

**EVALUACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LA MATERIA ORGANICA EN
EL PROCESO DE ADSORCIÓN DEL FOSFORO EN UN ANDISOL DEL
DEPARTAMENTO DEL CAUCA, BAJO UN SISTEMA DE CULTIVO
CAFÉ-GUAMO**

HAROLD HERNAN GOMEZ PALACIOS

Trabajo de Investigación

Directora: M.Sc. ISABEL BRAVO REALPE

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2010**

**EVALUACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LA MATERIA ORGANICA EN
EL PROCESO DE ADSORCIÓN DEL FOSFORO EN UN ANDISOL DEL
DEPARTAMENTO DEL CAUCA, BAJO UN SISTEMA DE CULTIVO
CAFÉ-GUAMO**

HAROLD HERNAN GOMEZ PALACIOS

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2010**

Nota de Aceptación

Director

M.Sc ISABEL BRAVO REALPE

Jurado

PhD. LILIANA MONTALVO

Jurado

PhD. Juan Carlos Menjivar

Fecha de sustentación: Popayán 24 enero de 2011

AGRADECIMIENTOS

Porque haber conseguido llegar a esta meta, solo ha sido posible gracias al apoyo incondicional de muchas personas....

Porque no ha sido meramente un logro individual...

Agradezco inmensamente a todas esas personas que creyeron en mí y dieron mucho de sí mismas para que esto haya sido posible....

Gracias a mi madre, a mis hermanos a mi directora de tesis profesora Isabel bravo Realpe y por supuesto a mis compañeros de carrera.....a Alejandra a Giovanni a Ricardo a Carolina a Elizabeth a Lila a Yeimy a Carlitos a las Marcelas a Camilo a Adrian a Libardo al profesor Alfonso Ramírez al profe Fernando H a la profe Tania y a todos aquellos con quienes compartí todo este precioso tiempo..... Al grupo de Agroquímica

Un especial agradecimiento al Dr Juan Carlos Menjivar del grupo de Investigación en Suelos de la Universidad Nacional de Colombia por su asesoría y financiación del trabajo

Gracias...

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	14
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2 OBJETIVOS	16
3 FUNDAMENTO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE	17
3.1 ANDISOLES	17
3.1.1 LAS ARCILLAS	20
3.1.2 ALÓFANO Y CONSTITUYENTES COMO ALÓFANO	22
3.2 MATERIA ORGÁNICA	23
3.3 EL FÓSFORO	26
3.3.1 Formas de fósforo en el suelo	26
➤ Fósforo inorgánico	27
➤ Fosfato insoluble de la roca madre material primario	28
➤ Fosfato precipitado o en forma de compuestos inorgánicos poco solubles	
➤ Fósforo orgánico	28
➤ Fosfatos de Inositol	29
➤ Ácidos nucleicos	30
➤ Fosfolípidos	30
➤ Fosfatos metabólicos	31
➤ Fosfoproteínas	31
3.3.2 Transformaciones químicas del fosforo en el suelo	33

3.3.3	fijación de fósforo	34
	➤ Adsorción de fósforo por minerales arcillosos	34
	➤ Adsorción de fósforo por compuestos de Fe y Al	35
	➤ Sustitución isomórfica	36
	➤ Adsorción superficial	37
3.4	Isotermas de Langmuir	37
3.5	Peróxido de hidrogeno y su uso como agente oxidante	39
3.6	Cultivo de cafeto	40
3.7	Guamo	41
4	METODOLOGIA	42
4.1	UBICACIÓN GEOGRAFICA Y TOMA DE MUESTRAS	42
4.2	TOMA DE MUESTRAS	42
4.3	CARACTERIZACION FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO	
4.3.1	Análisis físicos	43
	➤ Humedad	43
	➤ Textura	43
4.3.2	Análisis químicos	44
	➤ pH	44
	➤ Acidez intercambiable	44
	➤ Materia orgánica	44
	➤ Determinación de nitrógeno por el método Kjeldahl	45
	➤ Determinación de CIC	46
	➤ Determinación de bases de intercambiables	46
4.4	Supresión de la materia orgánica del suelo mediante oxidación con peróxido de hidrógeno	47

	➤ Efecto de la supresión de la materia orgánica en las propiedades del suelo	47
4.5	Evaluación de la presencia de alófanos	47
4.6	EVALUACION DE LA RETENCION DE P MEDIANTE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN	48
5.	ANALISIS DE RESULTADOS	49
5.1	ANALISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS	49
5.2	RESULTADOS DE LA SUPRESIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO	50
	➤ Efecto de la supresión de la materia orgánica en la propiedades del suelo	54
	➤ Efecto de la supresión de la materia orgánica en los grupos funcionales presentes en el suelo	55
	➤ Resultados para la prueba cualitativa de alofanos	58
5.3	EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE RETENCION DEL P MEDIANTE ISOTERMAS DE ADSORCION	59
	➤ Cinéticas de retención de P en el SSMO	59
5.4	FOSFORO ADSORBIDO POR EL SUELO SIN MATERIA ORGANICA	65
5.5	EVALUACION DE LA RETENCION DE P MEDIANTE ISOTERMAS DE ADSORCION PARA EL SUELO CON MATERIA ORGANICA	74
5.6	EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN DE P MEDIANTE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN PARA EL SUELO SIN MATERIA ORGÁNICA	78
6	CONCLUSIONES	80
7	RECOMENDACIONES	82
	BIBLIOGRAFIA	83
	ANEXOS	88

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Principales Formas de Fósforo Inorgánico	28
Tabla 2. Reactividad del radical hidroxilo.	40
Tabla 3. Resultados de Análisis Físicos y Químicos de SCMO	49
Tabla 4. Parámetros evaluados antes y después de la supresión de la MO del suelo	53
Tabla 5. Propiedades Físicas y Químicas del Suelo Sin MO	55
Tabla 6. Frecuencias Características de grupos correspondientes a Arcillas	56
Tabla 7. Resultados de la Prueba de Presencia de Alófanos	59
Tabla 8. Fosforo adsorbido por el Suelo Con Materia Orgánica.	60
Tabla 9. Porcentajes de adsorción de SCMO	63
Tabla 10. Pruebas de normalidad para resultados de SCMO	63
Tabla 11. Prueba de Estadísticos de contraste(a,b) Para datos de SCMO	64
Tabla 12. Estadísticos de contraste(a,b) SCMO	64
Tabla 13. Prueba de Tukey del P adsorbido en función del P suministrado para suelo CMO	65
Tabla 14. Fósforo adsorbido por el suelo SSMO.	66
Tabla 15. Porcentajes de adsorción de P. SSMO	69

Tabla 18.	Pruebas de normalidad (b) %P Adsorbido en función del P suministrado	69
Tabla 19.	Estadísticos de contraste(a, b).	69
Tabla 20.	Estadísticos de contraste (a,b) P Adicionado SSMO	71
Tabla 21.	Porcentaje de P adsorbido en función de las diferentes dosis de P suministrado	71
Tabla 22.	Porcentaje de Adsorción de P de Suelo con y Sin MO en tiempo de equilibrio	71
Tabla 23.	Pruebas de normalidad Para Datos de % AD De P en Función del Tiempo para Suelo con MO y sin MO	73
Tabla 24.	Pruebas de normalidad Para Datos de % AD De P en Función de la Concentración de P suministrado para l Suelo con MO y sin Pruebas de normalidad	73
Tabla 25.	Prueba de Kruskal Wallis Estadísticos de contraste(a,b).	74
Tabla 26.	Estadísticos de contraste(a,b)	74
Tabla 27.	Estadísticos de contraste(a,b)	74
Tabla 28.	Prueba de Tukey Porcentaje P Adsorbido	75
Tabla 29.	Datos de Isotherma de Langmuir, del suelo con MO	76
Tabla 30.	Prueba de Tukey del P adsorbido en función del P suministrado para suelo CMO	77
Tabla 31.	Valores para el Fenómeno de adsorción e Isotherma de Langmuir, SSM	78
Tabla 32.	Valores para la isoterma de Langmuir linealizada, SSMO	79
Tabla 33.	Comparación de Datos de Isothermas para Suelo Con y Sin MO	80

LISTA DE FIGURAS

		Pag
Figura 1	Mapa de suelos de Colombia	19
Figura 2	Arcillas,	21
Figura 3	La materia orgánica	24
Figura 4	Capacidad quelatante de la materia orgánica humificada.	25
Figura 5	Relación entre la concentración relativa de iones fosfato y el pH.	27
Figura 6	Estructura del Hexafosfato de Inositol	29
Figura 7	Representación de los ácidos nucleicos	30
Figura 8	Fórmula general de los fosfolípidos	31
Figura 9	Estructura de la Lecitina	31
Figura 10	Esquema del ciclo global del fósforo en el sistema suelo-planta	32
Figura 11	Adsorción de fósforo en minerales de arcilla 1:1	35
Figura 12	Reacción de adsorción de fósforo sobre minerales de hierro	36
Figura 13	Ubicación geográfica del corregimiento de Cuatro Esquinas y la vereda Aurelia del departamento del Cauca	42
Figura 14	Reactor de Oxidación de la MO del Suelo	51
Figura 15	Reacción del Aluminio con los grupos carboxílicos y fenólicos del humus	54
Figura 16	Espectros IR, 4000- 400 cm ⁻¹	56

Figura 17	Espectros IR, 2000-400 cm ⁻¹	56
Figura 18	Cinética de retención con adición de 5 ppm de P (SCMO)	60
Figura 19	Cinética de retención de P, 10 ppm adicionados, SCMO	60
Figura 20	Cinética de retención de P, 50 ppm adicionados, SCMO	60
Figura 21	Cinética de retención de P, 100 ppm adicionados, SCMO	61
Figura 22	Cinética de retención de P, 150 ppm adicionados. SCMO	62
Figura 23	Cinética de retención de P, 2 ppm adicionados. SSMO	66
Figura 24	Cinética de retención de P, 5 ppm adicionados. SSMO	66
Figura 25	Cinética de retención de P, 10 ppm adicionados. SSMO	67
Figura 26	Cinética de retención de P, 50 ppm adicionados. SSMO	66
Figura 27	Cinética de retención de P, 100 ppm adicionados. SSMO	68
Figura 28	% de adsorción de P	71
Figura 29	Isoterma de Langmuir no linealizada, del SCMO.	75
Figura 30	Isoterma de langmuir linealizada (Scatchard), SCMO	77
Figura 31	Isoterma de Langmuir no linealizada, SSMO	77
Figura 32	Isoterma de Langmuir linealizada (Scatchard) SSMO	78

LISTA DE ANEXOS

	PAG
ANEXO 1 Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos de clima medio (SCCS. 2000)	85
ANEXO 2 Análisis estadístico	86

LISTA DE ACRÓNIMOS

SSMO: Suelo sin materia orgánica

SCMO: Suelo con materia orgánica

P: Fosforo

EAF: Energía de adsorción de fosforo

CMAF: Constante de máxima adsorción de fosforo

Ca: Calcio

Ca/Mg: Relación Calcio / Magnesio

Fe: Hierro

Al: Aluminio

IR: Infrarrojo

SSCS: Sociedad colombiana para la ciencia del suelo

MO: Materia orgánica

MOS: Materia orgánica del suelo

CIC: Capacidad de intercambio cationico

RESUMEN

Los Andisoles son suelos de naturaleza fuertemente ácida, característica que afecta la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes esenciales para los cultivos, principalmente la del fósforo, uno de los macronutrientes que más limita la producción de los cultivos. La aplicación de fertilizantes y abonos para suplir tal deficiencia genera más acidez que a su vez conduce a una mayor retención de P.

En este trabajo se evaluó la retención de fósforo, de un Andisol cultivado con café-guamo a partir de una fuente de P (KH_2PO_4) mediante isotermas de adsorción, previa evaluación de las cinéticas de retención, en muestras de suelo con y sin MO, eliminada mediante tratamiento con peróxido de Hidrógeno. Además se evaluó la presencia de alófanos con el propósito de determinar si la adsorción de P también se puede atribuir a ellos.

Se recolectaron muestras de suelo de una finca ubicada en el municipio de Cajibío Vereda La Aurelia, cultivada con cafeto variedad caturra, (*Coffea arabica*) bajo sombra de guamo (*Inga* sp). Para evaluar la retención de P se aplicó un diseño experimental completamente aleatorio con 108 tratamientos consistentes en: seis concentraciones de P suministrado, seis tiempos de incubación y tres réplicas, utilizando el método en paralelo.

El tratamiento realizado con H_2O_2 no degrada el suelo en su estructura básica (fracción mineral), ya que existe solamente una diferencia en una banda que aparece en el SSMO a 1296 cm^{-1} que indica mayor presencia de silicatos por despolimerización de sílice en el rompimiento de su unión con la MO. Se logró destruir un 77.2% de la MO con el peróxido de Hidrogeno, indicando que el 22.8% de ella corresponde a una MO fuertemente ligada a alófanos y/o arcillas. La retención de P es alta tanto en el SCMO como en el SSMO con valores comprendidos entre 91% y 99% para el primero y valores entre 94 y 99.7% para el SSMO, sin existir diferencia significativa entre ellos, atribuyéndose de esta manera la retención principalmente a la fracción mineral. Los resultados de la retención de P se ajustaron a las Isoterma de Scatchard tanto para suelo con MO como el suelo sin MO con valores de $L=0.16 \times 10^6$ y 3×10^6 respectivamente, indicando mayor afinidad de retención de fosforo por parte de la fracción mineral del suelo. Se encontró que la MO protege al suelo de dicha retención.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los Andisoles son suelos derivados de cenizas volcánicas. Se destacan por tener valores de pH fuertemente ácidos, ricos en alófanos, bajas saturaciones de bases, altas capacidades de intercambio. Además presentan valores altos en MO que tienden a favorecer la formación de complejos Al-humus, predominando compuestos de bajo grado de polimerización y abundantes huminas. Una de las propiedades sobresalientes de los Andisoles es su alta capacidad de fijación de fósforo, causando baja fertilidad en este tipo de suelos y por esto los agricultores de esas regiones aplican altas y repetidas dosis de fertilizantes para suplir esas deficiencias, causando reacción fuertemente ácida que conllevan a una mayor adsorción de este nutriente.

Aún cuando se han realizado varios trabajos tendientes a esclarecer mecanismos de retención Fosfórica en estos suelos, con el propósito de realizar recomendaciones adecuadas que permitan evitar la contaminación ambiental generada por la aplicación de todo tipo de fertilizantes en altas cantidades para suplir tal deficiencia, no se tiene claro en cultivos de café bajo sombra de Guamo si existe influencia de la MO de dichos suelos sobre la retención fosfórica proveniente de fertilizantes o de abonos orgánicos muy utilizados actualmente por la tendencia ecológica de los agricultores.

Siendo el cultivo de cafeto uno de los principales renglones de la economía en el departamento del Cauca, es importante realizar investigaciones que conduzcan a mejorar su actividad agrícola volviéndola más sostenible tanto ecológica como económicamente, ya que el alto costo de los fertilizantes ha obligado a los agricultores de la región al uso de abonos orgánicos en cantidades lógicamente grandes (hasta 18 Ton/Ha) si se quiere reemplazar la fuente química de este nutriente, con consecuencias predecibles desde el punto de vista ambiental, ya que se alteran las condiciones normales de estos suelos, debido al efecto Priming.

Por esto en este trabajo se evaluó la influencia de la MO de estos suelos sobre la retención de P con el propósito de esclarecer mecanismos de adsorción que permitan conducir a recomendaciones adecuadas de fertilización y de un manejo adecuado de la MO.

2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estudiar el proceso de adsorción de fósforo en un Andisol del departamento del Cauca, con y sin MO, con el propósito de evaluar su influencia en la capacidad de retención de este nutriente.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física y químicamente el suelo de un Andisol cultivado con café bajo sombra de guamo proveniente del Municipio de Cajibío
- Buscar un método para eliminar completamente la MO del suelo
- Evaluar la retención de fósforo, por el suelo sin MO partir de una fuente de P (KH_2PO_4) mediante isoterma de adsorción.
- Evaluar la presencia de alófanos en el suelo

3. FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

El suelo es la cubierta de la mayor parte de la superficie continental del planeta tierra. Está constituido básicamente por agregados minerales y partículas orgánicas producidas por la acción del viento, el agua y los procesos de desintegración de la MO. También se podría decir que el suelo es la capa de materiales orgánicos y minerales que cubren la corteza terrestre y es donde las plantas desarrollan sus raíces y toman las sustancias esenciales para su crecimiento ^[1]

Los suelos cambian mucho de un lugar a otro. La composición química y la estructura física del suelo en un lugar dado, están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas. Las variaciones del suelo en la naturaleza son graduales, excepto las derivadas de desastres naturales. Sin embargo, el cultivo de la tierra priva al suelo de su cubierta vegetal y de mucha de su protección contra la erosión del agua y del viento, por lo que estos cambios pueden ser más rápidos. Los agricultores han tenido que desarrollar métodos para prevenir la alteración perjudicial del suelo debida al cultivo excesivo y para reconstruir suelos que ya han sido alterados con graves daños.

3.1 ANDISOLES.

Por definición un Andisol es un tipo de suelo producto de las eyecciones volcánicas tales como cenizas volcánicas, piedra pómez y lava, cuya fracción coloidal contiene predominantemente minerales con bajo orden de ordenamiento (amorfo) y/o complejos de aluminio-humus. Con el paso del tiempo, los aluminosilicatos sufren procesos de transformación y pasan a estados de mayor entropía tales como: alófanos, imogolita y ferrihydrita.

Los procesos biogeoquímicos dominantes en los Andisoles tienen que ver básicamente con la transformación de estos minerales. Su fracción arcillosa está dominada por alófana y/o imogolita proveniente de la meteorización de materiales piroclásticos producto de eyecciones recientes. Una de las principales propiedades de los Andisoles es su alta capacidad de fijación de fósforo (P). Un buen cultivo exige la aplicación de altas dosis de fósforo para contrarrestar el alto poder de fijación de este nutriente y permitir su adecuado suplemento.

En estos suelos la MO se acumula al interior de los horizontes minerales, formando un horizonte de color negro intenso, denominado: horizonte melanizado, o también se forman una sucesión de horizontes. Es por estas razones que los Andisoles son generalmente considerados como humíferos y poco diferenciados. De hecho, el contenido de carbono orgánico es a menudo alto, frecuentemente entre 50 y 250 g/kg hasta profundidades de 1.0 m [2].

Los suelos derivados de cenizas volcánicas se caracterizan por poseer propiedades químicas y físicas únicas, tales como alta estabilización de la MO, alta capacidad de retención de agua, baja densidad aparente, carga eléctrica coloidal variable, y alta retención de fósforo (Satti P., et al. 2007).

La alta retención de fósforo en estos suelos es atribuida principalmente a la actividad del hierro y aluminio asociados (mayoritariamente complejos de Al-humus) con las fracciones orgánica y mineral (alófana y ferrihydrite) formadas en el transcurso de la formación del suelo. La acumulación de materiales no cristalinos y la acumulación de MO son los procesos pedogénicos dominantes en los suelos derivados de cenizas volcánicas, esto es conocido como andosolización” [3]

La estabilización físico-química, favorecida por factores climáticos tales como la humedad permanente y bajas temperaturas medias explican la notable permanencia de la MO de los Andisoles. Los Andisoles poseen la característica de acumular bastante MO, y se caracterizan por una alteración intensa del material parental, producción de iones Al^{n+} y alófanas.

Los Andisoles están ampliamente distribuidos en una variedad de latitudes y climas y por lo general en áreas montañosas. Cubren aproximadamente más de 124 millones de hectáreas, alrededor de un 0,8 por ciento de superficie terrestre. Ubicados principalmente en el cinturón de fuego del pacífico, las islas Aleutianas, la Península de Kamchatka, a través de Japón, las islas Filipinas, Indonesia, Papúa, Nueva Guinea, las islas Salomón, Vanuatu y otras islas del pacífico de nueva Zelanda así como también en la costa oeste de Italia, islas Hawái, las Antillas, Islandia y las islas Canarias [4].

Los depósitos de suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia representan el 11.6 % del territorio nacional y se localizan en regiones de importante crecimiento demográfico y económico. Se extienden desde el eje cafetero (Antioquia, Caldas, Risaralda y Quindío) hasta los departamentos de Tolima, Cauca y Nariño en el sur occidente colombiano (figura1).

Figura 1. Mapa de suelos de Colombia



Fuente IGAC (2008).

3.1.1 LAS ARCILLAS

El término arcilla tiene diferentes significados en función del contexto en el cual se use, por ejemplo:

Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano (inferior a 2 mm).

Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 mm.

Para un ceramista una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica. Desde el punto de vista económico las arcillas son un grupo de minerales industriales con diferentes características mineralógicas y genéticas y con distintas propiedades tecnológicas y con muy variadas aplicaciones.

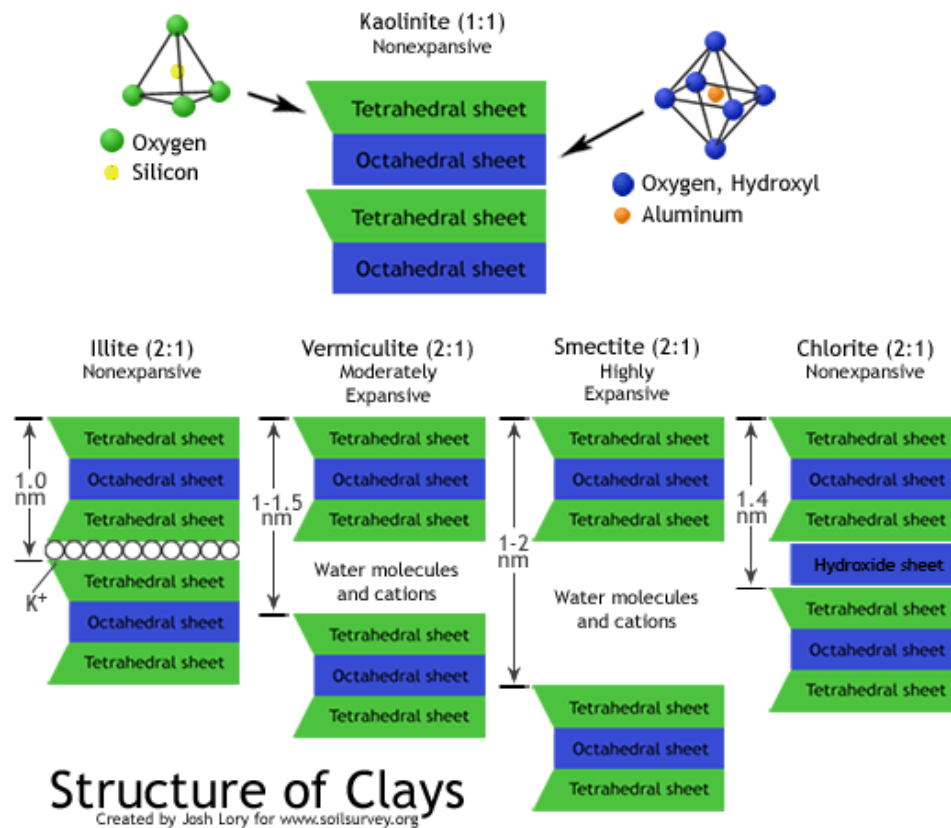
En este sentido se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 2 mm. Según esto todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan los 2 mm.

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan. Las propiedades de las arcillas son consecuencia de sus características estructurales. Por ello es imprescindible conocer la estructura de los filosilicatos para poder comprender sus propiedades.

Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos $(\text{SiO})_4^{4-}$ se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$, que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por Al^{3+} o Fe^{3+} . Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibbsita o

brucita. En ellas algunos Al^{3+} o Mg^{2+} , pueden estar sustituidos por Fe^{2+} o Fe^{3+} y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos $(\text{OH})^-$ de la capa brucítica o gibsitica, de forma que, en este plano, quede un $(\text{OH})^-$ en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los $(\text{OH})^-$ son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros. [5]

Figura 2. Estructura de las Arcillas



3.1.2. ALÓFANO Y CONSTITUYENTES COMO ALÓFANO

Alófano es un material secundario, no muy bien definido, cuya fórmula empírica es $m\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$, el cual resulta de la meteorización de las cenizas volcánicas, con una razón $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ que oscila entre 0.5 – 2.0. Así por ejemplo, las zonas situadas alrededor del Basín del Pacífico, presentan cenizas andesíticas o sea, de composición moderadamente básica, mientras las lavas de tipo poroso y vesicular conocidas como pómez, son altamente silíceas. Conviene destacar, que la meteorización de las cenizas no siempre conduce a la formación de alófano ^[6]

Para Besoain reportado por Fassbender ^[7]: “El alófano es un término general que designa un aluminosilicato no cristalino o poco cristalino, más ordenado que el vidrio, altamente hidratado, amorfo a rayos X, con una composición variable, pero formada básicamente por óxido de aluminio, silicio y agua, siendo la razón molecular de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre 0.5 y 2.

La importancia química que presentan los alófanos o constituyentes amorfos en suelos del departamento del Cauca, radica en la adsorción de fosfatos reflejada en una fuerte indisponibilidad de este nutriente en la mayoría de los suelos caucanos, implicando aplicaciones cada vez mayores de fuentes de este nutriente al suelo, ocasionando así serios perjuicios tanto al sustrato como a los cuerpos de agua, ya que por percolación pasa a ellos produciendo problemas de eutrofización y volviendo insostenible la producción de los cultivos, debido a costos en la fertilización. Además le confieren características químicas muy particulares al suelo, que merecen un manejo muy especial. Por esto se considera necesario iniciar estudios en esta región donde las propiedades químicas encontradas reflejan la presencia de estas sustancias.

Los alófanos son solubilizados fácilmente por acidez natural o artificial, produciendo especies de Aluminio tóxicas para el suelo, pues altas cantidades son perjudiciales para las plantas porque causan plasmólisis en las células radiculares y en el suelo pueden adsorber el fósforo, impidiendo así su disponibilidad o afectar la bioestructura del suelo causando así su pérdida y erosión continuada y progresiva. Además cuando las dosis de Aluminio en el suelo son altas, pueden pasar a los cuerpos de agua por lixiviación, generando toxicidad a sus organismos. Generalmente se postula que los átomos de hierro y aluminio expuestos en la red cristalina de los minerales de arcilla son responsables de la fijación del fósforo, pero en el caso de los Andisoles donde dominan los materiales inorgánicos amorfos, se ha reconocido que el aluminio y el hierro amorfos son los componentes principales que reaccionan con el fosfato produciendo alta fijación uniéndose el fósforo a través de un par de electrones al alófano, de ahí, lo poco reversible de esta atracción. Asimismo, la gran reactividad de estos materiales se

puede atribuir a la gran área superficial específica y al pequeño tamaño de partícula que ellos presentan. ^[8]

3.2 MATERIA ORGÁNICA

Diferentes autores denominan indistintamente MO o humus a la parte orgánica que cumple un papel esencial en el suelo. No existe una definición de humus con la que todos los especialistas estén de acuerdo: pero, en general el término humus se usa para referirse a todo el conjunto de sustancias variadas de color pardo y negruzco, que resultan de la descomposición de materias orgánicas de origen exclusivamente vegetal. Contiene aproximadamente un 5 % de nitrógeno ^[9].

Las formas y clasificación de la MO del suelo han sido descritas por muchos autores ^[10]. Para propósitos prácticos la MO puede ser dividida en dos grandes grupos en función de su ubicación en el suelo: superficial y no superficial. La superficial comprende básicamente de residuos de plantas y animales. Mientras que la no superficial consiste de microorganismos y microflora, así como también de residuos de plantas, animales y sustancias Húmicas. La cantidad total de MO en el suelo está influenciada directamente por sus propiedades y por el tipo de ecosistema, así para un ecosistema dado la velocidad de su descomposición y acumulación es determinada por propiedades del suelo tales como textura, pH, temperatura, humedad, aireación, porosidad y actividad biológica básicamente. Así mismo la MO influye o modifica muchas de estas mismas propiedades del suelo ^[11].

El humus tiene efecto sobre las propiedades físicas del suelo, formando agregados y dando estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas y formando el complejo de cambio, favoreciendo la penetración del agua y su retención, disminuyendo la erosión y favoreciendo el intercambio gaseoso. Cuando se refiere al efecto sobre las propiedades químicas del suelo, los autores mencionan que aumenta la capacidad de cambio del suelo, la reserva de nutrientes para la vida vegetal y la capacidad tampón del suelo favorece la acción de los abonos minerales y facilita su absorción a través de la membrana celular de las raicillas. Y en cuanto al efecto sobre las propiedades biológicas, favorece los procesos de mineralización, el desarrollo de la cubierta vegetal, sirve de alimento a una multitud de microorganismos y estimula el crecimiento de la planta en un sistema ecológico equilibrado ^[12]

La cantidad de humus del suelo depende de muchos factores, tales como la incorporación de nuevos restos orgánicos al suelo y su velocidad de oxidación química y biológica, la velocidad de descomposición de la MO existente ya en el suelo, la textura del suelo, la aireación, la humedad y los factores climáticos. Las prácticas de manejo del cultivo también pueden tener un efecto sobre este parámetro. Ya que por ejemplo, el empleo de abonos minerales acelera la descomposición de la MO en el suelo. Esto es una manifestación del crecimiento

de la actividad biológica, que se traduce en la práctica en una mejora de la fertilidad y, por tanto de los rendimientos ^[13]

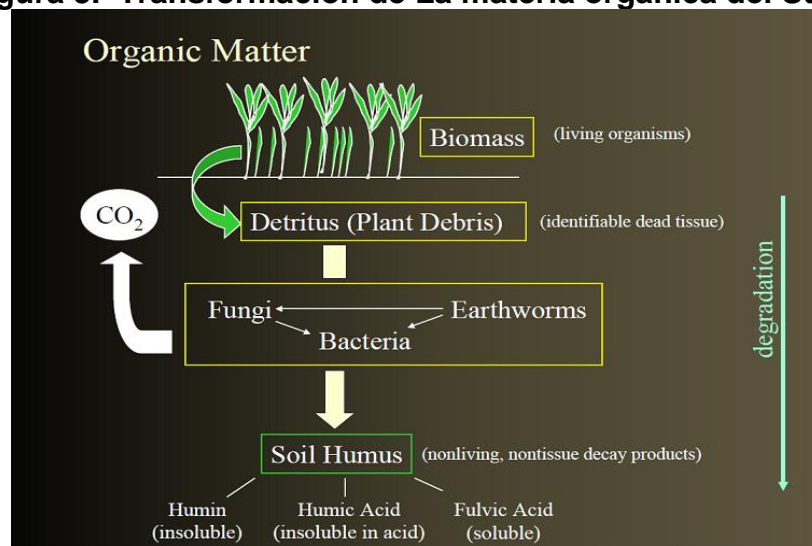
Algunas de las más importantes funciones de la MO del suelo son:

- Incrementar la fertilidad del suelo, retener cationes y conservar nutrientes en forma orgánica de una manera lábil para que la planta las pueda tomar
- Juntar las partículas del suelo formando agregados. La unión de las partículas del suelo dan a este estructura característica y aireación
- Dar alimento a los microorganismos que viven en el suelo.
- La fracción orgánica estable (humus) adsorbe y retiene muchos nutrientes, los cuales están en forma disponible para la planta ^[14].
- El humus también retiene muchos contaminantes (pesticidas) y metales pesados ^[14].

La MO existente en la superficie del suelo, así como los residuos frescos de plantas ayudan a protegerlo de los efectos de la lluvia, el viento y el sol. La remoción de estos residuos expone el suelo a un impacto climático negativo, mientras que la quema, priva a los organismos del suelo de su fuente de energía primaria ^[9].

Con la humificación los residuos de las plantas son transformados mediante procesos físicos, químicos y biológicos hacia formas químicamente más estables denominadas humus ^[16], los cuales se han clasificado en 3 grupos: ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas. (Figura 3)

Figura 3. Transformación de La materia orgánica del Suelo

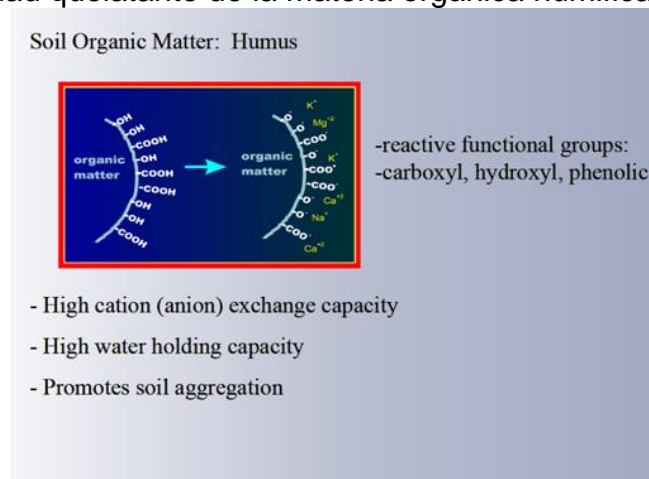


GES 175, Science of Soils, Lecture 6, Soil Biology.

Este último grupo de sustancias, y en especial los ácidos húmicos y fúlvicos tienen un efecto positivo sobre muchas de las funciones de las plantas, a nivel de las células y órganos, poseen un efecto estimulante en la formación de las raíces ya que aceleran la diferenciación del punto de crecimiento. La MO humificada tiene gran influencia en el aumento de peso y altura de la planta. ^[11] Cuando nos referimos a MO humificada se quiere decir, MO en la que debido al proceso de descomposición natural existen los 3 tipos de sustancias anteriormente citados (ácidos húmicos, fúlvicos y huminas). Este tipo de sustancias consta de una mezcla heterogénea de compuestos en la que cada una de las tres fracciones está constituida por moléculas de tamaños diferentes, y su estructura depende considerablemente tanto de los materiales orgánicos presentes en el suelo como de las diferentes condiciones ambientales.

Los ácidos húmicos, como parte fundamental en el mantenimiento de las diferentes características químicas, biológicas y físicas del suelo, han sido objeto de muy variadas investigaciones, con el objeto de tratar de elucidar su estructura además de su relación con el transporte y la retención de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos (figura 4). Se ha planteado que son macromoléculas aromáticas complejas (supramoléculas) con aminoácidos, amino azúcares, péptidos y compuestos alifáticos que están involucrados en las uniones entre los grupos aromáticos. La estructura propuesta para los ácidos húmicos consta de grupos fenólicos libres y enlazados, estructuras de quinonas, heteroátomos además de puentes de hidrogeno y ácidos carboxílicos en varios lugares de los anillos aromáticos. Además son moléculas policíclicas. Algunos autores proponen a los ácidos húmicos como mezclas de los carbohidratos, proteínas y lípidos procedentes tanto de las plantas como de los microorganismos, junto con degradaciones parciales de lignina, taninos y materiales microbiales como la melanina.

Figura 4. Capacidad quelatante de la materia orgánica humificada



También se conocen como pseudoestructuras, definidas como constituciones moleculares hipotéticas con elementos, estructuras y grupos funcionales parecidos y consistentes con algo o con todas las propiedades observadas de una mezcla dada, las cuales no son estructuras moleculares, ni son estructuras promedio o un modelo promedio estructural. El desarrollo de técnicas espectroscópicas ha permitido en gran medida el avance y la elucidación estructural de los ácidos húmicos, dando como consecuencia de esto un mayor entendimiento de sus funciones y sus relaciones en el suelo con los nutrientes y contaminantes ^[17].

3.3. EL FÓSFORO

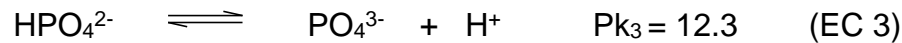
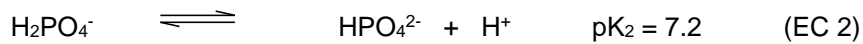
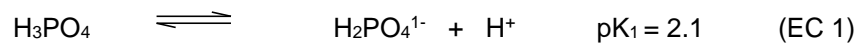
El fósforo es un componente esencial de los vegetales, cuya riqueza media en fosfato (P_2O_5) es del orden del 0,5 al 1 % de la materia seca, interviene activamente en la mayor parte de las reacciones bioquímicas complejas de la planta ^[18]. El papel fundamental del fósforo en las transferencias de energía ha sido bien comprobado. Los iones fosfato son capaces de recibir energía luminosa captada por la clorofila y transportarla a través de la planta. También tiene una gran importancia en el metabolismo de diversas sustancias bioquímicas.

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 solo a que su contenido total es bajo, sino a las múltiples reacciones que ocurren en el suelo llevándolo a formas no asimilables.

3.3.1 Formas del Fósforo en el Suelo

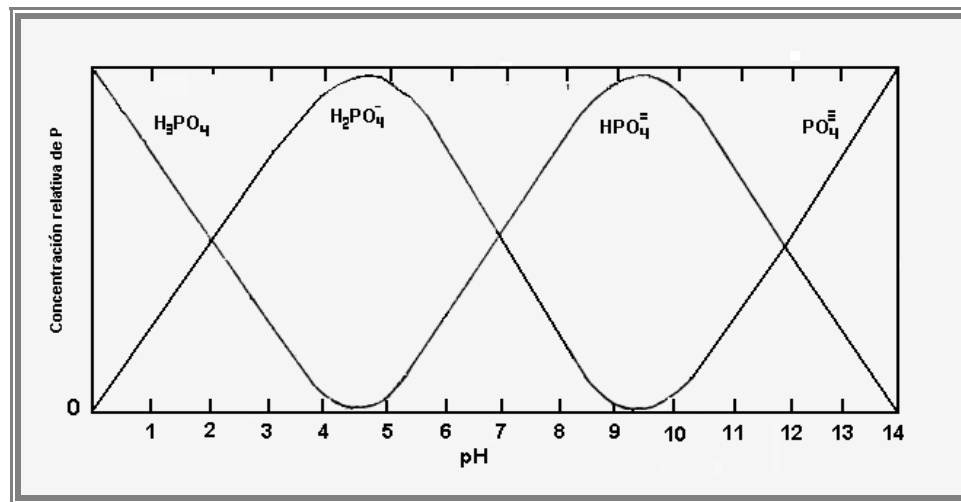
El Fosfato en la solución del suelo representa la fracción más pequeña, pero a la vez la más importante para la planta, debido a que son estos aniones disueltos los que ella absorbe. El fósforo del suelo se presenta casi exclusivamente como orto fosfatos derivados del ácido fosfórico, H_3PO_4 , y representado como P_2O_5 . La riqueza del suelo nativo en fosfato, depende fundamentalmente de la naturaleza de la roca madre que la originó.

La química del fósforo está relacionada con las formas iónicas del ácido fosfórico (H_3PO_4). Este ácido tiene tres constantes de disociación según las reacciones 1, 2 y 3:



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 HPO_4^{2-} [18]. El compuesto de P más importante en el suelo en términos de biodisponibilidad es el anión ortofosfato, el cual es disponible a corto y largo plazo para las plantas.

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



Reportado por MARQUÍNEZ, L. y POTOSÍ, S., 2005

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

- **Fósforo inorgánico:** los iones hidrógeno del ácido fosfórico se reemplazan por cationes, formando sales.

Las principales formas de fósforo inorgánico se muestran en la Tabla 1, todas ellas son de menor solubilidad que los compuestos fosfatados orgánicos

Tabla 1. Principales Formas de Fósforo Inorgánico

Fosfatos	Denominación	Composición	Características
Calcio	hidroxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{ Ca}(\text{OH})_2$	mayor abundancia
	oxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{ CaO}$	mayor abundancia
	fluorapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{ CaF}_2$	mayor solubilidad
	carbonatoapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{ CaCO}_3$	mayor solubilidad
	fosfato tricálcico	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	
	fosfato bicálcico	CaHPO_4	
	fosfato monocálcico	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	
Hierro	vivianita	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	
	estrengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
Aluminio	variscita	$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	

TSAI, S.M., ROSSETTO R. 1992

➤ **Fosfato insoluble de la roca madre (mineral primario)**

Representa una gran parte del fosfato total del suelo. En esta forma está completamente no disponible 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.

➤ **Fosfato precipitado o en forma de compuestos inorgánicos poco solubles**

En suelos ácidos predominan los fosfatos precipitados de hierro y aluminio; en suelos calizos los fosfatos de calcio principalmente en forma de apatita. 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 y 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 esto la formación de la estrengita y la variscita. ^[19]

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.

En suelos ácidos, el fósforo se encuentra como fosfatos de hierro y aluminio, mientras que en alcalinos los fosfatos cálcicos adquieren mayor importancia. En suelos de pH elevado, la actividad del calcio controla la solubilidad del fósforo.

Las relaciones encontradas indican que el H_2PO_4^- de los fosfatos de calcio es insoluble en suelos alcalinos, pero soluble en medios ácidos. ^[20]

La dinámica del fósforo en el suelo, es función en gran parte de la acidez del suelo, debida a su valor de pH y a la concentración de iones debidos a elementos tales como el aluminio, manganeso, hierro y calcio. El Fosfato en la solución del suelo representa una pequeña parte, que al mismo tiempo es la más importante para la nutrición de la planta, ya que es en esta forma iónica que la planta puede aprovechar y absorber

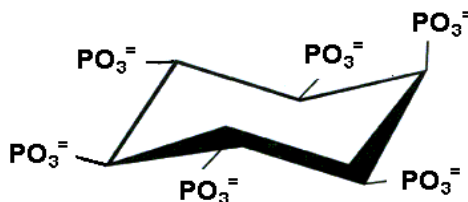
➤ **Fósforo orgánico.**

Las formas orgánicas (Po) son las principales fuentes de energía para el metabolismo de los carbohidratos, en sus formas de adenosin trifosfato (ATP) que es el compuesto transferidor de energía más común de las células, sintetizado a partir de adenosin difosfato (ADP). El nivel de fósforo orgánico (Po) en los suelos puede variar generalmente 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. ^[21]

De acuerdo con la estructura química en la MO 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 cuya fórmula estructural se muestra en la figura 6.

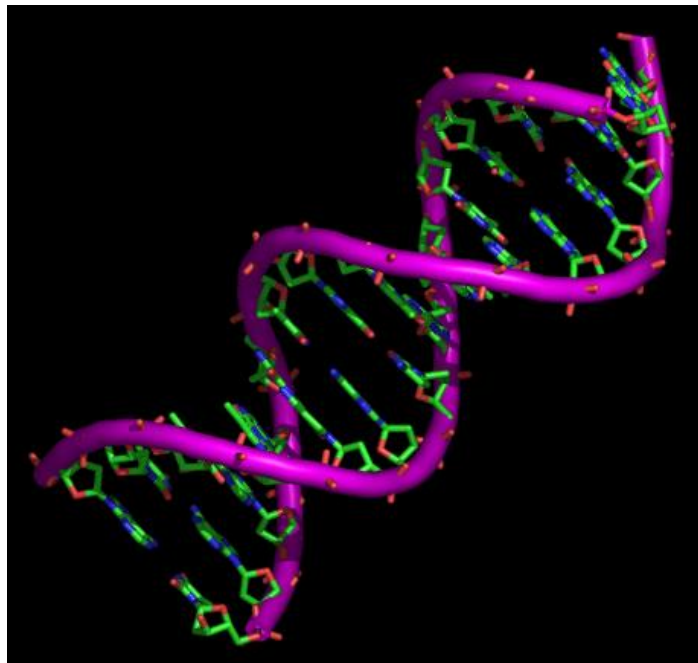
Figura 6. Estructura del Hexafosfato de Inositol



Los fosfatos de Inositol son importantes componentes de granos de cereales en forma de fitatos de calcio y magnesio, denominados fitina. Los Hexafosfato 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. [22]

- **Ácidos nucleicos.** (Figura 7) En los suelos los microorganismos sintetizan sus propios ácidos nucleicos a partir de pentosas, bases púricas y pirimidínicas y grupos fosfatos. Por acción de las fosfatasas 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. La velocidad de transformación de los ácidos nucleicos en microorganismos es rápida, depende principalmente de la acidez del suelo [23]

Figura 7. Representación de los ácidos nucleicos.



https://.../webquest/procesos_quimicos/adn.gif

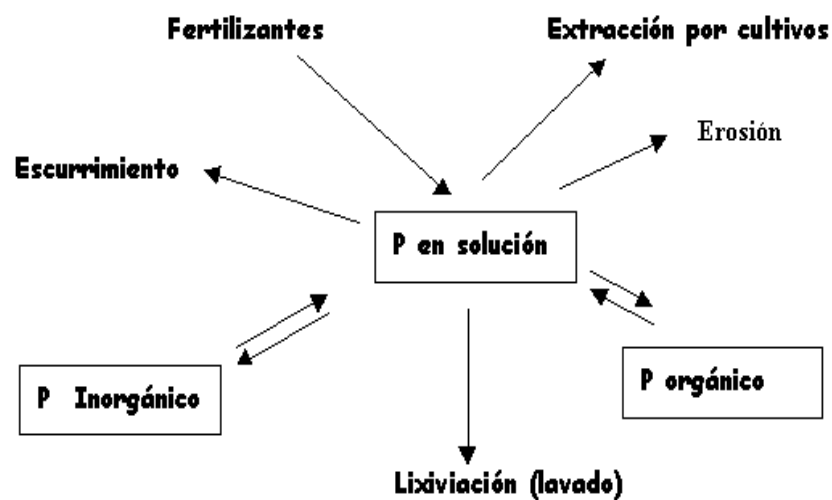
- **Fosfolípidos.** Es la tercera forma de compuestos orgánicos de fósforo en el suelo. Son moléculas anfipáticas porque en su estructura poseen regiones no polares debidas a cadenas hidrocarbonadas de ácidos grasos y regiones polares de las que hace parte el grupo fosfato. La cantidad total de

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

En el humus se encuentra también fosfato en proporciones entre 0.8 y 2.5% de P_2O_5 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 ^[23].

Desde un punto de vista práctico, interesa conocer las entradas y salidas de P del sistema suelo-planta y cómo es la movilidad del nutriente en el suelo. Como se desprende de la observación del ciclo global del P (figura 10), la única entrada al sistema proviene del agregado de fertilizantes fosfatados, mientras que las salidas pueden ser por extracción en los granos cosechados (la más importante en situaciones de erosión mínima); erosión, escurrimiento, lixiviación (de escasa importancia, como se mencionará más adelante). A medida que el P disponible en la solución del suelo es absorbido por las plantas, es repuesto a partir de la mineralización del humus, de las fracciones más lábiles de las arcillas y en forma mucho más lenta, desde la mineralogía primaria ^[24].

Figura 10. Esquema del ciclo global del fósforo en el sistema suelo-planta



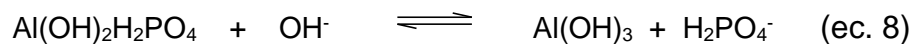
3.3.2. Transformaciones Químicas del Fósforo en el Suelo

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.

Cuando el pH baja, 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 ecuaciones 4 a 8:



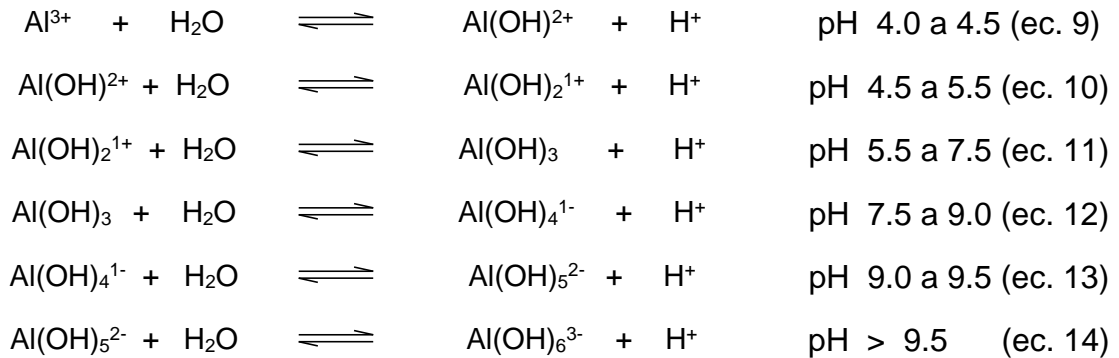
Al aumentar el pH a valores superiores de 5.5, el fósforo se hace más soluble aumentando su disponibilidad y se expresa mediante la ecuación 8:



Los fosfatos de aluminio e 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. A valores de pH superiores de 7, los fosfatos de calcio se vuelven insolubles [25].

El comportamiento del aluminio en el suelo condiciona las características de los suelos ácidos. La existencia en forma soluble de las distintas especies de aluminio depende del intervalo de pH del suelo y de la fuerza iónica. Existen formas intercambiables: el Al^{3+} , y las resultantes de su hidrólisis, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_3$. Formas precipitadas como el $\text{Al}(\text{OH})_3$, y formas aniónicas tales como $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ y $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$ y $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$ [26].

El origen de la acidez del suelo se halla en la hidrólisis de los iones aluminio en todo el rango de pH como se demuestra en las siguientes ecuaciones 9 a 14.



3.3.3. Fijación de Fósforo

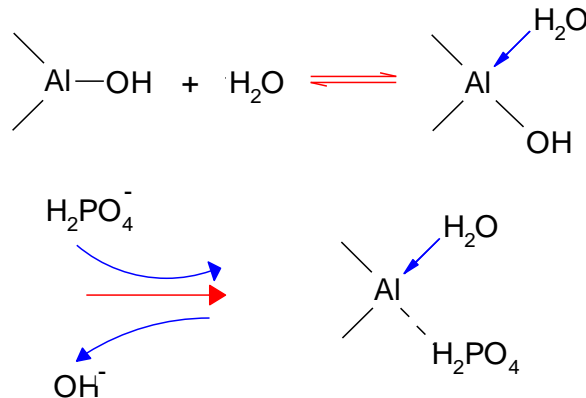
El P en el suelo puede estar fijado sobre el complejo arcillo-húmico y sobre las arcillas insolubilizándolos y volviéndolos no disponibles para la planta. La mayor parte del fósforo del suelo se encuentra en forma insoluble.

Los compuestos de P formados pueden encontrarse en forma de sales en solución, sales cristalinas o sales adsorbidas por los coloides del suelo. El ión fosfato puede, además, ser directamente adsorbido por los coloides del suelo o puede formar enlaces de gran estabilidad con los hidróxidos de Fe, Al o Mn que forman parte de los coloides del suelo, estos últimos constituyen el "fósforo fijado".

- **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 Al(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

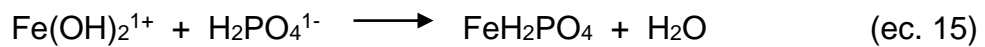
caolinita, comprende la interacción de dos regiones OH⁻ del borde de la arista y una tercera se refiere a la oclusión superficial del fosfato en una zona amorfa de la superficie de la arcilla. La fase inicial en la fijación se cree que es la hidratación seguida de una sustitución de grupos Al-OH por fosfato como se muestra en la figura 11^[27].

Figura 11. Adsorción de fósforo en minerales de arcilla 1:1

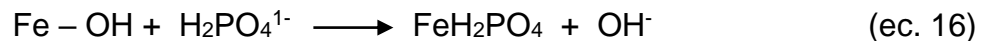


- **Adsorción de fósforo por compuestos de hierro y aluminio.** El proceso de adsorción de fosfatos por óxidos de hierro, puede ocurrir de varias maneras:

a. Sorción química de fosfatos en las superficies protonadas

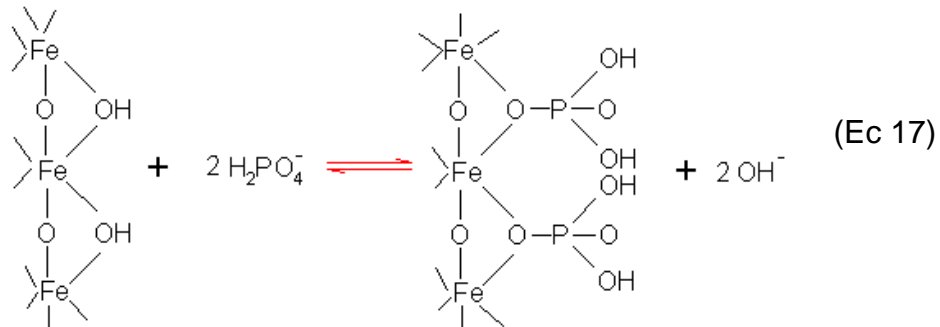


b. Sorción química mediante sustitución de grupos OH de la superficie:



Estructuralmente, la adsorción de fósforo sobre un mineral de óxido de hierro, puede representarse como se muestra en la figura 12

Figura 12. 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 Al^{3+} y Fe^{3+} procedentes de óxidos e hidróxidos coloidales aumentando su reactividad y facilitando su precipitación con fosfatos.

- **Sustitución Isomórfica:** Los iones fosfatos (número de coordinación 4), encajan bien en los sitios ocupados por los tetraedros de silicio de los silicatos. Por tanto, cuando se aplican fosfatos al suelo ocurre 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^- y el pH tiende a subir. Las siguientes reacciones para hidróxidos de hierro en oxisoles, ilustran este fenómeno ^[28].



En el primer caso se origina OH^- , en el segundo H_2O y carga negativa libre. Este fenómeno explica el aumento de carga negativa cuando se fosfatan los suelos ^[29].

- **Adsorción superficial:** Las superficies de las partículas del suelo, sean de carga constante o variable, son capaces de retener en estrecha proximidad al

sólido iones derivados de la solución del suelo. En esta región se acumulará un exceso superficial (sobre lo que podría esperarse sin un proceso de adsorción) y éste actúa como un almacén potencial de nutrientes capaz de reaprovisionar la solución del suelo cuando aquellos son eliminados por absorción radicular o microbiana. La literatura de la ciencia del suelo contiene un número muy amplio de documentos que describen la adsorción cuantitativamente e intentan explicar el fenómeno en términos de procesos en la superficie.

El tipo más usual de ensayo llevado a cabo es simplemente equilibrar submuestras de un suelo a temperatura constante (isoterma) con una gama de cantidades iguales de soluciones con diferentes concentraciones de la sustancia de interés a adsorber (adsorbato), y determinar la cantidad remanente después de la adsorción. El tiempo de equilibrio varía ampliamente con el sistema que se estudia: el intercambio de un catión simple puede completarse en minutos, mientras que la adsorción de ortofosfato puede continuar aumentando durante días (incluso después avanzar a un ritmo muy lento durante meses), en general el tiempo de equilibrio debe determinarse para cada caso.

La representación gráfica de la cantidad adsorbida por el suelo en relación con la concentración de la solución de equilibrio se denomina isoterma de adsorción. Estas tienen casi invariablemente una parte de pendiente fuerte a concentraciones de soluciones bajas, seguida de una curva creciente menos abrupta conforme la concentración aumenta. Las principales corresponden a curvas descritas por ecuaciones de isotermas de Langmuir y Freundlich ^[30].

3.4 Isoterma de Langmuir

Los fenómenos de adsorción de fosfatos en suelos han sido estudiados tradicionalmente mediante isotermas de adsorción ajustadas a ecuaciones matemáticas como la de Langmuir o la de Freundlich. Si bien la isoterma de Langmuir fue desarrollada en principio para el estudio de la adsorción de gases sobre sólidos, ha sido frecuentemente utilizada para describir la adsorción de líquidos y de iones en solución por los sólidos.

La ventaja de usar esta isoterma radica en la posibilidad de calcular la capacidad máxima de adsorción de fósforo (CMAP) y una constante relacionada con la energía de adsorción de fósforo (EAP); mientras que la de Freundlich, aunque describe adecuadamente el fenómeno de adsorción, sus constantes son de difícil interpretación ya que no tienen significado físico debido a que esta isoterma es puramente empírica ^[31].

Se muestra a continuación el enunciado de los tres postulados principales de la isoterma de Langmuir, a saber:

1. La energía de adsorción es constante, lo que implica la uniformidad de los sitios de adsorción y que no existe interacción entre las moléculas adsorbidas
2. La adsorción se realiza en lugares específicos sin movimiento de las moléculas en el plano de la superficie.
3. La máxima adsorción posible corresponde a una capa completa mono nuclear sobre la superficie sorbente.

Si se cumplieran los postulados de Adamson, debería obtenerse una recta al linealizar la isoterma de Langmuir, pero cuando se aplica al análisis de suelos presenta discontinuidades dependiendo de las concentraciones utilizadas.

Existen variadas opiniones sobre como sortear el problema de las discontinuidades en la isoterma de Langmuir, algunos investigadores han utilizado variaciones de esta ecuación que son conocidas como triple o doble Langmuir para mejorar los ajustes, así como también se linealiza de diferentes maneras.

Ecuación de Langmuir: En su forma lineal la ecuación de Langmuir se expresa:

$$X = \frac{KbC}{1 + KbC} \quad (\text{ec 20})$$

(Forma hiperbólica)

$$\frac{C}{X} = \frac{1}{Kb} + \frac{C}{b} \quad (\text{ec 21})$$

(Forma lineal)

Donde:

X: fósforo adsorbido (mg P / Kg suelo)

C: concentración en equilibrio (mg P / L solución)

K: EAF (L/mg)

b: CMAF (mg P/kg suelo)

En este trabajo se utilizó una de las linealizaciones de la isoterma de Langmuir, la linealización de Scatchard, cuya expresión matemática final viene dada por la ecuación:

$$x/c = b_m k - kx, \quad x/c \text{ vs } x \quad (\text{ec } 22)$$

Al graficar la anterior ecuación se debe obtener recta de pendiente $-k$ e intercepto en el eje y $b_m k$, además este valor es a menudo usado como un coeficiente de distribución (k_d) lo cual está justificado cuando las concentraciones son bajas. El valor k corresponde a la afinidad del compuesto por el suelo y b_m corresponde a la capacidad de adsorción del sólido ^[47].

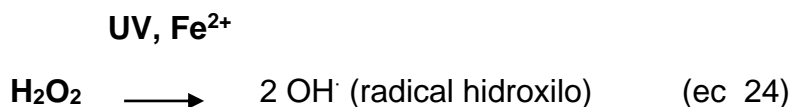
3.5. Peróxido de hidrógeno y su uso como agente oxidante.

El peróxido de hidrógeno es un producto químico respetuoso del medio ambiente. Sus usos incluyen el procesamiento de sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, textiles, blanqueo de la pulpa, el tratamiento de metales, aplicaciones cosméticas, catálisis de reacciones de polimerización, control de olores urbanos, el tratamiento de residuos industriales (desintoxicación), y el control de aguas residuales ^[32].

El peróxido de hidrogeno al descomponerse libera oxígeno, vapor de agua y calor (ecuación 23). En soluciones diluidas el calor es absorbido fácilmente por el agua presente. Mientras que en soluciones más concentradas, el calor aumenta la temperatura de la solución y acelera la velocidad de descomposición.



Numerosos agentes reductores inorgánicos son oxidados por el peróxido de hidrogeno en condiciones muy variadas. En contacto con suelos la reacción puede ser vigorosa, con la rápida evolución de oxígeno, vapor de agua y dióxido de carbono. Cuando este reactivo está almacenado siguiendo todas las normas técnicas de seguridad, no presenta riesgo alguno, se puede decir que es pobremente reactivo, pero cuando esta bajo la luz ultravioleta y/o también en presencia de algunos metales de transición se produce la reacción dada por la ecuación 24, dando como resultado los radicales hidroxilo, con su extremada reactividad, los cuales buscaran su estabilidad tratando de aparear ese electrón disponible, dando como resultado más probable la oxidación de algún material o la formación de una nueva molécula de peróxido de hidrogeno ^[33].



El peróxido de hidrogeno cuando es fuente de radicales hidroxilo es uno de los agentes oxidantes más fuertes conocidos, más fuerte aún que el cloro, el dióxido de cloro y que el permanganato de potasio, su reactividad es entonces la segunda luego del fluoruro, como se muestra en tabla 2.

Tabla 2. Reactividad del radical hidroxilo.

<i>Especie</i>	$E^{\theta} (V, 25^{\circ}C)^{1}$
Fluor	3,03
Radical hidroxilo	2,80
Oxígeno atómico	2,42
Ozono	2,07
Peróxido de hidrógeno	1,78
Radical perhidroxilo	1,70
Permanganato	1,68
Dióxido de cloro	1,57
Acido hipocloroso	1,49
Cloro	1,36
Bromo	1,09
Yodo	0,54

3.6 CULTIVO DE CAFETO

Los sistemas de producción de café en Colombia se han desarrollado solamente con variedades de la especie *coffea arabica* L. desde los comienzos de la caficultura colombiana con sentido comercial, hacia 1810 y hasta finales de los años 1950, predominó el cultivo en variedades de porte alto como la variedad típica, en cultivos extensos, con bajas densidades de siembra y con sombra. Posteriormente, entre los años 1970 y 1990 el cultivo evolucionó hacia sistemas intensivos a plena exposición solar, con variedades de porte bajo.

La década de los 90, se caracterizó por un incremento de cultivo de variedades de porte bajo con resistencia a la roya del cafeto, como la variedad colombiana. Recientemente se ha liberado la variedad Tabí de porte alto y también resistente a la roya del cafeto. A partir del año 2005 se liberaron la variedad castillo y las variedades castillo regional, para su cultivo en regiones específicas [34].

El cultivo del café por su naturaleza es uno de los cultivos más apropiados para preservar los recursos naturales en el Trópico. El café se adapta muy bien a zonas montañosas con altas precipitaciones y crece aún bajo sombrío. En Colombia, se han desarrollado conocimientos y prácticas de cultivo que buscan la preservación del medio ambiente que rodea la actividad agrícola de las montañas de Los Andes.

La conservación del suelo es una práctica fundamental, dado que los cafetales se establecen en zonas de alta pendiente, y sus suelos son frágiles debido al efecto erosivo de las lluvias. Para evitar la erosión, se plantan árboles de sombrío para que dejen caer su follaje y así formen una cobertura natural que amortigüe el impacto de las gotas de lluvia. También es importante la siembra de los cafetos en contorno, el manejo integrado de arvenses para asegurar la permanencia de una cobertura viva y las prácticas de bioingeniería para la conducción de las aguas y la protección de las corrientes de agua.

En las fincas cafeteras se emplea la MO que resulta a partir de la descomposición de la pulpa del café para la formación de las plantas de almácigo y el abono de los cultivos en su etapa de campo, esto le permite a los caficultores no sólo obtener plantas vigorosas y sanas para su siembra sino además reducir el Costo de producción y evitar el empleo de fertilizantes químicos ^[35].

3.7 Guamo

Múltiples estudios han comprobado el beneficio del sombrío sobre el cultivo de café. Mejorando la tasa de fotosíntesis y su desarrollo, disminuyendo el número y el costo de desyerbas, así como el costo de fertilizantes, y mejorando las propiedades organolépticas del café. Sin embargo este beneficio es consecuencia de la contribución que hace el sombrío a la conservación del suelo, mejorando las características físicas y químicas. Disminuyendo la evaporación desde la superficie y amortiguando las temperaturas.

El árbol de Guamo perteneciente a las especies de *Inga spp.* son aptas y ampliamente usadas en sistemas de finca, donde se requieren árboles de sombra. Principalmente se usan como sombra para café, pero también en diversos sistemas agroforestales debido a su fácil germinación por semilla, rápido crecimiento, capacidad de fijar nitrógeno, adaptabilidad a una amplia variedad de suelos incluyendo ácidos, produce una cobertura natural que protege el suelo con lo cual se controlan las malezas, hay liberación lenta de nutrientes y se conserva la humedad del suelo ^[36].

4 METODOLOGIA

4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y TOMA DE MUESTRA

El suelo bajo estudio se encuentra cultivado con cafeto variedad caturra, (*Coffea arabica*), bajo sombra de guamo (*Inga sp*), ubicado en finca Santa Rosa, vereda Aurelia, municipio de Cajibío, departamento del Cauca, a 1740 metros sobre el nivel del mar y con una precipitación pluvial de 1500 mm a 19°C. (Figura 13).

Figura 13. Ubicación geográfica del corregimiento de Cuatro Esquinas y la vereda Aurelia del departamento del Cauca



BURBANO, J., ZARAMA, P., 2006

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.

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 0- 10 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 trituraron y se pasaron por tamiz de 2 mm.

4.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO

Con el objeto de identificar el suelo a estudiar, se realizaron análisis físicos y químicos, de acuerdo a la metodología estandarizada en el Laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca ^[37].

4.3.1. Análisis Físicos

Los análisis físicos comprendieron las siguientes determinaciones:

- **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 determinó 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.
- **Textura:** Se refiere específicamente a las proporciones de arena, limos y arcillas (partículas menores a 2 mm de diámetro), que se encuentran en una masa de suelo, la textura del suelo es una propiedad física que se emplea como un criterio importante para evaluar otras propiedades como

son la capacidad de intercambio catiónico, índices de plasticidad, empleada para la clasificación del suelo entre otras. Se determinó por el método de Bouyoucos el cual comprende dos pasos generales: uno correspondiente al tamizado de la fracción gruesa (utilizando una variedad de tamices), el otro corresponde a un proceso de sedimentación de la fracción fina en agua (utilizando la pipeta para la evaluación de las diferentes partículas finas [38]).

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^+ .

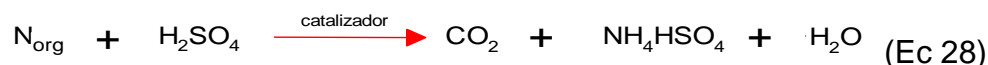
- **Materia orgánica:** Se realizó mediante el método de Walckley – Black, oxidando el carbono orgánico presente en el suelo con un oxidante en medio

ácido, utilizando como oxidante $K_2Cr_2O_7$ 1N y como medio ácido sulfúrico concentrado.



- **Determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl:** El método empleado es el utilizado universalmente en la determinación cuantitativa de N procedente de diversos materiales; consta de tres etapas:

1) Oxidación de la muestra: Las muestras de suelo son tratadas separadamente con H_2SO_4 y una mezcla catalizadora de $CuSO_4$ Selenio y K_2SO_4 para oxidar la MO 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:



- **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 HCl-(NH₄)₆Mo₇O₂₄ 4H₂O, que al reaccionar produce H₂MoO₄. Posteriormente, este ácido molíbdico reacciona con el ácido fosfórico de acuerdo a la siguiente reacción:



Este heterocompuesto 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:** Consiste en desplazar todos los cationes del suelo y reemplazarlos por iones NH₄⁺; el suelo seco, tamizado y muy fino, se satura con NH₄⁺. Posteriormente, hay un desplazamiento de los iones NH₄⁺ adsorbidos con NaCl, al 10% obteniéndose NH₄Cl en solución, que se trata con formaldehído neutro. El HCl obtenido se titula con NaOH 0,1 N. La siguiente reacción muestra lo ocurrido:



- **Determinación de las bases Intercambiables: Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio.** Se determinan con el primer extracto del tratamiento con acetato de amonio (AcONH₄) de la determinación de CIC, la cuantificación se realizó por espectrofotometría de Absorción Atómica, en el equipo Thermo serie S4SN71203 de la unidad de análisis industriales de la Universidad del Cauca.

4.4. SUPRESIÓN DE MATERIA ORGANICA DEL SUELO, MEDIANTE OXIDACION CON PEROXIDO DE HIDROGENO

Con el propósito de evaluar la retención de P por parte del suelo sin MO, es necesario inicialmente eliminarla mediante oxidación. Para ello, se uso peróxido de hidrogeno (Merck) con una concentración del 30 % p/p, reactivo tipo ISO. Se hace reaccionar el suelo con el peróxido en una relación 1: 8 en b año maría a 40°C durante 10 horas, agitando a intervalos regulares de tiempo. Luego se deja en reposo durante 14 horas al cabo de las cuales se aumenta la temperatura a 60°C para que prosiga la reacción durante 4 horas más. Las condiciones aplicadas son el resultado de numerosos ensayos.

4.4.1. Efecto de la supresión de la MO en propiedades del suelo

Con el propósito de evaluar el efecto de la supresión de la MO sobre algunas propiedades químicas del suelo, se determinaron antes y después de tal supresión, los parámetros de pH, MO, P disponible y presencia de alófanos. Además se tomaron espectros IR antes y después de la supresión de MO para observar cambios producidos en los grupos funcionales y evaluar el tipo de arcillas presentes en el.

4.5 EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA DE ALÓFANOS

Se realiza en tres muestras de suelo, evaluando el valor de pH del suelo en fluoruro de Sodio relación 1:50. Para ello, se toma 1 g de suelo seco al aire y tamizado, se adicionan 50mL de NaF 1N (pH = 6.8). Se toma el tiempo y se agita esta suspensión por un minuto. Se lee el pH en la tercera parte superior de la suspensión exactamente a los 2 min de la adición del NaF. Un valor de pH mayor o igual a 9.4 indica la presencia de alófanos.

Básicamente lo que ocurre es que el flúor del fluoruro de sodio reacciona con las arcillas del suelo, produciendo una liberación de grupos hidroxilos, aumentando el valor de pH.



4.6. EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN DE FÓSFORO MEDIANTE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Con el propósito de evaluar la adsorción de P en los suelos (con MO y sin MO) y medir su máxima capacidad de adsorción, se elaboran las Isotermas mediante la ecuación de Langmuir linealizada (linealización de Scatchard) empleando el método propuesto por *Fox y Kamprath* [39]. Para ello se aplicó un diseño experimental completamente aleatorio con 108 tratamientos consistentes en: seis concentraciones de P suministrado, seis tiempos de incubación y tres réplicas, utilizando el método en paralelo [40].

Para tal fin, se sigue el procedimiento detallado a continuación:

- **Preparación de suspensiones:** Se toma 1,0 g de suelo al cual se le ha eliminado su MO, se suspenden en 10 mL de una solución de NaCl 0.03 M, con cantidades crecientes de fósforo, utilizando fosfato monopotásico, KH_2PO_4 , en soluciones con concentraciones de 0, 2, 5, 10, 50 y 100 ppm de P. Igual procedimiento se aplica al suelo con MO
- **Incubación de las suspensiones:** Las suspensiones se agitan mecánicamente en agitador recíproco a 160rpm en forma continua durante 6 horas. Se incuban a una temperatura de 25°C, durante 2, 5, 10, 15 y 20 horas hasta alcanzar el punto de equilibrio.
- **Valoración del P retenido:** Para valorar el fósforo retenido, se tiene en cuenta la diferencia entre el contenido del fósforo que permanece en la solución una vez alcanzado el equilibrio y el contenido de fósforo suministrado, determinado mediante el método colorimétrico, formando un complejo de fósforo con el ácido molíbdico en medio reductor que absorbe a 660 nm.
- **Elaboración de Cinéticas de retención:** Con el objeto de determinar el tiempo en el que se alcanza el equilibrio de retención, se realiza inicialmente la cinética, empleando el método en paralelo, cada 0, 2, 5, 10, 15 y 20 horas, al final de las cuales se determina el fósforo retenido mediante método colorimétrico.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS

En la tabla 3 se presentan los resultados de los análisis físicos y químicos realizados a la muestra de suelo empleada en esta investigación. Para la interpretación de los resultados se utiliza como patrón de referencia, los datos reportados por Silva ^[41] (anexo 1).

Tabla 3. Resultados de Análisis Físicos y Químicos de SCMO

Suelo	Humedad Higroscópica (%)	Granulometría			Textura						
		Arena %	Arcilla %	Limo %							
Andisol	16,70	35,06	12,59	52,35	Franco Limoso						
Propiedades químicas											
pH	C %	MO %	N %	C/N	P (ppm)	Acidez intercambiable	Aluminio Intercambiable	Hidrógeno Intercambiable	CIC	CICE	
5,04	8,64	14,89	0,87	9,93	4,15	1,34	1,02	0,32	37,30	7,13	
Bases de cambio (meq/100g)						% Saturación de Bases					
Ca	Mg	Na	K	Ca/Mg	Ca+Mg / K	%SB	%Ca	%Mg	%Na	%K	%Al
3,16	0,89	0,84	0,90	3,55	4,05	81,2	44,32	12,48	11,78	12,62	14,31

El suelo, proveniente del municipio de Cajibío (Departamento del Cauca), sembrado con café bajo sombra de guamo, es de color oscuro, presenta un porcentaje de humedad higroscópica de 16.70%, comprendido dentro del rango normal (15 a 25%). Con textura Franco-Limosa, contenido normal de arcillas (12.59%), indicando que la retención de humedad se puede atribuir no solamente a las arcillas sino también al alto contenido de MO (14.89 %), detectado en este suelo.

El valor del pH, clasifica a este suelo como fuertemente ácido. Esto influye directamente en la disponibilidad de varios nutrientes para el cultivo, en este rango de pH (5 a 5.5) se ve favorecido el fenómeno de adsorción de nutrientes como fósforo, boro, azufre y molibdeno en la fase coloidal del suelo, debido a un intercambio aniónico, puesto que se forman cargas positivas en los coloides, favoreciendo así la capacidad de intercambio aniónico. La acidez fuerte proviene tanto de la MO, como de la fracción mineral del suelo, sobre todo a la presencia de alófanos detectada en este suelo. Además se puede atribuir al aluminio intercambiable y aún cuando el valor encontrado no es tóxico para las plantas, puede conducir a la insolubilización del P, volviéndolo indisponible para ella ^[42].

El contenido de MO influye sobre la CIC, clasificada como alta (37.30 meq/100g). El valor de CIC efectiva 7.132 meq/100g superior a 4 meq/100g es favorable para este suelo, protegiéndolo de pérdidas de bases (Ca, Mg, K) por lavado en dicho material parental. El calcio se encuentra en el rango apropiado, lo mismo que su saturación, pero hay deficiencia de Mg, con baja saturación. Esta base es tan necesaria para la planta que se absorben con rapidez, provocando el descenso de este nutriente en el suelo lo cual puede deberse a la continua extracción por parte de los cultivos sin su debida reposición. El nivel de K es alto. La relación Ca/Mg está en un rango apropiado. La relación (Ca+Mg)/K está en desequilibrio e indica el predominio de potasio, impidiendo la normal absorción de calcio y magnesio.

La acidez intercambiable, Al intercambiable y su porcentaje de saturación son bajos, de tal manera que no presenta toxicidad para el suelo y plantas de café. Debido que el porcentaje de saturación de Al es menor que las bases de cambio, no afecta la retención de estas últimas. Por lo tanto la acidez se atribuye a la MO que puede liberar iones H⁺ a la solución del suelo, o a la presencia de Al no intercambiable y principalmente de alófanos detectados en este análisis.

El porcentaje de N total es alto, atribuible a la fracción orgánica, sin embargo, no se puede asegurar su alta disponibilidad para las plantas. 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.

La relación C/N para este suelo indica un proceso normal de mineralización, los microorganismos estarán trabajando adecuadamente en la degradación de la MO, aunque el nitrógeno está en un valor elevado no implica que esté disponible generando por ende una fuente de energía baja para ellos y posiblemente influirá negativamente en el proceso de humificación de la MO ocasionando así fuerte acidez al suelo con consecuencias negativas de fertilidad.

El suelo presenta un bajo contenido de fósforo disponible 4.15 ppm, atribuible a la fuerte acidez, siendo posible que esté intercambiado aniónicamente o precipitado en forma de fosfatos de Al y de Fe. Aunque contenido de MO es alto, produce acidez favoreciendo así la retención de P en el suelo. Esta retención también se puede atribuir a la presencia de alófanos en este suelo, como se demuestra más adelante, influyendo en sus propiedades físicas y químicas tales como: alta retención de humedad, fuerte acidez y baja densidad aparente, formando el complejo humus-aluminio- P ó humus-Hierro- P.

5.2. RESULTADOS DE LA SUPRESIÓN DE LA MO DEL SUELO

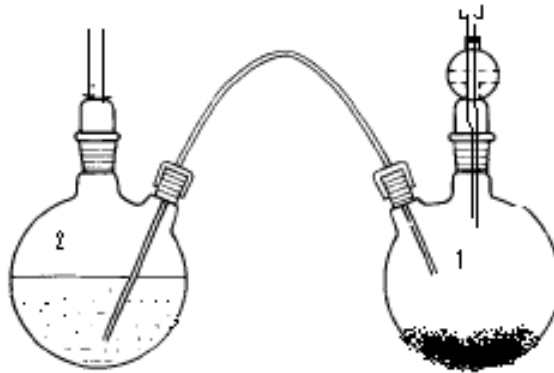
Inicialmente se diseñó un reactor mostrado en la figura 14 con el propósito de evaluar la cantidad de CO₂ liberado al reaccionar cierta cantidad de suelo con H₂O₂, el cual se recoge en una solución de Ca(OH)₂ saturado, produciendo una reacción visible por la obtención de una suspensión de CaCO₃ (que varía de incolora a lechosa) de acuerdo a la siguientes reacciones sucesivas:



Con el fin de calcular aproximadamente la cantidad de MO oxidada, se debería pesar la cantidad de CaCO₃ generado en la reacción, (previo secamiento).

En la figura 13, el recipiente numero 1 contiene la mezcla de suelo y peróxido de hidrogeno, el recipiente numero 2 contiene una solución sobresaturada y filtrada de cal apagada Ca(OH)₂. Por la manguera que comunica los balones, se transportan los gases generados en el recipiente número 1, los cuales son burbujeados y recolectados en la solución contenida del balón 2.

Figura 14: Reactor de Oxidación de la MO del Suelo



Se observó producción apreciable de CO_2 en las etapas iniciales del proceso de oxidación, luego de cierto tiempo aparece una gran producción de O_2 y la cantidad de CO_2 disminuye hasta hacerse nula. Para determinar que el gas producido tardíamente es O_2 , se realizó una prueba de ignición, consistente en la introducción de una astilla en estado de incandescencia durante el proceso de la reacción, la cual al entrar en contacto con el oxígeno, se prende (arde) inmediata y vigorosamente. Sin embargo, la reacción fue muy lenta y con abundantes escape de gas, razón por la cual se decidió no continuar con este método.

Después de varios ensayos preliminares, la Oxidación se realizó de la siguiente manera:

1. Reacción suelo- H_2O_2 en beaker de 1,0 L a temperatura constante de 40°C , en baño maría.
2. Adición de 200 mL de H_2O_2 por cada 25 g de suelo paulatinamente en el transcurso de 10 h.
3. Proseguir la reacción durante toda la noche, siempre a temperatura constante de 40°C .
4. Transcurrida la noche, elevar la temperatura del baño maría hasta 60°C y continúa la reacción por 4 horas más, agitando esporádicamente.

La selección de la Temperatura a 40 °C en baño maría, se realizó debido a que a temperaturas mayores la reacción se hace incontrolable por momentos, con una gran producción de gas, conllevando a una pérdida de material por rebose. A temperaturas menores de 40 °C la reacción es demasiado lenta. Se tomó como tiempo de reacción 10 horas, tiempo en el cual termina la reacción. Se optó por usar beaker de gran volumen como medio de reacción para evitar el rebose y consecuente pérdida de material, debido a la generación de alta cantidad de burbujas.

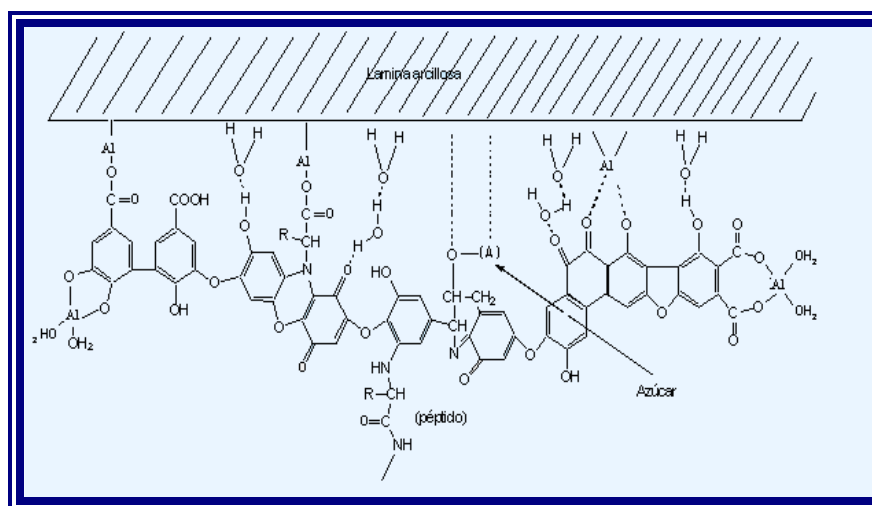
Luego de terminado el proceso de oxidación se procedió a secar el suelo oxidado a 105 °C durante 2 horas. Para eliminar cualquier rastro de peróxido de la muestra. En la tabla 5 se reportan los resultados de la pérdida de MO en el suelo oxidado con peróxido de hidrógeno.

Tabla 4: Parámetros antes y después de la supresión de la MOS

	Suelo con MO	Suelo sin MO	% de disminución
MO (%)	14.89	3.39	77.23

En ella se observa que no fue posible eliminar totalmente la MO, con dicho oxidante. Como lo demuestra Fassbender (1987) ^[43], la MO y la fracción inorgánica del suelo no actúan independientemente, sino que en suelos como Andisoles existen mezclas y uniones muy estables entre compuestos inorgánicos y orgánicos. Estas resultan de la combinación directa de estos materiales, por medio de enlaces iónicos, de los que resultan complejos estables, enlaces de Van der Waals dando lugar a complejos metaestables y enlaces de hidrógeno originando complejos poco estables. Es posible que la fracción de la MO más estable, no se logre eliminar con el método utilizado. En esta caso es posible que la MO esté compartiendo con la fracción mineral la atracción de cationes polivalentes como Al^{3+} y Ca^{2+} ilustradas en la figura 15, obteniéndose complejos muy estables, difícilmente degradables, equivalente a un 22.77% del total de la MOS que correspondería a alguna de las fracciones del humus, posiblemente a las huminas.

Figura 15. Reacción del Aluminio con los grupos carboxílicos y fenólicos del humus



MARQUINEZ, L., et al 2006

5.2.1. Efecto de la supresión de la MO en las propiedades del suelo

En la tabla 5 se relacionan los resultados del efecto de la supresión de la MO en otras propiedades del suelo.

Tabla 5. Propiedades Físicas y Químicas del Suelo Sin MO

	Suelo con MO	Suelo sin MO	% de disminución
%Humedad Higroscópica	16.7	3.165	81.05
Color	Oscuro	Amarillo Naranja	_____
MO (%)	14.89	3.39	77.23
pH	5.04	4.94	2%
P disponible (ppm)	4.15	0.330	92.05

Se observa en la tabla 5 el efecto de la supresión de la MO en todas las propiedades del suelo. El color cambia drásticamente, indicando por lo tanto que

el color del suelo se atribuye a su MO. Su humedad disminuye en un 81% significando que la mayor parte de la humedad de este suelo es retenida por su MO. También se aprecia una disminución del 2% en el valor de pH, confirmando que la mayor parte de la acidez proviene de la fracción mineral en este caso de alófanos, o de acidez no intercambiable por especies como el $\text{Al}(\text{OH})_2^+$. Pero que hay una gran contribución a esta acidez por parte de su de la MO.

Además en la tabla se observa que hay una fuerte disminución en el contenido de P disponible, correspondiente al 92.05%, indicando el papel tan importante que cumple la MO en la disponibilidad de dicho elemento. Este resultado además indica la fuerte adsorción de P que efectuaría la fracción mineral, por diferentes mecanismos como se demostrará más adelante.

5.2.2. Efecto de la supresión de la MO en grupos funcionales

Los espectros infrarrojos se tomaron con el objetivo de confirmar la presencia de arcillas, más específicamente alófanos y algún otro tipo de arcilla.

Estos se tomaron tanto al SCMO como al SSMO, se buscó la presencia de bandas características de alófanos, agua en minerales arcillosos, haloisita, SiO_4^{4-} y Si-O, cuyas frecuencias son reportadas en la tabla 6.

Tabla 6. Frecuencias Características de grupos correspondientes a Arcillas en IR

Arcilla	Frecuencia (cm^{-1})
Proto-imogolita alófano (Arcillas jóvenes).	427.90; 568.71; 693.07; 970.52; 1640; 3500
Haloisita y posibles capas octaédricas de silicatos	466.73; 1032.52; 1100.96
Caolinita, montmorillonita y materiales amorfos	800-750
Agua en minerales arcillosos	754.48; 1421.30; 1632; 1642.32
Si-O	990; 1030
SiO_4^{4-}	500; 625; 800; 1050
KBr	2350

Besoain E., et al. 2000

En la figura 16 se reportan los espectros IR obtenidos para las dos muestras de suelos (con y sin MO) y en la figura 17 se resalta la región comprendida entre 400 y 2000 cm^{-1} porque en ella se encuentran las bandas que permiten caracterizar más claramente la presencia de alófanos y otros aluminosilicatos

Figura 16 Espectros IR, 4000- 400 cm^{-1} de Suelo con y sin MO

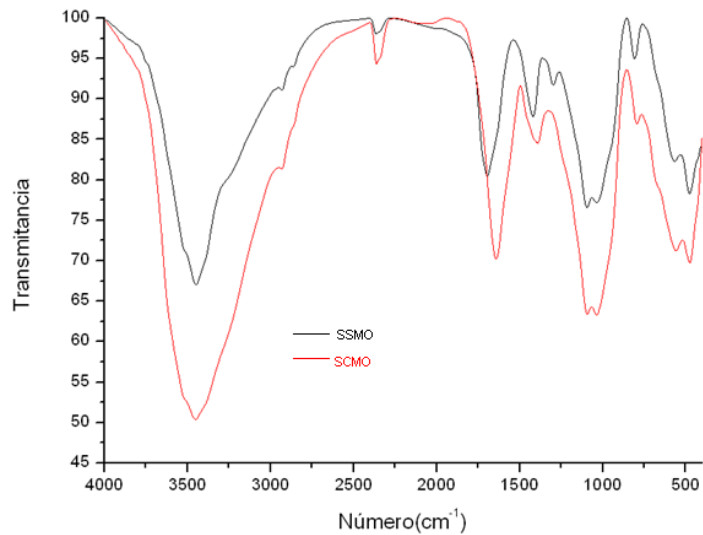
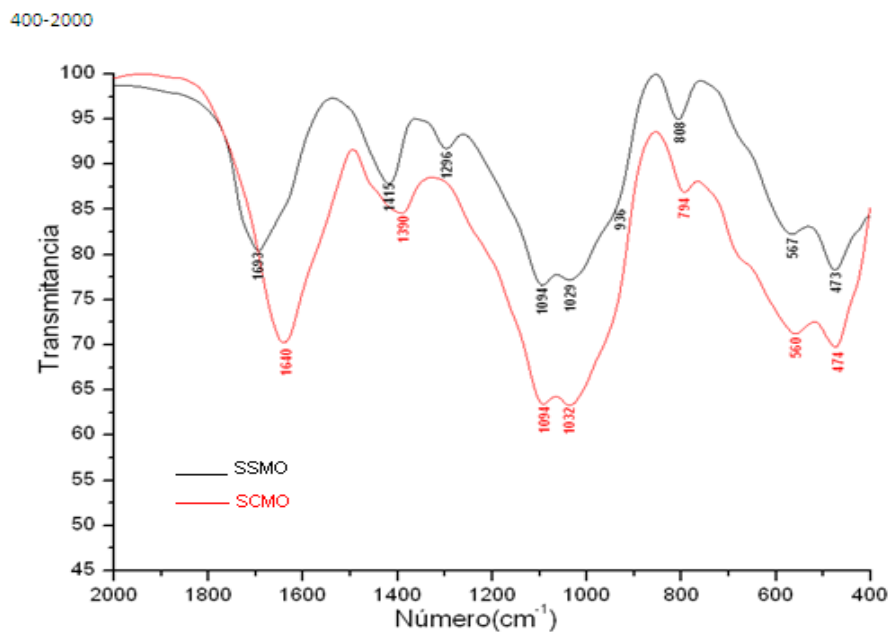


Figura 17. Espectros IR, 2000-400 cm^{-1} de Suelo con y sin MO



En dichos espectros se observa para el SCMO, la presencia de un hombro a 3533 y una banda a 560, además de otra a 1640 cm^{-1} , las cuales son típicas de proto-imogolita alófono, reportado por *PARFFIT AND HENMI*. Según *PARFITT*, Y *WADA*, reportado por *PARFITT* ^[44], la presencia de alófonos en suelos es confirmada por la existencia de las bandas centradas alrededor de 3500 y 1640 cm^{-1} . Estas bandas corresponden a la tensión y doblamiento de las vibraciones del hidroxilo, en el alófono. En la figura 17 se ven además unas bandas adicionales a 474; 1032 y 1094 cm^{-1} , las cuales son características de haloisita y posiblemente capas octaédricas de silicatos tal como lo reporta Russel et al. (1992), la banda a 1640 cm^{-1} corresponde a vibraciones y deformaciones de moléculas de agua en minerales arcillosos, yeso y sustancias amorfas de acuerdo a lo reportado por el *INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZI suelos de Colombia IGAC*. ^[45]. En la región de 800 a 750 cm^{-1} se halla una banda a 749 cm^{-1} la cual es característica de materiales amorfos y correspondería a vibraciones y deformaciones de grupos Si-O de silicio amorfo, caolinita y montmorillonita.

El hombro presente a 3533 cm^{-1} corresponde a estiramientos C-H de metilos o metilenos, los cuales confirman la presencia de sustancias orgánicas adsorbidas por los alófonos, confirmando así que los alófonos son fuertes adsorbentes de sustancias orgánicas, indicando que el suelo con tratamiento aún tiene MO. En diferentes estudios se ha notado que en los espectros de los silicatos están presentes bandas relacionadas con la vibración del anión SiO_4^{4-} . Como se ve en los espectros, están presentes las siguientes bandas, propias de este anión: 635 y 794 cm^{-1} .

Para el SSMO, se nota igualmente la presencia de las bandas características para proto- imogolita alófono a 567 y 3533 cm^{-1} . Así como también a 471; 1029 y 1094 cm^{-1} las cuales son características de un espectro de haloisita y muy posiblemente de capas octaédricas de silicatos. Las bandas a 1415 y 1693 cm^{-1} son características de materiales amorfos y complejos orgánicos, al igual que las bandas presentes en la región de 3533, las cuales ratifican la presencia de sustancias orgánicas fuertemente adsorbidas sobre los alófonos. La banda presente a 1415 cm^{-1} corresponde a vibraciones y deformaciones de moléculas de agua en minerales arcillosos y sustancias amorfas. Para este suelo Se nota una nueva banda a 1296 cm^{-1} y un aumento en definición de la banda a 808 cm^{-1} lo cual indica una mayor presencia de SiO_4^{4-} , muy posiblemente debido a que el tratamiento con el H_2O_2 indujo una despolimerización de sílice, dejando como resultado un número mayor de SiO_4^{4-} libre.

En conclusión, de los espectros IR se deduce claramente que estos suelos poseen carácter alofónico además de poseer otro tipo de arcillas, confirmando su carácter de Andisol.

5.2.3. Resultados correspondientes a Presencia de alófanos

En la tabla 7 se presentan los resultados correspondientes a la prueba de alófanos.

Tabla 7. Resultados de Presencia de Alófanos

Muestra	pH Antes del tratamiento con NaF	pH Después del tratamiento con NaF
SUELO CON MO	5.02	9.41
SUELO SIN MO	4.94	9.52

En la tabla 7 se observa que los valores de pH después del tratamiento, son superiores a 9.40 indicando presencia de alófanos. El mayor valor para el suelo sin MO confirma aún más dicha presencia y muestra que se han logrado romper algunas uniones entre la MO y estos alófanos.

5.3. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DEL FÓSFORO MEDIANTE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Con el propósito de evaluar la adsorción de P, se evaluó su máxima capacidad de adsorción, mediante el empleo de Isotermas de adsorción.

5.3.1 Cinéticas de retención de fósforo en el suelo

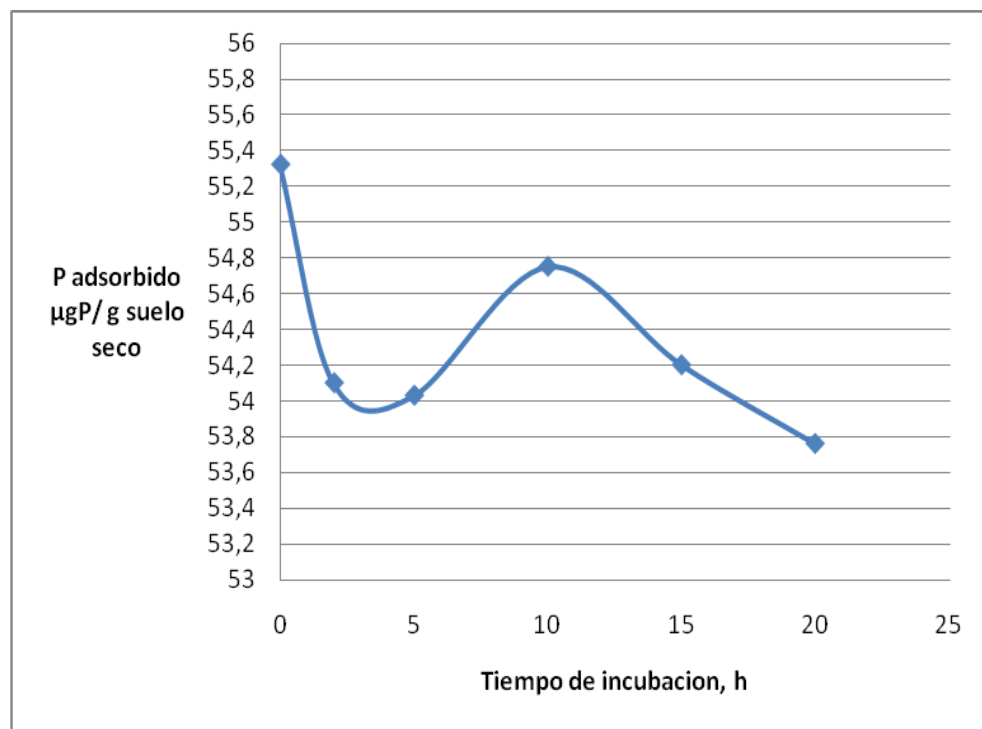
Para obtener la isoterma, es necesario elaborar inicialmente cinéticas de adsorción, con el propósito de establecer el tiempo de equilibrio, incubando los suelos con soluciones de determinada concentración de fósforo. Se incubó tanto el suelo con MO como el suelo sin MO.

Las soluciones suministradas se determinaron teniendo en cuenta la eficiencia o la aprovechabilidad del P cuando llega al suelo y la dosis aplicada por la mayoría de agricultores de la región, para tal fin se suministran concentraciones equivalentes a: 0, 5, 10, 50, y 100 ppm de P en diferentes tiempos de incubación: 0, 5, 10, 20 y 24 horas para el suelo con MO. Los resultados se relacionan en la tabla 8 y figuras 18 a 22.

Tabla 8. Fósforo adsorbido por el Suelo Con MO

P Sum ($\mu\text{gP/mL}$)	P sum al tiempo de equilibrio ($\mu\text{g P/g suelo seco}$)	Fósforo adsorbido ($\mu\text{g P/g suelo seco}$)				
		Tiempos de incubación (h)				
		0	5	10	20	24
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	58,90	55,32	54,03	54,75	53,39	53,88
10	116,64	113,53	112,30	112,21	110,20	110,80
50	580,03	575,70	573,92	575,00	576,38	575,16
100	1187,84	1173,15	1181,18	1181,57	1166,20	1181,57

Figura 18: Cinética de retención de Fósforo en SCMO, con adición de 5 ppm



Se nota en la figura 18, que para las 5 primeras horas hay una desorción de P, para luego adsorber hasta las 10 horas y entonces nuevamente desorber, constituyéndose esto en un proceso dinámico, donde los sitios de adsorción están en un constante proceso continuo de adsorción-desorción. Luego de llegar a una saturación de dichos sitios y debido a la repulsión de cargas se inicia el proceso de desorción.

Figura 19. Cinética de retención de Fósforo en SCMO con adición de 10 ppm

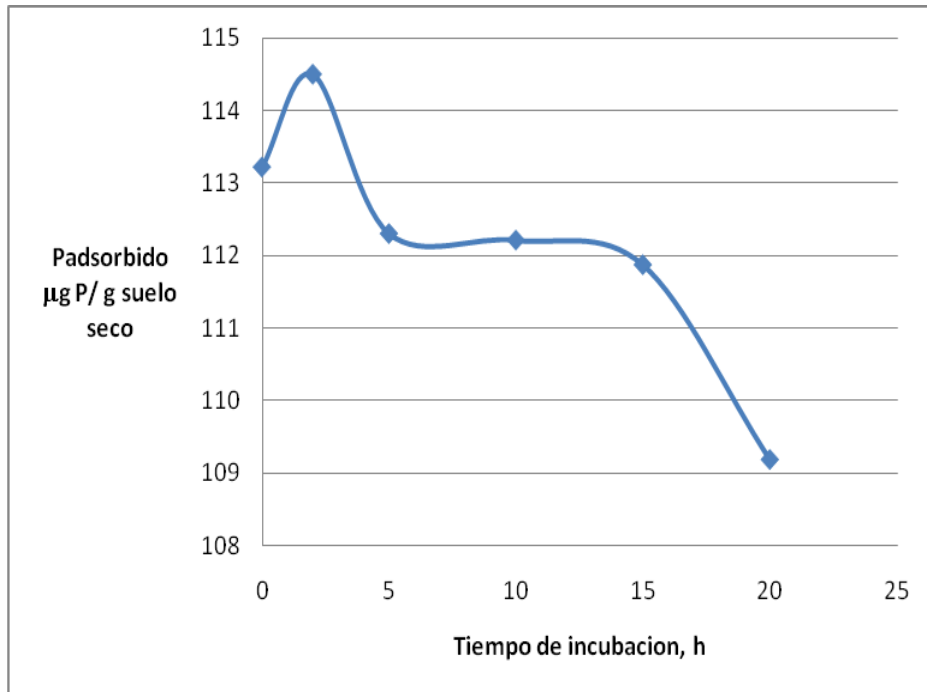


Figura 20. Cinética de retención de Fósforo en SCMO con adición de 50 ppm

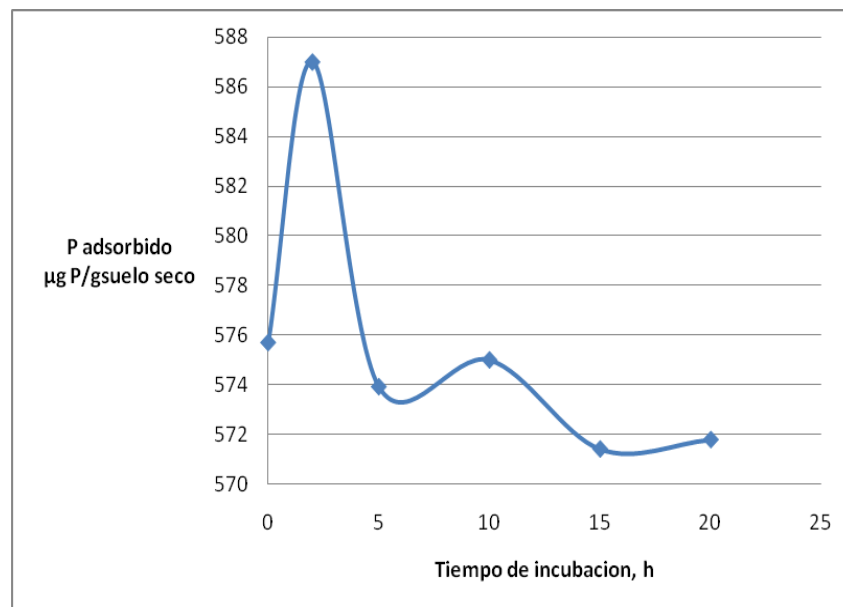
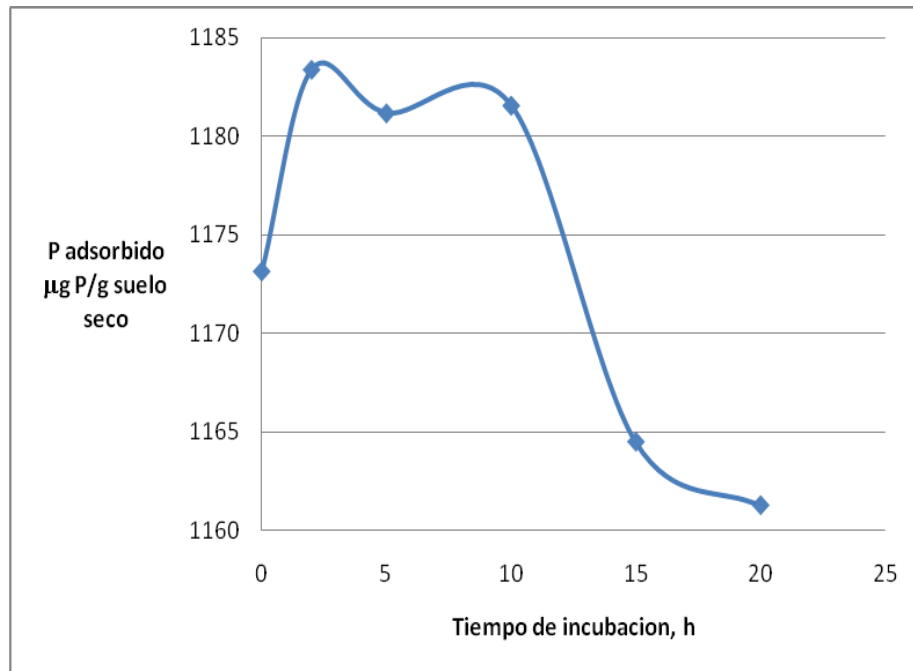


Figura 21. Cinética de retención de Fósforo en SCMO con adición 100 ppm



En las figuras (19 a 21) se observa un comportamiento inicial contrario al anterior, ya que primero hay un proceso de adsorción aproximadamente hasta las 2 primeras horas (5 para el último), para luego presentar una tendencia de desorción. Se observa que se alcanza el equilibrio cuando se adicionan 50 ppm de P a las 15 horas. Cuando se adicionan 100 ppm de P se observa un aparente inicio de equilibrio también a las 15 horas, pero no se puede afirmar ya que después de este tiempo el proceso de desorción continúa. Esta diferencia de comportamiento se debe a que al adicionar 5 ppm de P, la cantidad de sitios activos de adsorción sin saturar es mayor al número de aniones adicionados por tanto hay una adsorción. Luego de esta adición la cantidad de sitios disponibles es insuficiente para el número de aniones fosfato libres, lo cual hace que haya un proceso dinámico de adsorción-desorción.

En la tabla 9 se aprecia que el % P adsorbido en el SCMO en función del tiempo no varía apreciablemente para cada dosis suministrada, pero que para cada tiempo el P adsorbido aumenta a medida que aumenta la dosis suministrada, manifestando el hecho de la presencia de alto número de sitios de adsorción, lo cual es claro si se tiene en cuenta la gran cantidad de sitios activos de adsorción, a medida que aumenta el P adicionado se incrementa su adsorción mientras no se alcance el punto de saturación

Tabla 9. Porcentajes de adsorción de Fósforo en SCMO.

P Suministrado ($\mu\text{g P/mL}$)	% P adsorbido en los diferentes Tiempos de incubación				
	0 h	5 h	10 h	20 h	24 h
5	93,92	91,73	92,95	90,65	91,48
10	97,33	96,28	96,20	94,48	94,99
50	99,25	98,95	99,13	99,37	99,16
100	98,77	99,44	99,48	98,18	99,48

Con el propósito de saber si la diferencia es estadísticamente significativa, se aplica inicialmente la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para saber si los datos se ajustan a ella (tabla 10), en donde se aprecia que los resultados no se ajustan a esta.

Tabla 10. Pruebas de normalidad para resultados de Adsorción de P en SCMO

	tiempo	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	GI	Sig.
P adsorbido	1	,822	12	,017
	2	,811	18	,002
	3	,809	18	,002
	4	,806	18	,002
% adsorción	1	,509	12	,000
	2	,514	18	,000
	3	,507	18	,000
	4	,521	18	,000

Como no se ajustan a la normalidad, se aplican pruebas no paramétricas como la de Kruskal Wallis (Tabla 11) en donde se corrobora lo manifestado anteriormente

en el sentido de que la adsorción para cada dosis ocurre desde el momento cero de incubación, ya que no hay diferencia significativa para cada dosis suministrada en función del tiempo, indicando de esta manera que el equilibrio de adsorción ha sido alcanzado en el tiempo de estudio.

Tabla 11 Prueba de Estadísticos de contraste (a, b) datos de Adsorción de P de SCMO

	Adsorción	P adicionado
Chi-cuadrado	,461	,153
gl	3	3
Sig. asintót.	,977	,997

a Prueba de Kruskal-Wallis
b Variable de agrupación: tiempo

Si se tiene como variable de agrupación el P adicionado, (Tabla 12), se observa que sí hay diferencia significativa entre los %P adsorbido para el suelo con MO para las diferentes dosis suministradas, de tal manera que a mayor dosis suministrada mayor % de adsorción.

Tabla 12. Estadísticos de contraste (a, b) datos de Adsorción de P de SCMO

	% Adsorción	Tiempo
Chi-cuadrado	75,103	,000
gl	4	4
Sig. asintót.	,000	1,000

a Prueba de Kruskal-Wallis
b Variable de agrupación: P adicionado

Para saber cuáles dosis son diferentes se aplica una Prueba de Tukey (Tabla 13).

Tabla 13. Prueba de Tukey del Fósforo adsorbido en función del P suministrado SCMO

	P adicionado(µg/mL)	N	Subconjunto para alfa = .05					
			1	2	3	4	5	6
HSD de Tukey(a)	0.00	14	,00					
	5.00	14		54,15				
	10.00	14			112,85			
	50,00	14				584,12		
	100,00	14					1177,00	
	Sig.		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 14,000.

En dicha tabla se aprecia que los valores de P adsorbido son diferentes significativamente para las diferentes dosis suministradas, siendo significativamente mayor la adsorción para la mayor dosis y en su orden le siguen las otras dosis suministradas. Esto corrobora como se relató anteriormente que el número de sitios de adsorción es alto y que no se saturan con dosis bajas de P

Con base en las consideraciones anteriores se seleccionó el tiempo de 20 horas para realizar la respectiva isoterma en este suelo.

5.4 Fósforo adsorbido por el suelo sin MO.

Las dosis de P se suministran en concentraciones de: 0, 2, 5, 10, 50, y 100 ppm de P en diferentes tiempos de incubación a saber: 0, 2, 5, 10, 15 y 20 horas para el suelo sin MO. Se adiciona otra dosis más con respecto al SCMO para tener un rango más estrecho en el análisis. Los resultados se relacionan en la tabla 14 y figuras 23 a 27.

Tabla 14. Fósforo adsorbido por el SSMO.

P sum ($\mu\text{g/mL}$)	Fósforo adsorbido ($\mu\text{g P /g de suelo seco}$)					
	TIEMPOS DE INCUBACION (h)					
	0	2	5	10	15	20
0	0	0	0	0	0	0
2	18.17	17.89	18.18	16.89	17.06	16.93
5	48,57	47,95	46,17	48,25	47,57	47,84
10	99.08	99,13	99.06	98,48	100,66	96,05
50	498.71	496.53	500,03	497.92	497.13	496,99
100	996.42	995.02	992.51	995.30	988,73	995,43

Figura 22. Cinética de retención de Fósforo en SSMO con adición de 2 ppm

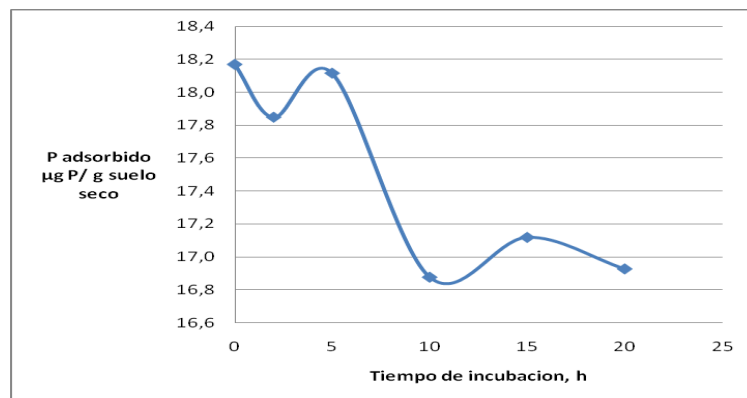


Figura 24. Cinética de retención de de Fósforo en SSMO con adición de 5 ppm

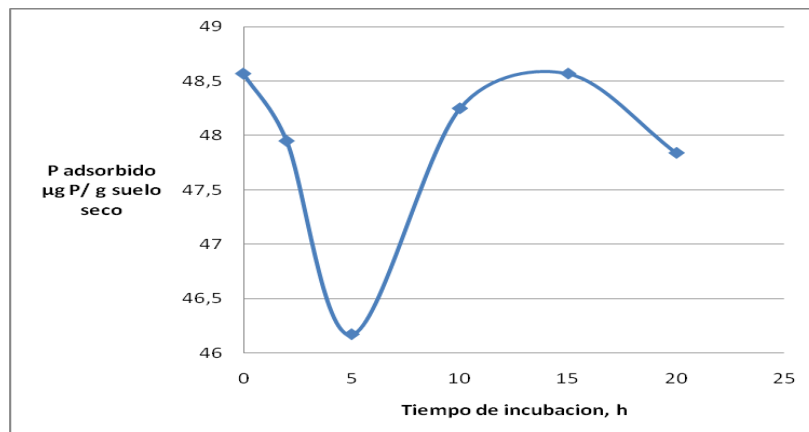


Figura 25. Cinética de retención de de Fósforo en SSMO con adición de 10 ppm

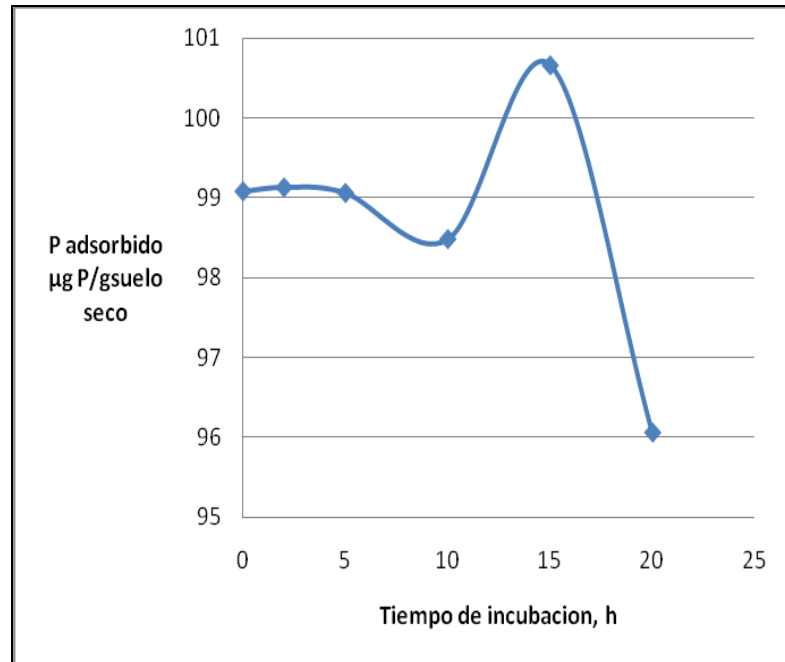


Figura 26. Cinética de retención de de Fósforo en SSMO con adición de 50 ppm

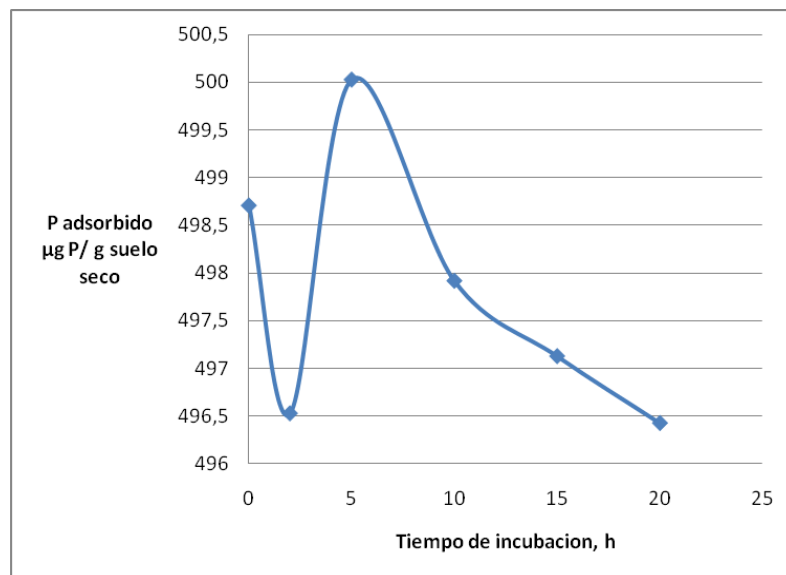
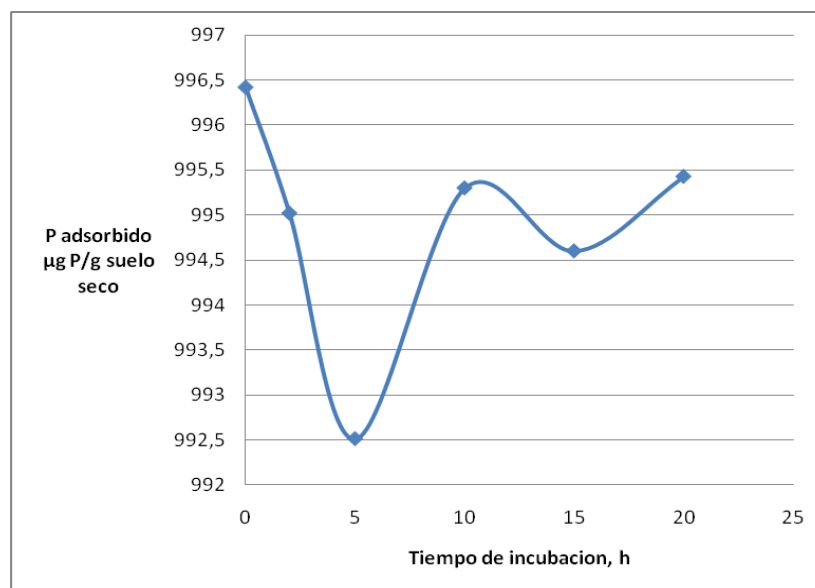


Figura 27. Cinética de retención de Fósforo en SSMO con adición de 100 ppm



En todos los casos (menos el correspondiente a la figura 25), se observa que inicialmente hay una ligera desorción de P, en un tiempo comprendido entre 0 y 5 horas de incubación cuando se suministraron P en el rango de 2, 5, 50 y 100 ppm. Si se adicionan 10 ppm se observa una adsorción constante durante las primeras 5 horas, luego hay fluctuaciones de desorción-adsorción, indicando que no hay estabilidad, obedeciendo a un proceso continuo de saturación y repulsión de partículas aniónicas, las cuales debido a su proximidad física, se ven repelidas entre sí por repulsión eléctrica. Llevando de esta manera a la liberación del P nuevamente a la solución. Así cuando la capa de sitios activos, tiene demasiados lugares vacíos, los aniones presentes en la solución se ven atraídos hacia ellos para ocuparlos, además si la solución está cada vez más saturada de aniones, se ve favorecido termodinámicamente el proceso de adsorción.

En la tabla 15 se observa que para todas las dosis suministradas y en todos los tiempos de incubación no hay diferencia apreciable entre los porcentajes de adsorción de P del suelo sin MO, para cada dosis suministrada, indicando que la retención ocurre en forma inmediata. Además se detecta que el porcentaje de adsorción aumenta con el incremento de la dosis suministrada, significando que existen alta cantidad de sitios de adsorción en la fracción mineral del suelo que van siendo saturados con altas concentraciones de P.

Tabla 15. Porcentajes de Adsorción de Fósforo en SSMO en función del tiempo

P Suministrado ($\mu\text{g P/mL}$)	% P adsorbido en los diferentes Tiempos de incubación					
	0 h	2 h	5 h	10 h	15 h	20 h
2	89,46	88,08	89,51	83,16	84,00	83,36
5	95,97	94,74	91,23	95,34	93,99	94,53
10	97,05	97,10	97,03	96,46	98,60	94,08
50	99,58	99,15	99,85	99,43	99,27	99,24
100	99,76	99,62	99,37	99,65	98,99	99,66

En la tabla 16 se representan los resultados del porcentaje de retención de P para el SSMO en 20 h de incubación. Se deduce que para todos los tiempos de incubación, la adsorción del fósforo adicionado es muy alta, en su mayoría con porcentajes de adsorción superiores al 94 %

TABLA16. Porcentaje de Adsorción de Fósforo en SSMO en tiempo de equilibrio

Fósforo suministrado (ppm)	Fósforo suministrado ($\mu\text{g P/g suelo}$)	Fósforo adsorbido ($\mu\text{g P/g suelo}$)	% Adsorción de Fósforo
0	0,00	0,00	0,00
2	20,31	16,93	83,36
5	50,61	47,84	94,53
10	102,09	96,05	94,08
50	500,79	497,00	99,24
100	998,82	995,43	99,66

Para saber si la diferencia es estadísticamente significativa, se aplica inicialmente la prueba de normalidad de Shapiro Wilk con el propósito de saber si los datos se ajustan a la normalidad cuyos resultados se relacionan en las tablas 17 y 18.

Tabla 17. Pruebas de normalidad: Fósforo Adsorbido en SSMO en función del Tiempo

	tiempo	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	Gl	Sig.
% ads	1	,543	18	,000
	2	,549	18	,000
	3	,560	18	,000
	4	,577	18	,000
	5	,571	18	,000
	6	,583	18	,000

Tabla 18. Pruebas de normalidad Fósforo Adsorbido en SSMO en función del P suministrado

	P adicionado (ppm)	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	Gl	Sig.
% ads	2,00	,927	18	,174
	5,00	,942	18	,316
	10,00	,782	18	,001
	50,00	,749	18	,000
	100,00	,635	18	,000

Se aprecia que gran parte de los resultados no se ajustan a la normalidad y por lo tanto se aplican pruebas no paramétricas. Se aplica la prueba de Kruskal-Wallis (Tabla 19), en la cual se observa que no hay diferencia significativa entre los Porcentajes de Adsorción de P con las diferentes dosis suministradas en función del tiempo de incubación, significando que la adsorción ocurrió desde el tiempo cero y que el tiempo de equilibrio de adsorción si fue alcanzado en el tiempo de estudio, obteniendo la misma tendencia que en el SCMO

Tabla 19. Estadísticos de contraste(a, b) Fósforo Adsorbido en SSMO variable de agrupación Tiempo

	% ads	P adicionado
Chi-cuadrado	,977	,000
gl	5	5
Sig. asintót.	,964	1,000

a Prueba de Kruskal-Wallis

b Variable de agrupación: tiempo

Ahora teniendo como variable de agrupación el P suministrado sin considerar el tiempo (Tabla 20), se aprecia que el % de P adsorbido es significativamente diferente dependiendo de la Cantidad de P suministrado.

Tabla 20. Estadísticos de contraste (a,b) de Fósforo Adsorbido en SSMO

	% ads
Chi-cuadrado	98,399
Gl	5
Sig. asintót.	,000

a Prueba de Kruskal-Wallis

b Variable de agrupación: P adicionado

Para saber cuáles son las dosis diferentes se aplica una prueba de Tukey (Tabla 21)

Tabla 21. Porcentaje de P adsorbido en función de las diferentes dosis de P suministrado

	P adicionado	N	Subconjunto para alfa = .05			
			1	2	3	
HSD de Tukey(a)		18	86,075			
	2,00	18				
	5,00	18		94,290		
	10,00	18		96,506		
	50,00	18			99,424	
	100,00	18	1,000		99,508	
	Sig.			,112	1,000	

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 18,000.

Se observa que los porcentajes de adsorción obtenidos cuando se suministran dosis 5 y 6 (correspondientes a 50 y 100 ppm de P) no difieren significativamente entre sí, pero son significativamente superiores a las demás dosis. Indicando que a 50 ppm aún no se han saturado todos los sitios de adsorción. Se deduce además de esta tabla que el menor porcentaje de adsorción se obtiene como era de esperarse con la dosis más baja correspondiente a 2 ppm.

Este comportamiento es diferente al observado en el SCMO en donde se encontró que los % de adsorción de todas las dosis suministradas son diferentes, notándose la influencia de la MO.

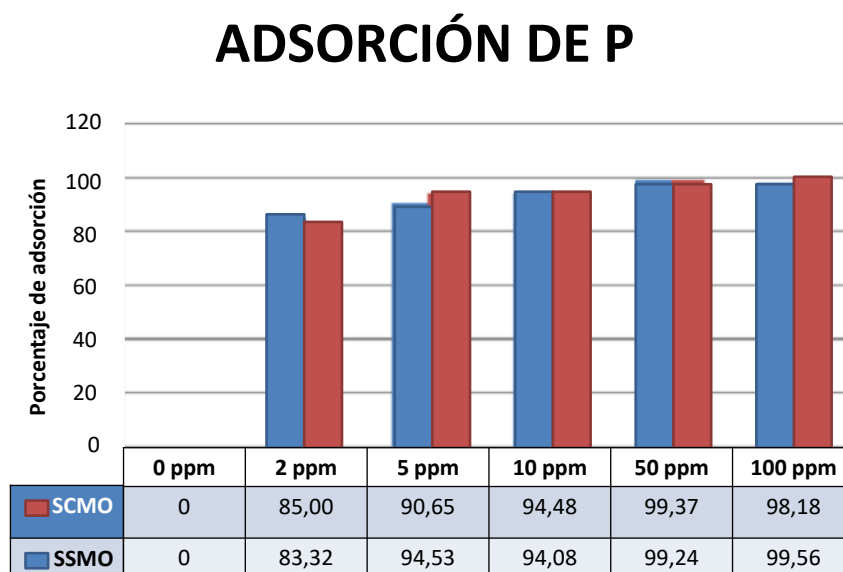
5.5. COMPARACIÓN DE ADSORCIÓN DE P DEL SUELO CON MO Y SIN MO

En la tabla 22 figura 28 se comparan los porcentajes de adsorción de P entre el SCMO y SSMO en el tiempo de equilibrio

Tabla 22. Porcentaje de Adsorción de Fósforo de SCMO y SSMO en tiempo de equilibrio

P suministrado ppm	SCMO		SSMO	
	P adsorbido $\mu\text{g P/g suelo}$	% Adsorción de P	P adsorbido $\mu\text{g P/g suelo}$	% Adsorción de P
0	0	0	0	0
2	21,00	85	16,93	83,36
5	53,39	90,65	47,84	94,53
10	110,2	94,48	96,05	94,08
50	576,38	99,37	497	94,24
100	1166,2	98,18	995,43	99,66

Figura 28. Comparación de Porcentaje de adsorción de Fósforo en SCMO y SSMO en tiempo de equilibrio



La figura 28 muestra que no hay diferencia apreciable entre los porcentajes de adsorción de P del suelo con y sin MO para las dosis suministradas a partir de 5 ppm. Por lo tanto se podría deducir que la adsorción de P en este suelo se atribuye mayoritariamente a su fracción mineral, mostrando que su MO no lo retiene, aspecto de gran importancia para el estado de fertilidad.

De este estudio también se deduce que la alta retención del P impediría su lixiviación hacia los cuerpos de agua evitando de esta manera problemas de contaminación por procesos de eutrofización. Sin embargo causaría serios problemas de deficiencia de P a los cultivos allí sembrados.

Para darle validez a los resultados se aplica inicialmente la prueba de normalidad con el propósito de saber si se ajustan a ella los datos (Tabla 23 y 24).

Tabla 23 Pruebas de normalidad: Comparación de Datos de Adsorción de Fósforo en Función del Tiempo para Suelo con MO y sin MO

	Tiempo	Shapiro-Wilk		gl	Sig.
		Estadístico	Estadístico		
Porcentaje P Adsorbido	1	,431	,531	30	,000
	2	,424	,556	30	,000
	3	,444	,538	30	,000
	4	,423	,552	30	,000

Tabla 24. Pruebas de normalidad: Comparación de Datos de Adsorción de Fósforo Suelo con MO y sin MO en Función de la Concentración suministrada.

	Tipo Suelo	Kolmogorov-Smirnov(a)		
		Estadístico	gl	Sig.
Porcentaje P Adsorbido	1,00	,427	60	,000
	2,00	,416	60	,000

a Corrección de la significación de Lilliefors

Como lo indican las tablas anteriores los datos no se ajustan a la normalidad. Por lo tanto se aplican pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis (Tabla 25 y 26), la cual indica que los porcentajes de adsorción de P provenientes de las diferentes dosis no son significativamente diferentes en función del tiempo para los dos tipos de suelo Con y sin MO afirmando nuevamente que se alcanzó el tiempo de equilibrio desde las cero horas

Tabla 25 Prueba de Kruskal Wallis Comparación de Suelo con y sin MO Estadísticos de contraste(a,b) Variable de agrupación: Tiempo

	Porcentaje P Adsorbido	Tipo Suelo
Chi-cuadrado	,610	,000
gl	3	3
Sig. asintót.	,894	1,000

a Prueba de Kruskal-Wallis
b Variable de agrupación: Tiempo

Tabla 26. Estadísticos de contraste(a,b) Suelo Con y Sin MO

	Porcentaje P Adsorbido
Chi-cuadrado	1,688
Gl	1
Sig. asintót.	,194

a Prueba de Kruskal-Wallis
b Variable de agrupación: Tipo Suelo

Cuando se considera el P suministrado (Tabla 27) si se aprecia diferencia significativa entre los valores de P adsorbido para las diferentes concentraciones suministradas indicando que a mayor P suministrado mayor será el % de adsorción. Pero que no hay diferencia entre los porcentajes de adsorción del suelo con y sin MO.

Tabla 27. Estadísticos de contraste(a,b) Suelo con y Sin MO, variable de agrupación: P suministro

	Porcentaje P Adsorbido
Chi-cuadrado	106,853
Gl	4
Sig. asintót.	,000

a Prueba de Kruskal-Wallis
b Variable de agrupación: P suministro

Nuevamente la tabla 28 muestra que en los dos casos: suelo con y sin MO, las concentraciones suministradas correspondientes a 50 y 100 ppm inducen los mayores porcentajes de adsorción y entre ambas dosis no existe diferencia significativa, es decir que con 50 ppm aún no se ha alcanzado el punto de saturación como se manifestó anteriormente.

Tabla 28. Prueba de Tukey Porcentaje P Adsorbido SCMO y SSMO

	P suministro(ppm)	N	Subconjunto para alfa = .05			
			1	2	3	4
HSD de Tukey(a)	5	24		93,415		
	10	24			96,232	
	50	24				99,315
	100	24				99,448
	Sig.		1,000	1,000	1,000	,997

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 24,000.

Todo este análisis corrobora que la retención de P se atribuye mayoritariamente a la fracción mineral del suelo como son las arcillas, óxidos de Fe y Al o alófanos

5.5. Evaluación de la Retención de P mediante isothermas de adsorción para el SCMO

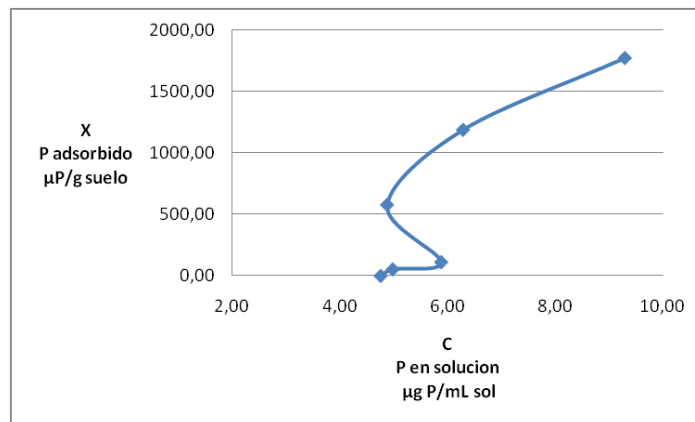
Inicialmente se someten los datos de adsorción a la ecuación de Langmuir

$$\left(\frac{C}{X} = \frac{1}{Kb} + \frac{C}{b} \right) . \text{ Los resultados se reportan en la tabla 29 y figura 29}$$

Tabla 29. Datos de Isotherma de Langmuir, del suelo con MO.

P adsorbido (X), µg P/g suelo	Concentración en solución (µg P /mL)
0,00	4,77
53,39	4,99
110,20	5,89
576,38	4,99
1166,20	6,30
1764,00	9,38

Figura 29 isoterma de Langmuir no linealizada, SCMO.



Se observa que los datos de adsorción de P en el suelo con MO no se ajustan al modelo tradicional lineal de la isoterma de Langmuir, puesto que presentan una forma que no se ajusta a ningún tipo de regresión, ni lineal ni de potencia ni polinómica ni exponencial. Por lo tanto se busca otro tipo de isoterma como lo muestra Limousine et al ^[48], quienes reportan la linealización de Scatchard mediante la ecuación:

$$\frac{Q}{C} = Q_{max}L - LQ$$

Donde **Q** es la cantidad de P retenido por el suelo (**Kg/Kg**)

Q_{max}: es la capacidad de adsorción de P por el suelo

Q_{max} L: es el coeficiente de distribución

L: es la afinidad del P por el suelo

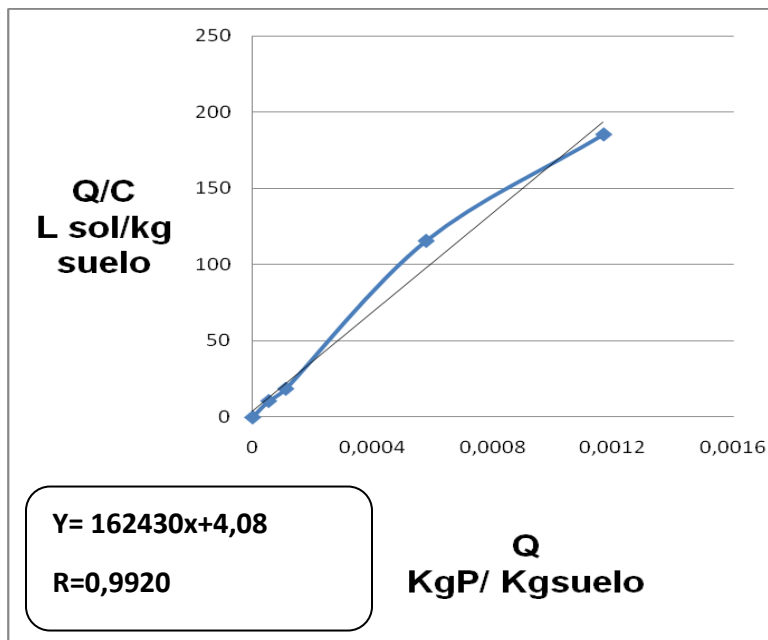
C: concentración de P remanente en la solución (**Kg/L**)

Los datos se reportan en la tabla 30, los resultados de la adsorción de este suelo se ajusta al modelo lineal como se observa en la figura 30.

Tabla 30 Datos de Isoterma de Scatchard del SCMO.

P ads (Q), Kg P/Kg suelo	X/C,(L) L sol/Kg suelo
0,00	0,00
$5,34 \times 10^{-5}$	10,70
$11,02 \times 10^{-5}$	18,71
$57,638 \times 10^{-5}$	117,87
$116,62 \times 10^{-5}$	185,11

Figura 30. Isoterma de langmuir linealizada (Scatchard), SCMO.



Se observa que los datos de adsorción de P en el suelo con MO se ajustan a la Isoterma de Scatchard, con una alta correlación lineal ($r = 0.9920$), con un valor de pendiente 162430, equivalente a la afinidad de P por el suelo ($L = 162430$), de acuerdo a la ecuación de Scatchard. La máxima capacidad de adsorción es $Q_{max} = 0.000025$ Kg P/Kg suelo

Razon por la cual se observan tan altos valores de retencion de P, todos superiores al 90 %, por lo tanto se puede decir que para mantener una cantidad suficiente y disponible de P en la solución del suelo, para que la planta la pueda aprovechar en sus procesos de nutrición, se deben aplicar altas cantidades de fertilizantes ricos en este elemento, afectando el rendimiento económico de los cultivadores. Esto es claro si se tiene en cuenta que se está frente a un tipo de suelo con características intrínsecas de fuerte retención de P, pues este andisol presentar alófanos, que lo fijan fuertemente.

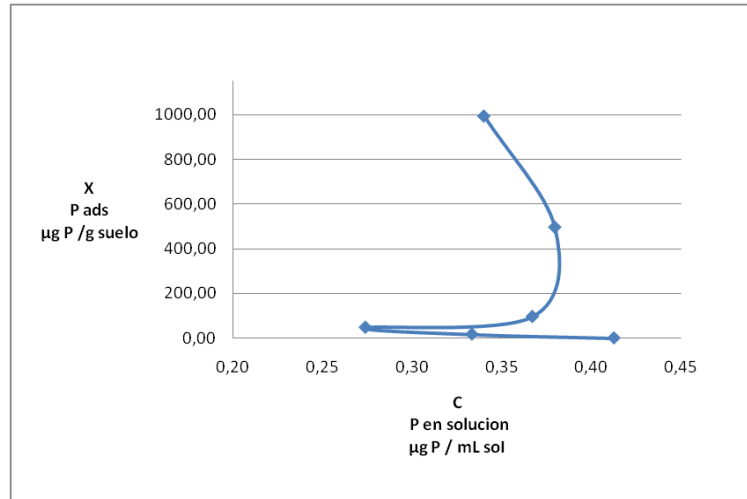
5.6. Evaluación de la Retención de P mediante Isotermas de adsorción para El suelo sin MO.

Inicialmente se ajustan los datos de adsorción de acuerdo a la ecuación de Langmuir ($\frac{C}{X} = \frac{1}{Kb} + \frac{C}{b}$). Los resultados se presentan en la tabla 31 y figura 31

Tabla 31. Valores para Isoterma de Langmuir en SSMO.

C Concentración en solución ($\mu\text{g P / mL}$)	X P adsorbido ($\mu\text{gP/g suelo}$)
0,41	0,00
0,33	16,93
0,27	47,84
0,37	96,05
0,38	496,99
0,34	995,43

Figura 31. Isoterma de Langmuir no linealizada en SSMO.



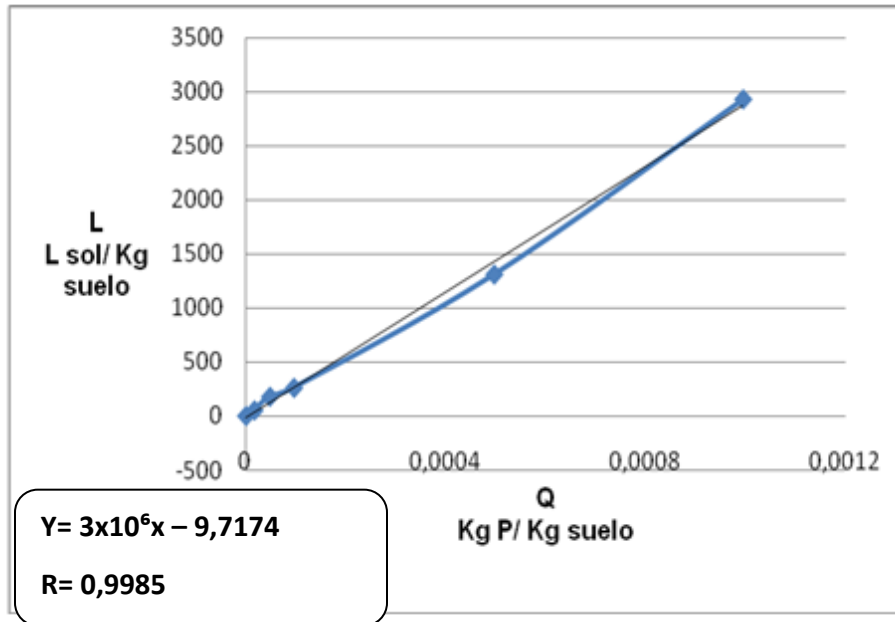
Los resultados muestran que al igual que en el SCMO, no se ajustan al modelo tradicional lineal de la isoterma de Langmuir, dicha tendencia no se ajusta a ningún tipo de regresión. Por lo tanto igual que en el SCMO, se busca otro tipo de isoterma cuya correspondencia sea lo más directa posible, es decir que se ajuste al modelo lineal, tal relación es dada por la linealización de Scatchard mediante la ecuación: $\frac{Q}{C} = Q_{max}L - LQ$

Los datos se reportan en la tabla 32 los resultados de la adsorción de este suelo se ajusta al modelo lineal como se observa en la figura 32.

Tabla 32. Valores para isoterma de Langmuir linealizada en SSMO.

P ads (Q) (Kg P/Kg suelo)	Q/C (L sol/kg sol)
0,00	0,00
$1,693 \times 10^{-5}$	51,30
$4,784 \times 10^{-5}$	177,19
$9,605 \times 10^{-5}$	259,59
$49,699 \times 10^{-5}$	1307,87
$99,543 \times 10^{-5}$	2927,73

Figura 32. Isoterma de Langmuir linealizada (Scatchard) SSMO.



Se observa que los datos de adsorción de P en el suelo sin MO también se ajustan a la Isoterma de Scatchard, con una alta correlación lineal ($r = 0.9985$), con un valor de pendiente superior al del suelo con MO, indicando mayor afinidad de adsorción de P, ($L = 3 \times 10^6$), de acuerdo a la ecuación de Scatchard. Confirmando el hecho de que la mayor capacidad de adsorción se puede atribuir a la fracción mineral del suelo, a los alófanos principalmente.

Aun cuando los resultados del % de adsorción de P en el suelo muestran que no hay diferencias en la retención del suelo con o sin MO, los resultados de las isotermas linealizadas permiten deducir que el porcentaje de adsorción es significativamente superior en el suelo sin MO, indicando que la MO protege al suelo de la retención de P. Si se comparan los dos suelos, los resultados de las Isotermas se muestran en la tabla 33

Tabla 33. Comparación de Datos de Isotermas para Suelo Con y Sin MO

Suelo	L	Q_{max}	Coefficiente de distribución ($Q_{max} L$)	P disponible (ppm)
Con MO	0.16×10^6	2.5×10^{-5}	4.0817	4.15
Sin MO	3×10^6	0.32×10^{-5}	9.7174	0.33

De esta tabla se deduce que el SSMO adsorbe con mayor afinidad el P que el suelo con MO, puesto que tiene mayor L, siendo 19 veces superior a la afinidad del SCMO, disminuyendo fuertemente la disponibilidad de este nutriente, como se deduce de este análisis, que el SCMO presenta un contenido de P 13 veces superior al del SSMO. Igualmente se observa un mayor coeficiente de distribución en el suelo sin MO indicando nuevamente que se encuentra mayor cantidad de P en los sitios de adsorción que en la solución del suelo y por lo tanto habrá en éste una mayor adsorción. El hecho de que Q_{max} sea mayor en el SCMO, se atribuye a que en ella también hay sitios de adsorción de P, pero con una baja afinidad y esto se refleja en el menor coeficiente de reparto, mostrando que existe fácilmente un proceso de desorción de este nutriente hacia la solución del suelo, confirmando nuevamente el factor de Protección de la MO sobre la retención de P. Como la MO se encuentra en el horizonte A donde está la mayor densidad de raíces que toman este nutriente, mientras que las arcillas y óxidos predominan en horizontes más profundos, de esta manera se evitaria la contaminación por lixiviación de P a cuerpos de agua.

6. CONCLUSIONES

1. En el suelo analizado se resalta su fuerte acidez, alto nivel de MO, nivel no tóxico de Al intercambiable, severa deficiencia de P, Mg, y de micronutrientes, alta CIC, presencia de alófanos, confirmada por espectroscopia IR, corroborando que el suelo pertenece al grupo de los Andisoles.
2. Se deduce de la espectroscopía IR que el tratamiento realizado con H₂O₂ no degrada el suelo en su estructura básica (fracción mineral), ya que existe solamente una diferencia en una banda que aparece en el SSMO a 1296 cm⁻¹ que indica mayor presencia de silicatos por despolimerización de sílice en el rompimiento de su unión con la MO
3. Se logró destruir un 77.2% de la MO con el peróxido de Hidrogeno, indicando que el 22.8% de ella corresponde a una MO fuertemente ligada a alófanos y/o arcillas. Este agente logra inducir una despolimerización de arcillas, aumentando el grupo de silicatos (SiO₄⁴⁻) libres.
4. Se demostró que no existe relación entre el tiempo de incubación y la adsorción de fósforo indicando que la adsorción ocurre instantáneamente.
5. La retención de P es alta tanto en el SCMO como en el SSMO con valores comprendidos entre 91% y 99% para el primero y valores entre 94 y 99.7% para el SSMO, sin existir diferencia significativa entre ellos, atribuyéndose de esta manera la retención principalmente a la fracción mineral
6. Los datos de adsorción de P en este suelo se ajustan al modelo de Scatchard con los parámetros de $L = 0.16 \times 10^6$ y 3×10^6 para el suelo con y sin MO respectivamente, siendo 19 veces superior a la afinidad del SCMO confirmando que la mayor adsorción de P se atribuye a la fracción mineral y que la MO protege al suelo de dicha adsorción.
7. El SSMO presenta un mayor coeficiente de distribución que el SCMO indicando nuevamente que en el primero se encuentra mayor cantidad de P en los sitios de adsorción con respecto a la solución y por lo tanto habrá en éste una mayor adsorción.

8. El SCMO presenta mayor valor de Q_{\max} pero con mucha menor afinidad que el SSMO, dando como resultado una mayor disponibilidad del P siendo 13 veces superior a la del SSMO.

BIBLIOGRAFIA

1. LONDOÑO, D., Acidez y Encalamiento de los Suelos. Promical Itagüí 2000
2. DUCHAUFOR, P., 2001. Introduction a la science du soil. Soil, vegetation, environnement, 6 edition. Dunod, parís, 331 pp.
3. DUCHAUFOR, P., 1977. Pédologie. 1: Pédogènese et classification. I. Masson. Paris
4. SOIL TAXONOMY a Basic System of Soil Classification for Makingand Interpreting Soil Surveys, Second Edition, 1999.
5. EMILIA, G. SUÁREZ, B. Las arcillas: propiedades y usos. Universidad Complutense (Madrid), Pág. 3, 4.
6. FLOREZ, M.T., 2004. Meteorización Experimental de los Fragmentos de Matriz y los Vidrios Volcánicos. Tesis Ph. D. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira 300p
7. FASSBENDER, HANS W. química de suelos con énfasis en suelos de América latina. 2ª ed. Rev., san José, costa rica, 3er capitulo, 1987
8. CAMPO, M. 2006. Evaluación de la presencia de alófanos en dos suelo del departamento del cauca. Tesis Pregrado. Universidad del Cauca, Popayán pp15
9. FAO. 2005. The importance of soil organic matter, Key to drought-resistant soil and sustained food production, by Alexandra Bot and José Benites, FAO soils bulletin No. 80. Rome

10. KOKONOVA, M. 1966. Soil organic matter. Pergamon Press, Oxford. p. 400-404.
11. OTINIANO-JULCA, A. MENESES-FLORIAN LILIANA. BLAS-SEVILLANO RAUL. BELLO-AMEZ SEGUNDO. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. Volumen 24, # 1, paginas 49-64, IDESIA (Chile), Enero-abril 2006
12. FAO. 2005. The importance of soil organic matter, Key to drought-resistant soil and sustained food production, by Alexandra Bot and José Benites, FAO soils bulletin No. 80. Rome.
13. ibid 11
14. FAO. 2005. The importance of soil organic matter, Key to drought-resistant soil and sustained food production, by Alexandra Bot and José Benites, FAO soils bulletin No. 80. Rome
15. CHEFETZ, B., TARCHITZKY, J., DESHMUKH A., HATCHER P, G. 2002. Structural characterization of soil organic matter and humic acids in particle-size fractions of an agricultural soil. Soil Sci. Soc. Am J. 66:129-141.
16. OTINIANO-JULCA, A. MENESES-FLORIAN LILIANA. BLAS-SEVILLANO RAUL. BELLO-AMEZ SEGUNDO. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. Volumen 24, # 1, paginas 49-64, IDESIA (Chile), Enero-abril 2006

17. MOSQUERA, C.S. BRAVO ISABEL. HANSEN EDDY W. comportamiento estructural de los ácidos húmicos obtenidos de un suelo Andisol del departamento del cauca.
Revista colombiana de química, volumen 36, numero 1, 2007
18. FUENTES.B, BOLAN.N, NAIDU.R, and MORA. M. 2006. Phosphorus in Organic waste-soil systems. Journal Soil Science Plant Nutrition. 6:64-83.
19. GIRALDO, E. 2002. Agroquímica: un estudio de los nutrientes esenciales en la producción agrícola. Universidad del cauca. Popayán.
20. GARAVITO, F., 1974. Propiedades químicas de los suelos. Instituto geográfico Agustín codazzi. Vol. 10 numero 11. Bogotá
21. LAVELLE, P. and SPAIN, A. 2001. Soil Ecology. Kluwer Academic Publisher. The Netherlands. 654p.
22. GIRALDO, E. 2002. Agroquímica: un estudio de los nutrientes esenciales en la producción agrícola. Universidad del cauca. Popayán.
23. ibíd.
24. ibíd.
25. FASSBENDER, HANS W. química de suelos con énfasis en suelos de América latina. 2ª ed. Rev., san José, costa rica, 3er capítulo, 1987
26. ibíd.
27. PORTA. C. 1994. JAIME. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. p. 225-233.

28. BORGGAARD, O.K. JORGENSON, S.S, MOBERG, J.P., AND RABENLANGE, B. 1990. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminum and iron oxides in sandy soils. Journal soil science. 41: 443-449.
29. MORENO T, SUAREZ D, Estudio de la influencia de la materia orgánica humificada de un Andisol en los departamentos del Cauca y Valle del Cauca con diferentes sistemas de producción en la retención de fósforo, tesis pregrado. Universidad del Cauca, Popayán 2001
30. GARAVITO, F., 1974. Propiedades químicas de los suelos. Instituto geográfico Agustín Codazzi. Vol. 10 número 11. Bogotá
31. RUSSELL, E.J., WILD A. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Editorial Mundi-Prensa, Barcelona España, 1992? 280-284
32. QUINTERO, C.E. BOSCHETTI.N.G. BENAVIDEZ. R.A., Estimación de la capacidad máxima de adsorción de fosfatos en suelos de entre ríos (Argentina)
33. US PEROXYDE. Technologies for a clean environment. Specializing in Hydrogen Peroxide for Environmental and Industrial Applications. Us peroxide.com
34. ibíd.
35. ARCILA, P., J.; FARFAN V., F.; MORENO B., A.M.; SALAZAR G.,L.F.; HINCAPIE G.,E. sistemas de producción de café en Colombia. Chinchina, Cenicafe, 2007.
36. CARDONA, C., SADEHIAN K., Evaluación de propiedades Físicas y Químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. Cenicafe, 56(4):348-364. 2005

- 37 ibíd.
- 38 BRAVO, I. Y GIRALDO, E. 2003. Manual de prácticas de química agrícola: Análisis de suelos. Departamento de química. Universidad del Cauca.
- 39 MOTTA, B, RODRIGUEZ, C. Métodos analíticos de laboratorio de suelos. Quinta edición. IGAC. Bogotá D.C, 1990, pág. 153 – 162.
- 40 FOX, R., KAMPRATH L. 1970. Citado por BURBANO, J., ZARAMA, P., 2000. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Science Society American* 34: 902-907
- 41 MARQUÍNEZ, L. y POTOSÍ, S., 2006. Fraccionamiento del Fósforo y su correlación con la Materia Orgánica y otras propiedades de dos suelos del departamento del Cauca. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia.
- 42 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 fe de Bogotá.
- 43 ibíd.
- 44 FASSBENDER, HANS W. química de suelos con énfasis en suelos de América latina. 2ª ed. Rev., san José, costa rica, 3er capitulo, 1987
- 45 PARFITT, R. L. y HENMI T., 1982. Comparison of an oxalate – extraction method and an infrared spectroscopic method for determining allophane in soil clays. *Soil Sci. Plant Nutr.* 28: 183 – 190.
- 46 INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Suelos de Colombia. Santafé de Bogotá, D.C. 1995. 632p
- 47 LIMOUSIN, G. GAUDET J,P, et al. Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. *ScienceDirect. Applied Geochemistry* 22 (2006) 249-17

ANEXOS

Anexo 1. Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos de clima medio (SCCS. 2000)

Tabla 1. Nivel de MO en suelo de clima medio

Nivel	Bajo	Medio	Alto
% MO	< 3	3 - 5	> 5

Tabla 2. Clasificación de acidez de suelos de acuerdo al valor de pH

pH	Clasificación
4.0 - 4.5	Acidez extrema
4.5 - 5.0	Acidez muy fuerte
5.0 - 5.5	Acidez fuerte
5.5 - 6.0	Acidez media
6.0 - 6.5	Acidez suave
6.5 - 7.0	Acidez muy suave
7.0 - 8.0	Alcalinidad suave
8.0 - 8.5	Alcalinidad moderada
8.5 - 9.0	Alcalinidad moderada
9.0 - 9.5	Alcalinidad fuerte
9.5 - 10.0	Alcalinidad muy fuerte

Tabla 3. Toxicidad de aluminio en el suelo (S.C.C.S. 2000)

Al Int. (meq/100g. suelo)	Evaluación	Efectos tóxicos
< 1.5 meq	Bajo	No tóxico
1.6 a 3.0 meq	Medio	Mod. Tóxico
> 3.0 meq	Alto	Tóxico, especialmente en leguminosas
>60 Reducción severa del crecimiento de plantas	30-60 Reduce moderadamente el crecimiento y desarrollo	<30 Generalmente no tóxica

Tabla 4. Clasificación del Suelo de acuerdo a niveles de Ca, Mg y K

Nutriente	(meq/100 g suelo)		
	Bajo	Medio	Alto
Ca	< 3.00	3.00 - 6.00	> 6.00
Mg	< 1.50	1.50 - 2.50	> 2.50
K	< 0.15	0.15 - 0.30	> 0.30

Tabla 5. Disponibilidad del fósforo para el método de Bray II

Nivel crítico	Disponibilidad
< 15 ppm	Bajo
15 – 30 ppm	Medio
> 30 ppm	Alto