicos para el análisis de suelos ácidos y plantas forrajeras. Centro internacional de agricultura tropical. CIAT. Programa de pastos tropicales. Cali, Colombia. 83p.

Sánchez E., J.A. 2010. Los suelos de Colombia. En: Burbano O., H. y Silva M., F. (Eds). Ciencias del suelo principios básicos. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá. Colombia. pp. 487 – 552.

Sánchez, P.A. y Salinas, J.G. 2008. Suelos Ácidos. Estrategias para su manejo con bajos insumos en América Tropical. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Segunda impresión. Bogotá. Colombia. 93 p.

Shukla, M.K.; Lal, R. and Ebinger, M. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. Elsevier Science B.V; Soil and Tillage Research 87, 194–204. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Smyth, A.J.; Dumanski, J. 1995. A framework for evaluating sustainable land management. Canadian Journal of soil science 75 (4), 401 – 406.

Tobón C., J.H. y León S, L.A. 1971. Comparación de varios métodos para determinar requerimientos de cal en algunos suelos colombianos. En: Suelos ecuatoriales. Acidez y enclamiento en el trópico. Primer coloquio de suelos. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Vol 3, N° 1. pp. 66 -87.

Tasi, H.A; Wilson, M.G.; Paz G., A; Indelángelo, N. y Sasal, M.C. 2007. Sensibilidad de algunas propiedades de un vertisol con uso ganadero-agrícola para indicar calidad de suelos. Trabajo presentado en el 10th International Symposium on Soil and Plant Analysis. Budapest, Hungary.

Tormena, C.A.; da Silva, A.P. and Libardi, P.L. 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. Elsevier Science B.V; Soil & Tillage Research 52, 223-232.

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

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

Valenzuela B., I.G. y Torrente T., A. 2010. Física de suelos. En: Burbano O., H. y Silva M., F. (Eds). Ciencias del suelo principios básicos. Publicación de la sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá. Colombia. Pag. 139 – 211.

Velásquez, E. 2004. Bioindicadores de calidad de suelo basados en las comunidades de macrofauna y su relación con características funcionales del suelo. Tesis de Doctorado en Ciencias Agropecuarias, Área Manejo de Suelos y Aguas. Palmira. Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. 190 p.

Velásquez, E. 2010. Asesoría personalizada. Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira.

Velásquez, E.; Lavelle, P. and Andrade, M. 2007. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. Elsevier Science B.V; *Soil Biology & Biochemistry* 39, 3066–3080.

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.

Wilson, M.G.; Tasi, H.A.; Garciarena, N.; Indelángelo, N. y Sasal, M.C. 2007. Indicadores de Calidad de Suelo. Paraná, Argentina.

Zhang, M.K.; Fang, L.P. 2007. Effect of tillage, fertilizer and green manure cropping on soil quality at an abandoned brick making site. Elsevier Science B.V; *Soil & Tillage Research* 93, 87–93. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Zornoza, R.; Mataix-Solera, J.; Guerrero, C.; Arcenegui, V.; Mataix-Beneyto, J. and Gómez, I. 2008. Validating the effectiveness and sensitivity of two soil quality indices based on natural forest soils under Mediterranean conditions. Elsevier Science B.V; *Soil Biology & Biochemistry* 40, 2079–2087. Available online at: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

## ANEXO A

### DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA

#### Horizonte 1

SISTEMA	CAJUELA	ESPESOR	COLOR	MUNSELL	%	MUNSELL	%	TEXTURA		ESTRUCTURA			CONSISTENCIA			pH
								CAMPO	TIPO	CLASE	GRADO	HUMEDC	PLASTICIDAD	PEGAJOSIDAD		
Palma30	1	0-29	Pardo oscuro	10YR3/3				FAr	BS	M	M	F	Lp	Lp	4.5	
	2	0-37	Pardo muy oscuro	10YR2/2		5Y5/2		FAr	BS	M	M	MF	Lp	Lp	5	
	3	0-31	Pardo grisáceo muy oscuro	10YR3/2		oliva		FAr	BS	MyF	B	MF	Lp	P	4.5	
	4	0-32	Pardo oscuro	7.5YR3/2				FAr	BS	M	M	F	Lp	P	4.8	
	5	0-37	Pardo oscuro	7.5YR3/3				FArL	BS	M	M	F	Lp	P	4.5	
Palma18	1	0-36	Pardo amarillento oscuro	10YR3/4				FArA	BS	MF	M	MF	Lp	P	5	
	2	0-44	Pardo fuerte	7.5YR4/6				FArA	BS	M	MF	MF	Lp	P	5	
	3	0-47	Pardo oscuro	7.5YR3/4				FArA	BS	M	MF	MF	Lp	p	5	
	4	0-35	Pardo oscuro	7.5YR3/2				FArA	BS	MF	M	MF	Lp	Lp	4.5	
	5	0-37	Pardo oscuro	7.5YR3/4				FArA	BS	M	MF	MF	Lp	Lp	5.5	
Pastura degradada	1	0-35	Pardo	7.5YR4/3				FAr	BS	M	BD	F	Lp	P	4.2	
	2	0-38	Pardo fuerte	7.5YR4/6		Pardo rojizo oscuro		FArL	BS	M	M	F	Lp	P	4.5	
	3	0-42	Pardo oscuro	10YR3/2	90%	2.5YR3/4	10%	FArA	BS	M	M	MF	Lp	Lp	4.5	
	4	0-40	Pardo oscuro	10YR3/2		2.5YR4/6	Motas		BS	M	M	F	Lp	Lp	4.5	
	5	0-24	Pardo oscuro	7.5YR3/4		rojo		F	BS	M	M	F	Lp	Lp	4.5	
Bosque Plantado	1	0-31	Pardo amarillento oscuro	10YR3/6				FArA	BS	M	D	F	Lp	P	4.2	
	2	0-42	Pardo amarillento oscuro	10YR3/4				FAr	BS	M	M	F	Lp	P	4.2	
	3	0-42	Pardo fuerte	7.5YR4/6				FAr	BS	M	M	F	Lp	P	4.8	
	4	0-46	Pardo amarillento oscuro	10YR3/6				FAr	BS	M	M	F	Lp	Lp	4.8	
	5	0-42	Pardo amarillento oscuro	10YR3/6				FAr	BS	M	M	MF	Lp	P	4.8	
Piña	1	0-38	Pardo oscuro	10YR3/3				FAr	BS	M	D	MF	P	Mp	4.8	
	2	0-36	Pardo oscuro	7.5YR3/3				FArA	BS	M	D	MF	Lp	Lp	4.8	
	3	0-40	Pardo oscuro	7.5YR3/4				FArA	BS	M	D	MF	Lp	Lp	5	
	4	0-32	Pardo muy oscuro	7.5YR2.5/2				FAr	BS	M	D	MF	Lp	Lp	5	
	5	0-28	Pardo amarillento oscuro	10YR3/4				FAr	BS	M	D	MF	Lp	Lp	5	

Cultivos transitorios	1	0-37	Pardo muy oscuro	7.5YR2.5/3	FArA	BS	MYF	D	F	Lp	Lp	4.8	
	2	0-33	Pardo grisáceo muy oscuro	10YR3/2	F	BS	M	D	MF	Lp	P	5	
	3	0-41	Pardo oscuro	7.5YR3/2	F	BS	M	MD	MF	Lp	P	5	
	4	0-47	Pardo oscuro	7.5YR3/4	F	BS	M	D	F	Lp	Lp	5	
	5	0-45	Pardo oscuro	10YR3/3	F	BS	M	M	F	Lp	Lp	4.8	
Caucho	1	0-40	Pardo grisáceo muy oscuro	10YR3/2	F	BS	M	D	MF	Lp	Lp	4.8	
	2	0-40	Pardo grisáceo muy oscuro	10YR3/2	F	BS	M	D	MF	Lp	Lp	4.2	
	3	0-41	Pardo muy oscuro	7.5YR2.5/3		BS	M	D	MF	Lp	Lp	4.8	
	4	0-31	Pardo muy oscuro	7.5YR2.5/2	F	BS	M	M	MF	Lp	Lp	4.2	
	5	0-33	Pardo oscuro	7.5YR3/2	F	BS	M	M	MF	Lp	Lp	4.5	
Pasto llanero + maní	1	0-31	Pardo oscuro	7.5YR3/3	FAr	BS	MYG	BD	F	Lp	Lp	4.8	
	2	0-42	Pardo amarillento oscuro	10YR4/4	FArA	BS	M	BD	F	Lp	Lp	5	
	3	0-33	Pardo oscuro	7.5YR3/2	FAr	BS	M	M	F	Lp	Lp	4.5	
	4	0-31	Pardo fuerte	7.5YR4/6	F	BS	MYG	D	F	Lp	Lp	4.5	
	5	0-32	Pardo amarillento oscuro	10YR4/4	FAr	BS	M	D	F	P	P	4.5	
Pasto llanero	1	0-25	Pardo	7.5YR4/3	FAr	BS	M	BD	F	Lp	P	4.5	
	2	0-35	Pardo amarillento oscuro	10YR3/6	FAr	BS	MYG	BD	F	P	Mp	4.5	
	3	0-32	Pardo oscuro	7.5YR3/3	FAr	BS	M	M	F	Lp	P	5	
	4	0-38	Pardo amarillento	10YR5/6	FAr	BS	M	M	F	Lp	P	4.5	
	5	0-32	Pardo amarillento oscuro	10YR3/4	FArA	BS	MYG	BD	F	Lp	Lp	4.5	
Pasto mulato II	1	0-21	Pardo oscuro	7.5YR3/3	FAr	BS	M	M	F	P	P	4.2	
	2	0-27	Pardo oscuro	7.5YR3/2	FArA	BS	M	B	F	P	Lp		
	3	0-29	Pardo oscuro	7.5YR3/3	FArA	BS	M	BD	F	P	Lp	4.8	
	4	0-30	Pardo oscuro	7.5YR3/3	90% 2.5YR2.5/4 10%	ArA	BS	M	B	F	P	Lp	4.8
	5	0-37	Pardo oscuro	7.5YR3/3	Pardo rojizo oscuro	FAr	BS	FM	B	F	Lp	Lp	4.8
Cítricos	1	0-35	Pardo	7.5YR5/3	F	BS	M	M	MF	P	Lp	5	
	2	0-36	Pardo oscuro	7.5YR3/3	F	BS	M	M	F	Lp	Lp	4.5	
	3	0-36	Pardo oscuro	7.5YR3/2	F	BS	M	M	F	Lp	Lp	4.8	
	4	0-36	Pardo oscuro	7.5YR3/3	F	BS	M	D	MF	Lp	Lp	4.5	
	5	0-16	Pardo	7.5YR4/4	F	BS	M	D	F	P	P	5	

## Horizonte 2.

SISTEMA	CAJUELA	ESPESOR	COLOR	MUNSELL	%	MUNSELL	%	MUNSELL	%	TEXTURA	ESTRUCTURA			CONSISTENCIA			pH
										CAMPO	TIPO	CLASE	GRADO	HUMEDO	PLASTICIDAD	PEGAJOSIDAD	
Palma30	1	29-88	Pardo fuerte	7.5YR5/6	60%	5YR6/6	30%	7.5YR4/4	10%	FArL	BS	M	M	F	Lp	P	5.5
	2	37-68	Pardo Amarillento oscuro	10YR4/4		Amarillo rojizo		Pardo		FArA	BS	G	M	F	Lp	Lp	5.5
	3	31-76	Pardo	7.5YR4/4						FAr	BS	F	M	FR	P	P	5
	4	32-69	Pardo oscuro	7.5YR3/2	90	2.5YR4/8	10%			FArL	BS	M	M	F	Lp	P	5
	5	37-74	Pardo Amarillento oscuro	10YR4/4		Rojo				FAr	BS	M	M	F	Lp	Mp	4.8
Palma18	1	36-125	Pardo Amarillento oscuro	10YR5/4						Far	BS	M	M	F	Lp	P	5
	2	44-134	Pardo fuerte	7.5YR5/8						FArL	BS	MF	MF	MF	Lp	P	5.5
	3	47-136	Pardo fuerte	7.5YR4/6						FArL	BS	MF	M	F	Lp	p	5
	4	35-130	Pardo fuerte	7.5YR5/6						FArL	BS	MF	M	F	P	P	4
	5	37-95	Pardo Amarillento oscuro	10YR3/6						FArL	BS	M	MF	F	Lp	Lp	5
Pastura degradada	1	35-101	Pardo fuerte	7.5YR5/8						ArL	BS	M	BD	F	Lp	P	4.2
	2	38-89	Pardo Amarillento oscuro	10YR4/6							BS	M	M				4.8
Bosque plantado	1	31-110	Pardo Amarillento oscuro	10YR4/6						FAr	BS	M	M	F	P	MP	4.8
	3	42-98	Pardo Amarillento oscuro	10YR4/6						FArL	BS	M	D	F	P	P	4.8
	4	46-56	Pardo Amarillento oscuro	10YR4/6						FArL	BS	M	D	F	P	P	5
	5	42-63	Pardo Amarillento oscuro	10YR4/6						FArL	BS	M	M	F	Lp	P	4.5
	Piña	1	38-120	Pardo Amarillento oscuro	10YR3/6						FAr	BS	F	D	F	P	P
2		36-74	Pardo fuerte	7.5YR4/6						FArL	BS	M	M	F	P	P	5
3		40-104	Pardo fuerte	7.5YR4/6						FArL	BS	M	D	F	Lp	P	4.8
4		32-132	Pardo fuerte	7.5YR5/8						FL	BS	M	D	F	Lp	Lp	5
5		28-109	Pardo fuerte	7.5YR4/6						FArA	BS	M	D	F	Lp	Lp	4.5
Cultivos transitorios	1	37-104	Pardo fuerte	7.5YR3/4						FArA	BS	M	M	F	Lp	P	4.5
	2	33-55	Pardo fuerte	7.5YR4/6						FAr	BS	MYF	M	F	Lp	P	4.8
	3	41-100	Pardo fuerte	7.5YR4/6						FAr	BS	M	M	F	Lp	P	4.5
	4	47-120	Pardo Amarillento oscuro	10YR4/6						F	BS	M	D	F	Lp	P	4.8
	5	45-66	Pardo oscuro	7.5YR3/3						FArL	BS	M	M	F	Lp	Mp	4.5

Caucho	1	40-101	Pardo oscuro	10YR3/3	F	BS	M	M	MF	Lp	Lp	4.8
	2	40-99		7.5YR3/2.5	F	BS	M	M	MF	Lp	Lp	4.2
	3	41-110	Pardo rojizo oscuro	5YR3/3		BS	M	M	F	Lp	Lp	4.8
	4	31-92	Pardo	7.5YR4/3	FAr	BS	M	D	MF	Lp	Lp	4.5
	5	33-131	rojo amarillento	5YR4/6	FAr	BS	M	M	F	P	P	4.5
Pasto llanero + maní	1	31-102	Pardo fuerte	7.5YR4/6	FArL	BS	M	M	F	P	Mp	5
	2	42-101	Pardo fuerte	7.5YR4/6	FAr	BS	M	M	F	Lp	Lp	4.8
	3	33-101	Pardo fuerte	7.5YR4/6	Ar	BS	M	M	F	P	P	4.5
	4	31-94	Pardo Amarillento oscuro	10YR4/6	FAr	BS	M	M	F	Lp	P	5
	5	32-78	Pardo Amarillento oscuro	10YR4/6	FAr	BS	M	M	F	P	P	4.5
Pasto llanero	2	35-79	rojo amarillento	5YR5/8	F	BS	M	M	F	Lp	Lp	5
	3	32-44	Pardo Amarillento oscuro	10YR3/6	FAr	BS	M	M	F	Lp	Mp	5
	4	38-103	Pardo fuerte	7.5YR5/8	ArL	BS	M	M	F	Lp	P	4.8
Pasto mulato II	1	21-36	Pardo fuerte	7.5YR4/6	Ar	BS	M	M	F	Mp	Mp	5
	2	27-87	Pardo fuerte	7.5YR4/6	FAr	BS	M	M	F	P	P	
	3	29-91	Pardo	7.5YR4/4	FAr	BS	M	M	F	P	P	5
	4	30-86	Pardo fuerte	7.5YR5/6	Ar	BS	M	M	F	P	P	5
	5	37-90	Pardo fuerte	7.5YR4/6	ArA	BS	M	B	F	P	P	4.8
Cítricos	1	35-135	Pardo oscuro	7.5YR3/4	FAr	BS	M	M	F	Lp	Lp	4.8
	2	36-87	Pardo fuerte	7.5YR4/6	FAr	BS	M	M	F	Lp	P	4.5
	3	36-58	Pardo	7.5YR4/4	FAr	BS	M	M	F	P	P	5
	4	36-60	Pardo	7.5YR4/4	F	BS	M	M	F	Lp	P	4.5
	5	16-38	Pardo fuerte	7.5YR4/6	FAr	BS	M	M	F	Lp	Lp	5

Interpretación. BS: bloques subangulares; M: medios; F: finos; G: grandes; M: moderada; BD: bien desarrollada; D: débil; F: friable; MF: muy friable; Lp: ligeramente Plástica; Lp: ligeramente pegajosa; Mp: muy plástica; Mp: muy pegajosa; p: plástica; p: pegajosa

## Anexo B

### ANÁLISIS DESCRIPTIVO

#### Variables físicas

Sistema	Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Error estándar	Coefficiente de variación	Rango	
Palma30	Saturación	28.992	44.226	34.474	5.925	2.65	17.187	15.234	
	THS 0,1	26.068	40.668	31.623	5.444	2.435	17.216	14.600	
	THS 0,3	23.667	36.537	27.551	5.297	2.369	19.227	12.870	
	THS 1,5	23.014	35.499	26.786	5.122	2.291	19.121	12.485	
	THS 3	20.603	32.897	24.802	4.858	2.173	19.589	12.294	
	THS 5	20.550	32.360	24.198	4.845	2.167	20.022	11.810	
	THS 15	18.610	30.490	22.618	4.733	2.117	20.926	11.880	
	Humed	23.669	37.130	28.038	5.681	2.541	20.264	13.461	
	D.A	1.287	1.692	1.498	0.157	0.07	10.506	0.405	
	D.R	2.107	2.418	2.262	0.138	0.062	6.089	0.311	
	Poros	28.517	43.429	34.664	6.142	2.747	17.717	14.912	
	CH	0.110	0.657	0.351	0.283	0.127	80.782	0.547	
	EST EST	3.345	5.559	4.750	0.831	0.372	17.502	2.214	
	Saturación	28.311	38.231	32.183	3.925	1.755	12.196	9.920	
	Palma18	THS 0,1	25.697	33.826	29.134	3.175	1.42	10.9	8.129
THS 0,3		22.142	26.972	24.600	1.842	0.824	7.486	4.830	
THS 1,5		21.553	26.602	23.967	1.852	0.828	7.727	5.049	
THS 3		20.612	25.436	23.087	1.815	0.812	7.86	4.824	
THS 5		19.870	24.780	22.116	1.864	0.834	8.428	4.910	
THS 15		18.660	23.540	20.722	1.979	0.885	9.551	4.880	
Humed		20.864	25.182	23.638	1.669	0.747	7.062	4.318	
D.A		1.420	1.678	1.545	0.100	0.045	6.473	0.258	
D.R		2.360	2.479	2.424	0.044	0.02	1.802	0.119	
Poros		34.615	43.012	37.509	3.531	1.579	9.414	8.397	
CH		0.110	1.753	0.635	0.659	0.295	103.737	1.643	
EST EST		3.659	5.394	4.537	0.774	0.346	17.062	1.735	
Saturación		32.226	46.528	38.058	7.074	3.164	18.588	14.302	
Pastura degradada		THS 0,1	30.372	42.729	35.563	6.339	2.835	17.826	12.357
		THS 0,3	26.483	36.079	29.550	4.123	1.844	13.952	9.596
	THS 1,5	25.568	35.510	28.816	4.115	1.84	14.279	9.942	
	THS 3	24.540	33.234	27.101	3.589	1.605	13.244	8.694	
	THS 5	23.680	32.240	26.026	3.530	1.578	13.562	8.560	
	THS 15	22.240	30.160	24.156	3.373	1.508	13.963	7.920	
	Humed	26.365	44.775	33.348	7.160	3.202	21.47	18.410	
	D.A	1.120	1.514	1.372	0.156	0.07	11.353	0.394	
	D.R	2.323	2.566	2.436	0.111	0.05	4.56	0.243	
	Poros	36.826	48.274	43.472	4.448	1.989	10.232	11.448	
	CH	0.222	3.333	0.887	1.370	0.613	154.421	3.111	
	EST EST	5.299	6.276	5.895	0.421	0.188	7.149	0.977	

	Saturación	29.913	38.144	33.140	3.127	1.398	9.434	8.231
	THS 0,1	27.994	35.397	31.035	2.781	1.244	8.962	7.403
	THS 0,3	23.345	30.882	26.474	2.850	1.275	10.766	7.537
	THS 1,5	22.955	28.687	25.601	2.191	0.98	8.558	5.732
	THS 3	21.602	27.222	24.048	2.140	0.957	8.9	5.620
	THS 5	20.780	26.100	23.200	2.052	0.918	8.844	5.320
<b>Bosque plantado</b>	THS 15	19.330	24.110	21.578	1.882	0.841	8.72	4.780
	Humed	25.439	29.486	27.249	1.926	0.861	7.066	4.047
	D.A	1.411	1.630	1.529	0.079	0.035	5.187	0.219
	D.R	2.510	2.577	2.541	0.031	0.014	1.218	0.067
	Poros	39.987	43.908	41.855	1.617	0.723	3.863	3.921
	CH	0.222	3.555	1.511	1.590	0.711	105.227	3.333
	EST EST	2.388	6.865	3.702	1.796	0.803	48.504	4.477
	Saturación	29.925	44.453	36.735	6.331	2.831	17.235	14.528
	THS 0,1	23.575	36.545	26.817	5.461	2.442	20.364	12.970
	THS 0,3	22.031	24.488	22.800	0.998	0.447	4.379	2.457
	THS 1,5	21.329	23.868	22.178	1.033	0.462	4.657	2.539
	THS 3	18.553	22.916	20.269	1.609	0.72	7.941	4.363
	THS 5	18.500	20.560	19.760	0.764	0.341	3.864	2.060
<b>Piña</b>	THS 15	17.080	18.940	18.340	0.794	0.355	4.33	1.860
	Humed	21.197	25.422	23.348	1.539	0.688	6.591	4.225
	D.A	1.252	1.704	1.469	0.173	0.077	11.75	0.452
	D.R	2.486	2.583	2.548	0.040	0.018	1.567	0.097
	Poros	39.547	52.625	45.610	5.104	2.283	11.191	13.078
	CH	0.667	2.888	1.822	0.934	0.418	51.295	2.221
	EST EST	1.795	3.473	2.355	0.652	0.292	27.707	1.678
	Saturación	24.674	37.575	30.993	6.035	2.699	19.472	12.901
	THS 0,1	20.712	30.597	24.856	3.830	1.713	15.41	9.885
	THS 0,3	18.559	28.435	23.154	3.645	1.63	15.743	9.876
	THS 1,5	18.045	27.828	22.607	3.575	1.599	15.813	9.783
	THS 3	15.597	25.966	20.788	3.748	1.676	18.028	10.369
	THS 5	14.470	25.760	20.496	4.061	1.816	19.814	11.290
<b>Cultivos transitorios</b>	THS 15	13.990	24.630	19.642	3.811	1.704	19.404	10.640
	Humed	18.239	24.956	21.871	2.631	1.176	12.028	6.717
	D.A	1.347	1.703	1.558	0.136	0.061	8.705	0.356
	D.R	2.521	2.615	2.561	0.035	0.016	1.362	0.094
	Poros	34.439	46.768	40.806	5.418	2.423	13.278	12.329
	CH	0.000	2.666	0.821	1.121	0.501	136.503	2.666
	EST EST	1.312	2.833	2.258	0.584	0.261	25.868	1.521
	Saturación	30.711	36.339	34.006	2.224	0.995	6.54	5.628
	THS 0,1	25.069	31.510	28.067	2.758	1.234	9.828	6.441
	THS 0,3	21.514	27.127	25.076	2.348	1.05	9.362	5.613
	THS 1,5	20.822	26.649	24.517	2.429	1.086	9.908	5.827
	THS 3	19.958	25.443	23.186	2.232	0.998	9.625	5.485
	THS 5	19.070	24.960	22.694	2.343	1.048	10.326	5.890
<b>Caucho</b>	THS 15	17.760	23.840	21.518	2.395	1.071	11.129	6.080
	Humed	22.594	29.918	26.283	2.600	1.163	9.893	7.324
	D.A	1.347	1.535	1.454	0.075	0.033	5.144	0.188
	D.R	2.451	2.609	2.543	0.057	0.026	2.25	0.158
	Poros	40.564	45.516	43.747	2.250	1.006	5.144	4.952
	CH	0.110	3.068	1.337	1.404	0.628	105.035	2.958
	EST EST	1.992	3.552	2.979	0.615	0.275	20.648	1.560

	Saturación	31.824	38.106	34.941	2.481	1.109	7.099	6.282
	THS 0,1	27.663	33.158	30.642	2.121	0.949	6.923	5.495
	THS 0,3	26.570	30.347	28.820	1.759	0.787	6.104	3.777
	THS 1,5	25.971	29.678	28.222	1.714	0.767	6.074	3.707
	THS 3	24.175	28.025	26.602	1.754	0.785	6.595	3.850
	THS 5	22.140	27.970	26.020	2.452	1.097	9.424	5.830
<b>Pasto Llanero + maní</b>	THS 15	22.030	27.020	25.148	2.095	0.937	8.332	4.990
	Humed	25.129	30.380	27.775	2.285	1.022	8.225	5.251
	D.A	1.392	1.546	1.460	0.056	0.025	3.862	0.154
	D.R	2.445	2.558	2.506	0.051	0.023	2.046	0.113
	Poros	40.752	44.702	43.481	1.602	0.716	3.684	3.950
	CH	0.219	2.630	0.833	1.009	0.451	121.216	2.411
	EST EST	4.783	6.068	5.192	0.507	0.227	9.762	1.285
	Saturación	25.598	31.320	29.569	2.326	1.04	7.866	5.722
	THS 0,1	23.746	28.411	26.785	1.838	0.822	6.863	4.665
	THS 0,3	22.701	27.450	25.525	1.802	0.806	7.059	4.749
	THS 1,5	21.382	26.053	24.107	1.795	0.803	7.445	4.671
	THS 3	21.018	25.557	23.399	1.669	0.746	7.131	4.539
	THS 5	20.550	25.120	22.952	1.701	0.761	7.41	4.570
<b>Pasto llanero</b>	THS 15	19.750	24.270	21.992	1.685	0.753	7.66	4.520
	Humed	24.362	29.000	26.147	1.713	0.766	6.551	4.638
	D.A	1.447	1.557	1.498	0.043	0.019	2.87	0.110
	D.R	2.537	2.677	2.587	0.053	0.024	2.048	0.140
	Poros	39.365	43.979	42.059	2.157	0.964	5.127	4.614
	CH	0.000	1.534	0.745	0.631	0.282	84.734	1.534
	EST EST	2.581	5.135	4.287	0.996	0.446	23.243	2.554
	Saturación	26.524	32.392	30.018	2.260	1.011	7.53	5.868
	THS 0,1	24.502	29.362	27.755	2.116	0.946	7.624	4.860
	THS 0,3	21.623	24.447	23.408	1.212	0.542	5.179	2.824
	THS 1,5	19.731	22.189	21.010	1.102	0.493	5.243	2.458
	THS 3	19.134	21.301	20.265	0.944	0.422	4.659	2.167
	THS 5	18.210	20.030	19.000	0.836	0.374	4.401	1.820
<b>Pasto mulato II</b>	THS 15	16.500	18.250	17.234	0.754	0.337	4.376	1.750
	Humed	19.940	22.783	21.311	1.136	0.508	5.329	2.843
	D.A	1.515	1.617	1.591	0.043	0.019	2.726	0.102
	D.R	2.615	2.684	2.657	0.027	0.012	1.031	0.069
	Poros	39.352	42.063	40.114	1.105	0.494	2.756	2.711
	CH	0.614	7.451	2.174	2.958	1.323	136.059	6.837
	EST EST	3.853	7.206	5.239	1.436	0.642	27.413	3.353
	Saturación	26.178	31.981	30.233	2.490	1.113	8.235	5.803
	THS 0,1	23.139	27.964	26.056	2.002	0.895	7.682	4.825
	THS 0,3	22.139	25.677	23.935	1.368	0.612	5.715	3.538
	THS 1,5	20.517	22.241	21.388	0.652	0.292	3.049	1.724
	THS 3	19.991	21.805	20.910	0.723	0.323	3.457	1.814
	THS 5	19.350	20.750	19.996	0.572	0.256	2.861	1.400
<b>Cítricos</b>	THS 15	17.730	19.200	18.608	0.611	0.273	3.283	1.470
	Humed	20.338	23.323	21.440	1.136	0.508	5.297	2.985
	D.A	1.321	1.611	1.524	0.117	0.053	7.709	0.290
	D.R	2.579	2.656	2.616	0.034	0.015	1.286	0.077
	Poros	37.545	49.943	41.723	4.953	2.215	11.87	12.398
	CH	0.110	2.191	1.118	0.799	0.357	71.49	2.081
	EST EST	2.264	3.985	3.171	0.773	0.346	24.372	1.721

## VARIABLES QUÍMICAS

Sistema	Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Error estándar	Coefficiente de variación	Rango
Palma30	pH	4.170	4.550	4.286	0.156	0.070	3.647	0.380
	CO	1.269	2.783	1.776	0.635	0.284	35.733	1.514
	Ca	0.509	3.724	1.417	1.315	0.588	92.745	3.215
	K	0.133	0.226	0.162	0.037	0.017	23.024	0.093
	Mg	0.098	0.642	0.292	0.216	0.096	73.990	0.544
	Na	0.039	0.100	0.058	0.024	0.011	41.901	0.061
	Al	1.562	4.851	3.966	1.389	0.621	35.024	3.289
	CIC	8.703	13.866	10.972	2.386	1.067	21.745	5.163
	P	0.700	3.035	1.712	0.999	0.447	58.367	2.335
	Cu	0.190	0.637	0.422	0.160	0.071	37.827	0.447
	Fe	112.167	409.975	242.861	117.670	52.624	48.452	297.808
	Mn	1.854	16.247	7.487	7.467	3.340	99.741	14.393
	Zn	0.378	0.827	0.575	0.178	0.079	30.923	0.449
	B	0.144	0.350	0.246	0.084	0.038	34.142	0.206
Palma18	pH	4.500	5.490	4.878	0.380	0.170	7.800	0.990
	CO	1.500	2.202	1.724	0.278	0.124	16.109	0.702
	Ca	0.890	4.305	2.167	1.647	0.736	76.002	3.415
	K	0.083	0.146	0.114	0.028	0.012	24.325	0.063
	Mg	0.149	0.631	0.301	0.195	0.087	64.865	0.482
	Na	0.047	0.084	0.063	0.014	0.006	22.947	0.037
	Al	0.000	3.779	2.725	1.547	0.692	56.767	3.779
	CIC	8.890	11.867	10.064	1.202	0.538	11.944	2.977
	P	1.519	31.905	9.212	12.803	5.725	138.980	30.386
	Cu	0.255	0.347	0.304	0.041	0.018	13.346	0.092
	Fe	77.098	123.795	94.528	18.814	8.414	19.903	46.697
	Mn	1.006	5.207	2.376	1.841	0.823	77.470	4.201
	Zn	0.216	0.709	0.377	0.195	0.087	51.739	0.493
	B	0.169	0.310	0.218	0.060	0.027	27.715	0.141
Pastura degradada	pH	4.250	4.630	4.440	0.172	0.077	3.868	0.380
	CO	1.461	2.237	1.841	0.364	0.163	19.744	0.776
	Ca	0.297	0.381	0.345	0.036	0.016	10.413	0.084
	K	0.050	0.093	0.074	0.019	0.008	25.538	0.043
	Mg	0.044	0.088	0.065	0.017	0.007	25.894	0.044
	Na	0.048	0.054	0.051	0.002	0.001	4.159	0.006
	Al	3.633	4.258	3.968	0.267	0.119	6.718	0.625
	CIC	9.536	12.679	10.985	1.423	0.637	12.959	3.143
	P	0.700	1.246	0.826	0.238	0.106	28.739	0.546
	Cu	0.342	0.559	0.446	0.082	0.036	18.257	0.217
	Fe	127.312	182.933	152.587	27.085	12.113	17.751	55.621
	Mn	1.380	3.607	2.568	1.007	0.450	39.200	2.227
	Zn	0.365	0.591	0.424	0.095	0.043	22.510	0.226
	B	0.127	0.164	0.142	0.016	0.007	10.998	0.037

<b>Bosque Plantado</b>	<b>pH</b>	4.030	4.600	4.310	0.219	0.098	5.089	0.570
	<b>CO</b>	1.080	1.294	1.190	0.088	0.039	7.395	0.214
	<b>Ca</b>	0.435	0.707	0.514	0.113	0.051	22.006	0.272
	<b>K</b>	0.051	0.090	0.068	0.015	0.007	21.612	0.039
	<b>Mg</b>	0.070	0.325	0.138	0.105	0.047	75.927	0.255
	<b>Na</b>	0.023	0.102	0.057	0.029	0.013	50.532	0.079
	<b>Al</b>	2.873	4.237	3.654	0.519	0.232	14.191	1.364
	<b>CIC</b>	7.433	11.677	9.484	1.926	0.861	20.309	4.244
	<b>P</b>	0.700	2.939	1.279	0.951	0.425	74.398	2.239
	<b>Cu</b>	0.513	0.827	0.663	0.136	0.061	20.547	0.314
	<b>Fe</b>	58.443	174.523	104.447	51.285	22.935	49.101	116.080
	<b>Mn</b>	2.596	8.741	5.796	2.560	1.145	44.173	6.145
	<b>Zn</b>	0.320	1.173	0.658	0.336	0.150	51.128	0.853
	<b>B</b>	0.120	0.192	0.163	0.027	0.012	16.564	0.072
<b>Piña</b>	<b>pH</b>	4.270	4.770	4.536	0.180	0.080	3.961	0.500
	<b>CO</b>	1.041	1.668	1.457	0.243	0.109	16.674	0.627
	<b>Ca</b>	0.303	0.757	0.515	0.195	0.087	37.860	0.454
	<b>K</b>	0.049	0.072	0.064	0.009	0.004	13.932	0.023
	<b>Mg</b>	0.032	0.103	0.069	0.029	0.013	42.856	0.071
	<b>Na</b>	0.024	0.044	0.034	0.008	0.004	24.586	0.020
	<b>Al</b>	2.540	3.737	3.283	0.446	0.199	13.580	1.197
	<b>CIC</b>	11.111	14.381	12.549	1.405	0.629	11.200	3.270
	<b>P</b>	10.498	88.615	32.304	32.208	14.404	99.700	78.117
	<b>Cu</b>	0.430	0.662	0.548	0.103	0.046	18.859	0.232
	<b>Fe</b>	49.066	138.014	92.890	38.996	17.439	41.981	88.948
	<b>Mn</b>	0.395	0.979	0.672	0.278	0.124	41.315	0.584
	<b>Zn</b>	0.396	2.596	1.271	0.815	0.365	64.137	2.200
	<b>B</b>	0.226	0.341	0.279	0.045	0.020	16.288	0.115
<b>Cultivos transitorios</b>	<b>pH</b>	4.790	5.880	5.170	0.440	0.197	8.516	1.090
	<b>CO</b>	1.136	1.802	1.431	0.269	0.120	18.795	0.666
	<b>Ca</b>	0.418	4.179	1.989	1.394	0.623	70.085	3.761
	<b>K</b>	0.051	0.148	0.091	0.037	0.017	41.369	0.097
	<b>Mg</b>	0.067	1.164	0.510	0.410	0.183	80.346	1.097
	<b>Na</b>	0.046	0.140	0.076	0.039	0.018	51.820	0.094
	<b>Al</b>	0.000	2.946	1.651	1.068	0.478	64.714	2.946
	<b>CIC</b>	9.350	13.207	11.358	1.759	0.787	15.488	3.857
	<b>P</b>	3.993	39.377	23.744	13.016	5.821	54.819	35.384
	<b>Cu</b>	0.284	0.497	0.428	0.090	0.040	20.972	0.213
	<b>Fe</b>	34.796	68.973	53.514	13.058	5.840	24.401	34.177
	<b>Mn</b>	0.189	1.213	0.558	0.389	0.174	69.643	1.024
	<b>Zn</b>	0.303	2.161	1.133	0.702	0.314	61.944	1.858
	<b>B</b>	0.169	0.271	0.238	0.041	0.018	17.166	0.102
<b>Caucho</b>	<b>pH</b>	4.490	4.820	4.646	0.135	0.060	2.906	0.330
	<b>CO</b>	1.416	1.531	1.475	0.047	0.021	3.156	0.115
	<b>Ca</b>	0.379	0.517	0.436	0.073	0.033	16.714	0.138
	<b>K</b>	0.043	0.064	0.056	0.008	0.004	14.972	0.021
	<b>Mg</b>	0.053	0.162	0.084	0.045	0.020	53.189	0.109
	<b>Na</b>	0.049	0.285	0.138	0.104	0.046	75.083	0.236
	<b>Al</b>	2.342	3.331	3.026	0.421	0.188	13.922	0.989
	<b>CIC</b>	6.532	14.612	11.209	3.542	1.584	31.598	8.080
	<b>P</b>	2.093	18.357	7.264	6.383	2.855	87.876	16.264
	<b>Cu</b>	0.249	0.523	0.402	0.107	0.048	26.622	0.274
	<b>Fe</b>	48.813	119.727	77.630	27.726	12.400	35.716	70.914
	<b>Mn</b>	0.845	2.335	1.258	0.640	0.286	50.872	1.490
	<b>Zn</b>	0.174	0.671	0.459	0.222	0.099	48.355	0.497
	<b>B</b>	0.187	0.308	0.259	0.046	0.021	17.877	0.121

	pH	4.620	4.730	4.664	0.044	0.020	0.942	0.110
	CO	1.321	1.862	1.592	0.209	0.094	13.134	0.541
	Ca	0.537	0.651	0.597	0.048	0.021	7.973	0.114
	K	0.066	0.515	0.183	0.189	0.084	103.293	0.449
	Mg	0.062	0.089	0.074	0.011	0.005	14.773	0.027
	Na	0.148	0.220	0.183	0.034	0.015	18.538	0.072
Pasto llanero + maní	Al	4.118	4.704	4.416	0.229	0.102	5.175	0.586
	CIC	8.257	11.133	9.317	1.162	0.520	12.471	2.876
	P	1.648	2.698	2.273	0.397	0.178	17.463	1.050
	Cu	0.692	0.877	0.790	0.080	0.036	10.070	0.185
	Fe	125.449	258.131	172.193	56.033	25.059	32.541	132.682
	Mn	1.546	3.474	2.296	0.717	0.320	31.209	1.928
	Zn	0.297	0.790	0.505	0.194	0.087	38.308	0.493
	B	0.120	0.179	0.157	0.026	0.011	16.239	0.059
	pH	4.680	4.880	4.804	0.076	0.034	1.589	0.200
	CO	1.177	2.020	1.572	0.300	0.134	19.062	0.843
	Ca	0.646	0.885	0.776	0.098	0.044	12.669	0.239
	K	0.055	0.123	0.090	0.026	0.011	28.502	0.068
	Mg	0.051	0.093	0.070	0.016	0.007	22.419	0.042
	Na	0.147	0.218	0.168	0.029	0.013	17.166	0.071
Pasto llanero	Al	2.650	4.354	3.179	0.683	0.305	21.471	1.704
	CIC	8.175	8.997	8.483	0.342	0.153	4.026	0.822
	P	1.816	6.271	3.453	1.749	0.782	50.650	4.455
	Cu	0.717	0.961	0.886	0.102	0.046	11.572	0.244
	Fe	81.018	256.231	151.135	65.785	29.420	43.527	175.213
	Mn	1.369	6.250	4.656	1.935	0.865	41.566	4.881
	Zn	0.176	0.595	0.420	0.176	0.079	42.034	0.419
	B	0.165	0.250	0.184	0.037	0.017	20.172	0.085
	pH	5.050	5.390	5.194	0.142	0.063	2.728	0.340
	CO	1.371	1.611	1.515	0.091	0.040	5.975	0.240
	Ca	0.882	2.425	1.530	0.673	0.301	43.997	1.543
	K	0.055	0.109	0.084	0.021	0.009	25.000	0.054
	Mg	0.187	1.129	0.541	0.371	0.166	68.584	0.942
	Na	0.014	0.044	0.022	0.012	0.006	55.936	0.030
Pasto mulato II	Al	0.909	3.063	2.152	0.882	0.395	40.993	2.154
	CIC	8.821	10.169	9.487	0.496	0.222	5.228	1.348
	P	4.993	24.047	12.510	8.752	3.914	69.955	19.054
	Cu	0.711	0.852	0.786	0.056	0.025	7.098	0.141
	Fe	49.476	116.881	91.259	26.619	11.904	29.168	67.405
	Mn	0.586	3.621	1.806	1.120	0.501	62.022	3.035
	Zn	0.391	1.079	0.657	0.273	0.122	41.535	0.688
	B	0.120	0.341	0.262	0.084	0.037	32.002	0.221
	pH	4.300	4.810	4.554	0.209	0.094	4.597	0.510
	CO	1.489	1.975	1.717	0.196	0.088	11.407	0.486
	Ca	0.333	1.429	0.882	0.484	0.217	54.939	1.096
	K	0.044	0.196	0.114	0.073	0.033	64.127	0.152
	Mg	0.037	0.519	0.298	0.220	0.099	74.038	0.482
	Na	0.145	0.366	0.195	0.096	0.043	49.330	0.221
Cítricos	Al	2.475	3.502	2.937	0.440	0.197	14.970	1.027
	CIC	7.518	12.242	9.202	1.814	0.811	19.712	4.724
	P	4.185	96.221	44.405	43.318	19.373	97.554	92.036
	Cu	0.422	0.864	0.676	0.160	0.071	23.654	0.442
	Fe	64.185	214.078	146.484	60.185	26.915	41.086	149.893
	Mn	1.367	4.130	2.499	1.121	0.501	44.865	2.763
	Zn	0.192	3.452	1.475	1.508	0.674	102.246	3.260
	B	0.195	0.345	0.262	0.057	0.025	21.654	0.150

## ANEXO C

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CORRELACIÓN

#### Variables Físicas

	Saturación	THS 0.3	THS 15.0	Densidad Aparente	Est Est	Arena	Limo	Arcilla	RP(0.0- 2.5)	RP(5.0- 15.0)
<b>THS 0.3</b>	0.704 <b>0.0001</b>	1.000								
<b>THS 15.0</b>	0.552 <b>0.0001</b>	0.915 <b>0.0001</b>	1.000							
<b>Densidad Aparente</b>	-0.680 <b>0.0001</b>	-0.542 <b>0.0001</b>	-0.488 <b>0.0002</b>	1.000						
<b>Est Est</b>	0.158 0.249	0.455 <b>0.0005</b>	0.368 <b>0.0056</b>	-0.204 0.1346	1.000					
<b>Arena</b>	-0.126 0.36	-0.377 <b>0.0046</b>	-0.304 <b>0.0242</b>	0.060 0.6612	-0.206 0.1306	1.000				
<b>Limo</b>	0.264 0.0519	0.501 <b>0.0001</b>	0.449 <b>0.0006</b>	-0.278 <b>0.0398</b>	0.411 <b>0.0018</b>	-0.837 <b>0.0001</b>	1.000			
<b>Arcilla</b>	-0.134 0.3281	-0.006 0.9639	-0.068 0.6237	0.273 <b>0.044</b>	-0.192 0.1612	-0.660 <b>0.0001</b>	0.142 0.3018	1.000		
<b>RP(0.0-2.5)</b>	-0.101 0.4634	0.087 0.5254	0.096 0.4852	0.101 0.4629	0.577 <b>0.0001</b>	0.169 0.2164	0.002 0.9899	-0.309 <b>0.0217</b>	1.000	
<b>RP(5.0-15.0)</b>	-0.234 0.085	-0.071 0.6042	-0.030 0.8275	0.265 0.0505	0.311 <b>0.021</b>	0.391 <b>0.0032</b>	-0.296 <b>0.0285</b>	-0.301 <b>0.0253</b>	0.551 <b>0.0001</b>	1.000
<b>RP(17.5- 30.0)</b>	-0.311 <b>0.0207</b>	-0.368 <b>0.0057</b>	-0.272 <b>0.0445</b>	0.394 <b>0.0029</b>	-0.172 0.2093	0.403 <b>0.0023</b>	-0.460 <b>0.0004</b>	-0.098 0.4759	0.183 0.18	0.652 <b>0.0001</b>

## Variables Químicas

	pH	CO	Ca	Mg	Al	Fe
pH	1.000	0.003 0.982	0.665 <.0001	0.623 <.0001	-0.766 <.0001	-0.408 0.002
CO		1.000	0.354 0.008	0.190 0.165	-0.022 0.872	0.662 <.0001
Ca			1.000	0.767 <.0001	-0.701 <.0001	0.035 0.797
Mg				1.000	-0.637 <.0001	-0.044 0.749
Al					1.000	0.306 0.023
Fe						1.000