

**FRACCIONAMIENTO DEL FÓSFORO Y SU CORRELACIÓN CON  
LA MATERIA ORGÁNICA Y OTRAS PROPIEDADES DE  
DOS SUELOS DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA**

**LUISA MARIELA MARQUÍNEZ YUNDA  
SANDRA FAISULER POTOSÍ RODRIGUEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
POPAYÁN  
2006**

**FRACCIONAMIENTO DEL FÓSFORO Y SU CORRELACIÓN CON  
LA MATERIA ORGÁNICA Y OTRAS PROPIEDADES DE  
DOS SUELOS DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA**

**LUISA MARIELA MARQUÍNEZ YUNDA  
SANDRA FAISULER POTOSÍ RODRIGUEZ**

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial  
para optar el título de Químico**

**Directora: M.Sc. ISABEL BRAVO REALPE**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
POPAYÁN  
2006**

## Nota de Aceptación

---

---

---

Director

---

Isabel Bravo Realpe  
M.Sc.

Jurado

---

Maite del Pilar Rada  
Doctor

Jurado

---

Edier Pérez  
Doctor

**Fecha de sustentación: Popayán, 4 de Julio de 2006**

*Ha sido el omnipotente, quien ha permitido que la sabiduría dirija y guíe nuestros pasos.*

*Ha sido el todopoderoso, quien ha iluminado nuestro sendero cuando más oscuro ha estado,*

*Ha sido el creador de todas las cosas, el que nos ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de*

*caer hemos estado; por ello, con toda la humildad que de nuestro corazón puede emanar,*

*dedicamos primeramente nuestro trabajo a Dios.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A nuestros padres Carlos y Naime, Oswaldo y Adriana por su inmenso amor, comprensión, apoyo y por creer en nosotras.*

*A nuestros hermanos por su cariño incondicional.*

*A nuestros hijos quienes han alegrado nuestro corazón.*

*A Luis y Ricardo por su amor y apoyo.*

*A nuestros amigos: Cristina, Diana, Mara, Zully y Alex, por todas las penas y alegrías vividas juntos, gracias por su amistad.*

*A nuestra Familia quienes nos han entregado su amor y apoyo siempre.*

*Estamos profundamente agradecidas con nuestra Directora, Isabel Bravo, por su paciencia, apoyo, dirección y entrega, a la profesora Maite y al profesor Edier por el tiempo y dedicación, y a nuestros profesores que ayudaron en nuestra formación.*

*A nuestros compañeros del grupo de Agroquímica, por su amistad y por que siempre estuvieron dispuestos a colaborarnos.*

*A nuestros compañeros de carrera por la amistad que nos brindaron.*

*A todas las personas que creyeron en nosotras...*

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	12
<b>1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	13
<b>2 OBJETIVOS</b>	14
<b>3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	15
<b>3.1 SUELOS ANDISOLES</b>	15
<b>3.2 EL FÓSFORO</b>	16
3.2.1 <i>Formas de fósforo en el suelo</i>	16
3.2.1.1 Fosfatos inorgánicos	17
➤ Fosfatos insolubles de la roca madre	17
➤ Fosfatos precipitados o en forma de compuestos inorgánicos poco solubles	17
3.2.1.2 Fosfatos orgánicos	18
➤ Fosfatos de inositol	19
➤ Ácidos nucleicos	19
➤ Fosfolípidos	20
➤ Fosfatos metabólicos	20
➤ Fosfoproteínas	21
3.2.2 <i>Transformaciones químicas del fósforo en el suelo</i>	21
3.2.3 <i>Fijación de fósforo</i>	22
3.2.3.1 Mecanismos de precipitación de fosfatos de calcio	24
3.2.3.2 Adsorción superficial	25
➤ Adsorción de fósforo por minerales arcillosos	25
➤ Adsorción de fósforo por compuestos de hierro y aluminio	26
➤ Adsorción de fósforo por materiales amorfos tipo alófono	27
3.2.3.3 Sustitución isomórfica	27
3.2.4 <i>Fraccionamiento de fósforo</i>	28
<b>3.3 MATERIA ORGÁNICA</b>	29
3.3.1 <i>Composición general de la materia orgánica del suelo</i>	29

➤	Relación E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub>	30
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>UBICACIÓN GEOGRÁFICA</b>	<b>31</b>
<b>4.2</b>	<b>TOMA DE MUESTRAS</b>	<b>31</b>
<b>4.3</b>	<b>CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO</b>	<b>31</b>
4.3.1	<i>Análisis físico</i>	32
➤	Humedad	32
➤	Densidad real	32
➤	Textura	32
4.3.2	<i>Análisis químico</i>	33
➤	pH	33
➤	Acidez intercambiable	33
➤	Materia orgánica	33
➤	Determinación del nitrógeno por el método de Kjeldahl	34
➤	Determinación de fósforo disponible	35
➤	Determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC)	35
➤	Determinación de las bases intercambiables	35
<b>4.4</b>	<b>FRACCIONAMIENTO DE MATERIA ORGÁNICA</b>	<b>36</b>
4.4.1	<i>Método granulométrico</i>	36
4.4.2	<i>Método de extracción y valoración de sustancias húmicas</i>	36
4.4.2.1	Evaluación del extracto húmico total	36
4.4.2.2	Evaluación del grado de humificación de la materia orgánica de los suelos	39
➤	Índice de humificación	39
➤	Relación E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub>	39
<b>4.5</b>	<b>FRACCIONAMIENTO DE FÓSFORO</b>	<b>39</b>
<b>4.6</b>	<b>CORRELACIÓN ENTRE LA MATERIA ORGÁNICA, LAS FRACCIONES DE FÓSFORO Y OTRAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS</b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>45</b>
<b>5.1</b>	<b>ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS</b>	<b>45</b>
<b>5.2</b>	<b>FRACCIONAMIENTO DE FÓSFORO</b>	<b>51</b>
5.2.1	<i>Fracciones de fósforo obtenidas por la extracción secuencial para el suelo No 1</i>	56
5.2.2	<i>Fracciones de fósforo obtenidas por la extracción secuencial para el suelo No 2</i>	60
<b>5.3</b>	<b>FRACCIONAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA</b>	<b>67</b>
5.3.1	<i>Separación de la materia orgánica humificada MOH de la materia orgánica fresca MOF</i>	67

5.3.2	<i>Extracción y valoración de las sustancias húmicas y del extracto húmico total</i>	68
5.3.2.1	Evaluación del grado de humificación	69
➤	Índice de humificación HR1	69
➤	Relación E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub>	70
5.4	<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>	71
6	<b>CONCLUSIONES</b>	77
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	79
	<b>ANEXOS</b>	83

## LISTA DE TABLAS

		Pág.
<b>Tabla 1</b>	Principales formas de fosfatos inorgánicos	17
<b>Tabla 2</b>	Denominación de las fracciones de fósforo	40
<b>Tabla 3</b>	Análisis físico y químico del suelo No 1	47
<b>Tabla 4</b>	Análisis físico y químico del suelo No 2	49
<b>Tabla 5</b>	Concentración de las diferentes fracciones de fósforo del suelo No 1	56
<b>Tabla 6</b>	Concentración de las diferentes fracciones de fósforo del suelo No 2	60
<b>Tabla 7</b>	Contenidos de MOH y MOF para los suelos	67
<b>Tabla 8</b>	Fraccionamiento de las sustancias húmicas y determinación del extracto húmico total para los suelos	68
<b>Tabla 9</b>	Resultados de índices de humificación de la MO de los suelos	69
<b>Tabla 10</b>	Relación $E_4/E_6$ para las fracciones de la materia orgánica humificada de los suelos	70

## LISTA DE FIGURAS

		<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b>	Estructura del hexafosfato de inositol	19
<b>Figura 2.</b>	Representación de los ácidos nucleicos	20
<b>Figura 3.</b>	Fórmula general de los fosfolípidos	20
<b>Figura 4.</b>	Estructura de la lecitina	21
<b>Figura 5.</b>	Relación entre la concentración relativa de iones fosfato y el pH	22
<b>Figura 6.</b>	Adsorción de fósforo en minerales de arcilla 1:1	26
<b>Figura 7.</b>	Reacción de adsorción de fósforo sobre minerales de hierro	27
<b>Figura 8.</b>	Diagrama de la Separación Granulométrica	37
<b>Figura 9.</b>	Diagrama de la Marcha analítica para la caracterización de la fracción húmica en materiales orgánicos.	38
<b>Figura 10.</b>	Diagrama para el Fraccionamiento de fósforo	41
<b>Figura 11.</b>	Diagrama para la Determinación de fósforo soluble en reductante	43
<b>Figura 12.</b>	Diagrama de Determinación de fósforo orgánico	44
<b>Figura 13.</b>	Diagrama de Determinación de fósforo Total	44
<b>Figura 14.</b>	Reacción del aluminio con los grupos carboxílicos y fenólicos del humus	46
<b>Figura 15.</b>	Estructura de algunos fosfatos ocluidos	55
<b>Figura 16.</b>	Resultados del contenido de fósforo en cada una de las fracciones suelo No. 1	57
<b>Figura 17.</b>	Relación entre la solubilidad de los fosfatos del suelo y el pH	59
<b>Figura 18.</b>	Resultados del contenido de fósforo en cada una de las fracciones del suelo No. 2	61
<b>Figura 19.</b>	Espectro IR del residuo de la digestión del fósforo total para el suelo No. 1	63
<b>Figura 20.</b>	Espectro IR del residuo de la digestión del fósforo total para el suelo No. 2	65
<b>Figura 21.</b>	Microfotografía en microscopía electrónica de transmisión del residuo de la digestión del fósforo total para el suelo No. 2	66
<b>Figura 22.</b>	Comparación de la relación C/N de los suelos	72
<b>Figura 23.</b>	Comparación del pH de los suelos	73
<b>Figura 24.</b>	Comparación del aluminio intercambiable de los suelos	73
<b>Figura 25.</b>	Comparación del porcentaje de arcilla de los suelos	73

<b>Figura 26.</b>	Comparación del porcentaje de saturación de aluminio de los suelos	74
<b>Figura 27.</b>	Comparación del índice de humificación de los suelos	74
<b>Figura 28.</b>	Comparación de carbono del extracto húmico total de los suelos	74
<b>Figura 29.</b>	Comparación del fósforo disponible de los suelos	74
<b>Figura 30.</b>	Comparación del fósforo orgánico de los suelos	75
<b>Figura 31.</b>	Comparación del fósforo soluble de los suelos	75
<b>Figura 32.</b>	Comparación del fósforo total de los suelos	75
<b>Figura 33.</b>	Comparación del fósforo unido al aluminio superficial de los suelos	75
<b>Figura 34.</b>	Comparación del fósforo unido al calcio de los suelos	76
<b>Figura 35.</b>	Comparación del fósforo unido al hierro superficial de los suelos	76
<b>Figura 36.</b>	Comparación del fósforo unido al hierro y al aluminio más ocluido de los suelos	76
<b>Figura 37.</b>	Comparación del fósforo unido al hierro y al aluminio ocluidos de los suelos	76

## ANEXO

		<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b>	Correlación estadística de los suelos	83

## LISTA DE ACRÓNIMOS

**AF:** Ácidos Fúlvicos

**AH:** Ácidos Húmicos

**Al:** Aluminio

**Ca:** Calcio

**Ca/Mg:** Relación Calcio / Magnesio

**CIC:** Capacidad de Intercambio Catiónico

**CICE:** Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva

**CRC:** Corporación Autónoma Regional del Cauca

**C/N:** Relación Carbono Nitrógeno

**EHT:** Extracto húmico total

**Fe:** Hierro

**FF:** Fracción Fúlvica

**HR1:** Índice de humificación

**IR:** Infrarrojo

**MOF:** Materia orgánica fresca

**MOH:** Materia orgánica humificada

**P:** Fósforo

## RESUMEN

El fósforo desempeña un papel importante en la nutrición de las plantas, considerándose junto al nitrógeno y al potasio, como uno de los elementos básicos para el normal desarrollo de los cultivos, ya que ocupa un lugar clave en el metabolismo de las plantas, siendo extraído por éstas en cantidades importantes. En suelos ácidos como los del departamento del Cauca, este nutriente presenta problemas de disponibilidad, ya que se puede adsorber aniómicamente, sustituirse isomórficamente o precipitarse con el hierro ó el aluminio presente en este tipo de suelos.

La materia orgánica en un suelo, contribuye a aumentar ó a disminuir la disponibilidad de fósforo, dependiendo del grado de humificación ó mineralización.

Se llevo a cabo la investigación en un suelo de la vereda La Aurelia del municipio de Cajibío con un alto contenido de materia orgánica (suelo No. 1) y otro localizado en la vereda El Cabuyo municipio de Popayán con un bajo contenido de materia orgánica (suelo No. 2) en estos se evaluaron las diferentes fracciones de fósforo, empleando el método de extracción secuencial de *Chang y Jackson* (1) reportado por *López y García* (2) y posteriormente se correlacionaron con las fracciones de materia orgánica obtenidas mediante la metodología estandarizada en el laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca, *Muñoz* (3).

Los resultados muestran que la abundancia relativa de las varias formas de fósforo en el suelo No. 1 es: P orgánico > P unido al Fe superficial > P unido al Fe y Al ocluido > P unido al Fe y al Al más ocluido > P unido al Al superficial > P unido al Ca > P soluble; para el suelo No. 2 la secuencia es: P unido al Fe y Al ocluidos > P orgánico > P unido al Fe y al Al más ocluido > P unido al Fe superficial > P unido al Ca > P unido al Al superficial > P soluble. Además se obtuvo una diferencia altamente significativa entre el % MO, relación C/N, HR1 y %EHT de los dos tipos de suelo siendo significativamente superiores en el suelo No. 1, parámetros que influyen fuertemente las diferentes fracciones de fósforo de los dos tipos de suelo, encontrándose que en el suelo No. 1 se presentaron valores significativamente superiores en todos los contenidos de fósforo en las diferentes fracciones a excepción del fósforo unido al calcio.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el departamento del Cauca, la explotación forestal, agrícola y ganadera se ve limitada por la infertilidad de sus suelos, caracterizados por la acidez, la cual varía desde fuerte hasta muy fuerte, ocasionando como consecuencia bajos contenidos de fósforo aprovechables, ya que estos suelos adsorben y fijan geoquímicamente este elemento sin dificultad provocando así, su deficiencia.

De otra parte, en este tipo de suelos se presentan altas concentraciones de aluminio en diferentes formas, el cual produce toxicidad no solamente a las plantas sino al suelo, puesto que este elemento genera el incremento de la acidez, y por lo tanto, del intercambio aniónico, afectando así la bioestructura del suelo e incrementando de esta manera la retención del fósforo, pasándolo a fracciones no disponibles para la planta.

No se conocen en este tipo de suelos cuáles son esas fracciones del fósforo ni en qué cantidad están, por esto no se pueden solucionar efectivamente los problemas de deficiencia de este nutriente. Para solucionar dicha deficiencia, los técnicos se limitan a recomendar la aplicación de altas y repetidas dosis de fertilizantes minerales que producen más acidez al suelo. Otra forma de solucionar tal deficiencia, es recomendar también la aplicación de altas dosis de abonos orgánicos, sin embargo, no existe un control químico que permita evaluar el grado de humificación de ellos, siendo generalmente bajo; de esta manera, su aplicación causa daño al suelo por su alto contenido de fracción fúlvica, la cual extrae a su vez más aluminio de los intersticios de las láminas de arcillas, provocando más acidez y más retención de fósforo.

La solución se encamina también al encalamiento fuerte con altas y repetidas dosis de calces que también afectan a la bioestructura del suelo y otras propiedades. Es por esto que se ve la necesidad de incrementar la disponibilidad de fósforo en el suelo con la ayuda de la materia orgánica con buen estado de humificación y así proteger al medio ambiente de los efectos perjudiciales del exceso de fertilizantes que, es necesario aplicar cuando hay deficiencia de este elemento.

El conocimiento de las distintas fracciones del fósforo y su relación con la materia orgánica, es el paso inicial para contribuir a la solución al menos parcial de este problema.

## **2. OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Obtener las diferentes fracciones de fósforo y valorar la materia orgánica presente en dos tipos de suelo, con el propósito de contribuir a la elucidación de la adsorción de este nutriente.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar física y químicamente dos suelos, uno de la región de Cajibío y otro del municipio de Popayán
- Evaluar las fracciones de fósforo: Disponible, soluble, fósforo unido al Al superficial, fósforo unido al Fe superficial, fósforo ocluido unido al Fe y Al, fósforo más ocluido unido al Fe y Al y fósforo unido al calcio, extraídas mediante el método secuencial de Chang y Jackson, además el fósforo orgánico y fósforo total, en los dos tipos de suelos.
- Extraer y Fraccionar la materia orgánica de los dos tipos de suelo
- Correlacionar las diferentes clases de materia orgánica obtenidas con las fracciones de fósforo presentes en los suelos de estudio.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El suelo es un sistema complejo en donde coexisten en estrecho equilibrio tres fases: Sólida, líquida y gaseosa.

La fase sólida de la mayoría de los suelos está constituida principalmente por sustancias inorgánicas de diferente composición química. Algunas de ellas son mezclas de compuestos a las que se denominan rocas, cuya meteorización conduce a los minerales primarios y secundarios formadores del suelo.

La fase líquida del suelo se define como una solución que posee equilibrio de electrolitos y que ocurre en condiciones de suelos no saturados por agua. Esta solución es de gran importancia para la nutrición de las plantas. En ella se encuentran presentes todos los nutrientes necesarios para los diferentes cultivos como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, cobre, cinc, hierro, manganeso, entre otros; también contiene moléculas orgánicas solubles de peso molecular reducido. Las concentraciones de estos elementos en la solución del suelo dependen de las propiedades físicas y químicas de este, como la presencia y solubilidad de sus componentes inorgánicos y orgánicos, su temperatura y la presión de los diferentes gases en su atmósfera.

La fase gaseosa varía bastante en los suelos y comúnmente ocupa volúmenes que oscilan de cero al 45% del volumen total de ellos. Sus componentes principales son los mismos que los del aire en la atmósfera: nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua y los gases inertes, *Fassbender y Bomemisza* (4).

#### 3.1 SUELOS ANDISOLES

Los Andisoles o Andosoles son suelos desaturados de insolubilización rápida de complejos organominerales, son ricos en alófanos y fuertemente ácidos. En Colombia están ampliamente distribuidos en la región Andina del país, especialmente en la cordillera central. En las cordilleras Occidental y Oriental también se presentan, pero comparativamente con la central, en menor proporción. Las características generales y dominantes del medio natural donde se presentan estos suelos están influenciadas por la presencia de cenizas

volcánicas, especialmente en aquellas zonas muy húmedas y pluviales, que constituyen pisos altitudinales que varían entre el Premontano (24°C) hasta el Montano (6-12°C) y donde los regímenes de humedad del suelo son muy altos. Los materiales orgánicos se presentan en cantidades muy altas (1,5-6% C.O). La erosividad varía de acuerdo con las cordilleras, predominando la media y alta en la Central y Occidental y las muy bajas en la Oriental.

Dentro de las características químicas, resaltan los valores de pH ácidos y fuertemente ácidos, las bajas saturaciones de bases, las altas capacidades de intercambio, la alta retención fosfórica, al igual que los valores altos en materiales orgánicos, con dominancia de compuestos de bajo grado de polimerización y abundantes huminas, *Muñoz (3)*.

### **3.2 EL FÓSFORO**

Entre los tres elementos principales (N, P, K), el fósforo es requerido por las plantas generalmente en menores cantidades; sin embargo, su estudio ha adquirido la mayor importancia a causa de la baja disponibilidad de este elemento en la mayoría de los suelos agrícolas del mundo, debido no sólo a que su contenido total es bajo, sino a las múltiples reacciones que ocurren en el suelo, llevándolo a formas no asimilables, *Garavito (5)*.

El fósforo es un elemento esencial para todas las formas de vida: Animal, vegetal y microbiano. Su contenido en los vegetales es de 0.5 – 1% de la materia seca en forma de fosfato ( $P_2O_5$ ). Participa en muchas fases del metabolismo celular ya que hace parte de estructuras como ácidos nucleicos: DNA y RNA moléculas fundamentales en el flujo de la información genética; del sistema ATP-ADP esencial para la transformación de energía en procesos catabólicos y anabólicos; de fosfolípidos moléculas constituyentes de las membranas biológicas y de varias proteínas y enzimas esenciales en el funcionamiento celular, *Giraldo (6)*.

#### **3.2.1 Formas del fósforo en el suelo**

El fosfato en la solución del suelo representa la fracción más pequeña, pero a la vez la más importante para la planta, debido a que son estos aniones disueltos los que ella absorbe.

Los fosfatos del suelo se pueden dividir en dos grandes grupos: **Inorgánicos** y **orgánicos**.

### 3.2.1.1. Fosfato inorgánico

Los iones hidrógeno del ácido fosfórico se reemplazan por cationes, formando sales, *Fassbender* y *Bomemisza* (4). Comprenden:

- **Fosfato insoluble de la roca madre (mineral primario)**, que representa una gran parte del fosfato total del suelo. En esta forma es completamente indisponible para la planta. Constituye una reserva a largo plazo, la cual solo puede volverse disponible mediante procesos de meteorización a través de lentas y prolongadas transformaciones físicas, químicas y biológicas, *Giraldo* (6).
- **Fosfato precipitado o en forma de compuestos inorgánicos poco solubles**. Cuyas principales formas se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Principales formas de fosfato inorgánico**

Fosfatos	Denominación	Composición	Características
<b>Calcio</b>	hidroxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ $\text{Ca}(\text{OH})_2$	mayor abundancia
	oxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ CaO	mayor abundancia
	fluorapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ CaF <sub>2</sub>	
	carbonatoapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ CaCO <sub>3</sub>	
	fosfato tricálcico	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	
<b>Hierro</b>	fosfato bicálcico	CaHPO <sub>4</sub>	mayor solubilidad
	fosfato monocálcico	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	mayor solubilidad
	vivianita	Fe <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 8H <sub>2</sub> O	
<b>Aluminio</b>	estrengita	FePO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	
	variscita	AlPO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	

*Adaptado de Tsai y Rosetto (7)*

En suelos ácidos predominan los fosfatos precipitados de hierro y aluminio, mientras que en suelos calizos, son los fosfatos de calcio en forma de apatita. En suelos de pH elevado, la actividad del calcio controla la solubilidad del fósforo. Las relaciones encontradas indican que el  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  de los fosfatos de calcio es insoluble en suelos alcalinos, pero soluble en medios ácidos, *Garavito* (5).

Los fosfatos de calcio comprenden una variedad de compuestos que varían en su solubilidad, desde relativamente solubles como monofosfatos y difosfatos de calcio presentes en cantidades pequeñas hasta las apatitas (hidroxi y fluoroapatitas) prácticamente insolubles. Los fosfatos de hierro y aluminio varían también ampliamente en solubilidad, dependiendo de la cantidad de fósforo presente. En los suelos ácidos es posible también la formación de sesquióxidos y sobre estos la formación de la estrengita y la variscita, *Giraldo* (6).

Entre los fosfatos inorgánicos se pueden distinguir formas químicamente bien definidas y cristalizadas, y otras no bien cristalizadas o amorfas, como los fosfatos adsorbidos y presentes en la solución del suelo.

Entre los fosfatos cristalinos encontramos los cálcicos, aluminicos y férricos; entre los primeros, son de importancia el fosfato monocálcico ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ), el fosfato dicálcico ( $\text{CaHPO}_4$ ), y sus formas hidratadas ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), las apatitas hidroxidadas ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ ) y sus variedades fluorada y carbónica. Entre los segundos se destacan: el fósforo aluminico (variscita,  $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y los fosfatos férricos o ferrosos (livianita  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ , y estrengita  $\text{Fe}_4\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Existen también fosfatos cristalinos complejos, derivados de la transformación de fertilizantes como taranakitas, fosfatos octacálcicos, gorceixita, cranealita y otros *Fassbender y Bomemisza* (4).

Por otro lado se deben considerar formas químicamente no bien definidas, no bien cristalizadas o amorfas, como los fosfatos adsorbidos al complejo coloidal y los ocluidos en los hidróxidos de Al, Fe y Mn a través de su proceso de cristalización y crecimiento. Estos fosfatos se denominan, generalmente, fosfatos ocluidos o inertes, *Fassbender y Bomemisza* (4).

### **3.2.1.2 Fosfato orgánico**

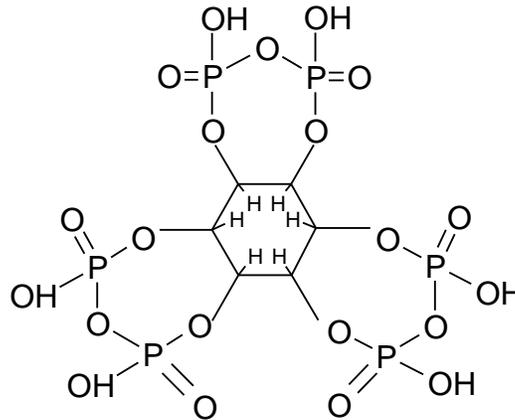
El nivel de fósforo orgánico en los suelos, puede generalmente variar entre 25 y 75%, en casos extremos, estos límites pueden extenderse hasta 3 y 85% del fósforo total. Estas variaciones en el contenido de fósforo orgánico dependen de

diversos factores tales como la temperatura, precipitación pluvial, acidez del suelo, grado de desarrollo, material parental y drenaje entre otros, *Giraldo* (6).

De acuerdo con la estructura química en la materia orgánica, existen cinco tipos principales de compuestos fosfatados:

- **Fosfatos de inositol.** Son moléculas resultantes de la esterificación del inositol con grupos fosfato. Estos compuestos representan entre un 30 y 80% del fósforo orgánico del suelo; el más común es el hexafosfato de inositol y su fórmula estructural se muestra en la figura 1.

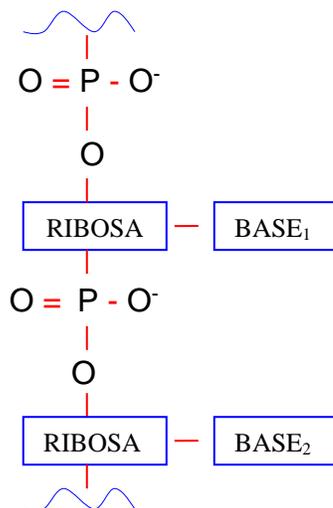
**Figura 1. Estructura del hexafosfato de inositol**



Los fosfatos de inositol son importantes componentes de granos de cereales en forma de fitatos de calcio y magnesio, denominados fitina. Los hexafosfatos de inositol encontrados en el suelo pueden ser también de origen microbial, puesto que varios microorganismos pueden sintetizar esta molécula. En las plantas pueden encontrarse además ésteres de inositol con uno a cinco fosfatos, aunque el hexafosfato es el más abundante *Giraldo* (6).

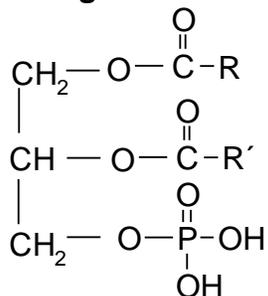
- **Ácidos nucleicos.** En los suelos los microorganismos sintetizan sus propios ácidos nucleicos a partir de pentosas, bases púricas, pirimidínicas y grupos fosfatos. Por acción de las fosfatasa, se libera fosfato al suelo. La participación de los ácidos nucleicos en el aporte de fósforo orgánico al suelo, puede llegar hasta un 65% del total del fósforo orgánico, aunque en general, el porcentaje de fósforo derivado de ácidos nucleicos no pasa de 3% como lo indican varios reportes. *Giraldo* (6). En la figura 2 se muestra una representación de los ácidos nucleicos.

**Figura 2. Representación de los ácidos nucleicos**



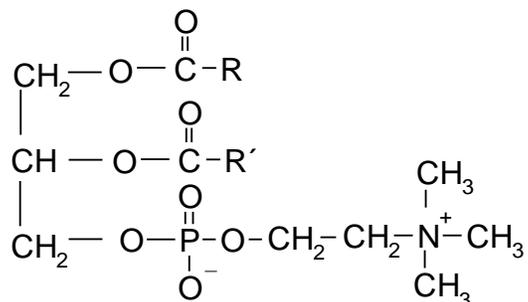
- **Fosfolípidos.** Son moléculas anfipáticas porque en su estructura poseen regiones no polares debidas a cadenas hidrocarbonadas de ácidos grasos y regiones polares de las que hace parte el grupo fosfato. La cantidad total de fosfolípidos en el suelo es en general menor de 5µg/g. Los fosfolípidos representan entre el 0.5 y el 7% del fósforo orgánico con un valor medio del 1%, *Giraldo* (6). Su fórmula general se relaciona en la figura 3.

**Figura 3. Fórmula general de los fosfolípidos**



- **Fosfatos metabólicos.** Como la lecitina, es una Fosfatidilcolina cuya fórmula se relaciona en la figura 4.

**Figura 4. Estructura de la Lecitina**

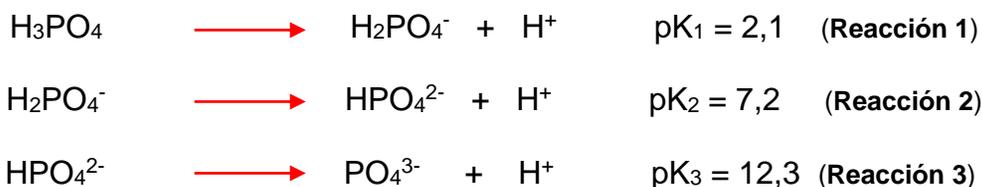


- **Fosfoproteínas.** Son Heteroproteínas que al hidrolizarse producen, además de los aminoácidos, un grupo inorgánico "grupo prostético" como el fosfato.

En el humus se encuentran fosfato en proporciones entre 0,8 y 2,5% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de la masa de humatos. Entre mayor sea el contenido de humus del suelo, más rico será este en fosfatos orgánicos. También en la masa microbiana del suelo hay una pequeña fracción de fósforo orgánico que solo se hace disponible para la planta con la muerte y desintegración de los microorganismos, *Giraldo* (6).

### 3.2.2 Transformaciones Químicas Del Fósforo En El Suelo

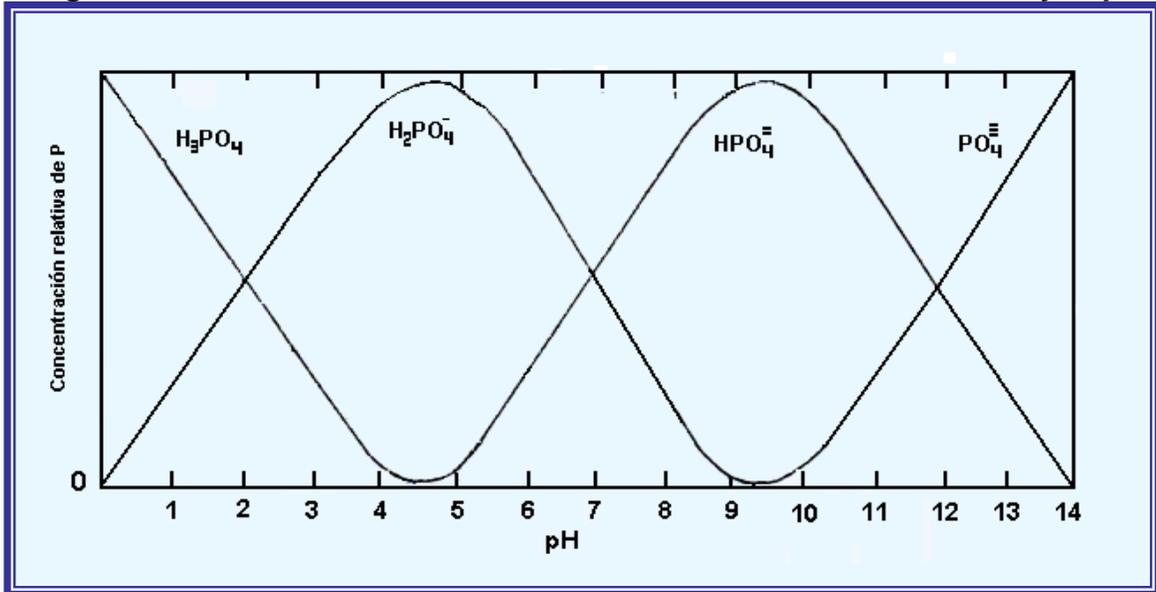
La dinámica del fósforo en el suelo, depende en gran medida de la acidez del suelo medida por su pH y por la concentración de iones como Al, Mn, Fe y Ca. La forma del ión fosfato en solución varía con el pH. El fósforo del suelo se presenta casi exclusivamente como **orto fosfatos** derivados del ácido fosfórico. La química del fósforo está relacionada con las formas iónicas del ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). Este ácido tiene tres constantes de disociación:



El predominio de una u otra de las formas iónicas depende del pH. La figura 5 muestra la concentración relativa de fosfatos en sus distintas formas iónicas en función del pH. Se observa que, a valores de pH comprendidos entre 4,5 y 7,0

(comunes en los suelos), las formas dominantes son  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$ , *Garavito* (5).

**Figura 5. Relación entre la concentración relativa de iones fosfato y el pH**



De acuerdo a la disociación del ácido fosfórico y a la ecuación de Henderson Hasselbach:  $\text{pH} = \text{pKa} + \log \text{B/A}$ , donde B y A son las bases y ácidos conjugados respectivamente; puede deducirse que a pH 6, un 94% del fósforo soluble, se encontrará como  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , pero a pH 7 sólo el 60% estará en esta forma.

### 3.2.3. Fijación De Fósforo

El proceso por el cual los fosfatos solubles, generalmente aplicados en forma de fertilizante, pasan a formas menos solubles a través de su reacción con partículas orgánicas e inorgánicas del suelo, se conoce como retención o fijación de fósforo. Como consecuencia, se restringe la movilidad del fósforo en el suelo y disminuye su posibilidad de ser absorbido por las plantas, *Garavito* (5).

Está ampliamente demostrada la participación activa del hierro y el aluminio, así como de sus óxidos e hidróxidos en la retención del fósforo, *Iyamuremye and Dick* (8). Durante las grandes transformaciones de los minerales primarios el hierro prevalece como elemento y se acumula en el suelo, siendo por tanto uno de los elementos mas dinámicos al estar presente junto con el aluminio en formas

amorfos y cristalinas, influyendo en gran medida en los procesos de fijación del fósforo; de ahí que muchos autores hallan correlacionado la capacidad de fijación de fósforo con los contenidos de compuestos de hierro y aluminio, tanto libre como en formas de óxidos, hidróxidos amorfos y cristalinos, *Zhang et al* (9).

Se ha encontrado una relación estrecha entre la acidez del medio y la fijación de los fosfatos. El decrecimiento del pH está asociado con la formación de compuestos de hierro y aluminio difícilmente solubles, mientras que el aumento del pH se asocia con la formación de fosfatos cálcicos y en menor proporción de fosfatos magnésicos. Cuando la reacción es ligeramente ácida a neutra, los fosfatos solubles pasan fundamentalmente a fosfato tricálcico y con el tiempo a moroxilapatita, que es la forma más estable de los fosfatos minerales, *Zhang et al* (9). Los fosfatos de calcio pueden encontrarse como tal, adsorbidos en las superficies de los carbonatos cálcicos y ocluidos en él.

La textura guarda gran relación con el contenido de arcilla que es el componente que está más asociado con la retención de los fosfatos en el suelo y se ha demostrado que en los suelos arenosos existe movimiento del fertilizante fosfórico soluble a través del perfil, *Tuller* (10). Los minerales arcillosos retienen los iones fosfatos de manera más intensa en un medio ácido, mediante el intercambio con los grupos OH<sup>-</sup> *Burnham and López-Hernández* (11).

El aumento del contenido de materia orgánica puede incrementar la disponibilidad del fósforo en el suelo al competir con el ión fosfato, pues ocupa los centros activos en las reacciones de adsorción polar (dado al carácter aniónico de la misma), por lo que provoca una disminución de la fijación del fósforo, *Borggaard et al* (12). Los ácidos orgánicos producidos por su descomposición acidifican el medio, con lo cual solubilizan cantidades mayores de hierro y aluminio y aumenta la posibilidad de fijación del fósforo por estos elementos. Por otra parte, los hidroxiácidos formados (tartárico, málico, malónico y cítrico) son capaces de formar quelatos con el hierro y aluminio e impiden que estos elementos insolubilizan los fosfatos presentes en el medio, *Borggaard et al* (12).

La fijación comprende mecanismos de precipitación y de adsorción, predominando una u otra forma según la concentración en la solución de equilibrio, el tiempo de reacción y los minerales constituyentes, *Iyamuremy and Dick* (8). Este fenómeno ha sido estudiado a través de isotermas de adsorción ajustadas a modelos matemáticos como los de Langmuir ó Freundlich. Se propone un tratamiento similar al de la ecuación de Langmuir de dos superficies, desarrollado por *Sposito* (13), haciendo uso de una combinación de ambas ecuaciones.

### 3.2.3.1 Mecanismos de precipitación

Los fosfatos de aluminio y hierro tienden a acumularse en suelos ácidos, mientras que los fosfatos de calcio predominan en suelos alcalinos. El rango de pH de 6 a 7 es el mejor desde el punto de vista de disponibilidad de este elemento para la planta, ya que en este rango el aluminio y el hierro están precipitados como hidróxidos y el fosfato está en solución. Por encima de pH 7, los fosfatos de calcio se vuelven insolubles, *Giraldo (6)*.

El P puede precipitar formando sales en estado amorfo de Ca y Mg como:  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  y  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ , sin embargo, pueden en esta forma ser susceptibles a la solubilización en suelos ácidos, quedando en forma parcialmente asimilable por las plantas, *Giraldo (6)*.

Cuando el pH disminuye, el fosfato se fija dando lugar a compuestos insolubles de fósforo con hierro y aluminio. La fijación es mayor a valores de pH menores a 5. Algunas reacciones de insolubilización del fosfato con cationes de hierro y aluminio se presentan en las reacciones 4 a 8:



Al aumentar el pH a valores superiores de 5.5, el fósforo se hace más soluble aumentando su disponibilidad, y se expresa mediante la siguiente reacción:



### 3.2.3.2 Adsorción superficial

La adsorción de fósforo sobre la superficie de los coloides del suelo (materia orgánica, arcillas, hidróxidos), ha sido evaluada utilizando las “isotermas de adsorción”, que describen la adsorción de gases sobre superficies sólidas, *Garavito* (5).

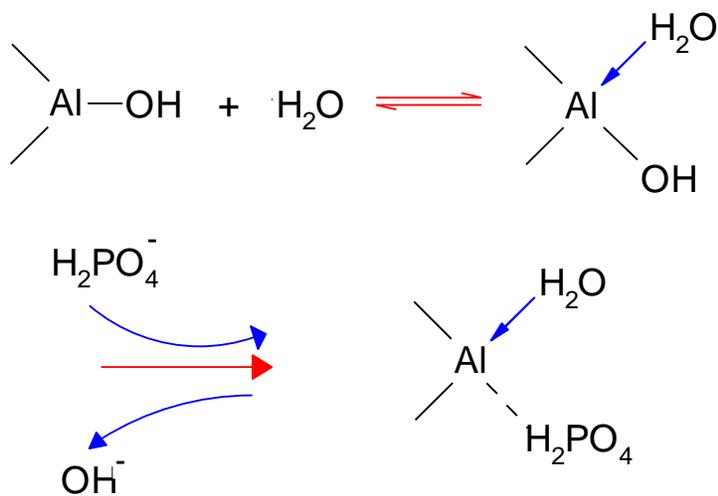
#### ➤ ***Adsorción de fósforo por minerales arcillosos***

Los minerales arcillosos que entran en la composición de los suelos, adsorben el anión fosfato con mayor fuerza a un pH ácido. Existe una correlación directa entre la adsorción de fósforo y el contenido de arcilla del suelo, pero los distintos tipos de arcilla varían en la capacidad de adsorción de fosfatos.

Entre las arcillas con mayor capacidad de adsorción está la caolinita (1:1) probablemente debido a su mayor contenido de grupos Al-OH expuestos en la superficie. La capa de alúmina está cubierta de tetraedros solo por un lado, y a valores bajos de pH puede crearse una capa superficial positiva al formarse grupos  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ . En arcillas tipo montmorillonita (2:1) como la bentonita, la capa de alúmina está bloqueada en ambos lados por tetraedros de Si-O, disminuyendo así la posibilidad de adsorción de aniones.

Las reacciones que se dan probablemente en una arcilla tipo caolinita, comprende la interacción de dos regiones OH del borde de la arista y una tercera se refiere a la oclusión superficial del fosfato en una zona amorfa de la superficie de la arcilla. La fase inicial en la fijación se cree que es la hidratación seguida de una sustitución de grupos Al-OH por fosfato como se muestra en la figura 6.

**Figura 6. Adsorción de fósforo en minerales de arcilla 1:1, Stevenson (14)**



➤ **Adsorción de fósforo por compuestos de hierro y aluminio**

El proceso de sorción de fosfatos por óxidos de hierro, puede ocurrir de varias maneras:

a. Sorción química de fosfatos en las superficies protonadas  $\text{OH}_2^+$

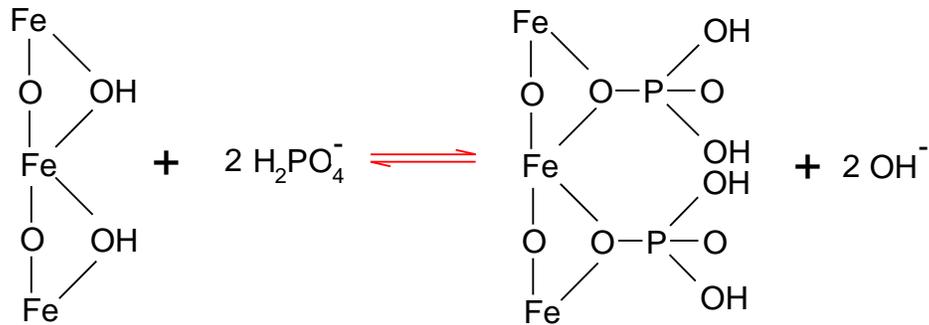


b. Sorción química mediante sustitución de grupos OH de la superficie:



Estructuralmente, la adsorción de fósforo sobre un mineral de óxido de hierro, puede representarse como se muestra en la figura 7.

**Figura 7. Reacción de adsorción de fósforo sobre minerales de hierro**



Al aumentar la acidez se rompe la estructura de los minerales arcillosos y se liberan al medio iones  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ , procedentes de óxidos e hidróxidos coloidales aumentando su reactividad y facilitando su precipitación con fosfatos.

➤ **Adsorción de fósforo por materiales amorfos tipo alófono**

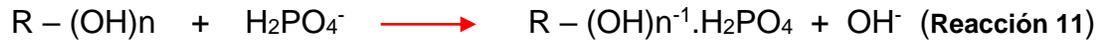
Los suelos derivados de cenizas volcánicas comprenden una apreciable área de los suelos de Suramérica y Centro América. La fracción arcilla de estos andisoles está constituida principalmente por Alófono. El material alófono es prácticamente una transición antes de cristalizar en arcillas definidas tales como caolinita y montmorillonita. En este periodo de transición tiene la propiedad de liberar gran cantidad de aluminio el cual afecta seriamente el crecimiento de las plantas y disminuye drásticamente la disponibilidad de fósforo en el suelo.

El alófono confiere a los suelos una alta capacidad de retención de humedad y fijación de oxianiones como fosfatos y boratos, *Giraldo (6)*.

**3.2.3.3 Sustitución isomórfica**

Los iones fosfatos (número de coordinación 4), encajan bien en los sitios ocupados por los tetraedros de silicio de los silicatos. Es de esperarse que cuando se aplican fosfatos al suelo ocurra algún grado de sustitución de fósforo por sílice en los enrejados arcillosos.

Otra forma de sustitución isomórfica se presenta al intercambiarse el ión fosfato, por iones hidroxilo en el enrejado de los minerales. En este caso hay desprendimiento de OH<sup>-</sup> y el pH tiende a subir. Las siguientes reacciones propuestas por *Fox and Kamprath* (15), para hidróxidos de hierro en oxisoles, ilustran este fenómeno:



En el primer caso se origina OH<sup>-</sup>, en el segundo H<sub>2</sub>O y carga negativa libre. Este fenómeno explica el aumento de carga negativa cuando se fosfatan suelos, *Garavito* (5).

### 3.2.4 Fraccionamiento De Fósforo

Para los especialistas en génesis de suelos, la caracterización de las formas de fósforo representa una valiosa ayuda, ya que en suelos poco evolucionados predominan los fosfatos de calcio, mientras que en los suelos de alta evolución, el fósforo se encuentra unido al hierro y al aluminio. Los suelos de desarrollo intermedio, poseen una proporción balanceada de fosfatos de calcio, hierro y aluminio.

Para el fraccionamiento de fósforo se han usado varias técnicas. Inicialmente se hacía la extracción de fosfatos por medio de ácidos y bases fuertes, sometiendo el suelo a extracciones sucesivas entre pH 1,5 y 12. Los valores de pH de las soluciones extractoras se obtenían por mezcla de diversas proporciones de NaOH y HCl. El método tiene el inconveniente de no diferenciar entre fosfatos de hierro y aluminio y además alguna proporción de estas formas de fósforo, son solubles en medio ácido.

El método desarrollado por *Chang y Jackson* (1) reportada por *López y Garcia* (2) con modificaciones tales como las de *Peterson y Corey* (16) y *Williams et al* (17) ha sido muy utilizado. Este método usa NH<sub>4</sub>F a pH 7 para extraer fosfatos de aluminio; NaOH para los fosfatos de hierro y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para los fosfatos de calcio. Después de realizar estas tres extracciones en secuencia, se trata el suelo con agentes reductores (ditionito y citrato de sodio), para solubilizar el fósforo ocluido (atrapado entre concreciones de hierro y aluminio), *Cross and Schelesinger* (18).

Posteriormente, este método fue modificado en el sentido de usar  $\text{NH}_4\text{F}$  a pH 8.2, valor en el que se minimiza la disolución de fosfatos de hierro y calcio. Otra modificación, consiste en tratar la muestra con los agentes reductores antes de la extracción con  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , con lo cual se evita que fosfatos ocluidos de hierro y aluminio se reporten como fosfatos de calcio, *Garavito* (5). Se asume básicamente que cada fracción específica tiene un grado de asimilabilidad en distintos suelos; esta presunción necesita ser verificada en los distintos lugares y con distintos sistemas de manejo, *Guo et al* (19).

### **3.3 MATERIA ORGÁNICA**

La materia orgánica del suelo (MOS) es uno de los materiales más complejos que existen en la naturaleza, complejidad que se refleja en su composición química. Por ello, se dice que la MOS contiene probablemente la mayor parte, sino todos, los compuestos orgánicos que ocurren naturalmente, porque se origina de los productos metabólicos y los tejidos de plantas, animales y microorganismos, *Burbano* (20). La MO tiene un profundo efecto sobre la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de la planta. Además sirve como fuente de N, P y S a través de su mineralización

#### **3.3.1 Composición general de la materia orgánica del suelo**

Los componentes de la MOS se clasifican en dos grupos generales de sustancias: No húmicas y húmicas. Dentro de las sustancias no húmicas, que en promedio representan el 20% de la MOS, se incluyen los residuos inalterados de tejidos vegetales y animales. Estas sustancias tienen una constitución química perteneciente a grupos orgánicos conocidos como carbohidratos, proteínas, grasas, ceras, resinas, etc. Dentro de las sustancias húmicas, que en promedio conforman el restante 80% de la MOS, se incluyen aquellas que han sido modificadas química y biológicamente y que conservan muy poca o ninguna semejanza con los compuestos orgánicos conocidos. Las diferencias entre los materiales húmicos y varios biopolímeros, como la lignina y la celulosa que por lo general son producidas por las plantas y los microbios, son numerosas. Las sustancias húmicas, según lo anterior, se clasifican en tres grupos con características diferentes en cuanto al grado de polimerización, color, contenido de C y N y, naturalmente, la solubilidad diferencial en diversos solventes y comprenden los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas. La calidad de la MO del suelo depende de su madurez, medida de acuerdo al grado de humificación, evaluado mediante diferentes parámetros, entre los cuales se consideran: Índices de humificación  $\text{HR}_1$ , relación  $\text{E}_4/\text{E}_6$ , de la MO, *Dávila* (21), *Muñoz* (22), *Mosquera* (23).

El índice de humificación es la relación entre el porcentaje de carbono de los ácidos húmicos sobre el porcentaje de carbono de la fracción fúlvica y la relación  $E_4/E_6$  es La relación de las densidades ópticas o absorbancias de las soluciones acuosas de ácidos húmicos y fúlvicos a 465 y 665 nm es ampliamente utilizada por los científicos del suelo en la caracterización de esos materiales. Permite inferir acerca del grado de aromaticidad de las moléculas de sustancias húmicas, así valores bajos, implican un alto grado de aromaticidad y valores altos indican un mayor contenido de cadenas alifáticas, *Kononova* (24). Permite diferenciar los ácidos húmicos de los fúlvicos; se considera que valores superiores a 5 son propios de los ácidos fúlvicos, *Dávila* (21), *Muñoz* (22), *Mosquera* (23) *Kononova* (24), *Chen et al* (25).

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1 .UBICACIÓN GEOGRÁFICA**

Los suelos estudiados comprenden dos regiones: La finca Santa Rosa de la vereda Aurelia municipio de Cajibío, a 1740 metros sobre el nivel del mar y con una precipitación pluvial de 1500 mm a 19 °C y la finca Chipagua de la vereda de El Cabuyo municipio de Popayán a 1737 metros sobre el nivel del mar, con una precipitación pluvial de 1932 mm a 19°C, las dos con características diferentes en cuanto a materia orgánica.

### **4.2. TOMA DE MUESTRAS**

La toma de las muestras de suelos se hace de acuerdo a la metodología estandarizada en el laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca, *Bravo y Giraldo (26)*. Para obtener un valor analítico representativo del volumen del suelo se dividió el terreno seleccionado en unidades de muestreo y se seleccionó una de ellas alrededor de los cultivos. Para tomar las respectivas muestras, se delimitó el área y se cruzó en zig – zag, se hicieron sondeos en la capa arable que comprendió alrededor de 20 cm de profundidad. Se tomaron entre 10 y 15 submuestras y se formó con estas una muestra compuesta de 2 Kg. Las muestras compuestas se llevaron al laboratorio, se secaron al aire por 24 horas, se molieron y se pasaron por tamiz de 2 mm,

### **4.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO**

Con el objeto de identificar los suelos a estudiar, se realizaron análisis físicos y químicos, de acuerdo a la metodología estandarizada en el Laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca, *Bravo y Giraldo (26)*.

### 4.3.1. Análisis Físicos

#### ★ **Humedad**

Se refiere al contenido de agua con relación al peso o volumen de la masa de suelo. Se expresa en forma gravimétrica cuando tiene relación con la masa del suelo y volumétrica cuando se relaciona con el volumen del suelo.

La humedad se determina en este caso por el método gravimétrico que es la relación entre la masa de agua y la masa de los sólidos del suelo. Consiste en pesar la muestra antes y después del calentamiento a 105°C con el objeto de eliminar el agua superficial en una estufa con circulación de aire forzado.

#### ★ **Densidad real**

Es la relación entre la masa del suelo y su volumen. Se determina mediante el método del picnómetro, que consiste en determinar la masa y el volumen de los sólidos del suelo a través de un frasco de volumen conocido.

#### ★ **Textura**

Se refiere a las proporciones de arena limo y arcilla (partículas menores de 2 mm de diámetro) que se encuentran en una masa de suelo. Se determinó mediante el método de Bouyoucos que consiste en determinar la cantidad de sólidos en suspensión por medio de un hidrómetro. La profundidad del centro de flotación del Hidrómetro varía con la densidad de la suspensión y también con la textura. Después de 40 segundos, todas las partículas mayores de 50 micras sedimentarán de tal manera que no tendrán influencia sobre el hidrómetro. Las lecturas realizadas una hora después, corresponden a partículas mayores de 5 micras y a las dos horas a partículas menores de 2 micras. El método se fundamenta en la ley de Stockes que dice que la velocidad de caída de las partículas de diferente tamaño en un medio líquido es directamente proporcional al cuadrado del radio de la partícula de donde  $V = k \times r^2$ . En resumen, la ley de Stockes esta dada por la siguiente ecuación:  $V = 2g(d_s - d^l)r^2/9\mu$ .

### 4.3.2. Análisis Químicos

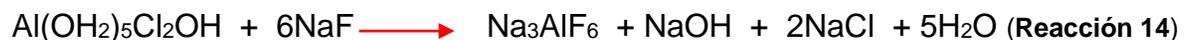
Los análisis químicos comprenden las siguientes determinaciones:

#### ★ pH

Se determinó mediante el método potenciométrico, en una suspensión suelo: agua, en relación 1:1 utilizando un pH – metro METROHM E-744 con electrodo combinado de vidrio.

#### ★ Acidez intercambiable

Se determinó mediante el método de desplazamiento, que consiste en desplazar los iones  $H^+$  y  $Al^{+3}$  del suelo con una solución neutra de KCl. Los iones desplazados son titulables con soda en presencia de fenolftaleína. Una vez titulados estos iones quedan en forma de  $Al(OH_2)_5^{2+}$  y se valorará el  $Al^{+3}$  presente en forma hidratada de acuerdo a las siguientes reacciones:



El NaOH producido se tituló con HCl y como la cantidad de NaOH depende de la cantidad de  $AlCl_3$ , el número de miliequivalentes de ácido clorhídrico empleados para neutralizar el NaOH es igual al número de miliequivalentes de  $Al^{+3}$ . La acidez intercambiable menos acidez de aluminio es igual a la acidez del  $H^+$ .

#### ★ Materia orgánica

Se realizó mediante el método de Walckley – Black, el cual consiste en oxidar el carbono orgánico presente en el suelo con un oxidante en medio ácido, utilizando como oxidante  $K_2Cr_2O_7$  1N y como medio ácido sulfúrico concentrado.



### ★ Determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl

Este método es el utilizado universalmente para la determinación cuantitativa de N procedente de diversos materiales; consta de tres etapas:

#### 1) Oxidación de la muestra

Las muestras de suelo se tratan separadamente con  $H_2SO_4$  y una mezcla catalizadora de  $CuSO_4$  Selenio y  $K_2SO_4$  para oxidar la materia orgánica y convertir el nitrógeno en sulfato ácido de amonio según la siguiente reacción:



El equipo utilizado en la digestión fue el BÜCHI B-426

#### 2) Descomposición del sulfato ácido de amonio

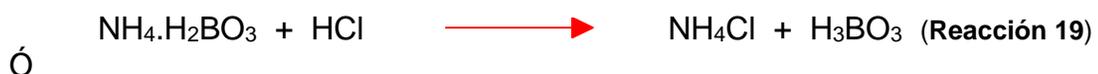
El sulfato de amonio se descompone por medio de un exceso de álcali para liberar el amoníaco, el cual se recoge por destilación sobre ácido bórico. Las reacciones son las siguientes:



El equipo de destilación empleado fue BÜCHI K-314

#### 3) Titulación del borato de amonio

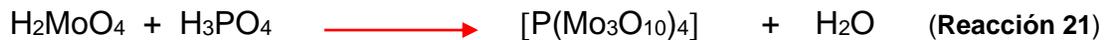
El borato de amonio formado en el paso anterior se valora con HCl o  $H_2SO_4$  0.1N utilizando como indicadores una mezcla de rojo de metilo y verde de bromocresol. La reacción es la siguiente:



El equipo empleado para esta titulación fue el titulador universal METROHM E-70

★ **Determinación de fósforo disponible**

El método utilizado para esta determinación en suelos ácidos fue el Bray II, en el cual el ión fluoruro precipita el calcio soluble, extrayendo así las formas de P-Ca más solubles. Una vez extraído el fósforo, se procedió a su determinación por el método colorimétrico, el cual consistió en formar un complejo del fósforo con ácido molíbdico que absorbe a 660nm. El método cloro-molíbdico utiliza una solución de  $\text{HCl}-(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , que al reaccionar produce  $\text{H}_2\text{MoO}_4$ . Posteriormente, este ácido molíbdico reacciona con el ácido fosfórico de acuerdo a la siguiente reacción:

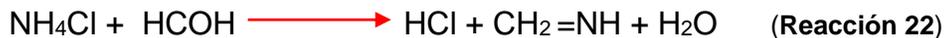


Este hetero compuesto incoloro por reducción con ácido ascórbico forma un compuesto de color azul que absorbe a 660 nm.

El equipo utilizado en esta determinación fue el Espectrofotómetro visible SPECTRONIC GENESYS 20.

★ **Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

Consistió en desplazar todos los cationes del suelo y reemplazarlos por iones  $\text{NH}_4^+$ ; el suelo seco, tamizado y muy fino, se saturó con  $\text{NH}_4^+$ . Posteriormente, se desplazaron los iones  $\text{NH}_4^+$  adsorbidos con  $\text{NaCl}$ , al 10% obteniéndose  $\text{NH}_4\text{Cl}$  en solución, que se trató con formaldehído neutro. El  $\text{HCl}$  obtenido se tituló con  $\text{NaOH}$  0,1 N. La reacción muestra lo que ocurre:



★ **Determinación de las bases Intercambiables**

Corresponden al Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio. Se determinaron en el primer extracto del tratamiento con acetato de amonio ( $\text{AcONH}_4$ ) de la determinación de

CIC y la cuantificación se realizó por espectrofotometría de Absorción Atómica, en el equipo SOLAR UNICAM 989 del laboratorio de la CRC.

#### **4.4. FRACCIONAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA**

Con el objeto de determinar el extracto húmico total y de valorar las sustancias húmicas, se separaron los compuestos húmicos de la materia orgánica no humificada, utilizando el método granulométrico. Para fraccionar las sustancias húmicas se empleó el método de extracción con soluciones básicas, de acuerdo a, *Mosquera* (23) como se describe a continuación:

##### **4.4.1 Método Granulométrico:**

Consistió en utilizar la diferencia de tamaño molecular de la materia orgánica humificada y la materia orgánica fresca (No humificada). La fracción menor de 50 $\mu$  corresponde a la materia orgánica humificada y la fracción mayor de 100 $\mu$  corresponde a la materia orgánica fresca. Para separar estas dos fracciones, se utilizó un tamizador automático (Retsch As200). En la figura 8 se muestra el procedimiento realizado de acuerdo a *Mosquera* (23).

##### **4.4.2 Método de Extracción y Valoración de Sustancias Húmicas**

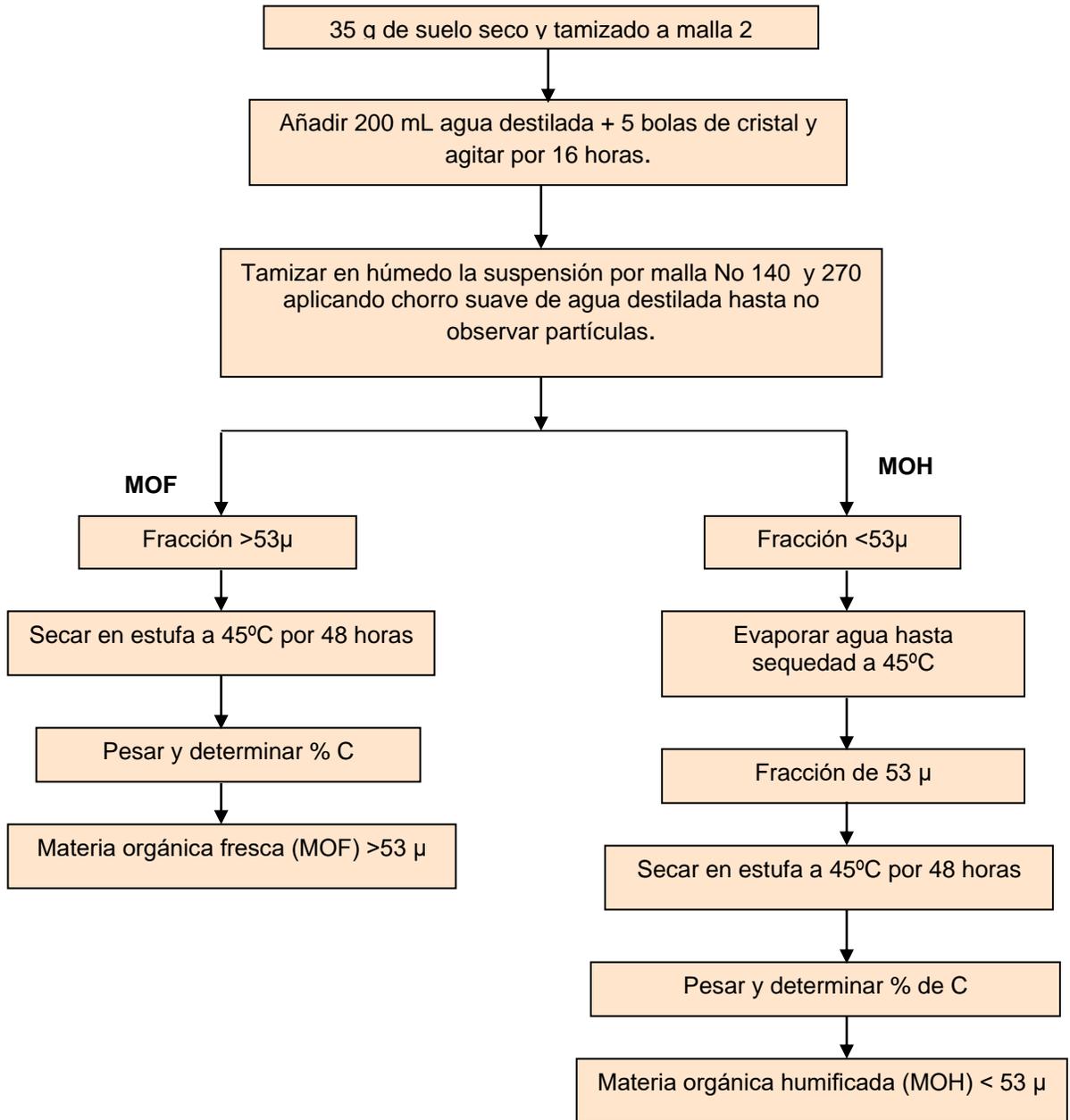
Después de separar la materia orgánica humificada, se procedió al fraccionamiento de las sustancias húmicas, con el propósito de evaluar el contenido de extracto húmico total, de huminas y de evaluar el grado de humificación de la materia orgánica de los suelos. El procedimiento se relaciona en la figura 9.

###### **4.4.2.1 Evaluación del Extracto Húmico Total**

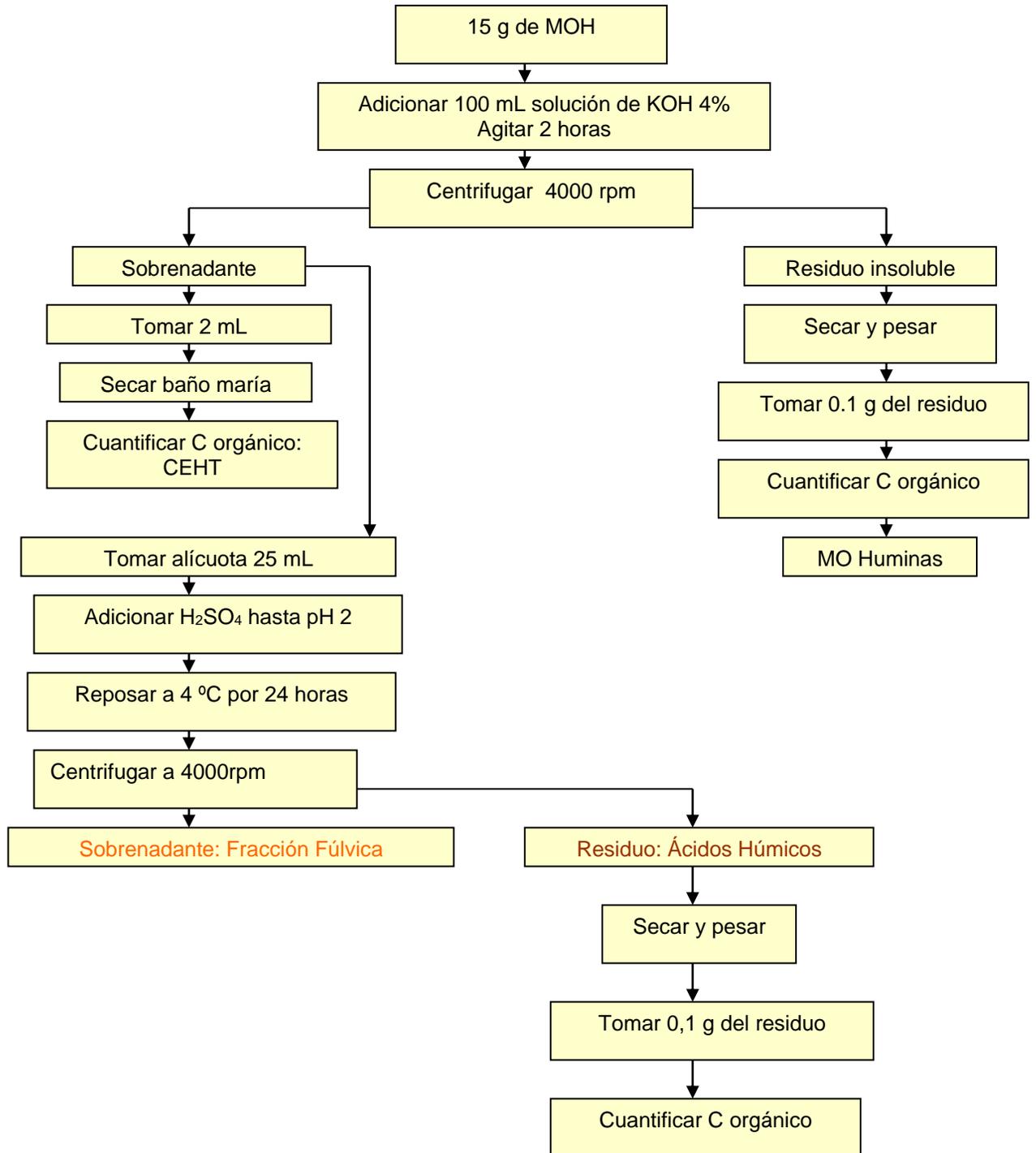
Con el propósito de determinar el porcentaje del extracto húmico total, se sigue el procedimiento relacionado en la figura 9. Con los datos obtenidos de la cuantificación de carbono orgánico, se determinó el porcentaje de carbono del extracto húmico total, aplicando la ecuación 1.

$$\%CEHT = \frac{(Vb - Vm) \times N \times 0.003 \times 100 \text{ mL} \times 100g}{2 \text{ mL} \times 15g} \quad (\text{Ecuación 1})$$

**Figura 8. Diagrama de separación Granulométrica de La MO**



**Figura 9. Diagrama de la marcha analítica para la caracterización de la fracción húmica en materiales orgánicos.**



#### 4.4.2.2 Evaluación del grado de Humificación de la Materia Orgánica de los Suelos

Para evaluar el grado de humificación se utilizaron dos parámetros:

- El índice de humificación HR1 de acuerdo a *Bravo y Giraldo (26)* y *Arango (27)*. El HR1 es la relación entre el porcentaje de carbono de los ácidos húmicos y el porcentaje de carbono de la fracción fúlvica como se muestra en la ecuación 2.

$$HR1 = \frac{\%CAH}{\%CFF} \text{ (Ecuación 2)}$$

- Relación E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> mediante la disolución del material húmico en una solución 0.05N de la sal básica NaHCO<sub>3</sub>, a la solución resultante se le mide el grado de absorción a dos longitudes de onda: 465 y 665 nm.

#### 4.5. FRACCIONAMIENTO DEL FÓSFORO

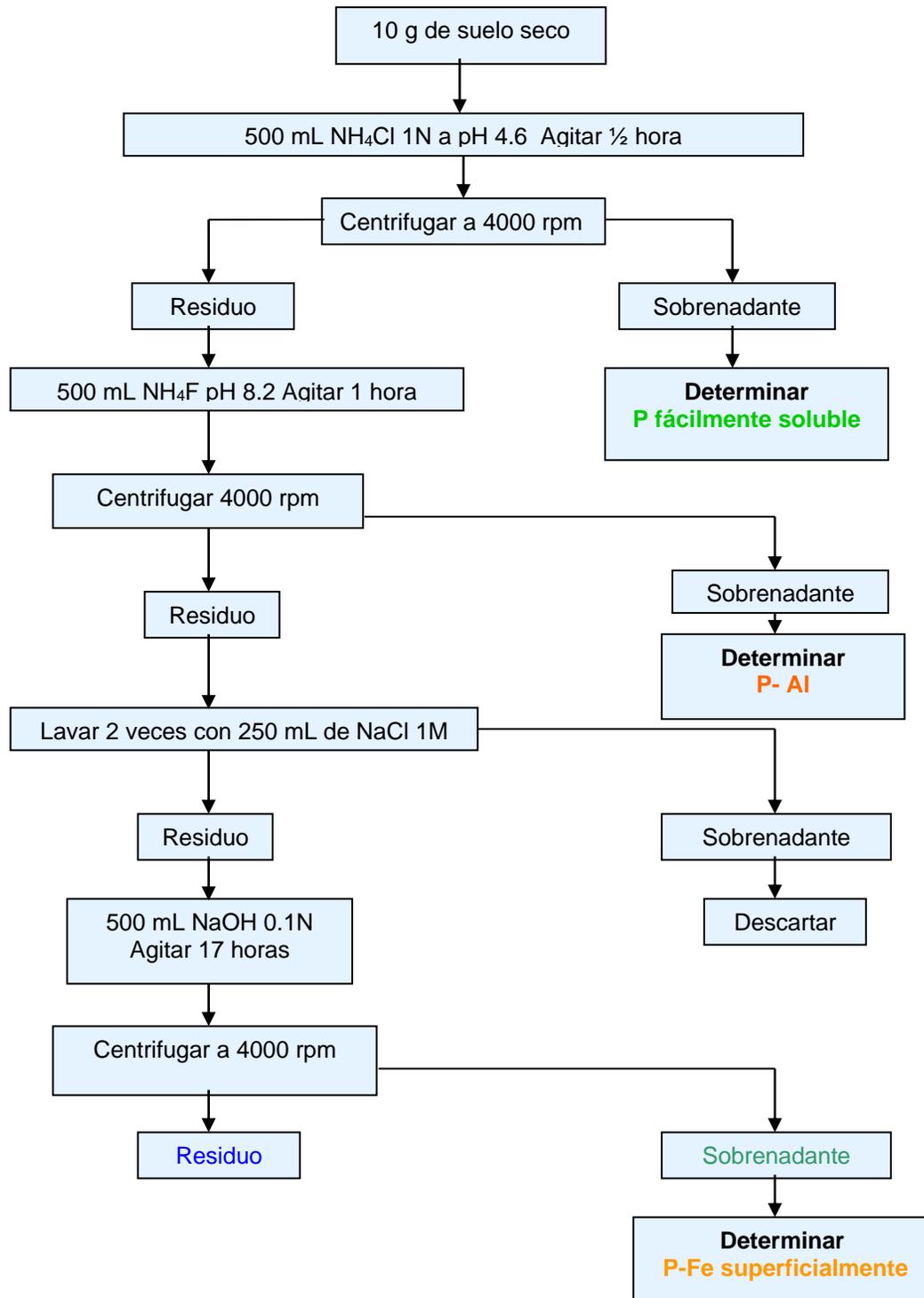
El método descrito por Chang y Jackson (1) y reportado por *López y García (2)*, se utiliza para separar el fósforo en grupos de diferente disponibilidad e involucra una extracción secuencial del fósforo con diferentes soluciones. Se hizo una modificación en cuanto a la determinación de fósforo disponible por ser suelos ácidos; en este fraccionamiento, el fósforo inmediatamente disponible para las plantas se determinó por el método de Bray II. La forma secuencial de extracción se reporta en la tabla 4, en donde la secuencia de extracción va desde el número 1 hasta el número 6. En este método se usó el NH<sub>4</sub>Cl a pH 4,6 para determinar el fósforo fácilmente soluble, NH<sub>4</sub>F a pH 8,2 para extraer fosfatos de aluminio y con NaOH se extrajeron los fosfatos de hierro y aluminio. Después de realizar estas tres extracciones en secuencia, se trató el suelo con agentes reductores (ditionito y citrato de sodio), para solubilizar el fósforo ocluido (atrapado entre concreciones de hierro y aluminio). Por último, se usó H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para los fosfatos de calcio. Posteriormente el fósforo orgánico se determinó extrayéndolo con una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,6 N, el fósforo total se determinó por digestión con ácido perclórico-nítrico 3:1. El procedimiento se relaciona en las figuras de la 10 a la 13.

**Tabla 2. Denominación de las fracciones de fósforo.**

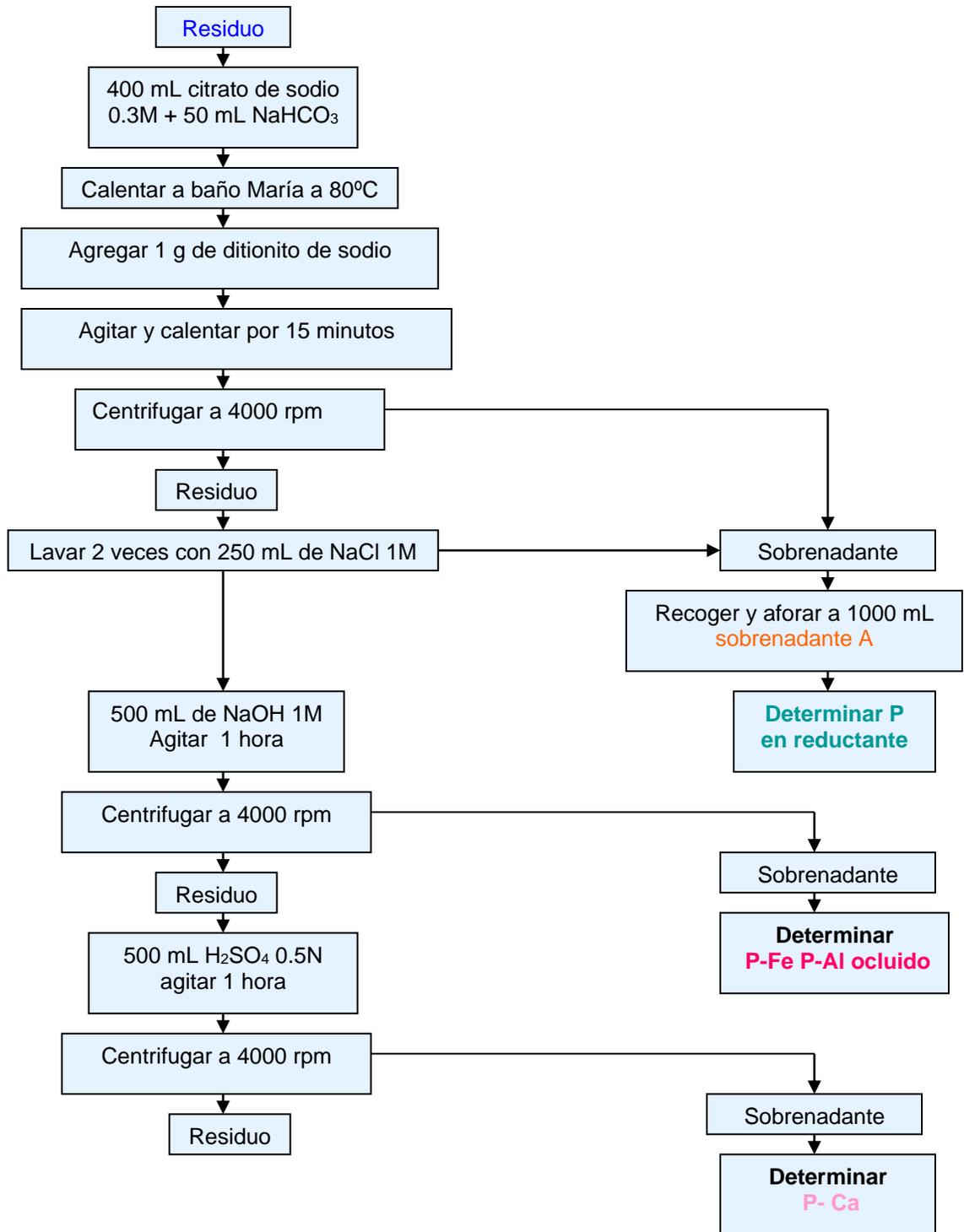
Secuencia de extracción No.	Extractante	Fracción determinada
1	NH <sub>4</sub> Cl 1N pH 4.6	<b>P fácilmente soluble</b>
2	NH <sub>4</sub> F 0.5N pH 8.2	P unido al Al ( <b>P-Al</b> )
3	NaOH 0.1N	P unido al Fe superficialmente ( <b>P-Fe</b> )
4	Citrato-ditionito Bicarbonato	<b>P soluble en reductante</b>
5	NaOH 1N	P unido al Fe y Al ocluido ( <b>P-Al, P-Fe Ocluido</b> )
6	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.5 N	P unido al calcio ( <b>P-Ca</b> )
*	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.6 N	P orgánico
*	Ácido Nítrico-Ácido perclórico (1:3)	P total

\* No hacen parte de la extracción secuencial

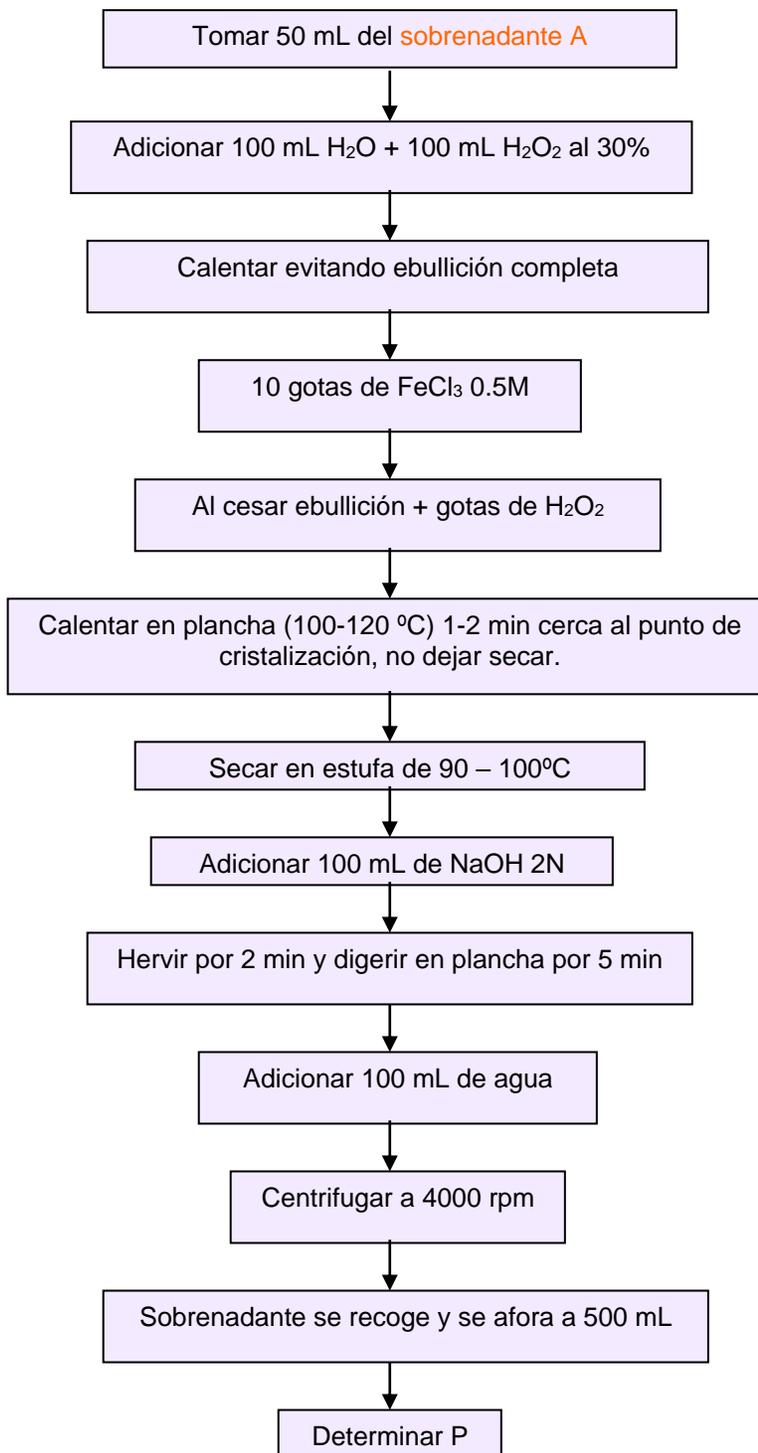
Figura 10. Diagrama para el fraccionamiento de fósforo



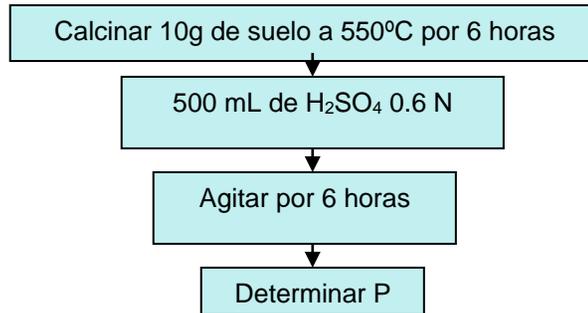
Continuación figura 10



**Figura 11. Diagrama para la determinación de fósforo soluble en reductante**

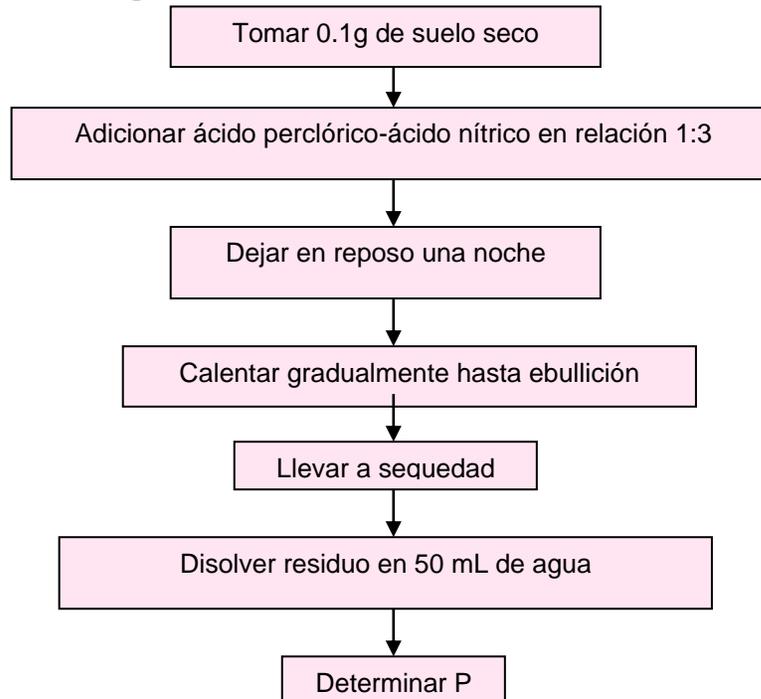


**Figura 12. Diagrama de determinación de fósforo orgánico**



**Nota:** igual procedimiento se aplica a una muestra sin calcinar, por diferencia entre las dos extracciones se determina el P orgánico.

**Figura 13. Diagrama de determinación de fósforo total**



#### **4.6 CORRELACIÓN ENTRE LA MATERIA ORGÁNICA Y LAS FRACCIONES DE FÓSFORO Y OTRAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS.**

Una vez encontradas las diferentes fracciones de materia orgánica y de fósforo se procede a correlacionarlas estadísticamente, mediante pruebas no paramétricas de Mann-Whitney y correlaciones bivariadas de Spirman, *Bravo et al* (28), *Bravo et al* (29), *Bravo et al* (30), *Duarte et al* (31).

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS

En las tablas 3 y 4, se recopilan los resultados para los análisis físicos y químicos realizados a las muestras de suelo empleadas en esta investigación. Todos los resultados obtenidos **se comparan con los parámetros relacionados como normales para un suelo fértil de acuerdo a Silva (32)**

La zona rural del municipio de Cajibío (Departamento del Cauca), se caracteriza por presentar suelos con una muy alta humedad. El suelo No. 1, proveniente de este municipio, es de color negro, presenta un porcentaje de humedad de 23,03%, que corresponde a una humedad alta. La textura que este suelo presenta es franco arenosa, en la cual las arenas, partículas mayores de 50  $\mu\text{m}$ , son más del 50% (55,29%), mientras que las arcillas, partículas menores de 2  $\mu\text{m}$ , solo representan el 10,37%, indicando que la retención de humedad se puede atribuir al alto contenido de materia orgánica, detectado en este suelo.

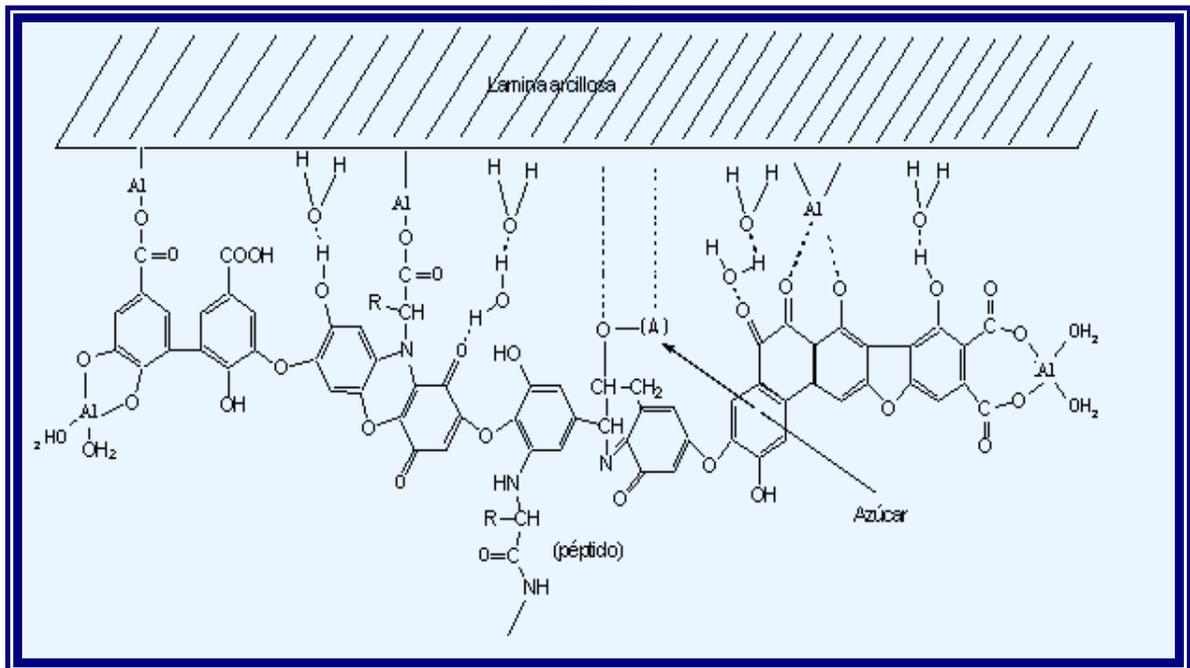
El valor de la densidad real obtenido es de 2,43g/mL, indicando un suelo de rango bajo a normal influenciado por el alto contenido de materia orgánica.

El pH 5,33 determinado en la suspensión suelo-agua, clasifica este suelo como fuertemente ácido. Esto influye en la disponibilidad de muchos nutrientes para la planta; a este pH, se favorece la adsorción de nutrientes como el fósforo, el boro, el azufre y molibdeno en la fase coloidal, ya que pueden intercambiarse aniónicamente puesto que se favorece la capacidad de intercambio aniónico. Además se puede presentar lavado de nutrientes como el Ca, Mg o K, lo cual se confirma con el bajo valor de CIC efectiva que es menor de 4, valor por debajo del cual indica un fuerte lavado de nutrientes en general. Se favorece la disponibilidad de nutrientes como el Fe y Mn pero, también se puede incrementar la cantidad de aluminio intercambiable.

La acidez intercambiable es ocasionada por el hidrógeno y el aluminio de cambio; en este caso se considera como un valor bajo; de igual forma, el Al intercambiable está en un rango bajo, no presentando toxicidad ni para el suelo ni para las plantas. Sin embargo, su porcentaje de saturación es medio y de esta manera, se

puede ver disminuida la fertilidad de este suelo, ya que puede afectar la retención de las bases de cambio, como se observa en la tabla 3 y como se mencionó anteriormente el fuerte lavado de ellas, las saturaciones de cada una de estas bases son inferiores a la saturación de Al, indicando que predominan en los sitios de intercambio los iones Al y que en cualquier momento pueden pasar a la solución del suelo aumentando el nivel del intercambiable y así se vuelve tóxico para ambos sistemas suelo y plantas. Sin embargo, probablemente el alto valor de MO presente en este suelo retiene fuertemente el Aluminio que pasa a la solución del suelo por medio de los grupos carboxílicos y fenólicos del humus, impidiendo que pase a la fase coloidal o a la solución del suelo de acuerdo a la figura 14.

**Figura 14. Reacción del Aluminio con los grupos carboxílicos y fenólicos del humus**



Por lo tanto, la acidez se atribuye principalmente a la MO, la cual puede disociar y liberar iones  $H^+$ .

La capacidad de intercambio catiónico presenta un valor de 42,36 meq/100 de suelo, valor alto atribuible principalmente al alto contenido de MO. En los suelos ácidos, la determinación más apropiada, es la suma de las bases de cambio y de la acidez de cambio; esta capacidad de cambio se denomina real o efectiva y en este suelo presenta un valor de 1,53 que indica un fuerte lavado de cationes, de tal manera que los contenidos de Ca y Mg son muy bajos, lo mismo que sus saturaciones. El nivel de K es alto proveniente de las arcillas presentes en este

**Tabla 3. Análisis Físico y Químico Del Suelo No. 1**

PROPIEDADES FÍSICAS											
SUELO	HUMEDAD (%)	DENSIDAD REAL (g/mL)	GRANULOMETRÍA			TEXTURA					
			% Arenas	% Arcillas	% Limos						
ANDISOL	23,03	2,43	55,29	10,37	34,34	FRANCO ARENOSA					
PROPIEDADES QUÍMICAS											
pH	%Corg	% M.O	% N	P (ppm)	C/N	Acidez Intercambiable meq/100g suelo	Al <sup>3+</sup> intercambiable meq/100g suelo	H <sup>+</sup> intercambiable meq/100g suelo	Capacidad de Intercambio meq/100g suelo		
5,33	6,76	11,67	0,54	3,31	12,59	0,73	0,56	0,17	42,36		
BASES DE CAMBIO											
Calcio meq/100g	Magnesio meq/100g	Sodio meq/100g	Potasio meq/100g	Ca/Mg	Capacidad de intercambio Efectiva meq/100g suelo	% SATURACIÓN DE BASES					
						% Saturación Bases	% Ca	% Mg	% Na	% K	% Al
0,34	0,06	0,083	0,32	5,4	1,53	52,48	22,22	3,92	5,42	20,91	36,6

suelo. La relación Ca/Mg es de 5,4, implicando que predomina la deficiencia de magnesio.

El porcentaje de nitrógeno total presente en el suelo es de 0,54% aunque el porcentaje de nitrógeno es alto, proveniente del alto nivel de MO, no se puede asegurar su alta disponibilidad para la absorción por las plantas, debido a que ese valor incluye tanto el nitrógeno en forma orgánica como inorgánica.

La forma orgánica que representa casi la totalidad del nitrógeno en el suelo no puede ser utilizada por la planta mientras no se transforme previamente en nitrógeno inorgánico, mediante una serie de procesos fundamentalmente de tipo bioquímico, en los cuales influyen factores tales como la temperatura, el pH y la humedad.

De acuerdo a *Giraldo* (6), se puede decir que la cantidad de nitrógeno disponible para la planta en el suelo analizado es baja, ya que este presenta un pH de 5,33, en el que el proceso de nitrificación se ve disminuido debido a que este tiene lugar con gran intensidad a intervalos de pH comprendidos entre 6,5-8.

La relación C/N indica un grado normal de mineralización de la materia orgánica, en este suelo.

El suelo presenta un bajo contenido de fósforo disponible, atribuible a la fuerte acidez, siendo posible que esté intercambiado aniónicamente o precipitado en forma de fosfatos de Al. Aún cuando el nivel de materia orgánica es alto y su relación C/N indica un grado de mineralización normal, no es suficiente para suministrar el fósforo disponible, debido probablemente a la fuerte acidez que esta suministra

**Tabla 4. Análisis Físico y Químico Del Suelo No 2**

PROPIEDADES FÍSICAS											
SUELO	HUMEDAD (%)	DENSIDAD REAL (g/mL)	GRANULOMETRÍA			TEXTURA					
			% Arenas	% Arcillas	% Limos						
ANDISOL	24,10	2,19	68,45	9,72	21,83	FRANCO ARENOSA					
PROPIEDADES QUÍMICAS											
pH	%Corg	% M.O	% N	P (ppm)	C/N	Acidez Intercambiable meq/100g suelo	Al <sup>3+</sup> intercambiable meq/100g suelo	H <sup>+</sup> intercambiable meq/100g suelo	Capacidad de Intercambio meq/100g suelo		
5,47	0,71	1,22	0,63	1,20	1,13	0,61	0,34	0,27	41,24		
BASES DE CAMBIO											
Calcio meq/100g	Magnesio meq/100g	Sodio meq/100g	Potasio meq/100g	Ca/Mg	Capacidad de intercambio Efectiva meq/100g suelo	% SATURACIÓN DE BASES					
						% Saturación Bases	% Ca	% Mg	% Na	% K	% Al
0,29	0,28	0,017	0,19	1,02	1,39	55,89	20,86	20,14	1,22	13,67	25,18

El suelo No. 2 proveniente de la vereda El Cabuyo, presenta un color amarillo, un porcentaje de humedad de 24,10%, que se clasifica como alta. La textura que este suelo presenta es franco arenosa, en la cual las arenas representan más del 50% (68,45 %), mientras que el 9,72% corresponde a las arcillas. La densidad real fue de 2,19 g/mL, considerándose como baja; de acuerdo a estas características y teniendo en cuenta que el porcentaje de materia orgánica que presenta este suelo es bajo (1,22 %), podría indicar altos contenidos de alófanos (aluminosilicatos no cristalinos constituidos principalmente por  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  originado de arcillas de suelos derivados de cenizas volcánicas) que le comunican alta capacidad de retención de humedad. Además le confieren capacidad de retención de fosfatos y boratos y una fuerte acidez al suelo (pH 5,47), por lo cual se ve limitada la disponibilidad de muchos nutrientes para la planta, confirmándose con el bajo valor de CIC efectiva que es menor de 4, valor por debajo del cual indica un fuerte lavado de bases de cambio, como se deduce de este análisis en donde se observa una fuerte deficiencia de Ca y Mg con baja saturación de Ca, aún cuando la saturación de Mg es media indica que predomina la deficiencia de Ca. El nivel de K es medio y su saturación es alta, proveniente probablemente del tipo de arcillas que predominan en este suelo.

La acidez intercambiabile presenta un valor de 0,61 meq/100g de suelo, que se considera como bajo al igual que el valor de Al intercambiabile y su saturación, lo cual no representa toxicidad ni para el suelo ni para las plantas. La capacidad de intercambio catiónico presenta un valor de 41,24 meq/100 de suelo que se evalúa como alto y se atribuye principalmente a las arcillas, ya que el nivel de materia orgánica es bajo. La relación Ca/Mg es inferior a 2, implicando que predomina la deficiencia de calcio.

El porcentaje de materia orgánica es de 1,22 %, muy bajo. El porcentaje de nitrógeno total presente en el suelo es de 0,63% que es considerado alto, no siendo todo disponible para la planta; la relación C/N indica el grado de mineralización de la materia orgánica, en este suelo, esta relación tiene un valor de 1,24 indicando fuerte mineralización, y por lo tanto pérdida de MO con posible pérdida de bioestructura y posible erosión. El suelo presenta un bajo contenido de fósforo disponible (1,29 ppm), atribuible a la fuerte acidez o a la retención aniónica por parte de los alófanos presentes en este suelo.

Al comparar el suelo No. 1 con el No. 2, se observa que la diferencia radica principalmente en el contenido de MO, en la saturación de Aluminio, en el origen de la acidez y en la relación C/N. En el suelo No. 1 el contenido de MO es alto y esta le confiere la fuerte acidez al suelo, mientras que en el suelo No. 2 el contenido de MO es bajo y la acidez de este suelo proviene probablemente de los alófanos (cuya presencia se deduce por las características encontradas en él) y

no de la MO. La saturación de Al en el suelo No. 1 es media mientras que en el suelo No. 2 es baja, ya que en éste último es superior la saturación de bases y principalmente la de potasio. De otra parte, el suelo No. 1 presenta una mineralización normal, mientras que el suelo No. 2 presenta una muy fuerte mineralización que hace que el contenido de base sea ligeramente superior y la saturación de Al inferior.

## 5.2 Fraccionamiento de fósforo

La fijación de fósforo es un problema serio en los suelos agrícolas, particularmente en los suelos altamente meteorizados y en los derivados de cenizas volcánicas (andisoles) como es el caso de los suelos analizados, *Sánchez y Uehara* (33); como consecuencia de esta retención, se disminuye la movilidad del fósforo en el suelo y disminuye la posibilidad de ser absorbido por las plantas *Garavito* (5), por ello, se ve la necesidad de conocer las formas en que se encuentra el fósforo y así buscar la manera de ser útil en el campo de la fertilidad.

Para el fósforo se han utilizado varias técnicas: Una de ellas es la de *Hedley et al* (34) propuesta inicialmente para el desarrollo de este trabajo, debido a que las soluciones extractoras utilizadas en esta metodología, no son capaces de romper los fosfatos más fuertemente retenidos, *Trasar et al* (35), se empleó el procedimiento descrito por Chang y Jackson, reportado por *López y García* (2), basado en extracciones sucesivas de las diferentes formas de fósforo usando extractores específicos.

En el fraccionamiento, es importante anotar que la adsorción es un fenómeno que aumenta a medida que transcurre el tiempo de contacto entre el suelo y la solución y por lo tanto los resultados obtenidos varían con el tiempo de agitación de la muestra; por ello, se ha establecido un tiempo de agitación para cada extractante. El suelo se pone en contacto con la solución extractora y se agita hasta que se establezca el equilibrio para luego determinar el fósforo en el líquido sobrenadante.

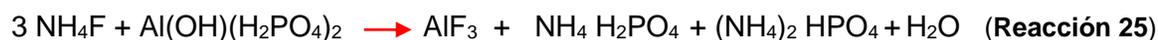
El orden de estas secuencias se explica a continuación:

- El primer extractante utilizado fue el  $\text{NH}_4\text{Cl}$  a pH 4,6, que se emplea para extraer el fósforo fácilmente soluble, es decir, el que se encuentra en solución como fosfatos de calcio. Teniendo en cuenta el valor del pH del suelo (5,33) y el diagrama de solubilidad de los iones fosfato (figura 5) el

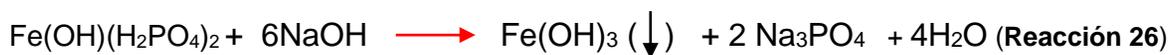
fosfato de calcio se encontraría en las dos formas: como  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  y como  $\text{CaHPO}_4$ , predominando la primera forma. Con base en estas consideraciones se plantean dos posibles reacciones así:



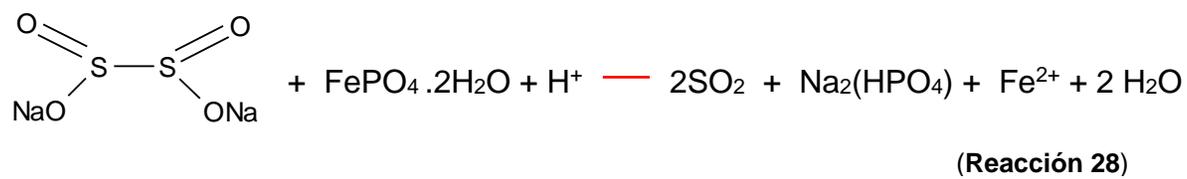
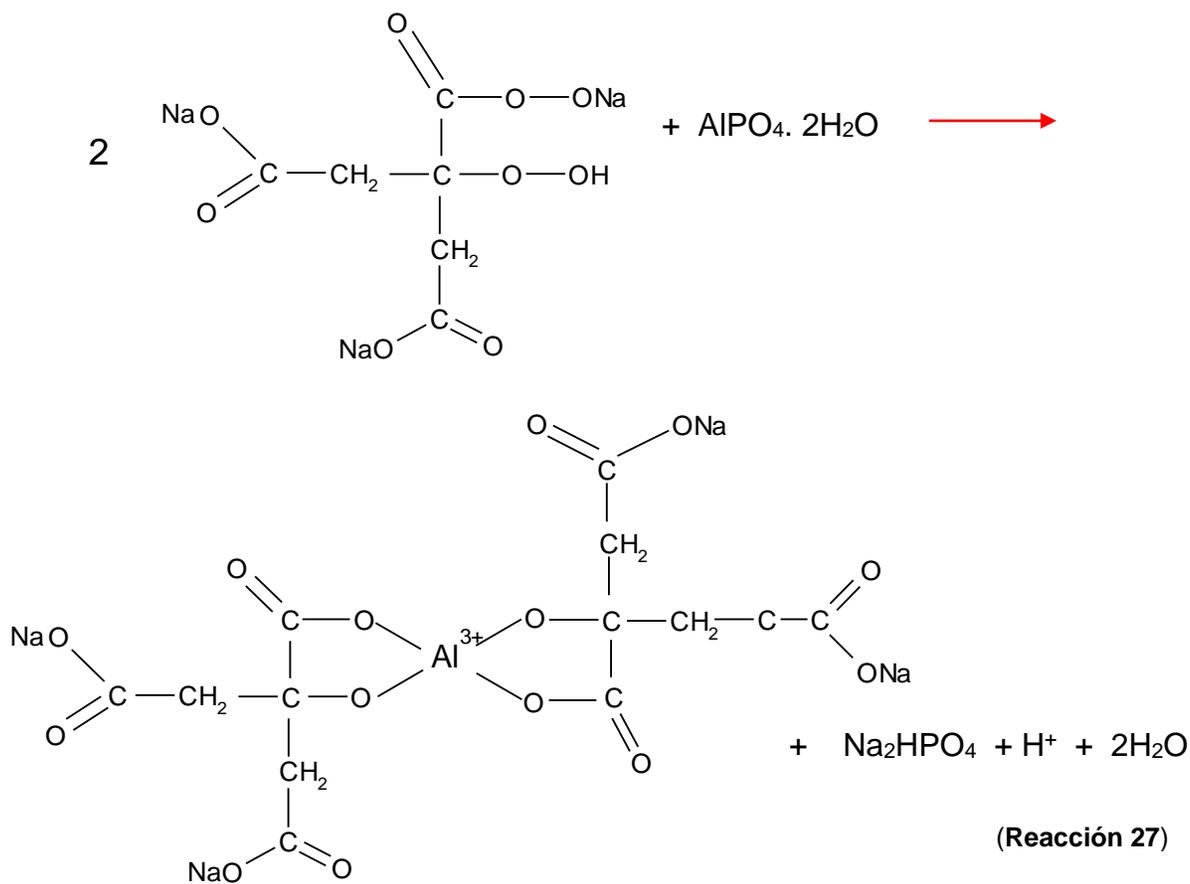
- En el segundo paso de la secuencia, se determina el fósforo unido al aluminio empleando una solución de fluoruro de amonio a pH 8,2; es necesario que la solución tenga este pH para minimizar la disolución de fosfatos de hierro y calcio, permitiendo así que los fosfatos de aluminio queden en solución. La reacción que se propone es la siguiente:

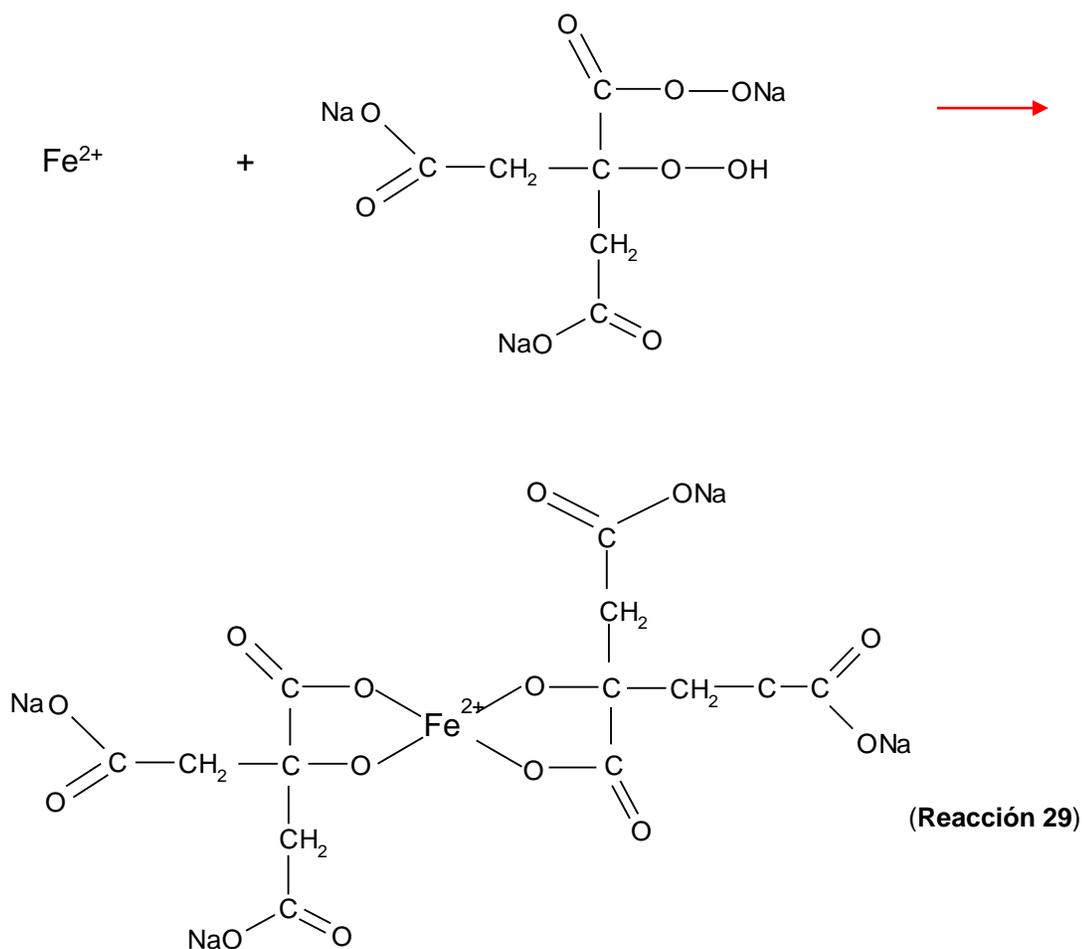


- En el tercer paso de la secuencia se utiliza NaOH 0,1N para extraer el fósforo unido al hierro superficial, como se propone en la reacción 26

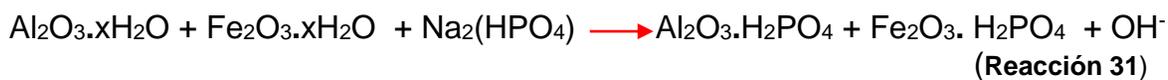
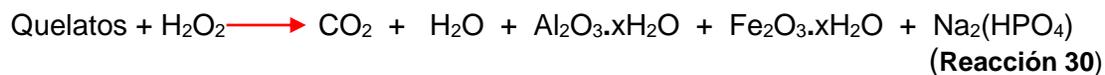


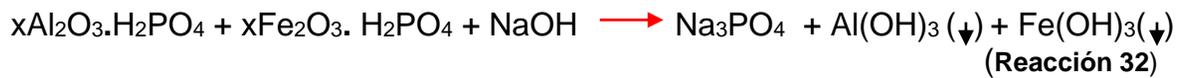
- El cuarto paso de la secuencia comprende la extracción de P unido al Fe y Al ocluido con una solución reductante de citrato, ditionito y bicarbonato. Para ello, es necesario, primero adicionarle a la muestra citrato, el cual quelata el hierro y el aluminio. Para facilitar la quelatación del  $\text{Fe}^{3+}$  que es muy estable, es necesario reducirlo a  $\text{Fe}^{2+}$  empleando el ditionito, un fuerte agente reductor. Quelatando estos metales, se logra solubilizarlos y se libera el P adsorbido sobre ellos, para su posterior determinación, una vez se elimine la interferencia causada por los citratos los cuales absorben a 660 nm. Las posibles reacciones que se plantean son:





Para eliminar esa interferencia se realizó un tratamiento a la solución anterior con peróxido de hidrogeno, el cual oxida los citratos formando óxidos de hierro y aluminio, que nuevamente reaccionarán con el P precipitándolo. Por ello, posteriormente son solubilizados con NaOH 2N con el propósito de precipitar el Fe y el Al en forma de hidróxidos y obtener el P en forma soluble para su determinación.





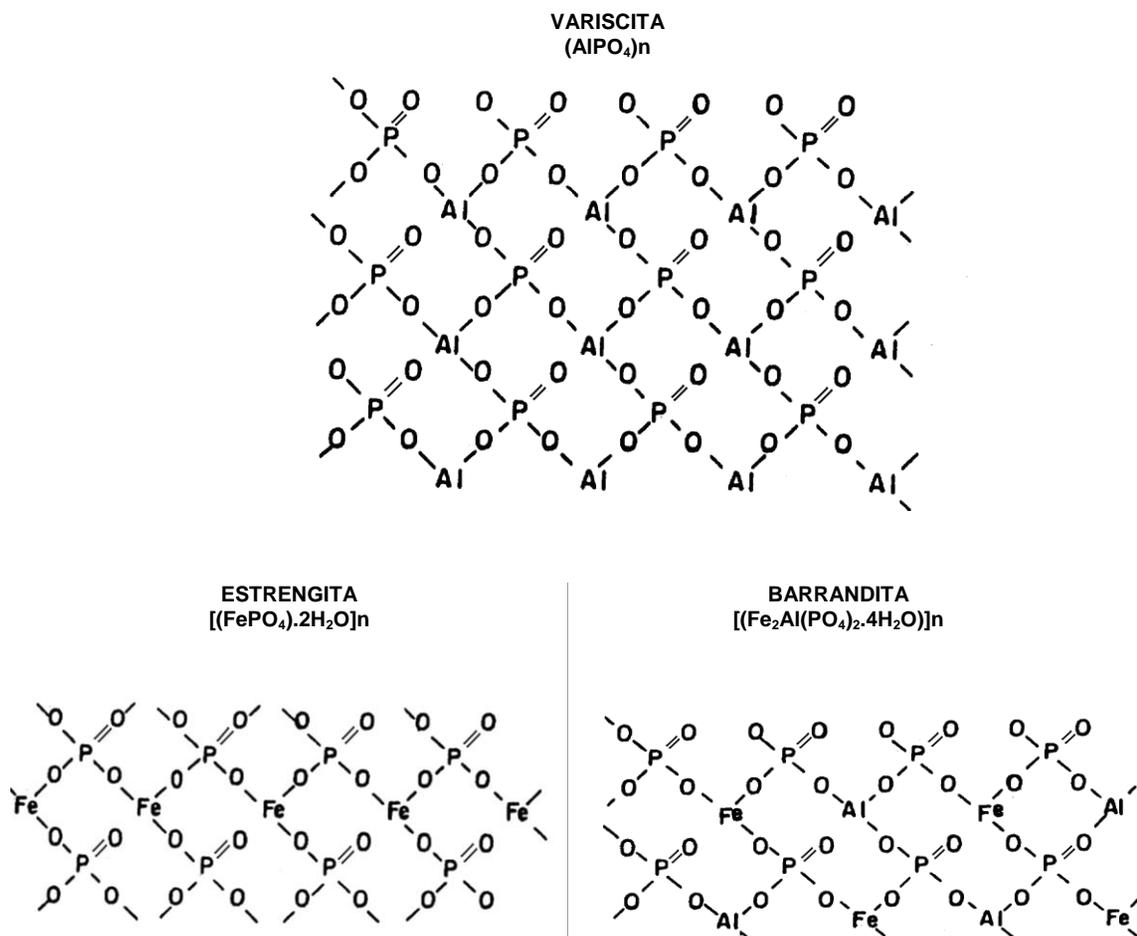
- El quinto paso, en la secuencia, extrae el fósforo unido al hierro y aluminio más ocluido con NaOH 1N, que a diferencia de la extracción con NaOH 0,1N extrae los fosfatos unidos al Fe y al Al que quedan accesible después de disolver los sesquioxidos durante el tratamiento con citrato-ditionito y bicarbonato (2), (En la figura 15 se muestra algunas estructuras de los fosfatos ocluidos).
- El sexto y ultimo paso en la secuencia corresponde al fósforo unido al calcio presente posiblemente en dos formas, cuyo extractante es H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.5N; ya que a pH básico estos fosfatos precipitan. Para esta extracción se plantean las siguientes reacciones:



La determinación del fósforo orgánico se realiza por diferencia entre una muestra de suelo calcinada y otra sin calcinar. La calcinación permite que se destruya toda la materia orgánica, quedando solo el fósforo inorgánico lo cual no se garantiza, debido a que parte del fósforo inorgánico se puede solubilizar por las altas temperaturas, *Bowman* (36).

A las dos muestras se les adicionó ácido sulfúrico para poder extraer de la solución mineral el fósforo

**Figura 15. Estructura de algunos fosfatos ocluidos**



El fósforo total se determina realizando una digestión con ácido perclórico y ácido nítrico en una relación 3:1, con el fin de destruir la materia orgánica y digerir la fracción inorgánica; al final se obtuvo un residuo blanco con partículas negras.

### 5.2.1 Fracciones de fósforo obtenidas por la extracción secuencial para el suelo No. 1

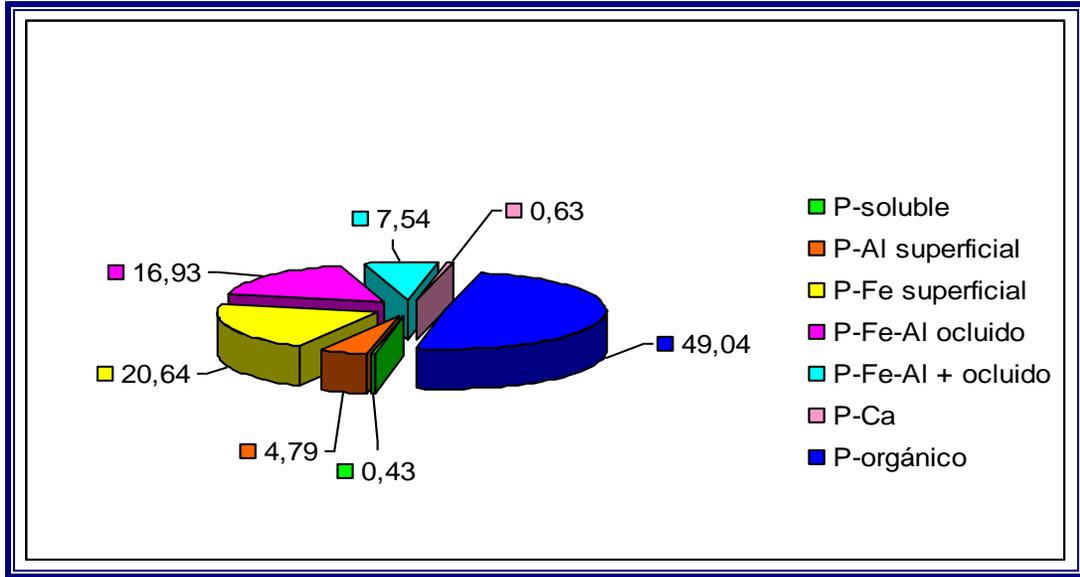
En la tabla 5 y figura 16 se presentan las concentraciones de fósforo de las diferentes fracciones determinadas para el suelo No. 1. El resultado es el promedio de dos réplicas.

**Tabla 5. Concentraciones de las diferentes fracciones de fósforo del suelo No 1.**

ORDEN SECUENCIAL DE EXTRACCIÓN	SOLUCIÓN EXTRACTORA	FRACCIÓN DE FÓSFORO	FÓSFORO (ppm)	g DE P/ 100g SUELO x 10 <sup>-4</sup>	% DE FÓSFORO REFERENTE AL FÓSFORO TOTAL
1	NH <sub>4</sub> Cl	Soluble	6,5	6,5	0,43
2	NH <sub>4</sub> F	P – Al	72,0	72,0	4,79
3	NaOH 0.1N	P – Fe superficial	310,5	310,5	20,64
4	Citrato-ditionito	P – Fe – Al ocluido	254,7	254,7	16,93
5	NaOH 1N	P – Fe –Al más ocluido	113,4	113,4	7,54
6	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.5N	P – Ca	9,4	9,4	0,63
*	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.6N	P – orgánico	737,5	737,5	49,04
*	HNO <sub>3</sub> -HClO <sub>4</sub> 1:3	P total	1051,5	1051,5	100

\* No hacen parte de la extracción secuencial

**Figura 16. Resultados del contenido de fósforo en cada una de las fracciones suelo No. 1**



Como se aprecia en la figura 16 y en la tabla 5, la mayor fracción corresponde al fósforo orgánico, representando el 49,04% del P total, estando acorde con lo reportado en la literatura por diferentes autores (*Fassbender and Bomemisza (4)*, *Stevenson (14)*, *Silva (32)*) y se corresponde con el alto contenido de MO presente en este suelo, indicando una reserva potencial de este nutriente tanto para los microorganismos como para los cultivos, ya que la participación del P orgánico en el P total generalmente varía entre 25 y 75%. Los compuestos principales del P orgánico son los fosfatos del ácido inositoheptafosfórico o inositol que llega a constituir el 50% de este.

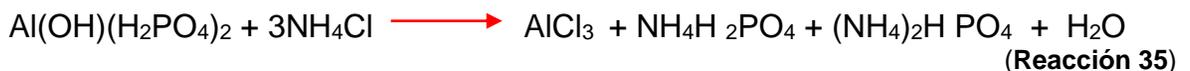
La abundancia relativa de las varias formas de fósforo inorgánico, presentan el siguiente orden: P unido al Fe superficial (0.1M NaOH) > P unido al Fe y Al ocluido (Cittrato-Ditionito-Bicarbonato) > P unido al Fe y al Al más ocluido (1M NaOH) > P unido al Al superficial (NH<sub>4</sub>F) > P unido al Ca (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) > P soluble (NH<sub>4</sub>Cl).

La fracción más abundante es la de fósforo unido al hierro superficial extraída con NaOH 0.1 M, esto debido al origen y al pH del suelo analizado en el que este catión se encuentra precipitado probablemente formando dióxidos u óxidos que adsorben el fósforo en forma aniónica como se mostró en la figura 7. Representa un 20,64% del P total y un 41.4% del P inorgánico.

Le sigue en orden de abundancia el P unido al Fe y Al ocluido, que corresponde al 16,93 % del P total, indicando una alta presencia de estos metales debido al origen del suelo y a su carácter fuertemente ácido. Luego, se presenta en orden de abundancia los fosfatos unidos al Fe y Al más ocluidos con un 7,54% del P total, atribuibles probablemente a variscitas, estregitas y otros minerales provenientes de las arcillas presentes en este suelo. El valor obtenido para el fósforo unido al aluminio es de 72 ppm que corresponden al 4,79 % del fósforo total, siendo este un bajo porcentaje debido a la baja cantidad de aluminio intercambiable que presenta este suelo y que se puede explicar debido al alto contenido de MO que puede estar quelatando este elemento de tal forma que impide su unión al fósforo.

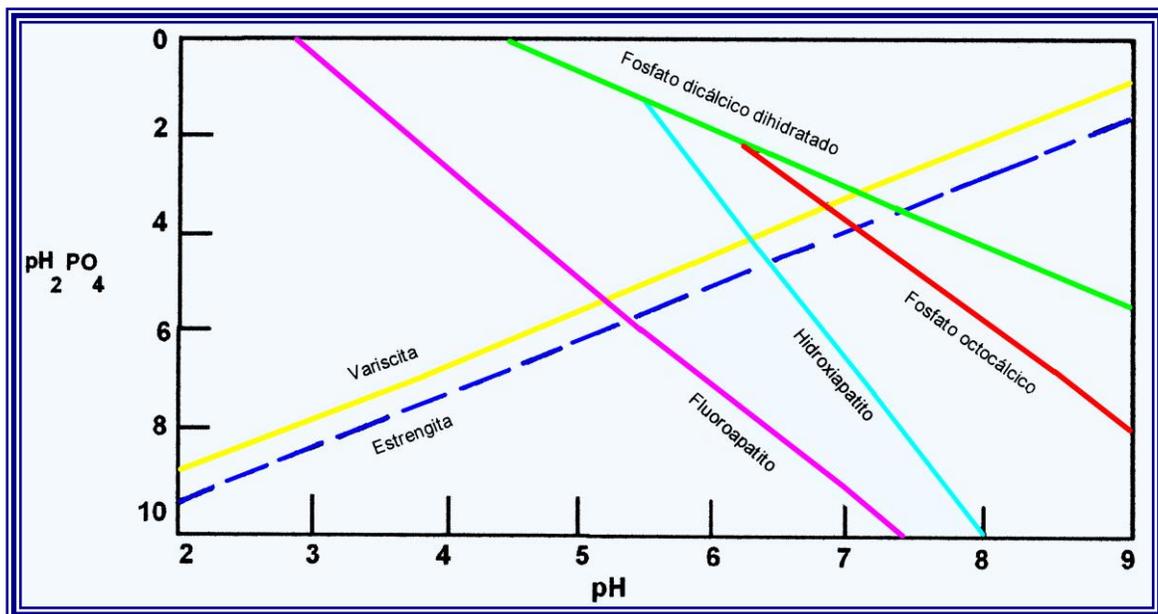
El fósforo unido al Ca con un 0,63% del P total, es bajo y se atribuye a la fuerte acidez del suelo, en donde esta forma es soluble y se lava fácilmente, lo cual se demuestra en el bajo nivel de Ca intercambiable encontrado en este suelo así como a su baja saturación. Al comparar este bajo valor con el reportado por *López y García* (2) para un suelo vertisol de España, se encuentra que en este último esta fracción corresponde al valor más alto, debido precisamente a que su pH oscila entre 6,6 y 8,2, en donde el catión predominante es el calcio.

Por último se presenta el fósforo soluble con una concentración de 6,5 ppm correspondiente a un 0,43% del P total, una cantidad mayor a la obtenida para el fósforo disponible (3,3 ppm). Es de esperar que el disponible sea superior al soluble, ya que cuando se evalúa el fósforo disponible se determina tanto el P soluble como el que está débilmente adsorbido sobre óxidos de hierro y aluminio. Este resultado se puede atribuir probablemente a que la solución extractora de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , es capaz de extraer también el P que está precipitado en forma de fosfatos de aluminio, como se muestra en la siguiente reacción:



De otra parte es posible que se logre la solubilización parcial de variscita que de acuerdo a la figura 17 a este valor de pH empezaría a solubilizar para producir fosfato en solución ya sea como  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  o como  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ . Al comparar este valor con el reportado por *López y García* (2) para el suelo Vertisol, se encuentra que también representa un bajo porcentaje del fósforo total (0,2%); no se encuentran reportes de fósforo soluble para suelos colombianos.

Figura 17. Relación entre la solubilidad de los fosfatos del suelo y el pH



El contenido de P total para este suelo es de 1051,5 ppm. No se encuentra en la literatura datos de P para este tipo de suelos, a excepción del estudio realizado por *Blasco y Bohórquez* (37) reportado por *Fasbender* (4), en suelos del Cauca en donde hallan un valor de 591 ppm. Sin embargo, no es posible comparar con este dato, debido a que no se muestran la características de los suelos analizados por ellos.

De acuerdo a los porcentajes, se observa que las formas de fósforo unido al hierro y al aluminio superficial, se encuentran en la misma proporción que las formas ocluidas indicando nuevamente la abundancia de estos elementos en diferentes formas debido a la fuerte acidez y al origen de ellos.

La suma de las fracciones de fósforo unido al hierro y al aluminio en todas sus formas (ocluídas y superficial), representan el 49.9% del fósforo total, siendo acorde con el tipo de suelo (Andisol) que contiene grandes cantidades de estos metales.

### 5.2.2 Fracciones de fósforo obtenidas por la extracción secuencial para el suelo No. 2

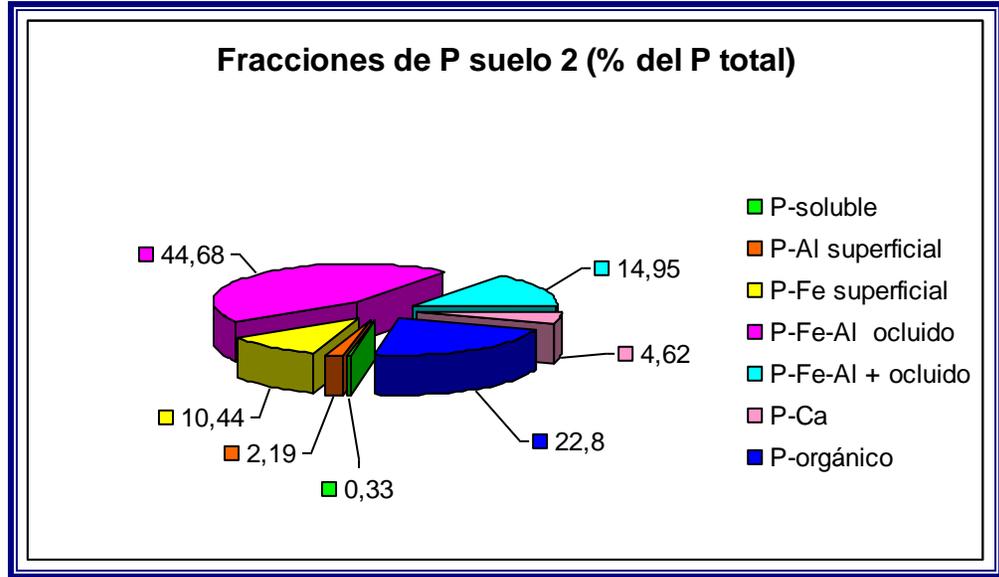
En la tabla 6 y figura 18 se presentan las concentraciones de fósforo de las diferentes fracciones determinadas para el suelo No. 2. El resultado es el promedio de dos réplicas.

**Tabla 6. Concentraciones de las diferentes fracciones de fósforo del suelo No. 2**

ORDEN SECUENCIAL DE EXTRACCIÓN	SOLUCIÓN EXTRACTORA	FRACCIÓN DE FÓSFORO	FÓSFORO (ppm)	g DE P/ 100g SUELO x 10 <sup>-4</sup>	% DE FÓSFORO REFERENTE AL FÓSFORO TOTAL
1	NH <sub>4</sub> Cl	Soluble	1,16	1,16	0,33
2	NH <sub>4</sub> F	P – Al	7,78	7,78	2,19
3	NaOH 0.1N	P – Fe superficial	37,10	37,10	10,44
4	Citrato-ditionito	P – Fe – Al ocluido	158,76	158,76	44,68
5	NaOH 1N	P – Fe – Al más ocluido	53,10	53,10	14,95
6	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.5N	P – Ca	16,41	16,41	4,62
*	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.6N	P orgánico	80,99	80,99	22,80
*	HNO <sub>3</sub> -HClO <sub>4</sub> 1:3	P total	257,51	257,51	

\* No hacen parte de la extracción secuencial

**Figura 18. Resultados del contenido de fósforo en cada una de las fracciones del suelo No. 2**



De acuerdo a la tabla 6 y a la figura 18, la abundancia de las diferentes fracciones de fósforo (orgánicas e inorgánicas) determinadas para el suelo No. 2, presentan el siguiente orden: P unido al Fe y Al ocluidos (Citrato-Ditionito-Bicarbonato) > P orgánico ( $H_2SO_4$  0.6 N) > P unido al Fe y al Al más ocluido (1M NaOH) > P unido al Fe superficial (0.1M NaOH) > P unido al Ca ( $H_2SO_4$ ) > P unido al Al superficial ( $NH_4F$ ) > P soluble ( $NH_4Cl$ ), orden similar al reportado por *Blasco y Bohorquez* (37) en estudios realizados en suelos del Cauca.

La fracción más representativa para este suelo es la del P unido al Fe y Al ocluidos, que corresponden al 44,68% del P total y a un 61,84% del P inorgánico, atribuible probablemente a la presencia de alófanos en este suelo. Le sigue en abundancia la fracción de fósforo orgánico que representa el 22,8% del fósforo total, aún cuando el nivel de MO es bajo, gran parte del P se encuentra en forma de compuestos orgánicos como ocurre en la mayoría de los suelos. La siguiente fracción es la del P unido al Fe y Al más ocluido con un 14,95% del P total, esto debido al origen y al pH que presenta este suelo. Luego, se presenta en orden de abundancia la fracción de P unido al Fe superficial con un 10,44% del P total atribuible probablemente a que al valor de pH del suelo la mayor parte del Fe está precipitado en forma de  $Fe(OH)_3$ . El fósforo unido al calcio representa el 4,62% del fósforo total, siendo un valor bajo debido a la fuerte acidez que presenta este suelo, por lo cual el fosfato de calcio es soluble y se lava fácilmente, lo que es acorde con el bajo porcentaje de saturación de calcio. El fósforo unido al aluminio corresponde al 2,19% del fósforo total, este bajo porcentaje es debido a la baja cantidad de aluminio intercambiable que presenta este suelo. Finalmente se

presenta la fracción de fósforo soluble con una concentración de 1,16 ppm que corresponden al 0,33% del fósforo total, siendo ligeramente superior la concentración del fósforo disponible (1,3 ppm) debido a que al evaluar este fósforo se determina tanto el fósforo disponible como el que está débilmente adsorbido sobre óxidos de hierro y aluminio.

El contenido de P total es de 257,51 ppm, supremamente inferior al encontrado en el suelo 1, debido probablemente al bajo contenido de MO que es la fuente principal de este elemento.

En el suelo No. 2 se destaca que la fracción de P unido al Fe y al Al ocluida (59,63%) es mayor respecto al P unido al Fe y Al superficial (12,63%); esto debido probablemente a la presencia de alofanos deducibles de las características físicas y químicas de este suelo.

La suma de las fracciones de P unido al Fe y Al superficial y P unido al Fe y Al ocluido es mayor para el suelo No. 2 con un 72,26% del P total con respecto al suelo No. 1 que presenta un 49,9% del P total, debido probablemente a la presencia de alofanos en el suelo No. 2.

El P unido al calcio del suelo No. 2 (4,62%) es superior al del suelo No. 1 debido a que este último presenta un pH menor, en donde la solubilidad de esta forma de P es mayor y se pueden presentar pérdidas por lavado como se mostró anteriormente en el análisis a este suelo, en donde la saturación de bases es inferior.

El fósforo soluble en el suelo No. 1 es superior al del suelo No. 2 como era de esperarse, debido a la mayor acidez presente en el primero; cabe resaltar que en suelos ácidos los fosfatos de calcio están en forma soluble, mientras que los fosfatos de hierro y aluminio están en forma precipitada. A medida que aumenta el valor del pH va disminuyendo la solubilidad de los fosfatos de calcio, lo cual explica también que el suelo No. 2 presente mayor contenido de fosfatos de calcio precipitados, ya que su valor de pH es superior al del suelo No. 1; por esta misma razón en el suelo No. 2 la solución extractora para fósforo soluble extraería menor cantidad de fosfato de calcio que en el suelo No. 1.

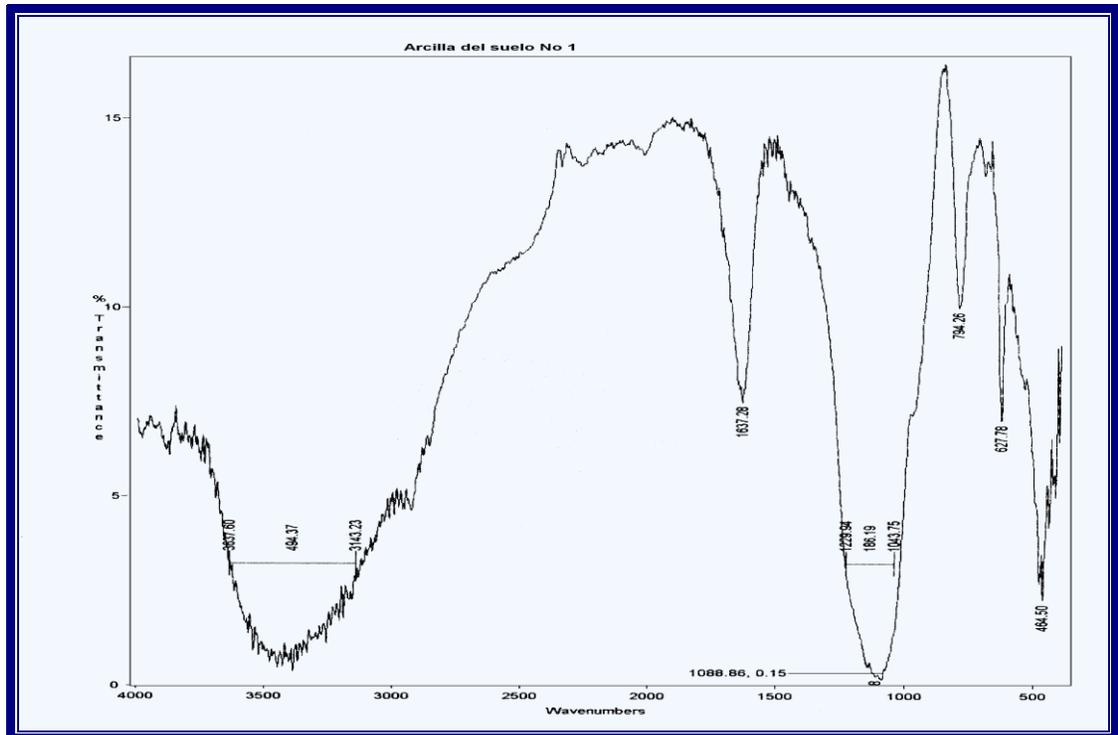
En suelos con alto contenido de MO predominan los fosfatos orgánicos como se observa en este estudio, ya que el suelo No. 1 con mayor cantidad de MO es el

que presenta mayor porcentaje de P orgánico comparado con el suelo No. 2 que presenta la menor cantidad de MO.

De acuerdo a Garavito (5) los dos tipos de suelos analizados se pueden considerar como suelos de alta evolución, ya que de la fracción inorgánica de P en ambos predomina el fósforo unido al hierro y al aluminio.

En la determinación de P total para los dos suelos se obtiene un residuo al cual se le realizó un espectro IR que se muestra en las figuras 19 y 20 y una microscopía electrónica de transmisión que se muestra en la figura 21.

**Figura 19. Espectro IR del residuo de la digestión del fósforo total para el suelo No 1**



Para el espectro IR del residuo del suelo No. 1, las bandas obtenidas son:

3640-3500  $\text{cm}^{-1}$  que representan las vibraciones de grupos OH de minerales arcillosos.

3500-3000  $\text{cm}^{-1}$  que son las vibraciones de dipolos de moléculas de agua, de grupos OH de minerales arcillosos.

1637  $\text{cm}^{-1}$  que son las vibraciones de H-OH de minerales arcillosos

1300-950  $\text{cm}^{-1}$  que son las vibraciones valenciales de grupos Si-O de minerales

1200-1100  $\text{cm}^{-1}$  que son las vibraciones de los enlaces O-Si-O

1100-1085  $\text{cm}^{-1}$  que son las vibraciones del enlace Si-O

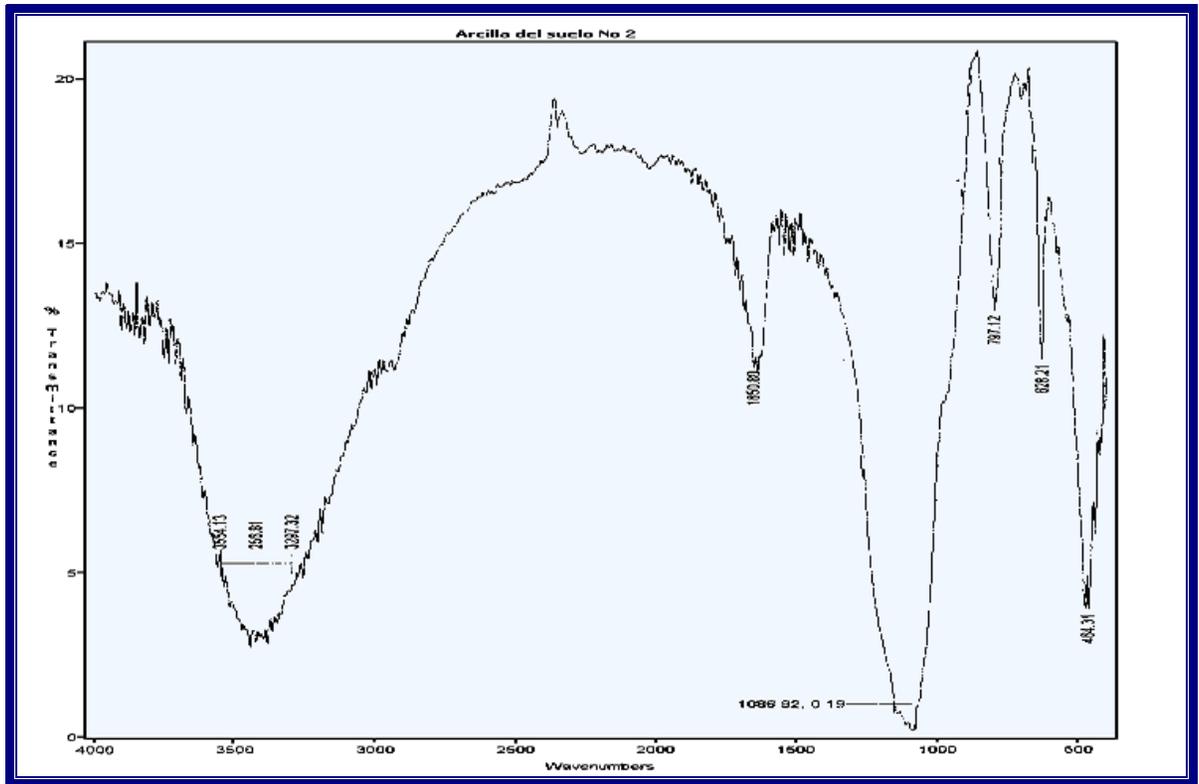
794  $\text{cm}^{-1}$  que son las vibraciones del enlace Si-O, se asocia a compuestos como cristobelita, óxido silicio amorfo, caolinita, montmorillonita.

630-620  $\text{cm}^{-1}$  que se asocia a vibraciones de los enlaces  $\text{Al}^{\text{IV}}\text{-O-Si}$  de la montmorillonita.

470-440  $\text{cm}^{-1}$  que son las vibraciones del enlace Si-O

440-420  $\text{cm}^{-1}$  que se atribuyen a enlaces  $\text{Me}^{\text{IV-VI}}\text{-OH}$  de arcillas como la caolinita, montmorillonita.

**Figura 20. Espectro IR del residuo de la digestión del fósforo total para el suelo No2.**



Para el suelo No. 2 las bandas obtenidas del IR son:

3554-3297  $\text{cm}^{-1}$  que se asocian a vibraciones de moléculas de agua de grupos OH de minerales.

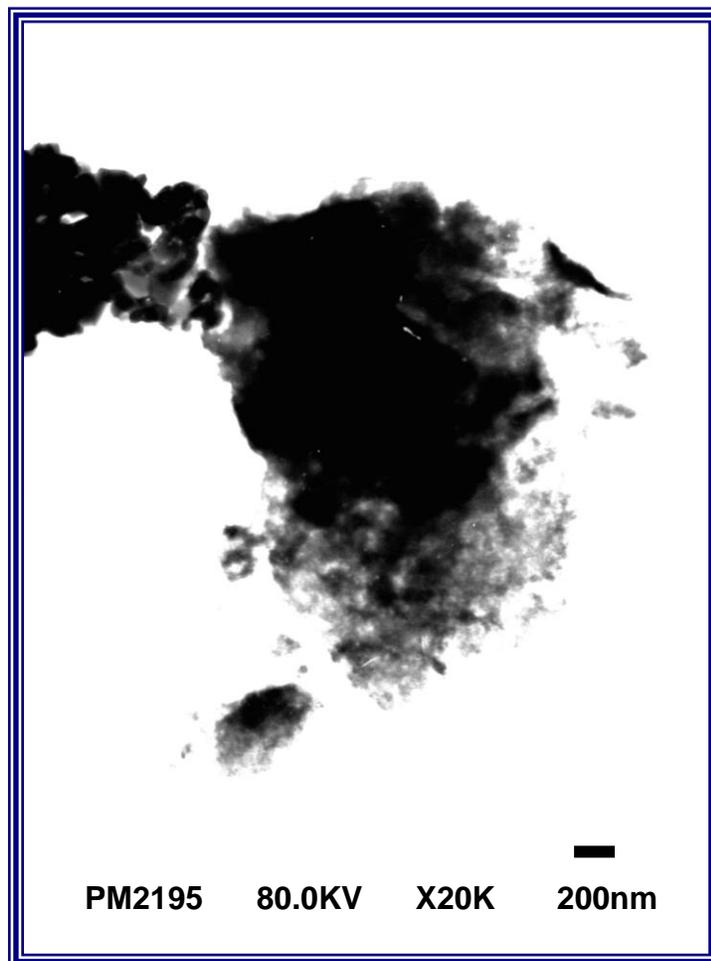
1650  $\text{cm}^{-1}$  que son las vibraciones del enlace H-OH de minerales arcillosos y sustancias amorfas.

797  $\text{cm}^{-1}$  que son las vibraciones de enlaces Si-O que se asocia a minerales como cristobelita, caolinita, montmorillonita y a óxidos de silicio amorfos que probablemente corresponden a los alófanos lo cual se comprueba con la banda a 1650  $\text{cm}^{-1}$ .

La diferencia de las bandas entre los dos suelos únicamente se manifiesta en la banda correspondiente a  $1650\text{ cm}^{-1}$

Del anterior análisis se puede inferir que probablemente el residuo obtenido después de la digestión en los dos tipos de suelos corresponde a láminas de arcilla y/o a compuestos amorfos como los alofanos que no fueron digeridos con la mezcla de ácidos. La microfotografía obtenidas en microscopía electrónica de transmisión para el suelo No.2 muestra partículas delgadas parecidas a una lámina con pequeños huecos muy similar a la microfotografía obtenida con partículas de alofanos encontradas por, *Bleeker and Parfitt* (38), lo que reafirma la presencia de alófanos en este suelo.

**Figura 21. Microfotografía en microscopía electrónica de transmisión del residuo de la digestión del fósforo total para el suelo No. 2**



El porcentaje del residuo obtenido en el suelo No 1 es de 6,94%, siendo inferior al porcentaje de arcillas encontrado en este suelo (10.37%), indicando que no todas las arcillas fueron digeridas. Para el suelo No. 2, el porcentaje de residuo es de 17,08%, siendo superior al de las arcillas presentes en el, indicando así que además en el residuo permanecen alofanos que hacen que incremente ese porcentaje, y nuevamente se corrobora su presencia por la banda de IR encontrada a  $1650\text{ cm}^{-1}$  en esta muestra de suelo.

### 5.3 Fraccionamiento de Materia orgánica

#### 5.3.1 Separación de la materia orgánica humificada (MOH) de la materia orgánica fresca (MOF)

Por medio del tamizado en húmedo, se separan dos componentes de la materia orgánica clasificados como sustancias húmicas o materia orgánica humificada que son partículas menores de  $50\mu\text{m}$  y las no húmicas o materia orgánica fresca que son las partículas mayores a  $50\mu\text{m}$ .

Las sustancias no húmicas o materia orgánica fresca (MOF) corresponden a los residuos inalterados de tejidos animales y vegetales. Las sustancias húmicas (MOH) son sustancias que han sido alteradas química y biológicamente y representan la fracción más activa de la materia orgánica, porque participan en un gran número de reacciones con otras moléculas como orgánicas, coloides minerales, iones inorgánicos y células microbianas, que son capaces de retener reversiblemente tanto moléculas de agua como iones.

En la Tabla 7 se recopilan los porcentajes de MO, C y porcentajes de rendimiento de la MOH y la MOF para el suelo No. 1 y No. 2 obtenidos mediante el método granulométrico.

**Tabla 7. Contenidos de MOH y MOF para los suelos**

SUELO No.	CONTENIDO DE MO	CLASE DE MO	%C	%MO
1	11,67	MOF	4,21	7,25
		MOH	6,80	11,72
2	1,22	MOF	0,42	0,72
		MOH	1,07	1,85

En la tabla 7 se observa que el suelo No. 1 presenta mayor contenido tanto de MOF como de MOH que el suelo No. 2, debido a que en el No. 1 el contenido de MO en el suelo es muy superior al del suelo No. 2.

Además, se observa un considerable incremento en el valor del % Corg y por ende en el % MO en la MOH en ambos suelos, indicando un mayor contenido de carbono orgánico fácilmente oxidable, en esta última fracción. Este aumento que es superior en el suelo No. 1, se debe posiblemente a la presencia de las sustancias húmicas (ácidos fúlvicos, húmicos y huminas) en la MOH y a la presencia de otros compuestos orgánicos como las proteínas, azúcares, aminoácidos, entre otros, ligados a estas sustancias, corroborando una mayor acción microbiológica sobre todo en el suelo No. 1, que permite la transformación y oxidación adecuada de la MO del suelo.

### **5.3.2 Extracción y Valoración de Sustancias Húmicas y del Extracto Húmico Total**

Las sustancias húmicas (o materia orgánica humificada), se clasifican en tres grupos: Ácidos húmicos, fúlvicos y huminas, por lo cual se hace necesario fraccionarlas utilizando la solubilidad diferencial en diversos solventes.

A las sustancias húmicas se les adicionó una solución de KOH al 4%; la fracción que no es dispersable, es decir, la que se precipita por la peptización del  $K^+$  y la actividad de rompimiento de los enlaces hidrógeno por los valores de pH muy alcalinos se conoce como humina. A la fracción dispersable o soluble a pH alcalino se le adiciona  $H_2SO_4$ , para precipitar los ácidos húmicos, quedando así en solución la fracción correspondiente a los ácidos fúlvicos. El extracto húmico total se considera a las fracciones correspondientes a los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos determinados en la fracción dispersable. Los resultados se presentan en la tabla 8.

**Tabla 8. Fraccionamiento de sustancias húmicas y determinación del extracto húmico total para los suelos**

SUELO No.	EXTRACTO HÚMICO TOTAL (%C)	FRACCIÓN DE SUSTANCIAS HÚMICAS	% C	%MO	%OBTENCIÓN
1	2,40	Huminas	4,29	7,4	92,90
		Ácidos húmicos	0,86	1,48	1,84
		Fracción fúlvica	1,54	2,48	4,64
2	0,40	Huminas	0,67	1,16	98,31
		Ácidos húmicos	0,06	0,1	0,48
		Fracción fúlvica	0,34	0,6	1,15

En la tabla 8 se observa que el porcentaje del extracto húmico total del suelo No. 1 es seis veces superior al del suelo No. 2, como era de esperarse debido a que el primero presenta contenidos de MO y de sustancias húmicas superiores a los del suelo No. 2. Además, en ambos suelos predomina la fracción correspondiente a las huminas con valores superiores al 90%. En el suelo No. 2 esta fracción es superior al del suelo No 1 y por esta razón, se detecta menor presencia de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos en este último, de tal manera que produce un menor extracto húmico total.

### 5.3.2.1 Evaluación del Grado de Humificación

El grado de humificación de la materia orgánica de los dos suelos se evaluó mediante dos parámetros: índice de humificación HR1 y relación E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub>

- **Índice de humificación HR1**, sus resultados se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9. Resultados de Índice de Humificación de la MO de los suelos**

SUELO No.	%C AH	%C FF	HR1
1	0,86	1,54	0,56
2	0,06	0,34	0,18

De la tabla 9 se deduce que en ambos suelos el índice de humificación es inferior a 1, indicando un bajo grado de humificación, debido probablemente a su fuerte acidez

La MO del suelo No.1 presenta mayor grado de humificación que la del suelo No. 2, como era de esperarse de acuerdo a los valores de la relación C/N que indicaron que el suelo No. 1 presenta una mineralización normal, mientras que en el suelo No. 2 la mineralización es muy alta, hasta el punto de llegar a una pérdida significativa de la materia orgánica y por lo tanto en este suelo no es posible elaborar un adecuado proceso de humificación. El mayor grado de humificación encontrado en el suelo No. 1 se puede correlacionar con el mayor porcentaje de extracto húmico total que presenta este suelo, así como con el menor porcentaje de huminas, comparado con el suelo No. 2. Además ese mayor grado de humificación implica una mayor capacidad de intercambio catiónico y capacidad de intercambio catiónica efectiva encontradas en este suelo. De otra parte el mayor grado de humificación del suelo No. 1 conduce a un menor porcentaje de materia orgánica fresca como se deduce de este análisis.

Aun cuando el grado de humificación del suelo No. 1 es mayor que el del suelo No. 2, el primero presenta mayor contenido de ácidos fúlvicos, debido al alto porcentaje de MO, lo cual lleva a una mayor solubilización de aluminio de los intersticios de las láminas de arcilla así como hierro de los minerales primarios o secundarios y por esto se encuentra en este suelo mayor contenido de aluminio intercambiable y mayor contenido de fósforo unido al aluminio y al hierro superficial.

- **Relación E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub>:** La relación E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> hallada mediante espectroscopia visible, *Mosquera* (23), permitió corroborar que la fracción húmica presenta una estructura compleja. Los resultados se relacionan en la tabla 10.

**Tabla 10. Relación E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> de cada una de las fracciones de la materia orgánica humificada para los suelos**

MUESTRA	FRACCIÓN	E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub>
Suelo No. 1	Huminas	1,83
	Ácidos húmicos	4,47
	Fracción fúlvica	3,38
Suelo No. 2	Huminas	2,00
	Ácidos húmicos	2,92
	Fracción fúlvica	2,32

Es de esperar de acuerdo a lo reportado en la literatura *Arango et al (27), Arango (33), Bravo (34), Arango (39), Bravo (40)*). que la relación  $E_4/E_6$  en ambos suelos fuese mayor en los ácidos fúlvicos que en los ácidos húmicos; sin embargo, debido a que estas fracciones no fueron purificadas, es posible que en la fracción fúlvica se presenten aun ácidos húmicos que le confieren un menor valor a la relación  $E_4/E_6$  en ambos suelos.

En el suelo No. 1 y No. 2, el valor de  $E_4/E_6$  de los ácidos húmicos es inferior a 5, propio de los ácidos húmicos *Mosquera (23)*. Al comparar los valores de esta relación en los ácidos húmicos de los suelos, se observa que el suelo No. 1 presenta mayor relación que el suelo No. 2, indicando probablemente que el suelo No. 1 tiene menor grado de condensación en la estructura de estos ácidos y por lo tanto su estructura es menos polimerizada que la de los ácidos del suelo No. 2 y de esta manera se podría concluir que es un suelo más joven, con un mayor grado de humificación que el suelo No. 2, el cual ha sido más meteorizado y por lo tanto presenta mayor mineralización, concordando con lo que indica la relación C/N.

#### 5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico comprendió la aplicación de pruebas no paramétricas como las de Mann-Whitney y correlaciones bivariantes de Rho de Spearman, *Bravo et al (28), Bravo et al (29), Bravo et al (30), Duarte et al (31)*. Estas pruebas son descriptivas, ya que los datos no se ajustan a la normalidad debido al tamaño de la muestra. Los resultados se presentan en el anexo, tabla 1.

De la tabla 3 se destacan las siguientes correlaciones: El fósforo soluble en ambos suelos correlaciona positivamente con el fósforo disponible, fósforo unido al aluminio superficial, fósforo unido al hierro y al aluminio más ocluido, fósforo orgánico, fósforo total, %MO, %EHT, HR1, Al intercambiable, % de arcillas, C/N y porcentaje de saturación de aluminio, indicando que al aumentar estas fracciones aumenta el fósforo soluble; en ningún caso es significativa estadísticamente esta correlación. El fósforo soluble se correlaciona negativamente con el pH y con el fósforo unido al calcio, indicando que a mayor pH habrá menos fosfato de calcio soluble y a mayor fosfato de calcio precipitado habrá menos fósforo soluble, pero en este caso tampoco la correlación es significativa.

Las fracciones de fósforo unidas al hierro y al aluminio superficial presentan una correlación negativa con el fósforo unido al calcio debido al antagonismo que presenta el hierro y el aluminio con el calcio y con el pH porque a medida que este

se incrementa precipita el aluminio y el hierro en forma de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  por lo tanto, libera el fósforo unido a ellos.

El fósforo orgánico se correlaciona negativamente con el pH porque a mayor pH mayor mineralización de la MO y por tanto disminuye las moléculas presentes en forma de fósforo orgánico. Correlaciona positivamente con la MO, EHT y HR1 porque el incremento de ellos conlleva al incremento de moléculas de fósforo orgánico.

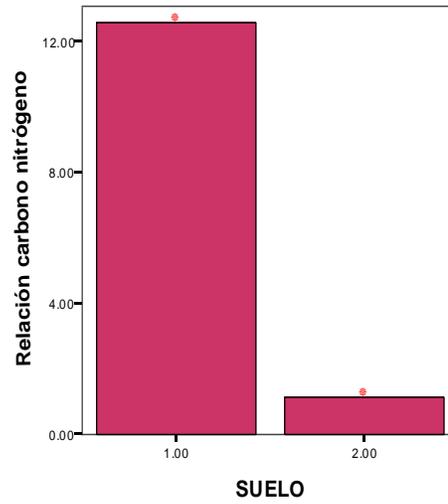
El fósforo unido al hierro y al aluminio más ocluidos se relacionan negativamente con el pH y con el calcio porque al incrementar el valor de pH precipita el Fe y Al liberando el fósforo unido a ellos y con el calcio por el antagonismo que hay entre estos elementos en el suelo.

Sin embargo, en todas estas correlaciones no existe una correlación significativa estadísticamente como se observa en la tabla 3, ya que los valores de significancia lateral son superiores a 0,05.

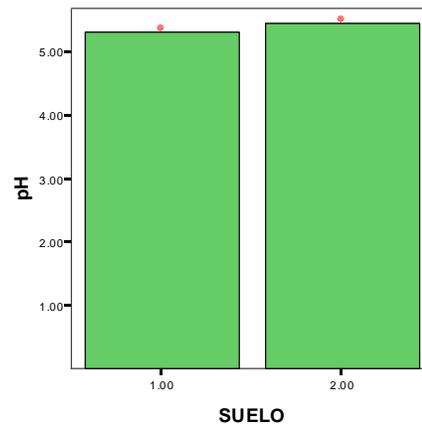
Las correlaciones gráficas de los diferentes parámetros analizados entre los dos tipos de suelos se muestran en las figuras 22 a 37. De ellas se deduce que existe una diferencia altamente significativa entre el % MO, relación C/N, HR1 y %EHT de los dos tipos de suelo siendo significativamente superiores en el suelo No. 1. También se aprecia una diferencia significativa entre el contenido de aluminio intercambiable y la saturación de aluminio siendo superior en el suelo No. 1. De las gráficas se aprecia además que no existe diferencia significativa entre los valores de pH y porcentaje de arcillas en los dos tipos de suelos.

De otra parte analizando las gráficas 22 a 38 se deduce que en las fracciones de fósforo de los dos tipos de suelos se aprecian diferencias siendo significativamente superiores en el suelo No. 1 los contenidos de fósforo total, fósforo orgánico, fósforo unido al hierro superficial, fósforo unido al hierro y al aluminio ocluido, fósforo unido al hierro y al aluminio más ocluido, fósforo unido al aluminio superficial, fósforo soluble y fósforo disponible. Mientras que en el suelo No. 2 únicamente es significativamente superior la fracción de fósforo unida al calcio, lo cual se puede atribuir probablemente a que este suelo presenta un ligero incremento en el valor de su pH.

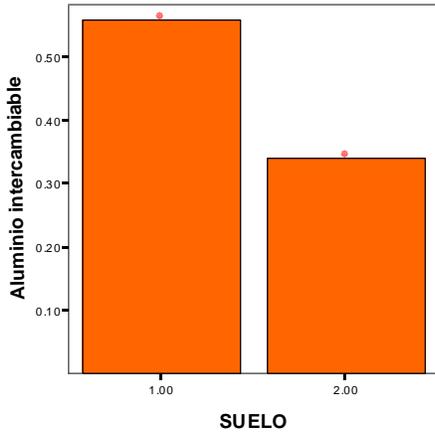
**Figura 22. Comparación de la relación C/N de los suelos**



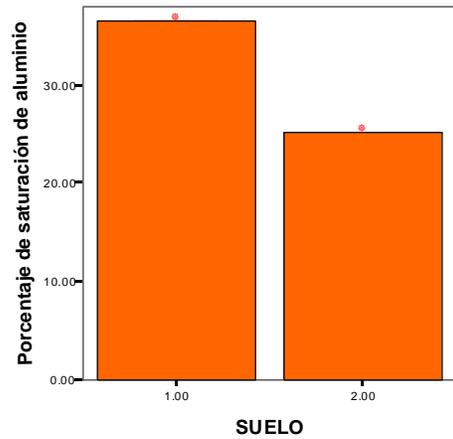
**Figura 23. Comparación del pH de los suelos**



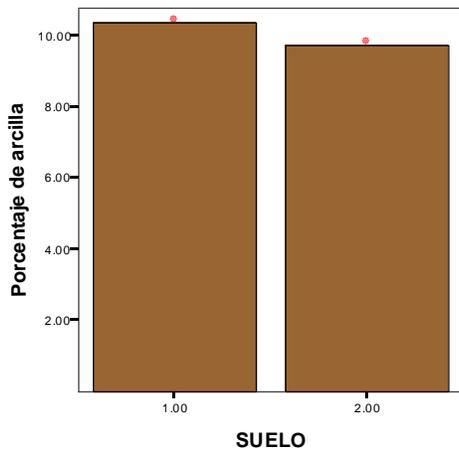
**Figura 24. Comparación del aluminio intercambiable de los suelos**



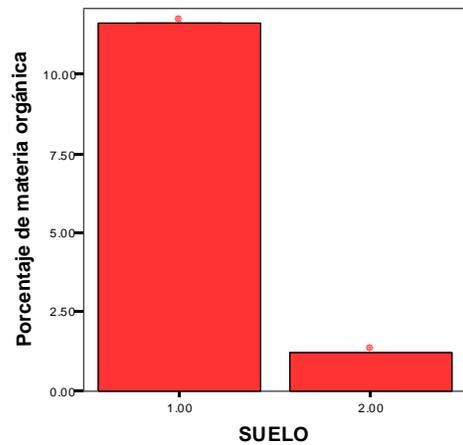
**Figura 26. Comparación del porcentaje de saturación de aluminio de los suelos**



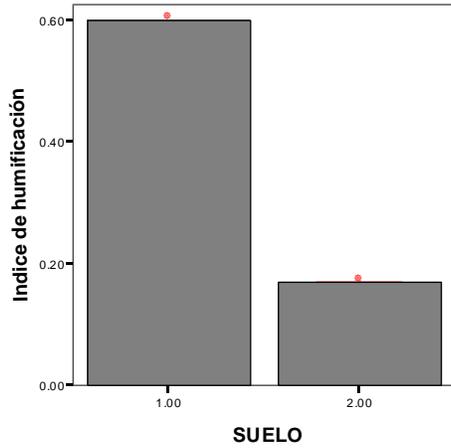
**Figura 25. Comparación del porcentaje de arcilla de los suelos**



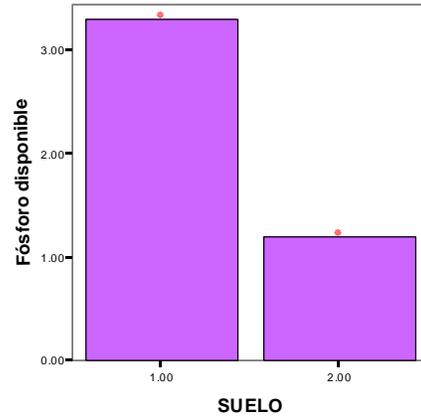
**Figura 27. Comparación de la materia orgánica de los dos suelos**



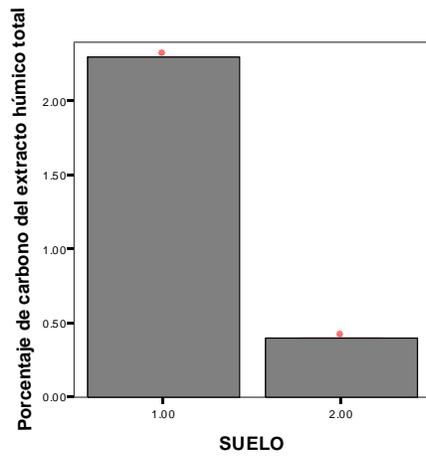
**Figura 28. Comparación del índice de humificación de los suelos**



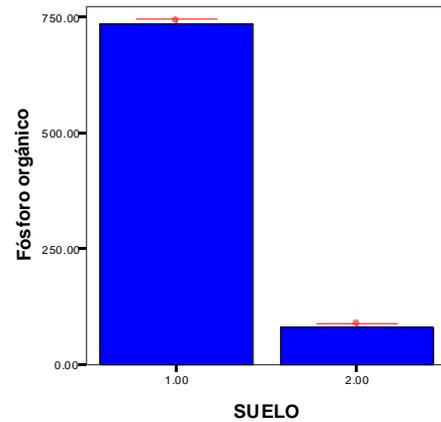
**Figura 30. Comparación del fósforo disponible de los suelos**



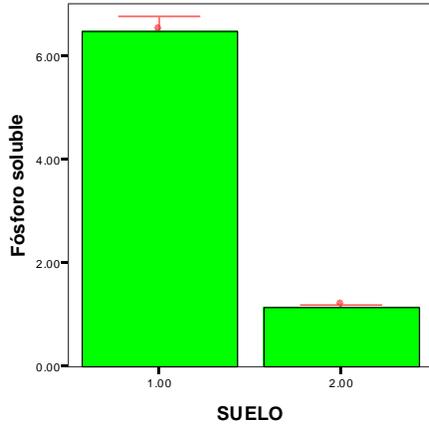
**Figura 29. Comparación de carbono del extracto húmico total de los suelos**



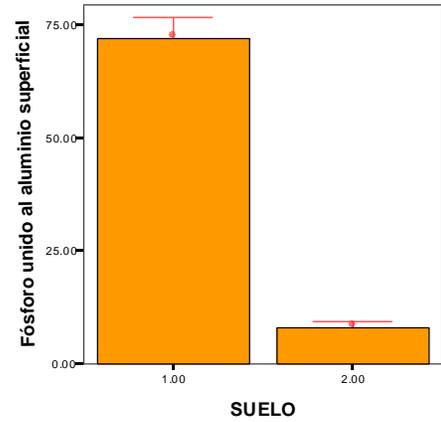
**Figura 31. Comparación del fósforo orgánico de los suelos**



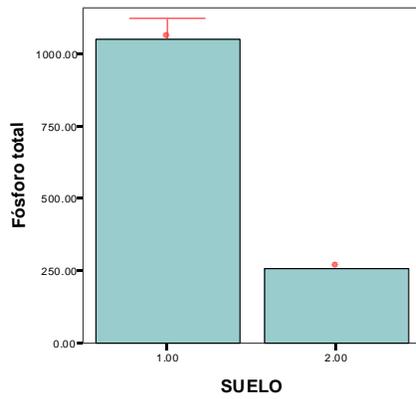
**Figura 32. Comparación del fósforo soluble de los suelos**



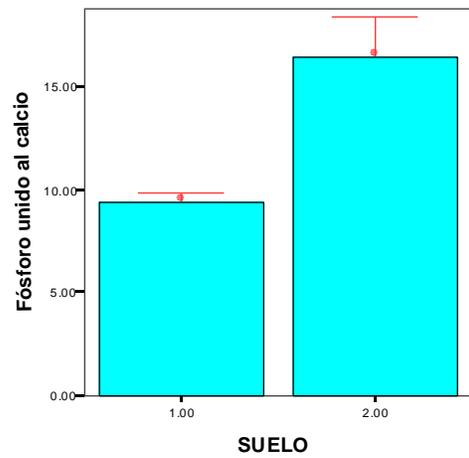
**Figura 34. Comparación del fósforo unido al aluminio superficial de los suelos**



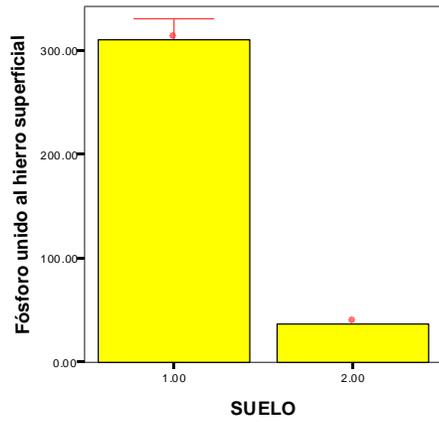
**Figura 33. Comparación del fósforo total de los suelos**



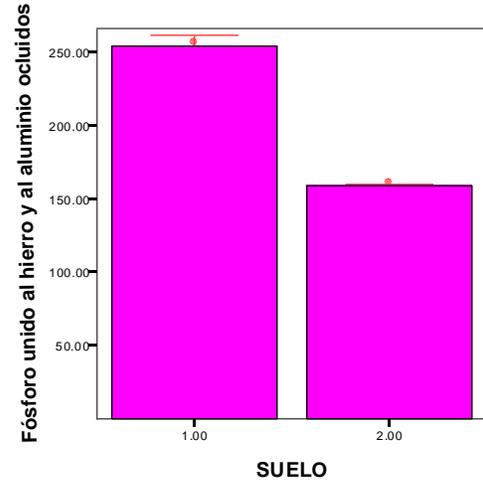
**Figura 35. Comparación del fósforo unido al calcio de los suelos**



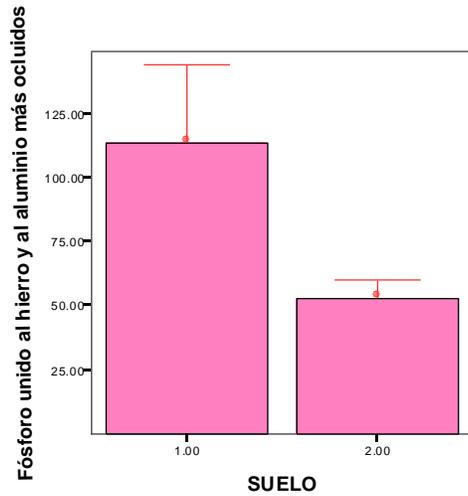
**Figura 36. Comparación del fósforo unido al hierro superficial de los suelos**



**Figura 38. Comparación del fósforo unido al hierro y al aluminio ocluidos de los suelos**



**Figura 37. Comparación del fósforo unido al hierro y al aluminio más ocluido de los suelos**



## 6. CONCLUSIONES

- La diferencia entre los dos tipos de suelos analizados radica principalmente en el contenido de MO, en el origen de la Acidez y en la relación C/N En el suelo No. 1 el contenido de MO es alto confiriéndole fuerte acidez, su saturación de Al es media, presenta una mineralización normal. Mientras que en el suelo No. 2 el contenido de MO es bajo y la acidez de éste proviene probablemente de los alófanos Su saturación de Al es baja, presenta una muy fuerte mineralización
- La abundancia relativa de las varias formas de fósforo presentes en el suelo No. 1 tienen el siguiente orden: P orgánico > P unido al Fe superficial > P unido al Fe y Al ocluido > P unido al Fe y al Al más ocluido > P unido al Al superficial > P unido al Ca > P soluble, contrastando con el orden encontrado en el suelo No. 2 que es: P unido al Fe y Al ocluidos > P orgánico > P unido al Fe y al Al más ocluido > P unido al Fe superficial > P unido al Ca > P unido al Al superficial > P soluble
- Los dos tipos de suelos analizados se pueden considerar como suelos de alta evolución, ya que de la fracción inorgánica de P en ambos predomina el fósforo unido al hierro y al aluminio.
- En el suelo No. 1 la fracción de fósforo más representativa fue la orgánica atribuible a su alto contenido de materia orgánica, mientras que para el suelo No. 2 la fracción mayor fue la del fósforo unido al hierro y al aluminio ocluidos debido a la presencia de alófanos en este suelo.
- El porcentaje del extracto húmico total del suelo No. 1 es seis veces superior al del suelo No. 2, debido a que el primero presenta mayor contenido de MO y de sustancias húmicas.
- Los dos suelos presentaron un bajo grado de humificación, siendo el suelo No. 1 muy superior al del suelo No. 2
- La relación  $E_4/E_6$  indica que el suelo No. 1 probablemente es más joven que el suelo No. 2.

- Existe una diferencia altamente significativa entre el % MO, relación C/N, HR1 y %EHT de los dos tipos de suelo siendo significativamente superiores en el suelo No. 1, parámetros que influyen fuertemente en las diferentes fracciones de fósforo de los dos tipos de suelo, encontrándose que el suelo No. 1 presenta valores significativamente superiores en todos los contenidos de fósforo en las diferentes fracciones a excepción del fósforo unido al calcio.
- Se deduce una correlación positiva entre el contenido de materia orgánica, su grado de humificación y la disponibilidad del fósforo en los suelos de tal manera que a mayor grado de humificación mayor disponibilidad y solubilidad de fósforo.
- En la digestión de los dos suelos para determinar el fósforo total se presentó un residuo blanco que de acuerdo al análisis IR y la microscopía electrónica de transmisión corresponde probablemente a silicatos y aluminosilicatos de arcillas y/o de alofanos.
- Con el presente trabajo se contribuye a la elucidación de los mecanismos de retención de fósforo ya que se muestra que en un suelo con muy bajo contenido de materia orgánica la fuerte retención se atribuye a la presencia de alofanos. Mientras que en un suelo con alto nivel de materia orgánica se disminuye la retención efectuada por óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio. Y el mayor contenido de fósforo presente en ella, sería potencialmente disponible a medida que ocurra un proceso adecuado de mineralización y para ello es necesario disminuir químicamente la fuerte acidez del suelo.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) CHANG, S., and JACKSON, M., 1957. Fractionation of soil Phosphorus. Soil Science Society American Journal. 84:133-144.
- (2) LÓPEZ, A., and GARCÍA, A., 2001. Phosphate fractions and availability in vertisols of south-western Spain. Soil Science. Vol. 166, 8:549-565.
- (3) MUÑOZ, B. 2004. Extracción y caracterización preliminar de huminas de un suelo Andisol del Departamento del Cauca. Trabajo de grado (químico). Universidad del Cauca. Popayán. p. 24-26.
- (4) FASSBENDER, H., and BOMEMISZA, E. 1987. Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina. Costa Rica. p. 7, 11 y 121-124.
- (5) GARAVITO, F., 1974. Propiedades Químicas de los Suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Vol 10. No 11. Bogotá.
- (6) GIRALDO, E. 2002. Agroquímica: Un Estudio de los Nutrientes Esenciales en la Producción Agrícola. Universidad del Cauca. Popayán.
- (7) TSAI, S.M. y ROSSETTO R. 1992. Transformacoes microbianas do fósforo. In Microbiologia do Solo. Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo. Campinas, Brasil.
- (8) IYAMUREMYE, F. and DICK, R.P. 1996. Organic Amendments and Phosphorus dynamics: I. Phosphorus Chemistry and sorption. Soil Science., 161: 426-435.
- (9) ZHANG, M.; ALVA, A. K.; Li, Y. C.; CALVERT, D. V. 1997. Fractionation of Iron, Manganese, Aluminium, and Phosphorus in Selected sandy soils under Citrus Production. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 794 - 801.
- (10) TULLER, M. 2001. Physical and Chemical Processes of water and solute Transport/Retention in soil. SSSA. No 56. GARDNER, L. R. 1990. The role of rock weathering in the phosphorus budget of terrestrial watersheds. Biogeochemistry. 11: 97-110.

- (11) BURNHAM, C. P. and LÓPEZ-HERNÁNDEZ, D. 1982. Phosphate retention in different Soil Taxonomy Classes. *Soil Science*. 134: 376-380.
- (12) BORGGGAARD, O.K., JORGENSON, S.S, MOBERG, J.P., and RABEN-LANGE, B. 1990. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminum and iron oxides in sandy soils. *Journal Soil Science*. 41: 443-449.
- (13) SPOSITO, G. 1993. The surface Chemistry of soils. En: Clarendon Press, Oxford, England. (1984). Citado por: SANYAL, K.S., DE DATTA, K.S., and CHANG, Y.P. Phosphate sorption-Desorption Behavior of some Acidic soils of South and Southcast Asia. *Soil Science Society American Journal*. 57: 937-945.
- (14) STEVENSON, F. 1986. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. New York, Wiley. p. 380.
- (15) FOX, R., KAMPRATH L. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requeriments of soils. *Soil Science Society American* 34: 902-907.
- (16) PETERSEN, G. and COREY, R. 1966. A Modified Chang and Jackson Procedure for Routine Fractionation of Inorganic Soil Phosphates. *Soil Science Society American Journal*. 30:563-565.
- (17) WILLIAMS J., SYRES J. and WALKER, T. 1967. Fractionation of Soil Inorganics Phosphate by a Modification of Chang and Jackson Procedure. *Soil Science Society American Journal*. 31:736 –739.
- (18) CROSS, A.F. and SCHELESINGER, W.H. 1995. A Literature review and evaluation of the Hedley Fractionation: Aplications to the biogeochemical cycle of soil Phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*. 64:197-214.
- (19) GUO, F., YOST, R.S., HUE, N. V., EVENSEN, C.I., and SILVA, J.A. 2000. Changes in Phosphorus fractions in soils under intensive plant growth. *Soil Science Society American Journal*. 64:1681-1689.
- (20) BURBANO, H., 1998. La Materia Orgánica: Origen, Propiedades y su Relación con la Calidad/Salud del Suelo. IX Congreso de la Ciencia del Suelo. p. 161-182
- (21) DAVILA, J. 2002. Caracterización Preliminar de Ácidos Fúlvicos de Dos Suelos Colombianos (Andisol del Cauca y Oxisol del Amazonas). Trabajo de Grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación.

- (22) MUÑOZ, G. M. 2003. Evaluación de la Retención de Aluminio por Dos Fuentes de Materia Orgánica y su Correlación con el Grado de Humificación. Trabajo de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación.
- (23) MOSQUERA. C. 2006. Caracterización Preliminar de la Estructura de los Ácidos Húmicos de un Suelo Andisol del Departamento del Cauca. Trabajo de grado (químico). Universidad del Cauca. Popayán.
- (24) KOKONOVA, M. 1966. Soil organic matter. Pergamon Press, Oxford. p. 400-404.
- (25) CHEN, Y., SENESI, N. and SCHNITZER, M. 1977. Information provided on humic substances by E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> ratios. Soil Science Society American Journal. 41: 352-358.
- (26) BRAVO, I. y GIRALDO, E. 2003. Manual de prácticas de química agrícola: Análisis de suelos. Departamento de química. Universidad del Cauca.
- (27) ARANGO, G. 1999. Cambios químicos durante la compostación de residuos de cosecha. Suelos Ecuatoriales. Volumen 29 No. 1. p 25-31
- (28) BRAVO, I., DUARTE, B., y GIRALDO, E. 2005. Utilización de microorganismos solubilizadores de fósforo en asocio a prácticas de manejo ecológico del suelo como alternativa para mejorar la disponibilidad de compuestos fosfóricos en fincas de agricultores en tres agroecosistemas de ladera del departamento del Cauca. Programa nacional de transferencia de tecnología agropecuaria (PRONATTA). Ministerio de agricultura. Universidad del Cauca FUNCOP. Enviado para edición.
- (29) BRAVO, I., GIRALDO, E. y GARCES, P. 2001. Biotransformación de algunos residuos agroindustriales y evaluación de su proceso de humificación. Suelos Ecuatoriales. Vol. 31 No 2.
- (30) BRAVO, I., DUARTE, B., y FERNANDEZ, C. 2004. Evaluación de las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos dedicados al cultivo de chontaduro del corregimiento de Cuatro Esquinas departamento del Cauca. XVI Congreso latinoamericano y XII congreso Colombiano de la ciencia del suelo. Sociedad latinoamericana de la ciencia del suelo. Cartagena de Indias, Colombia.
- (31) DUARTE, B., BRAVO, I. y TORRES, A. 2003. Caracterización de microorganismos solubilizadores de fósforo con respecto a algunas propiedades químicas del suelo en un agroecosistema asociado de mora de castilla y hortalizas. Suelos Ecuatoriales. Vol 33 No 2.

- (32) SILVA, F. 2000. Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Sociedad Colombiana De La Ciencia Del Suelo. Tercera edición. Santa fé de Bogota.
- (33) SANCHEZ, P., and UEHARA, G. 1980. Management consideration for acid soil with high phosphorus fixation capacity. In the role of phosphorus in agriculture. F. E. Khasawneh (ed.) ASA, Madison, WI. p 471-514.
- (34) HEDLEY, M. J., STEWART J. and CHAUHAN B., 1982. Changes in Inorganic and Organic Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. Soil Science Society American Journal. 46:970-976.
- (35) TRASAR, M., GIL, S., y GUITIAN, F. 1986. Caracterización del fósforo en los suelos gallegos: Estudio comparativo de los procedimientos de Chang y Jackson, 1957 y de Hedley et al, 1982. Anal. Edafol. Agrobiol. 41: 37-51.
- (36) BOWMAN, R. 1989. A Sequential Extraction Procedure with Concentrated Sulfuric Acid and Dilute Base for Soil Organic Phosphorus. Soil Science Society American Journal. 53: 362-366.
- (37) BLASCO, L., BOHORQUEZ, N. 1968. Fractionation of phosphorus in tropical soils of Colombia. Agrochimica 12: 173-178.
- (38) BLEEKER, P., and PARFITT, R. 1974. Volcanic ash and its clay mineralogy. Geoderma. 11:123-135.
- (39) ARANGO. G. 1999. Sustancias Húmicas Formadas Durante la Compostación de Residuos de Cosecha. Suelos Ecuatoriales. Volumen 29 No. 1. p 33-38
- (40) BRAVO, I. 2001. Biotransformación de Algunos Residuos Agroindustriales y evaluación de su proceso de Humificación. Suelos Ecuatoriales. Volumen 31 No.2. p 146-151.

## ANEXOS

### Tabla 3. Correlación estadística de los suelos

	P-dis	P-sol	P-Al Super	P-Fe Super	P-Al-Fe oc	P-Al-Fe>oc	P-Ca	P-org	P- total	% MO	% CEHT	HR1	pH	Al int	% arcilla	C/N	Porcentaje de saturación de aluminio
P-dis	1	0,894	0,894	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	1	1	1	-1	1	1	1	1
Coefficiente de correlación Sig. (bilateral)		0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106				0,000001				
N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
P-sol	0,894	1	0,8	1	1	0,8	-0,8	0,8	0,8	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	0,894	0,894
Coefficiente de correlación Sig. (bilateral)	0,106		0,2			0,2	0,2	0,2	0,2	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106
N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
P-Al Super	0,894	0,8	1	0,8	0,8	1	-0,6	0,6	1	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	0,894	0,89442719
Coefficiente de correlación Sig. (bilateral)	0,106	0,2		0,2	0,2		0,4	0,4		0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,10557281
N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
P-Fe Super	0,894	1	0,8	1	1	0,8	-0,8	0,8	0,8	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	0,894	0,894
Coefficiente de correlación Sig. (bilateral)	0,106		0,2			0,2	0,2	0,2	0,2	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106
N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
P-Al-Fe oc	0,894	1	0,8	1	1	0,8	-0,8	0,8	0,8	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	0,894	0,894
Coefficiente de correlación Sig. (bilateral)	0,106		0,2			0,2	0,2	0,2	0,2	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,10557281
N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
P-Al-Fe>oc	0,894	0,8	1	0,8	0,8	1	-0,6	0,6	1	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	0,894	0,89442719
Coefficiente de correlación Sig. (bilateral)	0,106	0,2		0,2	0,2		0,4	0,4		0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106
N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
P-Ca	-0,894	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-0,6	1	-1	-0,6	-0,894	-0,894	-0,894	0,894	-0,894	-0,894	-0,894	-0,894
Coefficiente de correlación Sig. (bilateral)	0,106	0,2	0,4	0,2	0,2	0,4		0,000001	0,4	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106

Continuación tabla 3

	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
P-org	Coeficiente de correlación	0,894	0,8	0,6	0,8	0,8	0,6	-1	1	0,6	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	0,894	0,894	0,89442719
	Sig. (bilateral)	0,106	0,2	0,4	0,2	0,2	0,4	0,000001		0,4	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,10557281
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
P-total	Coeficiente de correlación	0,894	0,8	1	0,8	0,8	1	-0,6	0,6	1	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	0,894	0,894	0,894
	Sig. (bilateral)	0,106	0,2		0,2	0,2		0,4	0,4		0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
%MO	Coeficiente de correlación	1	0,894	0,894	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	1	1	1	-1	1	1	1	1	1
	Sig. (bilateral)		0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106				0,000001					
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
%CEHT	Coeficiente de correlación	1	0,894	0,894	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	1	1	1	-1	1	1	1	1	1
	Sig. (bilateral)		0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106				0,000001					
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
HR1	Coeficiente de correlación	1	0,894	0,894	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	1	1	1	-1	1	1	1	1	1
	Sig. (bilateral)		0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106				0,000001					
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
pH	Coeficiente de correlación	-1	0,894	-0,894	-0,894	-0,894	-0,894	0,894	-0,894	-0,894	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1
	Sig. (bilateral)	0,000001	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,000001	0,000001	0,000001		0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Al int	Coeficiente de correlación	1	0,894	0,894	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	1	1	1	-1	1	1	1	1	1
	Sig. (bilateral)		0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106				0,000001					
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
% arcillas	Coeficiente de correlación	1	0,894	0,894	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	1	1	1	-1	1	1	1	1	1
	Sig. (bilateral)		0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106				0,000001					
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Continuación tabla 3

C/N	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral)	1	0,894	0,894	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	1	1	1	-1	1	1	1	1
			0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,1061	.	.	.	0,000001	.	.	.	.
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
% sat AI	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral)	1	0,894	0,894	0,894	0,894	0,894	-0,894	0,894	0,894	1	1	1	-1	1	1	1	1
			0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	.	.	.	0,000001	.	.	.	.
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).