

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE LA
ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA EN SUELOS
DEDICADOS AL CULTIVO DE CAFETO**

NELSON ADRIAN CAMPO CEBALLOS

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

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE LA
ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA EN SUELOS
DEDICADOS AL CULTIVO DE CAFETO**

NELSON ADRIAN CAMPO CEBALLOS

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial
Para optar al título de Químico**

**DIRECTOR
M.Sc. ISABEL BRAVO REALPE
Profesora Titular Departamento de química**

**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

Ph. D. FABIO A. CABEZAS FAJARDO

Jurado

M.Sc. IVAN PAZ

Fecha de sustentación: Popayán, 27 de Agosto de 2010

DEDICATORIA

A Dios quien me guió con su luz por el camino de la verdad y me ha dado la fortaleza necesaria para culminar esta etapa de mi vida, tras superar todos los obstáculos que se presentaron.

A mis padres que con su apoyo incondicional, enseñanzas y amor creyeron en mí y nunca dudaron de mis capacidades.

A toda mi familia que siempre me apoyó y me enseñó esa perseverancia, virtud muy importante en el cumplimiento de esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser mi guía y mostrarme la luz que me dio la fortaleza para avanzar en estos años de mi vida.

A mis padres por su cariño, comprensión, consejos, apoyo incondicional y por creer siempre en mí.

A mis hermanos, por su compañía, amistad y consejos que cada día me hicieron una mejor persona.

A mi familia que siempre me ha apoyado y brindado toda su comprensión.

A mi directora de trabajo de grado, M.Sc. Isabel Bravo Realpe por su paciencia, apoyo, dirección, entrega, por su amistad.

A mis compañeros del grupo de agroquímica, Camilo, Viviana, Anderson, Libardo, Harold, Diana; quienes de alguna manera me brindaron su colaboración en el grupo, muchas gracias.

A cada uno de mis profesores que ayudaron en mi formación tanto académica como personal.

A mis compañeros de carrera, Cristian, Edison, con quienes compartí muchos momentos gratos y demás personas que de alguna manera compartieron conmigo en estos años de estudio.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	19
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2. OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo General	21
2.2 Objetivos Específicos	21
3. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE	22
3.1 ANDISOLES	22
3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA	23
3.3 FERTILIDAD DEL SUELO	24
3.3.1 Factores que determinan la fertilidad del suelo	25
➤ Físicos	25
➤ Químicos	25
➤ Biológicos	25
3.3.2 Clases de fertilidad de un suelo	25
➤ Fertilidad Natural	25
➤ Fertilidad Adquirida	25
➤ Fertilidad Actual	26
➤ Fertilidad Potencial	26
3.4 FERTILIZANTES, UN GRAN APORTE PARA LOS SUELOS	26
3.4.1 Grados de los fertilizantes	29

➤ Fertilizantes Simples	29
3.4.2 Fertilizantes Multinutrientes	31
3.4.3 Aplicación de fertilizantes al suelo	32
3.5 FACTORES EDÁFICOS QUE INCIDEN EN LA PRODUCTIVIDAD DEL CAFETAL	32
3.5.1 Características físicas y químicas de los suelos cafeteros Colombianos	33
3.5.2 Condiciones Físicas	33
3.5.3 Textura y Estructura	33
3.5.4 Condición Hídrica	33
3.5.5 Temperatura	34
3.5.6 Condiciones químicas	34
3.5.7 Elementos minerales esenciales para el crecimiento del cafeto	34
3.6 EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	35
3.6.1 Tipos de Contaminación Ambiental	36
➤ Contaminación del aire	36
➤ Contaminación del agua	36
➤ Contaminación del suelo	37
3.6.2 Causas de la Contaminación Ambiental	37
3.6.3 Efectos de la Contaminación Ambiental	38
3.6.4 Efecto de la Contaminación por Agroquímicos	39
3.7 EL FÓSFORO EN EL SUELO	39
3.7.1 Fósforo inorgánico del suelo	40
➤ Fosfatos insolubles de la roca madre	40
➤ Fosfatos precipitados o en forma de compuestos inorgánicos poco Solubles	40
3.7.2 Naturaleza del Fósforo orgánico del suelo	42
➤ Fosfatos de inositol	42
➤ Ácidos nucleícos	43
➤ Fosfolípidos	43
➤ Fosfoproteínas	44
➤ Fosfatos metabólicos	44

3.7.3 Mineralización del P Orgánico en el Suelo	44
3.7.4 Pérdidas de P en el suelo	46
3.7.5 Como afecta el pH la disponibilidad de P en el suelo	47
3.8 MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO	49
3.8.1 Características físicas de la MO	49
3.8.2 Características químicas de la MO	50
3.8.3 Características biológicas de la MO	51
3.8.4 Las sustancias húmicas	52
➤ Ácidos fúlvicos	52
➤ Ácidos húmicos	52
➤ Huminas	53
3.9 INDICADORES MICROBIOLÓGICOS Y BIOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DE SUELO	53
3.9.1 Indicadores microbiológicos	53
➤ Bacterias	53
➤ Hongos	54
➤ Biomasa microbiana	55
➤ Respiración microbiana	55
3.10 ENZIMAS DEL SUELO Y SU IMPORTANCIA	56
3.11 LAS FOSFATASAS	57
3.12 PRINCIPIO DEL MÉTODO DE TABATABAI PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LAS FOSFATASAS	58
4 METODOLOGÍA	60
4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA	60
4.2 TOMA DE MUESTRAS	61
4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO	61
4.3.1 Análisis físicos	61
➤ Humedad	61
➤ Densidad Aparente	61

➤ Textura	62
4.3.2 Análisis Químicos	62
➤ pH	62
➤ Acidez intercambiable	62
➤ Materia orgánica	63
➤ Determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl	63
➤ Determinación de fósforo disponible	64
➤ Determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC)	65
➤ Determinación de bases intercambiables	65
➤ Determinación de microelementos	65
4.4 EVALUACIÓN DEL GRADO DE HUMIFICACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA	65
➤ Método granulométrico	65
➤ Método de extracción y valoración de sustancias húmicas	66
4.5 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE DOS TIPOS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS SOBRE LA ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA PRESENTE EN EL SUELO	69
4.6 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS FERTILIZANTES SOBRE DIFERENTES FRACCIONES DE P EN LA MUESTRA DE SUELO	70
➤ Fósforo Disponible	70
➤ Fósforo Orgánico	70
➤ Fósforo Total	71
4.7 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS FERTILIZANTES SOBRE EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA EN LA MUESTRA DE SUELO	72
5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
5.1 ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO	73
5.2 EVALUACIÓN DEL GRADO DE HUMIFICACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA	75

5.3 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE DOS TIPOS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS SOBRE LA ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA PRESENTE EN EL SUELO	78
5.4 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE ALGUNOS PARÁMETROS QUÍMICOS DEL SUELO	83
5.4.1 Efecto de la fertilización sobre el valor del pH en función del tiempo	84
5.4.2 Efecto de la fertilización sobre el valor del P Disponible en función del tiempo	87
5.4.3 Efecto de la fertilización sobre el valor del P Orgánico en función del tiempo	91
5.4.4 Efecto de la fertilización sobre el valor del P total en función del tiempo	94
5.4.5 Efecto de la fertilización sobre el valor de la MO en función del tiempo	97
6. CONCLUSIONES	100
BIBLIOGRAFÍA	102
ANEXOS	110

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Algunos fertilizantes con micronutrientes Importantes	27
Tabla 2. Composición fertilizantes importantes	30
Tabla 3. Fertilizantes multinutrientes – rango de contenidos de nutrientes	31
Tabla 4. Rango de contenidos minerales del suelo más adecuados para el desarrollo del cultivo del cafeto en Colombia	35
Tabla 5. Principales formas de fosfato inorgánico	41
Tabla 6. Análisis Físico y Químico del Suelo	73
Tabla 7. Porcentaje de fracciones de MOH y MOF obtenidas por separación granulométrica	76
Tabla 8. Porcentaje de Carbono de la Materia Orgánica Libre, Humificada, Ácidos Húmicos, Fracción fúlvica y huminas	76
Tabla 9. Grado de humificación de la MOH	77
Tabla 10. Dosis necesaria de fertilizante para alcanzar 30ppm de P disponible	78
Tabla 11. Efecto de la Fertilización sobre la Actividad de la Fosfatasa Acida	79
Tabla 12. Prueba de ANOVA para la AFA en función del tiempo	81
Tabla 13. Prueba de Duncan para AFA en función del tiempo	81
Tabla 14. Prueba de ANOVA para la AFA en función del tratamiento	82
Tabla 15. Prueba de Duncan para la AFA en función del tratamiento	82
Tabla 16. Correlaciones de Pearson para la AFA	83
Tabla 17. Efecto de la fertilización sobre el pH	84

Tabla 18. Prueba de Kruskal-Wallis para pH en función del tiempo	85
Tabla 19. Prueba de Tukey para pH en función del tiempo	86
Tabla 20. Prueba de ANOVA para pH en función del tratamiento	86
Tabla 21. Prueba de Duncan para pH en función del tratamiento	86
Tabla 22. Correlaciones de Rho de Spearman para el pH	87
Tabla 23. Efecto de la fertilización sobre el P Disponible	87
Tabla 24. Prueba de ANOVA para P disponible en función del tiempo	89
Tabla 25. Prueba de Duncan para P disponible en función del tiempo	89
Tabla 26. Prueba de ANOVA para P disponible en función del tratamiento	90
Tabla 27. Prueba de Duncan para P disponible en función del tratamiento	90
Tabla 28. Correlaciones de Pearson para P disponible	90
Tabla 29. Efecto de la fertilización sobre el P Orgánico	91
Tabla 30. Prueba de Kruskal-Wallis para P orgánico en función del tiempo	93
Tabla 31. Prueba de Tukey para P orgánico en función del tiempo	93
Tabla 32. Prueba de ANOVA para P orgánico en función del tratamiento	93
Tabla 33. Prueba de Duncan para P orgánico en función del Tratamiento	93
Tabla 34. Correlaciones de Pearson para P orgánico	94
Tabla 35. Efecto de la fertilización sobre el P total	94
Tabla 36. Prueba de Kruskal-Wallis para P total en función del tiempo	96
Tabla 37. Prueba de Tukey para P total en función del tiempo	96
Tabla 38. Prueba de ANOVA para P total en función del tratamiento	96

Tabla 39. Prueba de Duncan para P total en función del tratamiento	97
Tabla 40. Correlaciones de Pearson para P total	97
Tabla 41. Efecto de la fertilización sobre la Materia Orgánica	97
Tabla 42. Prueba de ANOVA para MO en función del tiempo y del tratamiento	98
Tabla 43. Correlaciones de Pearson para MO	99

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Andisoles	22
Figura 2. Suelos de la Zona Cafetera Colombiana	23
Figura 3. Diagrama del efecto invernadero	38
Figura 4. Ciclo del fósforo	40
Figura 5. Estructura del hexafosfato de inositol	42
Figura 6. Representación de los ácidos nucleicos	43
Figura 7. Estructura de los Fosfolípidos	43
Figura 8. Estructura de la Lecitina	44
Figura 9. Proceso de mineralización e inmovilización del fósforo	45
Figura 10. Etapas de disociación de ácido fosfórico según el pH	47
Figura 11. Relación entre la concentración relativa de iones fosfato y el pH	48
Figura 12. Representación esquemática de la fijación de fósforo en los complejos humus – Al	48
Figura 13. Reacción general catalizada por las fosfatasas	58
Figura 14. Reacción actividad de las fosfatasas método de Tabatabai	59
Figura 15. Ubicación Geográfica de la zona de muestreo	60
Figura 16. Diagrama de determinación de materia orgánica por el método colorimétrico	63
Figura 17. Diagrama de separación Granulométrica de la MO	66
Figura 18. Extracción de las Sustancias Húmicas	67

Figura 19. Floculación de Arcillas	68
Figura 20. Separación de los Ácidos Húmicos y Fracción Fúlvica	68
Figura 21. Diagrama para determinación de la fosfatasa ácida en suelo	69
Figura 22. Diagrama de diseño experimental para la evaluación del efecto de fertilizantes fosfatados sobre la actividad de la fosfatasa ácida	70
Figura 23. Diagrama de determinación de fósforo orgánico	71
Figura 24. Diagrama para la determinación de fósforo total	72
Figura 25. Grupos quelatados por la MO que producen acidez	74
Figura 26. Efecto de la Fertilización sobre la Actividad de la Fosfatasa Acida en función del Tiempo	79
Figura 27. Efecto de la fertilización sobre el pH en función del Tiempo	84
Figura 28. Efecto de la fertilización sobre el valor del P Disponible en función del tiempo	88
Figura 29. Efecto de la fertilización sobre el valor del P Orgánico en función del tiempo	91
Figura 30. Efecto de la fertilización sobre el valor del P total en función del tiempo	95
Figura 31. Efecto de la fertilización sobre el valor de la MO en función del tiempo	98

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO 1. Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos de clima medio (SCCS. 2000)	110
ANEXO 2. Tablas Tratamiento estadístico	111
ANEXO 3. Valores de actividad fosfomonoesterasa obtenidos a partir de datos bibliográficos	119

LISTA DE ACRÓNIMOS

AFA: Actividad de la Fosfatasa Ácida

FA: Fosfatasa Ácida

P: Fósforo

MO: Materia Orgánica

MOS: Materia Orgánica del Suelo

MOF: Materia Orgánica Libre

MOH: Materia Orgánica Humificada

AF: Ácidos Fúlvicos

AH: Ácidos Húmicos

FF: Fracción Fúlvica

SH: Sustancia húmica

Al: Aluminio

Ca: Calcio

Mg: Magnesio

K: Potasio

Na: Sodio

Ca/Mg: Relación Calcio / Magnesio

C/N: Relación de Carbono y Nitrógeno

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico

CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva

Fe: Hierro

Cu: Cobre

Mn: Manganese

Zn: Zinc

qCO₂: Coeficiente Metabólico

RESUMEN

Este estudio, fue realizado en el laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca, entre Noviembre de 2009 y Febrero de 2010, evaluando el efecto causado por la aplicación de dos fertilizantes, Triple 15 y KH_2PO_4 , sobre la actividad enzimática de la fosfatasa ácida en un Andisol dedicado al cultivo de cafeto, proveniente de una finca ubicada en la vereda “La Aurelia” del municipio de Cajibío, en el Departamento del Cauca.

Además de la caracterización física y química de este suelo, se evaluó el efecto de fertilizantes fosfatados sobre su calidad mediante un indicador bioquímico: la actividad de la fosfatasa acida (AFA), ya que el suelo estudiado es de carácter fuertemente ácido y presenta serias deficiencias de fósforo. También se evaluó el grado de humificación de la Materia orgánica.

La actividad de la fosfatasa ácida se determinó de acuerdo al método colorimétrico implementado en el laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca de acuerdo al método descrito por Tabatabai (1994), el cual emplea como sustrato p-nitrofenilfosfato 0.05M a pH 6.5. El grado de humificación se evaluó mediante índices de humificación HR, HR_1 , HI.

En este estudio se utilizó un diseño experimental factorial de bloques, donde el factor o variable independiente fue el fertilizante fosfatado, proveniente de dos fuentes: Triple 15 y KH_2PO_4 , con una dosis de cada uno, con tres períodos de incubación y cinco réplicas por tratamiento, incluyendo un testigo absoluto, para un total de 45 tratamientos, utilizando el método en paralelo. Las variables dependientes fueron la actividad de la fosfatasa ácida, el P disponible, P orgánico, P total y la MO.

La MO presentó un bajo grado de humificación, con un 50.622% de MOH y un 35.467% de MOF, donde los contenidos de sustancias húmicas fueron bajos. Por otra parte, La fertilización con Triple 15 y KH_2PO_4 afectó de manera progresiva y significativa la AFA, resultado denotado por la disminución de su valor desde su aplicación entre un 12% y 15 %, un mes después entre un 28% y 37% , llegando dos meses después a una disminución comprendida entre un 53% y 56% respectivamente. Este efecto observado está estrechamente y significativamente relacionado con la disminución del valor del pH, afectando así la calidad y condiciones ambientales del suelo. Además generó incremento en los niveles de P disponible, P orgánico y P total, sin observarse cambios significativos en el contenido de MO en el tiempo de estudio.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los compuestos de fósforo orgánico constituyen del 5 al 50% del fósforo total en el suelo y su asimilación por las plantas y microorganismos está precedida por su degradación enzimática. Las enzimas que comúnmente hidrolizan ésteres de fosfato son llamadas fosfatasa. Si estas enzimas no tienen las condiciones adecuadas para desarrollar su actividad, el P orgánico no puede mineralizarse y se presenta seria deficiencia de fósforo en los suelos.

La deficiencia de P en Andisoles Caucanos dedicados al cultivo de cafeto, ha sido ampliamente detectada y es causada generalmente por su fuerte acidez que genera procesos de adsorción, Para suplir tal deficiencia, los agricultores recurren a la aplicación de altas y repetidas dosis de fertilizantes sintéticos y naturales y al enclavamiento progresivo y continuo en el suelo con el fin de aumentar el rendimiento de las cosechas, en esos momentos los fertilizantes pierden su acción beneficiosa y pasan a ser contaminantes del suelo, volviéndose insostenible la producción, generando contaminación a las diferentes fases ambientales, alterando las condiciones normales de estos suelos y afectando su actividad microbiana [1,2].

La actividad de las fosfatasa puede ser influenciada por numerosos factores que afectan todas las propiedades del suelo, como es el caso del uso de fertilizantes minerales, que reducen la actividad de la fosfatasa ácida impidiendo de esta manera la mineralización de compuestos orgánicos y generando la acumulación de grandes capas de materia orgánica (MO) en el suelo con la consecuente producción de más acidez e impedimento del normal desarrollo de cultivos y microorganismos. Por todas estas razones puede considerarse como un indicador bioquímico de la calidad del suelo y puede servir como un índice de susceptibilidad a factores de estrés. No se conocen estudios que muestren tal efecto en Andisoles Caucanos.

Con base en las anteriores consideraciones se plantea la siguiente hipótesis de trabajo:

La actividad de la fosfatasa ácida en suelos cafeteros del Cauca se ve afectada por la aplicación de fertilizantes fosfatados afectando así otros parámetros, generando una fuerte acidez e impidiendo una normal mineralización del P orgánico. Por lo tanto la actividad de esta enzima de origen microbiano mayoritariamente, se puede considerar como un valor bioindicativo de la calidad del suelo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de dos tipos de fertilizantes fosfatados sobre la actividad de la fosfatasa ácida, disponibilidad de fósforo y materia orgánica presente en un Andisol dedicado al cultivo del café en la vereda La Aurelia, Municipio de Cajibío del Departamento del Cauca.

2.2 Objetivos Específicos

- a.** Caracterizar física y químicamente el suelo a estudiar proveniente de la Finca Santa Rosa, Vereda La Aurelia, Municipio de Cajibío, Departamento del Cauca.
- b.** Evaluar el grado de humificación de la materia orgánica presente en la muestra de suelo.
- c.** Evaluar el efecto de dos tipos de fertilizantes fosfatados sobre la actividad de la fosfatasa ácida presente en el suelo objeto de estudio.
- d.** Evaluar la influencia de los fertilizantes sobre diferentes fracciones de P en la muestra de suelo.

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1 ANDISOLES

Los Andisoles son suelos con propiedades que dependen principalmente de la presencia de cantidades significativas de los materiales; alofán, ferrihidrita, o complejos aluminio-humus en los suelos y se desarrollan a partir de una amplia gama de depósitos de cenizas volcánicas [3] (**Figura 1**).

Estos materiales denominados originalmente amorfos, se forman durante el intemperismo y desgaste de los materiales parentales, procesos dominantes en estos suelos, con un volumen significativo de vidrio, aunque el vidrio volcánico es un componente común en muchos Andisoles no es un requisito del orden Andisol. Las translocaciones y acumulaciones de los compuestos translocados generalmente son mínimos, sin embargo, puede producirse migración de la materia orgánica complejada con aluminio, bajo condiciones determinadas por la naturaleza de las sustancias humitas y del componente mineral [3].

Los suelos que presentan propiedades ándicas deben contener menos del 25% de carbono orgánico, además de un alto porcentaje de Al y Fe total, una densidad igual o menor a 0.9 g/cm^3 , un 85% o más de retención de fosfato. Estos suelos presentan estructuras bien definidas, alto porcentaje de retención de humedad, baja densidad aparente, pH ácido, baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, alta capacidad de intercambio catiónico dependiente del pH, bajo porcentaje de saturación de cationes intercambiables. Además presentan altos contenidos de materia orgánica en diferentes grados de humificación, en directa relación con la pluviometría y temperatura propia de cada zona [3].

Figura 1. Andisoles



Fuente: Espinosa, J. 2008.

Una de las características más importantes y a la vez la principal limitante de los Andisoles es su incapacidad para inmovilizar (fijar) fósforo en la superficie de los minerales amorfos, sin embargo, esta capacidad de fijación de fósforo varía con el tipo de arcilla presente, condición que a su vez, parece estar determinada por la altura a la cual se encuentran los depósitos de ceniza que formaron el suelo [4].

Estos suelos, fundamentalmente consisten en un horizonte A pardo oscuro a negro, de 30 cm aproximadamente de espesor, estructura grumosa y granular fina, con un contenido de materiales orgánicos hasta del 30 % en los miembros más oscuros del grupo.

En Colombia, los Andisoles están ampliamente distribuidos en la región andina del país, especialmente en la Cordillera Central, aunque en las Cordilleras Occidental y Oriental se presentan en menor proporción

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA

La zona cafetera colombiana se encuentra localizada en las laderas de las Cordilleras Oriental, Central y Occidental, extendiéndose desde el sur del país en los departamentos de Nariño y Cauca, hasta el norte en la Sierra Nevada de Santa Marta, desde 1° a 11° de latitud norte en un rango de 1.000 a 2.000 m.s.n.m. [5] (Figura 2).

Figura 2. Suelos de la Zona Cafetera Colombiana



Fuente: <http://www.cafedecolombia.com>

La mejor zona para el cultivo del café está localizada entre 1.200 y 1.800 metros de altura y temperatura entre 18.5°C y 22°C. Los suelos predominantes son de reciente formación (Entisoles, Inceptisoles, Andisoles) con pendientes y longitudes considerables, desde altamente susceptibles como muy resistentes a la erosión [5,6].

Los cultivos de café se encuentra en suelos muy variados (arenosos, pedregosos, arcillosos); en relieves desde plano o ligeramente ondulado (menos de 25% de pendiente) hasta abrupto (mayor de 75%) y pH de 4,0 a 7,0; con gran variabilidad en la distribución de estas características.

Para el cultivo del café se necesitan los siguientes requerimientos: un clima templado y húmedo, con frecuentes lluvias y temperaturas comprendidas entre los 15 y los 25 grados centígrados, suelos de cultivos profundos, permeables, bien regados y con un subsuelo que elimine el agua fácilmente, una altitud ideal para su cultivo es entre 600 y 1200 metros; Las mejores zonas son montañosas y terrenos de origen volcánicos [5,6].

3.3 FERTILIDAD DEL SUELO

El suelo es un sistema vivo, dinámico y no renovable, cuya condición y funcionamiento es clave para la producción de alimentos y para el mantenimiento de la calidad ambiental a escalas local, regional y global. No sólo es la base para la agricultura y para los diferentes ecosistemas, sino que además, de él depende toda la vida del planeta, razones por las cuales se hace importante realizar diversos análisis para determinar si las características que presenta, son aptas para desarrollar sus funciones [7].

La fertilidad de un suelo es la capacidad de éste para mantener una cubierta vegetal, cualidad resultante de la interacción entre las características físicas, químicas y biológicas del suelo para suministrar a las plantas agua y nutrientes esenciales para su crecimiento y desarrollo [8].

En relación al suministro de condiciones óptimas para el asentamiento de las plantas, estas características no actúan independientemente, sino en armónica interrelación, que en conjunto determinan la fertilidad del suelo. Por ejemplo, un suelo puede estar provisto de suficientes elementos minerales “fertilidad química” pero que no está provisto de buenas condiciones físicas y viceversa.

Igualmente, la fertilidad del suelo no es suficiente para el crecimiento de las plantas; el clima juega un papel importante y determinante en muchos casos. Por ejemplo se puede tener un suelo fértil y que dadas las temperaturas extremas no es capaz de producir buenas cosechas, entonces es un suelo fértil, no productivo.

3.3.1 Factores que determinan la fertilidad del suelo

Los factores que determinan la fertilidad se pueden clasificar en:

- **Físicos**, que condicionan el desarrollo del sistema radicular y su aporte hídrico. La fertilidad física se identifica por: textura, estructura, porosidad, aireación, capacidad de retención hídrica, estabilidad de agregados, etc. [9].
- **Químicos**, que hace referencia a la reserva de nutrientes y su aporte a las plantas. Se caracteriza por: capacidad de cambio de cationes, pH, materia orgánica, macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) y micronutrientes (B, Fe, Mo, Mn, Zn, Cu, Na y Cl), y sus formas químicas en el suelo que condicionan su biodisponibilidad [9].
- **Biológicos**, determinados por la actividad de los microorganismos del suelo. La microflora del suelo utiliza la materia orgánica como sustrato y fuente de energía, interviniendo en la producción de enzimas, ciclo del C y del N, transformaciones biológicas de nutrientes y procesos de humificación y mineralización [9].

La materia orgánica es un factor clave en la fertilidad del suelo, ya que actúa sobre las propiedades físicas (porosidad, capacidad de retención hídrica, estabilidad de agregados, etc.), sobre las químicas, aportando nutrientes mediante los procesos de mineralización, y a través de su capacidad de cambio de cationes, que actúa como una reserva nutricional, y sobre las biológicas, ya que mantiene la actividad microbiana del suelo [9].

3.3.2 Clases de fertilidad del suelo

Para comprender mejor la relación entre el suelo y las plantas, se utilizan algunos conceptos asociados a la fertilidad, es decir a los estados de la misma o a la capacidad para mantenerla.

Las clases de fertilidad que puede presentar un suelo son:

- **Fertilidad natural:** Por tal se entiende a la fertilidad propia de los suelos vírgenes en los que existe un equilibrio dinámico entre el suelo y la vegetación que soporta.
- **Fertilidad adquirida:** Es un término asociado a los suelos cultivados o a los que han sufrido algún tipo de intervención humana. El uso de abonos, enmiendas o labores, puede modificar el estado de la fertilidad natural del suelo.

- **Fertilidad actual:** Es la que posee el suelo en un momento determinado, ya sea natural o adquirida.
- **Fertilidad potencial:** Es la capacidad del suelo para mantener su fertilidad natural. En la evaluación de este tipo de fertilidad intervienen parámetros que no se utilizan de forma habitual en el establecimiento de la fertilidad natural.

Uno de los más influyentes es la naturaleza de las fracciones granulométricas gruesas. Las arenas están constituidas fundamentalmente por minerales primarios susceptibles de alterarse y generar minerales secundarios con pérdida de componentes, algunos de los cuales pueden constituir nutrientes para las plantas, con lo que se incrementa la fertilidad. Pero no necesariamente se ha de modificar la fertilidad química sino que puede cambiar el pH, por la liberación de bases, o la textura, por la formación de arcilla.

Cuando un suelo posee una alta cantidad de minerales alterables su fertilidad potencial está asegurada, mientras que la ausencia de ellos pone en riesgo el mantenimiento de la misma. En general, los suelos jóvenes tienen una baja fertilidad actual y una elevada fertilidad potencial, lo que asegura el mantenimiento de la vegetación e incluso su incremento, mientras que en los suelos viejos ocurre todo lo contrario.

3.4 FERTILIZANTES, UN GRAN APOORTE PARA LOS SUELOS

Cualquier material natural o industrializado, que contenga al menos cinco por ciento de uno o más de los tres nutrientes primarios (N, P₂O₅, K₂O), puede ser llamado fertilizante [10].

En la actualidad para conseguir buenas cosechas y económicamente más rentables, se utilizan los fertilizantes. Estos productos químicos que se encargan de administrarles los minerales que le hacen falta a los suelos por sus excesivos usos en el cultivo, y por lo tanto son cada vez más utilizados por los agricultores. Es así que los fertilizantes le aportan al suelo los nutrientes que le hacen falta y principalmente con su aplicación las producciones de las cosechas pueden llegar hasta triplicarse en algunos casos. Además de los fines económicos, estos son a consecuencia de la demanda mundial que existe de todo tipo de cultivos, y para aumentar el rendimiento de cada cosecha, se utilizan los fertilizantes [10].

A pesar de esto, su uso excesivo daña a los cultivos en los cuales se aplica y también produciendo intoxicaciones a las personas. Es así que el uso de fertilizantes debe tener ciertos controles en su aplicación y quienes los utilizan deben conocer perfectamente las consecuencias y daños que pueden ocasionar si se hacen aplicaciones mucho mayores de lo que en realidad se necesitan. Los

fertilizantes aportan al suelo N, K, y P, tres elementos importantísimos para el desarrollo de los cultivos. El nitrógeno le aporta a las plantas las proteínas necesarias para el crecimiento de las mismas. El potasio por su parte juega un papel importantísimo en la síntesis de proteínas en las plantas. Por último, el fósforo es esencial para la fotosíntesis y otros procesos químicos que ocurren en las plantas.

En el pasado los nutrientes secundarios, particularmente el azufre, no eran siempre listados en la bolsa o contenedor. Esto ha cambiado ahora. Además de los fertilizantes simples conteniendo magnesio, azufre y/o calcio mencionados anteriormente, el azufre es también contenido en el yeso (16-18% de S). El sulfato potásico – magnésico o sulfato potásico de magnesio provee fácilmente suministros disponibles de ambos (magnesio, 6% de Mg) y azufre (16–22% de S). [10].

Los micronutrientes requieren una atención y cuidado especial porque hay un margen estrecho entre el exceso y la deficiencia en las necesidades de microelementos de las plantas. Estos son necesarios sólo en pequeñas cantidades. Si se aplica demasiado de un microelemento dado (por ejemplo boro), puede tener un efecto dañino en el cultivo y / o en el cultivo subsiguiente. Los fertilizantes compuestos especiales pueden ser preparados conteniendo micronutrientes conjuntamente con los grados NPK para suelos y cultivos en los cuales las deficiencias existentes son conocidas (**Tabla 1**).

Tabla 1. Algunos fertilizantes con micronutrientes importantes

Portador de micronutrientes	Formula	Micronutrientes
Sulfato ferroso	FeSO ₄ .7H ₂ O	Hierro (Fe)
Sulfato de cobre	CuSO ₄ .5H ₂ O	Cobre (Cu)
Sulfato de cinc	ZnSO ₄ .7H ₂ O	Zinc (Zn)
Sulfato de manganeso	MnSO ₄ .7H ₂ O	Manganeso (Mn)
Bórax	Na ₂ B ₄ O ₇ . 10H ₂ O	Boro (B)
Molibdato de sodio	Na ₂ MoO ₇ . 10H ₂ O	Molibdeno (Mo)

Fuente: FAO e IFA. 2002.

En muchos casos, las deficiencias de los microelementos son causadas a través de un pH del suelo o sea demasiado bajo (ácido), o más aún, demasiado alto (de neutral a alcalino), de este modo un cambio en el pH del suelo puede pasar a los microelementos en una forma disponible para las plantas.

Cada vez que sean necesarios los fertilizantes micronutrientes, se debería consultar a un especialista de fertilizantes de la estación experimental local.

Una dosis de aplicación más exacta y normalmente también una eficiencia mayor es posible a través del uso de pulverización o de tratamientos de semillas con micronutrientes (formulados como polvos o líquidos).

El complejo de componentes orgánicos de hierro, zinc, manganeso y cobre – quelatos – aumentarán significativamente la eficiencia de los micronutrientes aplicados, particularmente del hierro, que es difícilmente absorbido en forma no quelatada.

Los fertilizantes más comunes a base de nitrógeno son: el amoníaco anhidro, el nitrato de amonio (ácido nítrico y amoníaco) y el sulfato de amonio (amoníaco y ácido sulfúrico). Los fertilizantes de fósforo son: el superfosfato triple (cuando se le aplica ácido fosfórico a la piedra de fósforo) y los fosfatos monoamónico y diamónico. Por último los fertilizantes de potasio son aquellos a base de depósitos subterráneos de potasa o salmuera y son el cloruro de potasio, el nitrato de potasio y el sulfato de potasio. Además de estos tipos de fertilizantes se pueden hacer combinaciones entre sí, mezclándolos en estado seco o mezclándolos en solución [10].

Los Fertilizantes fabricados industrialmente son llamados *fertilizantes minerales* y su presentación es muy variada. Dependiendo del proceso de fabricación, las partículas de los fertilizantes minerales pueden ser de muy diferentes tamaños y formas: gránulos, píldoras, «perlados», cristales, polvo de grano grueso / compactado o fino. La mayoría de los fertilizantes es provista en forma sólida. Los fertilizantes líquidos y de suspensión son importantes principalmente en América del Norte.

Además de su contenido nutritivo específico, la *calidad física* de un fertilizante es determinada por el rango del tamaño de sus partículas (productos tamizados), su densidad / dureza, su resistencia a la humedad y al daño físico, y su libertad de apelmazarse – los fertilizantes de alta calidad gozan de un tratamiento especial de la superficie / recubrimiento. Respecto al transporte, almacenamiento y aplicación en el campo, la densidad / peso específico de un fertilizante es también importante. Normalmente la urea tiene un volumen más grande por unidad de peso que la mayoría de los otros fertilizantes.

Debido a su simplicidad, flexibilidad y seguridad (contra la intemperie y grandes pérdidas así como adulteración) la bolsa de 50 Kg es el principal método de distribución para los pequeños agricultores.

La mayoría de los gobiernos han establecido regulaciones estrictas a través del Ministerio de Agricultura u otras autoridades, sobre el tipo de bolsas de fertilizantes (o contenedores) en los cuales los fertilizantes minerales son distribuidos a los agricultores y cómo ellos pueden ser etiquetados. La información en la etiqueta contiene el nutriente (primario y/o secundario y/o micronutrientes),

los contenidos del fertilizante (en la mayoría de los casos también las formas del nutriente) e indica el análisis o grado [10].

Los nutrientes primarios son expresados comúnmente en porcentajes N-P₂O₅-K₂O (algunas veces con el agregado de microelementos Mg-S). Ellos son dados siempre en esta secuencia. De este modo, en una fórmula 17-17-17, el primer número es el porcentaje de N, el segundo número el porcentaje de P₂O₅ y el tercero el porcentaje de K₂O.

El etiquetado también indica el peso de la bolsa, a menudo da recomendaciones para su correcto manipuleo y almacenamiento, y el nombre del productor o del comerciante del fertilizante. La mayoría de los fertilizantes también tienen un nombre de marca, el cual es impreso en la bolsa del fertilizante.

Por ejemplo, dos bolsas de fertilizantes de 50 Kg de *grado* 17-17-17 contienen 17 Kg de N, 17 kg de P₂O₅ y 17 Kg de K₂O. Contrariamente al término *grado*, la *fórmula del nutriente* se refiere a las proporciones relativas de los nutrientes respectivos: el grado 17-17-17 debería tener una razón 1:1:1 de N-P₂O₅-K₂O, mientras un grado 12-24-12 debería tener una razón 1:2:1.

Es importante conocer el análisis del fertilizante o el grado para calcular la cantidad correcta de fertilizante para la dosis necesaria de nutrientes a ser aplicada por hectárea. Por ejemplo, un agricultor necesita ocho bolsas de 50 Kg (400 kg) de grado 15-15-15 para aplicar una dosis de 60-60-60 por hectárea.

3.4.1 Grados de los Fertilizantes

Los fertilizantes que contienen sólo un nutriente primario son denominados fertilizantes simples. Aquellos conteniendo dos o tres nutrientes primarios son llamados fertilizantes multinutrientes, algunas veces también fertilizantes binarios (dos nutrientes) o ternarios (tres nutrientes) [10].

- **Fertilizantes Simples.** Algunos de los fertilizantes simples más utilizados (así como regionalmente importantes) son los siguientes: *Urea* con 46% de N, es la mayor fuente de nitrógeno en el mundo debido a su alta concentración y a su precio normalmente atractivo por unidad de N. Sin embargo, su aplicación requiere excepcionalmente buenas prácticas agrícolas para evitar, en particular, las pérdidas por evaporación de amoníaco en el aire. La urea debería ser aplicada sólo cuando sea posible incorporarla inmediatamente en el suelo después de esparcida o cuándo la lluvia se espera en pocas horas después de la aplicación [10].
- **Sulfato amónico**, con el 21% de N (en forma de amoníaco), no es tan concentrado como la urea. Sin embargo, contiene, además del N, el 23% azufre, un nutriente que es de creciente importancia. Se usa

preferentemente en cultivos irrigados y donde el azufre debe ser aplicado. Lo mismo es cierto para el *nitrosulfato amónico* con el 26% de N (alrededor de 2/3 como amoníaco y 1/3 como nitrato) y del 13 al 15% de azufre [10].

- **Nitrato amónico cálcico**, con por encima del 27% de N (partes iguales de N como amoníaco y como nitrato), es un fertilizante preferido para los cultivos en las regiones semiáridas de los subtrópicos [10].
- **Superfosfato simple**, con el 16 al 20% de P₂O₅ contiene adicionalmente 12% de azufre y más del 20% de calcio (CaO) [10].
- **Superfosfato triple** con una concentración del 46% de P₂O₅ no contiene ni azufre y menos calcio. Ambos tipos de fertilizantes fosfatados contienen el fosfato soluble en agua, en una forma disponible para las plantas. Una cantidad sustancial de fosfato es aplicada en forma de fertilizantes NP (nitrofosfato, fosfato monoamónico (MAP) y fosfato diamónico (DAP)) y de fertilizantes NPK.
- **Cloruro potásico**, con hasta 60% de K₂O, es el fertilizante potásico simple líder usado en la mayoría de los cultivos. En cultivos sensibles al cloro o en los cuales el azufre se necesita, se usa el *sulfato potásico* con el 50% de K₂O y 18% de azufre. Sin embargo, como con los fertilizantes fosfatados, una gran parte de K₂O es aplicada en la forma de fertilizantes NPK y PK. [10].

La **Tabla 2** presenta los análisis de los fertilizantes comúnmente conocidos.

Tabla 2. Composición fertilizantes importantes

Nombres comunes (formulas)	Grado o análisis en %				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	S
Fertilizantes nitrogenados					
Sulfato amónico (NH ₄) ₂ SO ₄	21	0	0	-	23
Nitrato amónico NH ₄ NO ₃	33-34,5	0	0	-	-
Nitrato amónico-cálcico NH ₄ NO ₃ +CaCO ₃	20,5-26	0	0	-	-
Urea CO(NH ₂) ₂	45-46	0	0	-	-
Nitrosulfato amónico NH ₄ NO ₃ - (NH ₄) ₂ SO ₄	26	0	0	-	15
Fertilizantes fosfatados					
Superfosfato simple Ca(H ₂ PO ₄) ₂ + CaSO ₄	0	16-20	0	-	12
Superfosfato triple o concentrado Ca(H ₂ PO ₄) ₂	0	46	0	-	-
Fosfato de roca molido (fosfato mineral)	0	20-40	0	-	-

Tabla 2. (Continuación)

Nombres comunes (formulas)	Grado o análisis en %				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	S
Fertilizantes potásicos					
Cloruro potásico KCl	0	0	60	-	-
Sulfato potásico K ₂ SO ₄	0	0	50	-	18
Sulfato potásico - magnésico K ₂ SO ₄ . 2MgSO ₄	0	0	26-30	5-7	16-22
Fertilizantes de magnesio					
Kieserita MgSO ₄ . 7H ₂ O	-	-	-	16	22
Kieserita calcinada MgSO ₄ . H ₂ O	-	-	-	20	17
Fertilizantes azufrados					
Yeso CaSO ₄ . 2H ₂ O					16-18

Fuente: FAO e IFA. 2002.

3.4.2 Fertilizantes Multinutrientes

Un gran número de fertilizantes multinutrientes es ofrecido en el mercado mundial (Tabla 3).

Tabla 3. Fertilizantes multinutrientes – rango de contenidos de nutrientes

Tipo de Fertilizantes		%N	%P ₂ O ₅	%K ₂ O
Fertilizantes NPK		5-26	5-35	5-26
Fertilizantes amónicos	DAP	16-18	42-48	-
	MAP	11	52	-
Nitrofosfatos	NP	20-26	6-34	-
Fertilizantes PK	PK	-	6-30	6-30

Fuente: FAO e IFA. 2002.

Las ventajas más notables de los fertilizantes multinutrientes para el agricultor son: Facilidad de manipulación, transporte y almacenamiento, Fácil aplicación, Alto contenido de nutrientes, Distribución uniforme de nutrientes en el campo, Fertilización equilibrada, es decir nitrógeno, fosfato y potasio disponibles juntos desde el inicio y de acuerdo con los requerimientos de las plantas y elevada eficiencia del fertilizante.

En general, hay tres tipos distintos de fertilizantes multinutrientes:

- **Fertilizantes complejos:** fabricados a través de procesos que incluyen una reacción química entre los componentes que contienen los nutrientes primarios

(cada gránulo contiene la fórmula declarada de nutrientes);

- **Fertilizantes compuestos:** fertilizantes simples granulados o intermedios, los gránulos contienen los nutrientes en diferentes proporciones;
- **Fertilizantes mixtos o mezclados:** mezclas simples mecánicas de los fertilizantes simples (la mezcla puede no ser homogénea si no se tiene cuidado) [10].

Añadidos a los nutrientes primarios (el nitrógeno, el fósforo y el potasio), diversos tipos de fertilizantes también contienen nutrientes secundarios tales como magnesio, azufre y calcio. Algunos también contienen micronutrientes tales como hierro, cobre, zinc, manganeso, boro y molibdeno. De este modo, al elegir el grado correcto, el agricultor tiene la posibilidad de aplicar todos los nutrientes necesarios en un fertilizante único.

3.4.3 Aplicación de Fertilizantes al Suelo

En los suelos poco fértiles las raíces de las plantaciones son cortas, lo que produce que la planta no tenga un buen crecimiento, es así que la utilización de fertilizantes, aporta a los suelos los nutrientes que ayudan al perfecto crecimiento de las raíces de las plantaciones.

No hay que olvidarse que mas allá de las grandes ayudas que aportan a los suelos y a los desarrollos casi perfectos de los cultivos, hay que considerar los aspectos negativos que a la larga pueden ocasionar los fertilizantes. Como ya hemos dicho, dañan con el tiempo las plantaciones si es que su aplicación es abundante, pueden llegar a contaminar los pozos de agua. Además, su uso no debe ser alto, los suelos reaccionan favorablemente al comienzo, pero su utilización excesiva puede ser negativa con el tiempo. Más allá de esto, en el caso de utilización de fertilizantes, hay que tomar en cuenta la necesidad de cada tipo de plantación y la necesidad que el suelo tiene.

Además de la utilización de fertilizantes se deben tomar otras medidas de control y cuidado en los cultivos, para que tengan éxito. Estos cuidados deben ser con respecto al riego que necesita cada tipo de cultivo, las condiciones climáticas del lugar en donde se realizan las plantaciones, la aparición de plagas y enfermedades que pueden producir grandes pérdidas si no son controladas a tiempo.

3.5 FACTORES EDÁFICOS QUE INCIDEN EN LA PRODUCTIVIDAD DEL CAFETAL

Los Factores Edáficos son aquellos que regulan el suelo y que influyen en la distribución y abundancia de flora y fauna. Son factores edáficos del suelo: la

textura del material (arena, grava, arcilla, limo), su estructura, porosidad, cantidad de materia orgánica, y nivel freático, entre otros.

A continuación se mencionan los factores edáficos más importantes para un buen desarrollo del cultivo del cafeto en suelos pertenecientes a la región andina Colombiana.

3.5.1 Características físicas y químicas de los suelos cafeteros colombianos

Los suelos de la zona cafetera colombiana son relativamente jóvenes, es decir, todavía están en proceso de desarrollo y según la naturaleza del material petrográfico del cual se derivan, han sido agrupados dentro de las clases: metamórficos, ígneos y sedimentarios, y sobre ellos existen diferentes grados y patrones de cubrimiento de cenizas volcánicas. Estos suelos son altamente variables en sus características debido a su distribución en la zona cafetera, por su ubicación sobre distintos tipos de relieve, desde plano o ligeramente ondulado hasta abrupto con valores de pendiente superiores al 75%. En estos suelos también varían las condiciones físicas (desde pedregosos y arenosos hasta francos y arcillosos) y químicas (contenidos bajos a altos de MO y minerales esenciales) [11].

3.5.2 Condiciones Físicas. La condición física del suelo tiene un papel importante en el vigor del cultivo y en última instancia, la producción dependerá en gran parte de la calidad de la relación suelo – aire – agua – temperatura. Estos factores físicos combinados con la cantidad y estado de la MO de suelo, afectan el desarrollo radical de la planta y por ende, la capacidad de absorción de nutrimentos, la colonización de la raíz por benéficos o perjudiciales, y los procesos fisiológicos de la planta [11].

Un suelo con buena condición física se caracteriza por que posee una humedad adecuada, es suelto, con macroporos bien interconectados que permiten un rápido acceso de las raíces, el aire y el agua. Así mismo, este suelo debe mantener la temperatura adecuada para que ocurra un crecimiento y funcionamiento óptimo de las raíces.

3.5.3 Textura y Estructura. Las mejores condiciones se presenta en suelos provenientes de cenizas volcánicas, los cuales poseen en general buena textura (francos) y estructura (granular), buena profundidad efectiva (40-60cm), buen drenaje interno, buena capacidad de retención de humedad y mayor resistencia a la erosión en comparación con otros suelos de la zona cafetera, debido al predominio de minerales amorfos como la alófana [11].

3.5.4 Condición Hídrica. En toda la zona cafetera pueden existir condiciones físicas de suelo y clima que conducen a niveles críticos de déficit o exceso de humedad. Los déficits hídricos son más frecuentes en aquellas regiones con

inadecuada distribución de lluvias y texturas del suelo muy arenosas, suelos pedregosos, cascajosos y poco profundos [11].

El contenido de agua del suelo, cuando ha cesado todo movimiento descendente de esta, se denomina capacidad de campo. Esta capacidad de campo está muy relacionada con la textura, el contenido de MO, el tipo de minerales presentes y la estructura del suelo.

3.5.5 Temperatura. La temperatura del suelo es un factor tan importante como el agua para el crecimiento normal de la planta. El rango de temperatura en el cual crecen las plantas cultivadas puede estar entre 10 y 40°C. La temperatura óptima para crecimiento cambia con la especie, variedad, la edad de la planta, el estado de desarrollo y el tiempo de exposición [11].

La temperatura afecta directamente funciones y procesos de la planta como: la fotosíntesis, la respiración, la permeabilidad de las membranas, la absorción de agua y nutrientes, la transpiración, la actividad enzimática y la coagulación de proteínas.

3.5.6 Condiciones químicas. Entre los componentes químicos del suelo de importancia para crecimiento del café se encuentran la MO, el pH y los macro y micronutrientes [11].

La MO, es considerada como un indicador de la productividad del suelo. Entre las funciones que desempeña se pueden señalar las siguientes: es fuente de nutrientes (nitrógeno, fósforo, azufre, boro y zinc, entre otros), incrementa la capacidad de intercambio de cationes, suministra energía para la actividad de los microorganismos, permite una adecuada agregación de las partículas del suelo mejorando así su estructura, capacidad de retención de agua y aireación. Debe anotarse que gran parte de estas funciones dependen de la descomposición de la MO [11].

El pH del suelo es una característica de importancia como indicador de la condición de acidez o alcalinidad del suelo. En Colombia, el café crece en suelos con valores de pH generalmente entre 5,0 y 6,0. La acidez del suelo afecta el desarrollo de la planta por su influencia en la disponibilidad de ciertos elementos esenciales o tóxicos para la planta. En muchos suelos se presenta un pH inferior a 5,0, el cual puede conducir a problemas de toxicidad de aluminio o de magnesio y deficiencias de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , S, B, Cu^{2+} y Zn^{2+} . En algunos suelos de origen sedimentario se presenta un pH muy alto (básico) de principalmente a los altos contenidos de Ca^{2+} , y en estos casos es frecuente observar deficiencias de micronutrientes como Mn^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} , B o Cu^{2+} .

3.5.7 Elementos minerales esenciales para el crecimiento del café. Se han reconocido 16 elementos como esenciales para el crecimiento de las plantas. Tres

de ellos Carbono, Hidrogeno y Oxigeno, son suministrados por el agua y el aire (CO₂). Los 13 restantes se consideran nutrientes vegetales y pueden agruparse en 6 macronutrientes (Nitrógeno, Fosforo, Potasio, Magnesio, Calcio y Azufre) que la planta requiere en grandes cantidades y 7 micronutrientes (boro, cloro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno y zinc) que la planta toma en pequeñas cantidades. Cuando alguno de estos elementos se encuentra en la planta en cantidades inferiores a los niveles mínimos requeridos para el crecimiento normal, la planta exhibe varios síntomas externos e internos, los cuales aparecen en cualquiera de sus órganos incluyendo hojas, tallos, raíces, flores, frutos y semillas [11].

En general, los suelos de la zona cafetera son considerados de fertilidad natural media a baja. Poseen contenidos medios a altos de materia orgánica, tendencia a la acidez, bajos contenidos de fósforo y responden bien a la fertilización nitrogenada, al potasio y al magnesio. Entre los micronutrientes las deficiencias más frecuentemente observadas son las de hierro y boro aunque su manifestación es temporal, asociadas a periodos lluviosos y secos respectivamente, también se observa deficiencia de zinc que ocurre esporádicamente (**Tabla 4**).

Tabla 4. Rango de contenidos minerales del suelo más adecuados para el desarrollo del cultivo del café en Colombia

Contenido en el Suelo	Límite Inferior	Límite Superior
MO (%)	11,4	12,6
P (mg.kg ⁻¹)	6,0	14,0
K (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,3	0,4
Ca (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	1,8	2,4
Mg (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,6	0,8
Al (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,0	60
Saturación de Al (%)	0,0	60
pH	5,0	5,5
B (mg.kg ⁻¹)	0,2	
Zn (mg.kg ⁻¹)	1,0	
Mn (mg.kg ⁻¹)	50	
Fe (mg.kg ⁻¹)	100	
Cu (mg.kg ⁻¹)	1,0	

Fuente: Valencia *et al.*, 1989; Valencia y Arcila, 1977.

3.6 EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

La contaminación es uno de los problemas ambientales más importantes que afectan a nuestro mundo y surge cuando se produce un desequilibrio, como resultado de la adición de cualquier sustancia al medio ambiente, en cantidad tal, que cause efectos adversos en el hombre, en los animales, vegetales o materiales expuestos a dosis que sobrepasen los niveles aceptables en la naturaleza.

La contaminación puede surgir a partir de ciertas manifestaciones de la naturaleza (fuentes naturales) o bien debido a los diferentes procesos productivos del hombre (fuentes antropogénicas) que conforman las actividades de la vida diaria [12].

Las fuentes que generan contaminación de origen antropogénico más importantes son: industriales (frigoríficos, mataderos y curtiembres, actividad minera y petrolera), comerciales (envolturas y empaques), agrícolas (agroquímicos), domiciliarias (envases, pañales, restos de jardinería) y fuentes móviles (gases de combustión de vehículos). Como fuente de emisión se entiende el origen físico o geográfico donde se produce una liberación contaminante al ambiente, ya sea al aire, al agua o al suelo. Tradicionalmente el medio ambiente se ha dividido, para su estudio y su interpretación, en esos tres componentes que son: aire, agua y suelo; sin embargo, esta división es meramente teórica, ya que la mayoría de los contaminantes interactúan con más de uno de los elementos del ambiente [12].

3.6.1 Tipos de Contaminación Ambiental

➤ **Contaminación del aire:**

Sucede cuando se libera a los aires contaminantes en grandes cantidades como gases tóxicos entre los que se encuentran: el **CO**, **CO₂**, **NO**, **SO₂**, entre otros, que pueden afectar la vida humana, de animales y plantas, interfiriendo así en las actividades que realiza el hombre [12].

El aire se puede contaminar con emisiones de Industrias, automóviles, quema de basura e incendios Esta contaminación del aire también provoca daños en el medio ambiente, habiendo afectado la flora arbórea, la fauna y los lagos.

La contaminación del aire también ha reducido el espesor de la capa de ozono. Además puede causar trastornos en el ser humano tales como ardor en los ojos y en la nariz, irritación y picazón de la garganta y problemas respiratorios.

➤ **Contaminación del agua:**

El agua es considerada como contaminada cuando sus características naturales están alteradas de tal modo que la hace total o parcialmente inadecuada para el uso al que es destinada [13].

La contaminación del agua se debe al crecimiento demográfico, desarrollo industrial y urbanización. La contaminación puede ser natural o artificial. La contaminación natural se da por hojas, tierras y algunos microorganismos, La contaminación artificial es producto de la actividad humana, basura, aceite, petróleo, aguas negras y metales pesados son entre otros los

principales contaminantes. Estas materias deterioran la calidad del agua y la hacen inútil para los usos pretendidos [13].

Las principales causas de contaminación del agua son: Desagües a ríos, lagos, mares, Descargas de desagües industriales y aguas servidas. Emisiones industriales en polvo, Basurales, Quema de basuras, Incendios forestales, Fumigaciones aéreas, Derrames de petróleo, Corrientes de aire y relación presión/temperatura, productos químicos domésticos y desechos radioactivos, productos pesticidas y otros utilizados en la agricultura.

Lo más grave es que una parte de los derivados del petróleo son arrojados al mar por los barcos o por las industrias ribereñas y son absorbidos por la fauna y flora marinas que los retransmiten a los consumidores de peces, crustáceos, moluscos, algas, etc. Afectando la cadena trófica.

➤ **Contaminación del suelo:**

El suelo es la fina capa superior de la corteza terrestre en contacto con la atmósfera y las aguas, que se ha formado lentamente como consecuencia de la acción combinada de cinco factores: clima, material originario, paisaje, factores bióticos (vegetación, fauna y acciones antrópicas) y finalmente el tiempo [14].

Se considera suelo contaminado, aquel cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes peligrosos de origen humano, en concentración tal que comparten un riesgo para la salud humana o el medio ambiente.

El suelo no es un recurso que una vez contaminado por residuos pueda autopurificarse automáticamente y si lo hace este estado permanece un largo tiempo, porque es muy lenta la autopurificación

La contaminación de suelos agrícolas es el resultado del uso de fertilizantes, plaguicidas y herbicidas que se aplican con el fin de aumentarla producción de alimentos, eliminación de insectos, hongos y otros organismos que disminuían el rendimiento de la producción de alimentos, además de la incorporación al suelo de materias extrañas, como basura, desechos tóxicos, productos químicos, y desechos industriales. La contaminación del suelo produce un desequilibrio físico, químico y biológico que afecta negativamente las plantas, animales y seres humanos [14].

3.6.2 Causas de la Contaminación Ambiental

Las principales causas de contaminación son las producidas por las actividades del hombre, por ejemplo, las relacionadas con la generación de energía,

incluyendo la explotación de recursos no renovables, como el petróleo o los diversos minerales, la industria en general o la agricultura. Sin embargo, también pueden causar contaminación las actividades no productivas, como las que se realizan dentro del hogar o las asociadas con el transporte o los servicios [15].

La contaminación también puede ser consecuencia de procesos sociales como el crecimiento demográfico, los movimientos migratorios o la urbanización a causa de los cuales, por ejemplo, en un sitio determinado se pueden generar gran cantidad de desechos. Una causa adicional son los patrones culturales, en particular, los asociados con la economía de consumo. Actualmente un factor de gran importancia es el uso generalizado en el hogar, la industria o la agricultura, de sustancias sintéticas para diversos fines.

La contaminación ambiental es debida más que todo a desechos sólidos domésticos, desechos sólidos industriales, exceso de fertilizantes y productos químicos, la tala y quema indiscriminada, las basuras, el monóxido de carbono de los vehículos, los desagües de aguas negras o contaminadas al mar o ríos [15].

3.6.3 Efectos de la Contaminación Ambiental

Entre los efectos de la contaminación ambiental se encuentra el debilitamiento de la capa de ozono, que protege a los seres vivos de la radiación ultravioleta del Sol, debido a la destrucción del ozono estratosférico por Cl y Br procedentes de la contaminación por Clorofluorocarbonados (CFCs), Hidrofluorocarbonados (HFCs), además de gases como SO_2 , NO , NO_2 , CO_2 , CH_4 , N_2O , CO , etc. Generando uno de los efectos como lo es el calentamiento global, provocado por el aumento de la concentración de CO_2 atmosférico causado en gran cantidad por la combustión masiva de materiales fósiles [16] (**Figura 3**).

Figura 3. Diagrama del efecto invernadero



Fuente: <http://polucionhuelva.blogspot.com>

3.6.4 Efecto de la Contaminación por Agroquímicos

Desde los años cuarenta, el uso de plaguicidas ha aumentado de una manera continua, llegando a 5 millones de toneladas en 1995 a escala mundial. Se observa una tendencia actual a la reducción en el uso de los mismos en los países desarrollados; no obstante éstos se siguen aplicando en forma intensiva en los países tropicales. Se ha establecido que sólo un 0.1% de la cantidad de plaguicidas aplicado llega a la plaga, mientras que el restante circula por el medio ambiente, contaminando posiblemente el suelo, agua y la biota; por lo tanto, se hace necesario caracterizar el destino final y la toxicidad no prevista de estos plaguicidas para evaluar con certeza el riesgo asociado a su uso [17].

Estudios en el ámbito internacional revelan la gravedad del problema. Un trabajo realizado entre los años 1973 a 1994 en Waimea, Nueva Zelanda, arrojó que luego de un proceso de colmatación en un estuario de la región de Mapua, los niveles de contaminación encontrados, estaban ligados a liberaciones constantes de pesticidas organoclorados [18]. Otras investigaciones en el área constatan la gravedad del problema. Por ejemplo, un estudio realizado en la India reportó niveles de DDT de 2.26 ppm en suelo y 0.18 ppm en el agua, en una zona aledaña a un centro poblado donde se controlaba malaria [19].

Situación problemática bastante generalizada, es también la que se deriva de la aplicación abusiva de fertilizantes en el suelo con el fin de aumentar el rendimiento de las cosechas, y en esos momentos los fertilizantes pierden su acción beneficiosa y pasan a ser contaminantes del suelo.

Fertilizantes Nitrogenados, fosforados, entre otros, producen una serie de efectos secundarios como los son: el aporte de otros nutrientes como S, Mg, Ca, Na y B, causan variación de la reacción el suelo (acidificación o alcalinización), generan un incremento de la actividad biológica del suelo con importantes efectos indirectos sobre la dinámica global de los nutrientes, provocando daños por salinidad y contaminación de acuíferos, causados por una dosificación muy alta de estos materiales, que además causan daños por las impurezas y productos de descomposición [20].

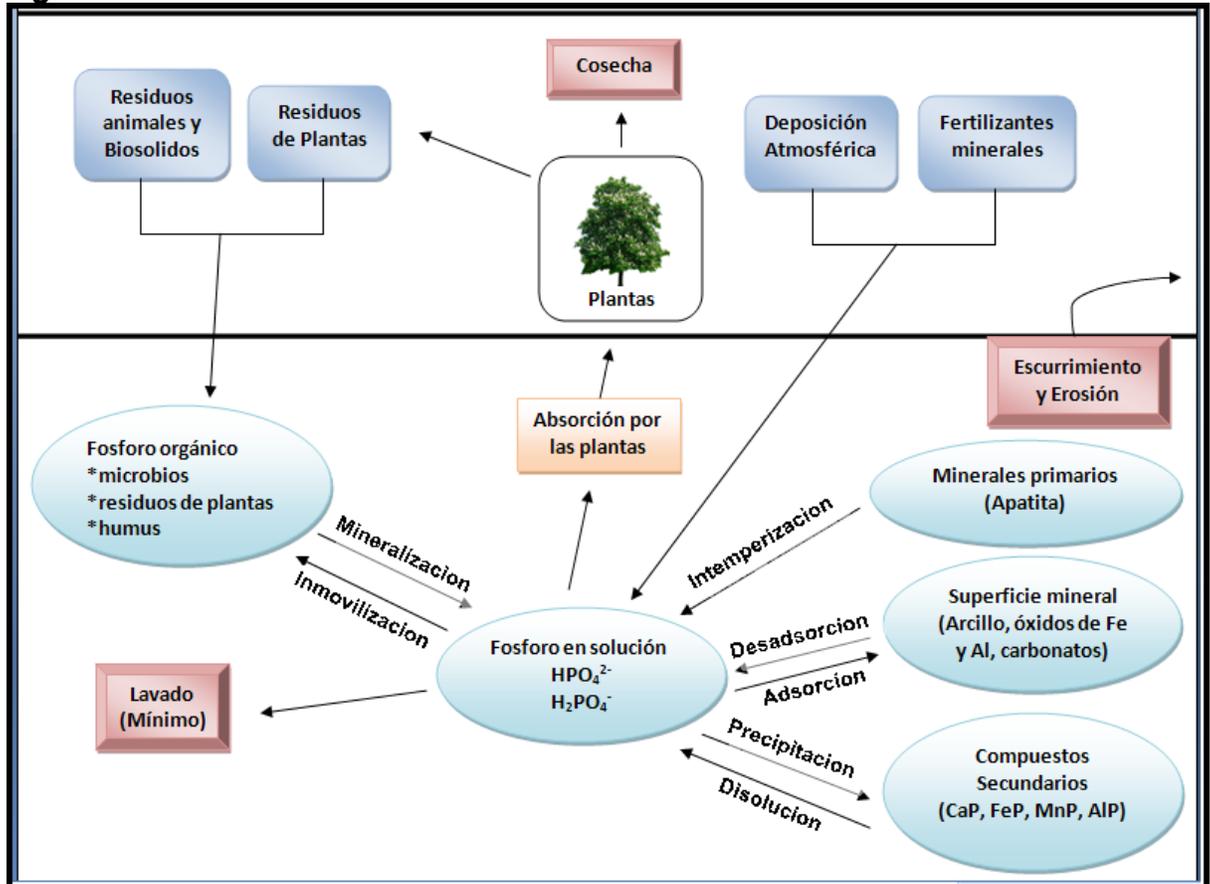
3.7 EL FÓSFORO EN EL SUELO

El fósforo en el suelo se puede encontrar en forma de: P orgánico, P inorgánico, P en la disolución del suelo (asimilable) y P orgánico (inmovilizado). Estas formas de P en el suelo se pueden observar en el ciclo del P [21] (**Figura 4**).

Todas estas formas están en equilibrio. De los distintos factores que puede modificar este equilibrio, el más importante es el pH. El fósforo es un elemento poco móvil en el suelo, por lo que aparece en más bajas concentraciones como

contaminante del agua, que el nitrógeno. Normalmente sólo es lavado cuando haya sido aplicado en exceso durante largo tiempo y la capacidad de fijación del suelo se encuentre saturada [21,22].

Figura 4. Ciclo del fósforo



Fuente: <http://msucares.com/crops/soils/phosphorus.html>

3.7.1 Fósforo inorgánico del suelo

Los iones hidrógeno del ácido fosfórico se reemplazan por cationes, formando sales [25]. Comprenden:

- **Fosfato insoluble de la roca madre (mineral primario)**, que representa una gran parte del fosfato total del suelo. En esta forma es completamente indisponible para la planta. Constituye una reserva a largo plazo, la cual solo puede volverse disponible mediante procesos de meteorización a través de lentas y prolongadas transformaciones físicas, químicas y biológicas [25].

- **Fosfato precipitado o en forma de compuestos inorgánicos poco solubles.** Cuyas principales formas se muestran en la **Tabla 5** [26].

Tabla 5. Principales formas de fosfato inorgánico

Fosfatos	Denominación	Composición	Características
Calcio	Hidroxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ $\text{Ca}(\text{OH})_2$	mayor abundancia
	Oxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ CaO	
	Fluorapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ CaF ₂	mayor abundancia
	Carbonatoapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ CaCO ₃	
	fosfato tricálcico	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	
	fosfato bicálcico	CaHPO ₄	mayor solubilidad
	fosfato monocálcico	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	mayor solubilidad
Hierro	Vivianita	Fe ₃ (PO ₄) ₂ 8H ₂ O	
	Estrengita	FePO ₄ 2H ₂ O	
Aluminio	Variscita	AlPO ₄ 2H ₂ O	

Fuente: Tsai, S.M. y Rossetto R. (1992).

En suelos ácidos predominan los fosfatos precipitados de hierro y aluminio, mientras que en suelos calizos, son los fosfatos de calcio en forma de apatita. En suelos de pH elevado, la actividad del calcio controla la solubilidad del fósforo. Las relaciones encontradas indican que el H₂PO₄⁻ de los fosfatos de calcio es insoluble en suelos alcalinos, pero soluble en medios ácidos [23].

Los fosfatos de calcio comprenden una variedad de compuestos que varían en su solubilidad, desde relativamente solubles como monofosfatos y difosfatos de calcio presentes en cantidades pequeñas hasta las apatitas (hidroxi y fluoroapatitas) prácticamente insolubles. Los fosfatos de hierro y aluminio varían también ampliamente en solubilidad, dependiendo de la cantidad de fósforo presente. En los suelos ácidos es posible también la formación de sesquióxidos y sobre estos la formación de la estrengita y la variscita [24].

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

Entre los fosfatos cristalinos encontramos los cálcicos, aluminicos y férricos; entre los primeros, son de importancia el fosfato monocálcico (Ca(H₂PO₄)₂), el fosfato dicálcico (CaHPO₄), y sus formas hidratadas (Ca(H₂PO₄)₂.H₂O y CaHPO₄.2H₂O), las apatitas hidroxidadas (Ca₅(PO₄)₃OH) y sus variedades fluorada y carbónica. Entre los segundos se destacan: el fósforo aluminico (variscita, AlPO₄.2H₂O) y los fosfatos férricos o ferrosos (livianita Fe₃(PO₄)₂.8H₂O, y estrengita Fe₄PO₄.2H₂O).

Existen también fosfatos cristalinos complejos, derivados de la transformación de fertilizantes como taranakitas, fosfatos octacálcicos, gorceixita, cranealita y otros [25].

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 [25].

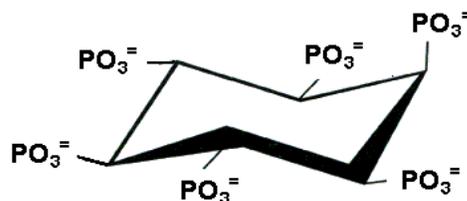
3.7.2 Naturaleza del Fósforo orgánico del suelo

El P orgánico está compuesto por varias fracciones que varían desde las más fácilmente utilizables por la planta hasta las más resistentes a la mineralización. Puede representar desde un 15 al 80 % del contenido total de P en el suelo, siendo normal encontrar valores entre el 30 y 50 % en muchos suelos. 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 [27]. Cuando se trata de suelos pobres en fósforo, la mineralización de la fracción orgánica, es importante en el reciclado ya que libera fósforo inorgánico a la solución, contribuyendo a mantener un nivel adecuado de fósforo disponible para las plantas. Algunos investigadores encontraron que la cantidad de P mineralizado en suelos de regiones templadas puede alcanzar valores entre 5 a 20 kg/ha/año, mientras que en los suelos tropicales puede variar desde 67 a 157 kg de P/ha/año. Esto remarca la importancia que puede tener la fracción orgánica del fósforo como fuente de fósforo disponible para las plantas y lo variable de su rol, en función de las diferentes condiciones de suelo, de clima y prácticas de cultivo.

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

Fosfatos de inositol. Son moléculas resultantes de la esterificación del inositol con grupos fosfato. Estos compuestos representan entre un 30 y 80% del fósforo orgánico del suelo; el más común es el hexafosfato de inositol (**Figura 5**).

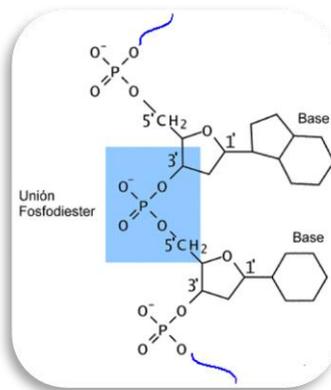
Figura 5. Estructura del hexafosfato de inositol



Los fosfatos de inositol son importantes componentes de granos de cereales en forma de fitatos de calcio y magnesio, denominados fitina. Los hexafosfatos de inositol encontrados en el suelo pueden ser también de origen microbial, puesto que varios microorganismos pueden sintetizar esta molécula. En las plantas pueden encontrarse además ésteres de inositol con uno a cinco fosfatos, aunque el hexafosfato es el más abundante [27].

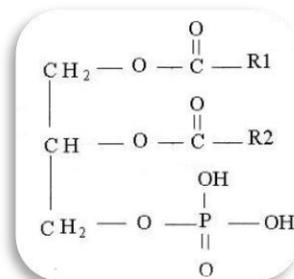
Ácidos nucleicos. En los suelos los microorganismos sintetizan sus propios ácidos nucleicos a partir de pentosas, bases púricas, pirimidínicas y grupos fosfatos. Por acción de las fosfatasas, se libera fosfato al suelo. La participación de los ácidos nucleicos en el aporte de fósforo orgánico al suelo, 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 [28] **(Figura 6).**

Figura 6. Representación de los ácidos nucleicos



Fosfolípidos. Son moléculas anfipáticas porque en su estructura poseen regiones no polares debidas a cadenas hidrocarbonadas de ácidos grasos y regiones polares de las que hace parte el grupo fosfato. La cantidad total de fosfolípidos en el suelo es en general menor de 5µg/g. Los fosfolípidos representan entre el 0.5 y el 7% del fósforo orgánico con un valor medio del 1% [28] **(Figura 7).**

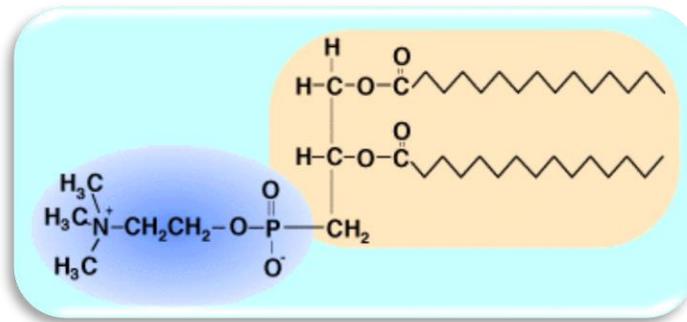
Figura 7. Estructura de los Fosfolípidos



Fosfoproteínas. Son heteroproteínas que al hidrolizarse producen, además de los aminoácidos, un grupo inorgánico "grupo prostético" como el fosfato [28].

Fosfatos metabólicos. Son compuestos que al combinarse con el H_3PO_4 producen el desdoblamiento de la glucosa proporcionando energía y la contracción muscular, la cual exige la combustión de los azúcares. El fósforo permite así a la glucosa transformarse en ácido láctico con desprendimiento de energía. Los compuestos fosfóricos favorecen la absorción de las grasas a nivel del intestino. Por otra parte aseguran el transporte de los ácidos grasos de que tiene necesidad el organismo, después de haberlos transformado en lecitinas [28], la cual es una Fosfatidilcolina (**Figura 8**).

Figura 8. Estructura de la Lecitina



En el humus se encuentran fosfatos en proporciones entre 0,8 y 2,5% expresados como P_2O_5 . 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 [27].

3.7.3 Mineralización del P Orgánico en el Suelo

No se tiene todavía una idea clara de la dinámica del P orgánico en el suelo. Recientemente se ha prestado una gran atención al papel de las micorrizas en la extracción de nutrientes, en especial de P. Se sabe que las micorrizas (simbiosis entre hongos del suelo y raíces de las plantas) aumentan la absorción del P por las plantas al parecer a través de procesos enzimáticos [21,22].

El nivel de fosfato soluble en el suelo depende de dos procesos opuestos: la mineralización y la inmovilización de este elemento (**Figura 9**).

Figura 9. Proceso de mineralización e inmovilización del fósforo



La mineralización y la inmovilización de fósforo orgánico como un proceso biológico está muy influenciado por diversas propiedades físicas y químicas del suelo e inducidas por el hombre. Los factores que afectan el grado de mineralización del fósforo orgánico comprenden: [29]

- **Temperatura:** el grado de mineralización en general aumenta con la temperatura, es bastante rápido a temperaturas por encima de 300°C [30].
- **Humedad:** algunos investigadores han sugerido que la mayor mineralización se produce bajo condiciones de humedad, mientras que otros indican que existe bajo condiciones más secas. Un importante aspecto es la alteración de las zonas secas, con condiciones de humedad [30].
- **pH:** algunos estudios muestran que el grado de mineralización se incrementa con la aumento en el pH del suelo y disminuye cuando el pH es superior a 7. Podría estar asociado con cambios en la solubilidad del fósforo orgánico. El P orgánico es más estable por debajo de pH de 5 y superiores a 7,5 y responsable de la mineralización entre 5 -7 [30].
- **La actividad microbiana:** se ha demostrado que las bacterias del suelo, actinomicetos, hongos y protozoos, pueden hidrolizar los compuestos orgánicos de P. Los procesos de mineralización se indican indirectamente por las correlaciones entre los grados de mineralización de P y C orgánico del suelo o la respiración [31].
- **Diferentes condiciones del suelo:** (condiciones aeróbicas y anaeróbicas), en la que microorganismos varían en su actividad para hidrolizar los fosfatos orgánicos [30].
- **El Fosfato inorgánico:** algunos estudios han demostrado que el aumento del grado de mineralización después de la adición de P inorgánico permite al P orgánico ser más fácilmente desfosforilados por acción enzimática, debido a que el P desplazado se enlaza al Fe, Al y Ca [29].

- **Las plantas:** son la fuente de materia orgánica en el suelo, pero su presencia debería aumentar el grado de mineralización de P_{org} (por ejemplo; por la actividad de la fosfatasa) [30].
- **Cultivo:** algunos estudios han sugerido que el cultivo estimula la mineralización del fósforo orgánico [30].
- **Actividad enzimática:** la mineralización de fósforo orgánico es afectada por la acción de las fosfatasas [29].

3.7.4 Pérdidas de P en el suelo

Las principales pérdidas de fósforo en el suelo se dan por: Extracción por cultivos, pérdidas por lixiviación, pérdidas por erosión y pérdidas por volatilización.

El fenómeno de eutrofización de las aguas es el enriquecimiento de las aguas superficiales con nutrientes para las plantas. Aunque tanto el N como el P contribuyen a la eutrofización, en la mayor parte de los casos, es el contenido de P el factor limitante.

En agricultura el fósforo puede pasar a las aguas superficiales y subterráneas por: Lixiviación, Escorrentía superficial, Erosión por el agua y el viento, y Aplicaciones directas de fósforo (abonado mineral u orgánico).

La contribución del primer factor (lixiviación) depende mucho de las condiciones geográficas, tales como clima (lluvia y evaporación), tipo de suelo, topografía, cultivo y prácticas agrícolas. Sin embargo, sólo bajo condiciones extremas de riego con agua residual sobre suelos arenosos, ligeros, algo de fósforo puede percolar hacia abajo. En condiciones más normales, la penetración del fósforo orgánico e inorgánico en los perfiles tiene lugar de forma lenta y se limita a los primeros 50 cm de suelo [32].

Las pérdidas de fósforo por lixiviación desde perfiles situados a un metro de profundidad, excepto en condiciones extremas, pueden considerarse como una pérdida *natural* desde el suelo, no influida por la fertilización fosforada. Esto contrasta con el caso del nitrógeno, donde las actividades agrícolas, en efecto, aumentan las pérdidas de nitrógeno a un perfil de 1 m de profundidad.

Cuando existe un exceso de agua en regiones planas, predominan los fenómenos de lixiviación, pero en un terreno inclinado suele ser más importante la *escorrentía*. Si también aumenta la intensidad de la lluvia de tormenta ($>22 \text{ mm.h}^{-1}$) y su frecuencia, la escorrentía es reemplazada por la *erosión hídrica*. El agua puede arrastrar suelo superficial, conteniendo grandes cantidades de fósforo y otros elementos fertilizantes.

Es importante reducir las pérdidas por escorrentía. La escorrentía aunque más importante en terrenos de pendiente, puede tener lugar en suelos planos en invierno, cuando la nieve funde sobre un suelo helado; entonces, los fertilizantes son arrastrados, junto con partículas de arcilla o materiales disueltos en la nieve fundida.

Se ha demostrado que la contribución relativa de la agricultura al contenido de fósforo en las aguas es muy pequeña (alrededor del 3 %). Ello no quiere decir que no se tenga en cuenta. A medida que, en el futuro, se reduzcan las otras fuentes de contaminación hay riesgo de que aumente su contribución relativa.

No obstante, existen zonas (por ejemplo, los Países Bajos) en donde ha empezado a preocupar la acumulación de fósforo en el suelo. Esta acumulación está relacionada con la aplicación de fósforo (en forma de residuos animales y fertilizantes) en dosis mayores a las extracciones. Puesto que la dosis de residuos ganaderos suele calcularse teniendo en cuenta su contenido en nitrógeno, con frecuencia el fósforo aplicado en forma de residuos ganaderos es más del doble de las extracciones. A largo plazo esto puede conducir a un elevado contenido de fósforo en los suelos.

3.7.5 Como afecta el pH la disponibilidad de P en el suelo

El fósforo es absorbido por la raíz de las plantas en forma de ión ortofosfato primario (H_2PO_4^-), o como ortofosfato secundario (HPO_4^{2-}). En el caso de estos aniones, el pH influye enormemente en la proporción con la que son absorbidos por la planta. Así, Cuando se tienen valores de pH básicos o alcalinos en el suelo, se puede reducir la disponibilidad del (H_2PO_4^-) porque puede haber precipitación de sales de fósforo al reaccionar con cationes como el Calcio (Ca^{2+}) o Magnesio (Mg^{2+}) y formarse fosfatos poco solubles con estos elementos. Por el contrario, cuando existen valores de pH ácidos en el suelo, se podrán formar otros compuestos fijando (HPO_4^{2-}) con cationes como el Hierro (Fe^{2+}), aluminio (Al^{3+}) y Manganeso (Mn^{2+}), los cuales aumentan su solubilidad a medida que disminuye el pH (pH más ácido) [27] (Figura 10 y 11).

Figura 10. Etapas de disociación de ácido fosfórico según el pH

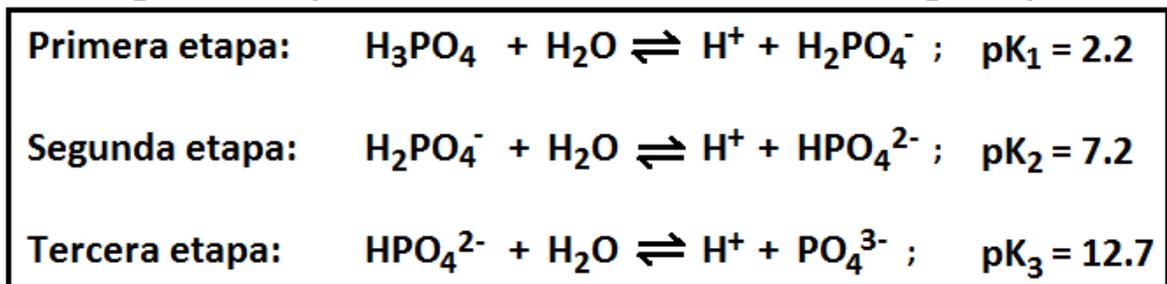
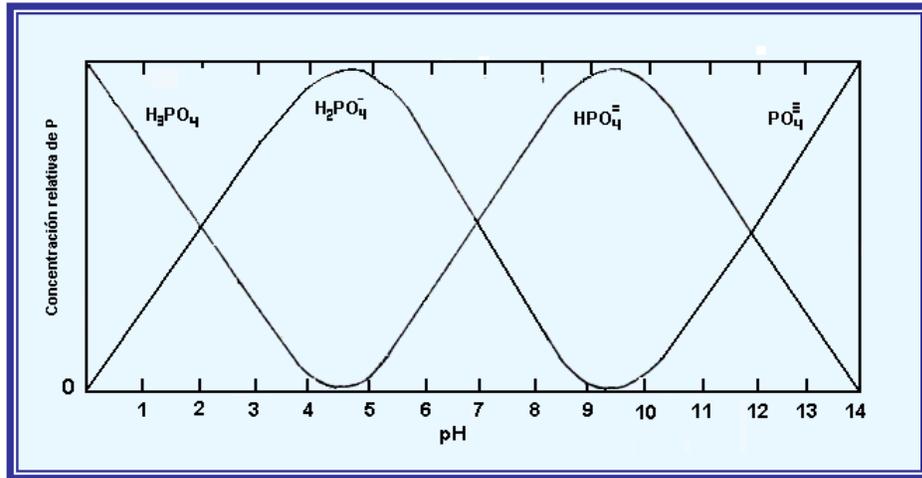


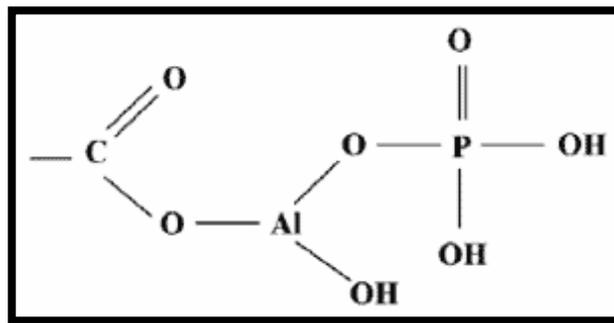
Figura 11. Relación entre la concentración relativa de iones fosfato y el pH



Fuente: Tsai S.M. y Rossetto R. 1992.

Debido a que por un lado las formas disponibles de P en la solución del suelo tienen cargas negativas (H_2PO_4^-) y (HPO_4^{2-}) y por otro lado hay cationes en el suelo que poseen cargas positivas (Ca^{2+}), forman compuestos que son insolubles y poco asimilables por las plantas. Un ejemplo es la fijación de P en complejos Humus – Al (Figura 12).

Figura 12. Representación esquemática de la fijación de fósforo en los complejos humus – Al



Fuente: Sollins. 1991.

La solubilidad de numerosos compuestos que contienen P en el suelo está determinada principalmente por el pH. Los fosfatos de hierro, manganeso y aluminio son poco solubles en agua (con pH neutro). Así, ellos predominan en suelos ácidos. Por el contrario, a un nivel de pH superior a 7.0, se producen compuestos insolubles de fósforo con calcio (Ca); magnesio (Mg) y sodio (Na). Entonces, las formas más solubles y disponibles de P, en general, se presentan dentro de rangos de pH entre 5.5 y 7.0 [27,32].

3.8 MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

La materia orgánica (MO) es uno de los componentes del suelo más complejos que existen en la naturaleza, complejidad que se refleja en su composición química. Por ello, se dice que la materia orgánica del suelo (MOS), contiene probablemente la mayor parte, sino todos, los compuestos orgánicos que ocurren naturalmente, porque se origina de los productos metabólicos y los tejidos de plantas, animales y microorganismos. La MO tiene un profundo efecto sobre la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de la planta. Además sirve como fuente de N, P y S a través de su mineralización [33].

Hay una gran diferencia entre la materia orgánica descomponible y la materia orgánica humificada. El humus es un producto de descomposición parcial de la materia orgánica fresca con posterior síntesis. Cuando se ha formado en un suelo con pH de 5.6 es una sustancia agregadora de grumos. Cuando se descompone, se rompen las uniones orgánicas entre las partículas del suelo y, por lo tanto, la estructura biológica decae al deshacerse los agregados mayores. El suelo se torna amorfo y hay gran pérdida de gran parte de la productividad [34,35].

Los diferentes grupos de MO en los suelos son influenciados por distintos factores. Las partículas de materia orgánica libre y la biomasa microbiana de los suelos son controladas por el aporte de residuos, manejo de residuos de cultivos o cobertura del suelo y el clima. La agregación del suelo, la textura y la mineralogía controlan la materia orgánica en macroagregados y por lo tanto, la labranza tiene un gran efecto sobre el tamaño de esos reservorios. Los otros reservorios son menos afectados por los factores agronómicos pero lo son sobre todo por factores pedológicos (microagregación, composición de la arcilla) [34,35].

La MOS es un indicador clave de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas (p. ej. producción y economía) como en sus funciones ambientales entre ellas captura de carbono y calidad del aire. Es la principal determinante de la actividad biológica de este compartimento ambiental. La cantidad, diversidad y actividad de la fauna del suelo y de los microorganismos están directamente relacionadas con la materia orgánica. La materia orgánica y la actividad biológica que ésta genera, tienen gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos [27,33].

3.8.1 Características físicas de la MO

La MO disminuye la densidad aparente del suelo (por tener una menor densidad que la materia mineral), contribuye a la estabilidad de los agregados, mejora la tasa de infiltración y la capacidad de retención de agua. Existen numerosos estudios sobre la mejora de estas características tras el aporte de materia orgánica, aunque no queda bien claro qué estadio de la materia orgánica favorece qué proceso [36].

La MO viva de origen vegetal se caracteriza por una estructura celular abierta. Las partículas de cortezas o corcho o las fibras vegetales tienen células en su interior que contribuyen a aumentar la porosidad del suelo (porcentaje de poros), es decir, aumenta el número de poros que son capaces de retener agua o aire sin aumentar el volumen total de suelo. Los espacios vacíos que se forman en la interface entre las partículas orgánicas y minerales pueden contribuir al aumento de la conductividad hidráulica del suelo. Debido al efecto físico del tamaño de las partículas, la materia orgánica aumenta la capacidad de retención de agua de suelos arenosos y aumenta la capacidad de aireación de suelos arcillosos. Tolera mejor los efectos mecánicos del paso de maquinaria por tener una mayor elasticidad que la materia mineral. Al cohesionar los suelos arenosos contribuyen a reducir las pérdidas de suelo por erosión superficial [36].

En todos los suelos en general favorece la estructura agregada que limita el arrastre de partículas de suelo, canalizando a la vez el paso del agua a través del mismo. Además, los residuos orgánicos fácilmente descomponibles dan lugar a la síntesis de compuestos orgánicos complejos que actúan ligando las partículas del suelo favoreciendo la formación de agregados, lo que repercute en una mejora de la aireación y de la retención de agua [36].

La MO tiene también efectos importantes sobre la temperatura del suelo. La materia orgánica tiene una conductividad térmica más baja que la materia mineral, mientras que las diferencias en la capacidad calorífica son bajas porque dependen del contenido de humedad. Al tener una conductividad térmica baja, la materia orgánica mantiene las temperaturas constantes en el tiempo, reduciéndose las oscilaciones térmicas. Al tener un color más oscuro que el suelo mineral disminuye la radiación reflejada, calentándose más [36].

3.8.2 Características químicas de la MO

La MO tiene un papel importante en la mejora de la disponibilidad de micronutrientes (principalmente hierro, manganeso, zinc y cobre) para las plantas así como en la reducción de los efectos tóxicos de los cationes libres. Muchos metales que precipitarían en suelos en condiciones normales, se encuentran mantenidos en la solución del suelo en forma quelatada. Es probable que estos micronutrientes sean transportados hacia las raíces de las plantas en forma de quelatos complejos solubles [36].

La MO mejora la nutrición en fósforo, es posible que a través de favorecer el desarrollo de microorganismos que actúan sobre los fosfatos. Es posible que la formación de complejos arcillo-húmicos o la quelatación contribuyan a solubilizar los fosfatos inorgánicos insolubles. Parece que las sustancias húmicas aumentan la liberación de potasio fijado a las arcillas [36].

La MO contiene un número elevado de grupos funcionales (carboxílicos, hidroxílicos, aminoácidos, amidas, cetonas y aldehídos). Entre ellos, son los grupos carboxílicos los que contribuyen en mayor grado a la adsorción de moléculas de agua en forma de puentes de hidrógeno o enlaces coordinados. Los grupos funcionales de la materia orgánica proporcionan capacidad de intercambio catiónico, contribuyendo por tanto a aumentarla en suelos con bajo contenido en arcilla. También proporcionan una mayor capacidad tampón, lo que afectará a la cantidad de enmienda a utilizar si se desea subir el pH (mayor cantidad de enmienda a mayor capacidad tampón) [36].

La MO suele acidificar el medio, favoreciendo así indirectamente la absorción de nutrientes por las plantas [36].

3.8.3 Características biológicas de la MO

La MO sirve de fuente de energía para los microorganismos del suelo. Favorece la presencia de lombrices que contribuyen a estructurar el suelo. Algunos materiales orgánicos presentan actividad supresora frente a hongos y se utilizan para combatir hongos patógenos. La supresión puede ser biótica o abiótica y puede deberse a diversos factores, entre ellos, factores físicos relacionados con la disponibilidad de oxígeno y el drenaje, un pH inadecuado al desarrollo de los microorganismos patógenos, presencia o ausencia de elementos como el nitrógeno, etc. [36].

La materia orgánica puede proporcionar actividad enzimática. Parece que existen enzimas activas adsorbidas al humus o a las partículas de arcilla no ligadas a las fracciones vivas. Una de las más abundantes es la ureasa. En general las enzimas contribuyen a hidrolizar moléculas de cadena larga, haciendo disponibles para las plantas algunos elementos resultantes de la hidrólisis [36].

Algunos productos derivados de la descomposición de la materia orgánica, como los derivados fenólicos, afectan al balance hormonal inhibiendo o favoreciendo la actividad de las hormonas vegetales. Algunos materiales como las cortezas, contienen sustancias que inhiben el crecimiento y que se eliminan generalmente mediante el compostaje. Existen también algunas hormonas ligadas a la materia orgánica, como las auxinas, o el etileno que se libera en condiciones reductoras (por ejemplo, por exceso de agua). La materia orgánica puede adsorber reguladores de crecimiento que se pueden añadir de forma externa. También tiene un papel importante en la absorción de pesticidas aplicados al suelo [36].

En la mineralización, los residuos sufren un proceso de degradación hasta los componentes elementales de las proteínas, carbohidratos y otros, los productos resultantes pueden ser objeto de nuevos procesos de resíntesis y polimerización, dando lugar a nuevos agregados químicos que reciben el nombre de sustancias

húmicas con características específicas; este proceso recibe el nombre de humificación [34,35].

Existe una estrecha relación entre el contenido de MO y la actividad enzimática, estando ambos parámetros influenciados por los cultivos y el sistema de laboreo del suelo. Dentro del sistema enzimático del suelo, las fosfatasa constituyen un grupo de enzimas que catalizan la hidrólisis de ésteres y anhídridos del ácido fosfórico y su importancia radica en la mineralización del fósforo orgánico para su asimilación por las plantas, hecho de especial trascendencia en suelos tropicales donde la deficiencia de P constituye uno de los factores restrictivos para la productividad de los cultivos [27].

3.8.4 Las Sustancias Húmicas

Las sustancias húmicas constituyen una parte principal y estable de la MO del suelo, son agregados moleculares heterogéneos, actualmente se consideran como asociaciones supramoleculares de compuestos con masas molares relativamente bajas, que se estabilizan por interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrogeno, llegando a formar micelas [37,38]. La estructura molecular de las sustancias húmicas, se visualiza como bloques de compuestos aromáticos unidos básicamente por enlaces de hidrógeno, que contienen gran cantidad de grupos funcionales tales como: Carboxílicos, fenólicos, alcohólicos, enólicos, cetónicos e hidroxiquinonas [39]. Las sustancias Húmicas son divididas operacionalmente en ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas, de acuerdo con su solubilidad en diferentes condiciones de pH.

- **Ácidos fúlvicos.** Los ácidos fúlvicos representan la fracción de humus, extraíble por álcali que es no precipitable por ácidos y que tiene color amarillento –rojo, se distinguen por su contenido superior en grupos funcionales ácidos carboxílicos e hidroxifenólicos y, por lo tanto, por su mayor capacidad para actuar destructivamente sobre los minerales. Son muy ricos en polisacáridos, en osaninas y en aniones minerales como fosfatos. Su elevado contenido en cargas aniónicas les confiere una gran aptitud para formar complejos estables con cationes polivalentes (Fe^{3+} , Al^{3+} , Cu^{2+} , etc.).
- **Ácidos húmicos.** Generalmente son polímeros de alto grado, constituidos por monómeros conformados por unidades estructurales. Estas unidades se componen de: 1) un núcleo, 2) una cadena puente, y 3) grupos orgánicos reactivos, que se presentan entrelazados formando coloides esferoidales; su carácter ácido, o sea su capacidad de intercambio catiónico, se basa principalmente en la presencia de radicales - COOH y - OH. Los ácidos húmicos se extraen con NaOH, KOH, NH_4OH , $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, NaHCO_3 , NaF, oxalato sódico, urea u otros, solos o en mezcla de ellos,

posterior acidificación con ácidos HCl o H₂SO₄, precipitando en forma de gel oscuro [40].

- **Huminas:** Corresponden al grupo de sustancias húmicas que no se extraen con soluciones alcalinas, considerados como ácidos húmicos que han perdido la capacidad de disolverse en álcali. Esto debido a la alteración de las propiedades químico coloidal, provocado por desecación e interacción de los ácidos húmicos con la fracción inorgánica del suelo. En el suelo se encuentran en diferentes estados: “humina microbiana”, formada por metabolitos microbianos y compuestos alifáticos derivados de ellos, “humina heredada”, próxima a la materia orgánica fresca, constituyente de las membranas, “humina noformada”, resultado de procesos de inmovilización por los cationes y no es extraíble por reactivos alcalinos, y finalmente “humina estabilizada”, resultante de la evolución lenta de los ácidos húmicos que provoca la polimerización de los núcleos aromáticos y un descenso de su solubilidad ante los reactivos de extracción [40,41].

3.9 INDICADORES MICROBIOLÓGICOS Y BIOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DE SUELO

La fertilidad y el funcionamiento de los suelos dependen en una gran proporción de las propiedades bioquímicas [42] y microbiológicas, ya que son muy importantes para definir las principales funciones edáficas: productiva, filtrante y degradativa [43]. Por lo tanto, la actividad biológica y bioquímica del suelo es de importancia capital en el mantenimiento de la fertilidad de los hábitats terrestres y consecuentemente del funcionamiento de los ecosistemas forestales y agrícolas [44].

Los índices más comunes que se indican para medir la actividad metabólica de la microbiota del suelo son, aparte de la mineralización neta del nitrógeno, la respiración microbiana, las actividades específicas, es decir, las enzimas del suelo, y la energía involucrada en los procesos [45,46].

3.9.1 Indicadores microbiológicos

Los principales indicadores microbiológicos presentes en el suelo son [47] :

- **Bacterias**

Expresa el número de unidades formadoras de colonias por gramo de suelo. Es un indicador que refleja la población potencial de las bacterias en un determinado suelo, especialmente aquellas que ocupan diferentes nichos o hábitats en forma saprofítica. La función básica de las bacterias es la descomposición y mineralización de los residuos orgánicos, de donde obtienen su fuente energética

y alimenticia. Mediante su metabolismo liberan al medio sustancias como enzimas, proteínas, reguladores de crecimiento, metabolitos y algunos nutrientes. Los beneficios de las bacterias para los cultivos se relacionan con un incremento en la cantidad de raíces y un aporte importante de elementos básicos para el desarrollo y producción.

El número de bacterias tiene una estrecha relación con algunas propiedades físicas del suelo, como la textura, estructura, porosidad, aireación y retención de humedad, ya que su actividad se beneficia con una mayor disponibilidad de oxígeno, principalmente en aquellos suelos con poca compactación y sin excesos de agua.

Dentro de las propiedades químicas que favorece la actividad de las bacterias se encuentra un pH cercano a la neutralidad, una baja acidez, altos contenidos de materia orgánica y alta disponibilidad de algunos elementos necesarios para su metabolismo, como N, Ca y Mg.

También es importante tomar en cuenta los factores que pueden afectar negativamente las poblaciones de bacterias, dentro de éstos está la presencia de otros organismos antagónicos y de sustancias contaminantes en el suelo, así como la aplicación de agroquímicos.

➤ **Hongos**

Es un indicador que refleja la población potencial de los hongos en un determinado suelo (unidades formadoras de colonias por gramo del sustrato), especialmente aquellos que ocupan diferentes nichos o hábitats en forma saprofítica.

La función básica de los hongos es la descomposición y mineralización de los residuos orgánicos frescos o recién incorporados al suelo, por esto se les conoce como descomponedores primarios que mediante su metabolismo libera gran cantidad de enzimas capaces de destruir compuestos de estructuras complejas, para así obtener su fuente energética y alimenticia. Además liberan al medio proteínas, reguladores de crecimiento, metabolitos y algunos nutrientes.

Los beneficios de los hongos para los cultivos se relacionan con un incremento en la cantidad de raíces, una protección al ataque de fitopatógenos y un aporte importante de elementos básicos para el desarrollo y producción.

Al igual que las bacterias y actinomicetos, la disponibilidad de oxígeno en el medio es importante, ya que el número de hongos del suelo tiene una estrecha relación con propiedades físicas relacionadas con la función filtrante del suelo: textura, estructura, porosidad, aireación y retención de humedad. En cuanto a parámetros químicos, se favorece la actividad de los hongos a un pH del suelo medianamente

ácido, una acidez intercambiable intermedia, altos contenidos de materia orgánica y alta disponibilidad de elementos esenciales. Organismos antagónicos y sustancias contaminantes son factores que también afectan la actividad de los hongos en el suelo.

➤ **Biomasa microbiana**

La biomasa microbiana es el componente más activo del suelo, forma parte del “pool” de la materia orgánica y cumple una función muy importante en el humus, ya que interviene en los procesos de mineralización de nutrientes [48]. Una vez muertos ponen a disposición de otros microorganismos y de las plantas los nutrientes contenidos en los restos microbianos [33] y, por otro lado, también participan en la inmovilización. Así, los ciclos de algunos nutrientes mayoritarios, como el carbono, demuestran que la biomasa microbiana es clave en la dinámica de los nutrientes esenciales en el sistema edáfico; por ello, algunos autores afirman que la biomasa microbiana y su actividad en el suelo puede ser empleada como índice de comparación entre sistemas naturales o como indicador de las variaciones sufridas en el equilibrio de un suelo debido a la presencia de agentes nocivos o su manejo productivo [49]. Es decir, que los parámetros microbiológicos, y por lo tanto bioquímicos, sirven para indicar posibles cambios netos en el equilibrio del suelo que no podrían detectarse con métodos tradicionales [45,46, 49,50,51].

Algunos autores [45,46,49] recomiendan indicadores sencillos de medir y de interpretar. Los más comunes que se utilizan son, entre otros, la biomasa microbiana, la respiración del suelo y las relaciones con la materia orgánica y el estado fisiológico del suelo, donde se ve involucrada la energía en los procesos orgánicos. En cuanto a la biomasa microbiana, este indicador expresa la cantidad de microflora presente en el suelo a través de la extracción del carbono microbiano. El mismo se ve afectado por la agroclimatología que sufren las muestras *in situ*, es decir la humedad, el calor, la biodiversidad de residuos orgánicos al ecosistema y por sustancias agresivas a la actividad microbiana.

➤ **Respiración microbiana**

La actividad microbiana del suelo puede ser estimada indirectamente en la determinación de la respiración basal. Esta consiste en determinar la producción de O₂ en el medio o bien la concentración de CO₂ desprendido (función de la actividad biológica y del contenido del suelo en carbono orgánico fácilmente mineralizable), mediante la técnica de incubación estática que captura el producto de mineralización en una solución alcalina durante un periodo de tiempo bajo condiciones ambientales óptimas [52,53].

Comúnmente se analiza la tasa de evolución de CO₂ proveniente de la mineralización del sustrato orgánico del suelo. El flujo de CO₂ teóricamente

representa una medición integrada de la respiración de raíces, respiración de la fauna del suelo y la mineralización del carbono desde las diferentes fracciones de la materia orgánica del suelo y del mantillo. Las mediciones también proveen una indicación sensitiva de la respuesta de la actividad microbiana a variaciones de temperatura y humedad, los efectos de humedecimiento – secado, la aplicación de agroquímicos o elementos metálicos, la exudación de sustancias supresoras y el manejo del medio, entre otros [53,54].

A pesar de sus limitaciones, la respiración continúa siendo el método más popular que se usa como indicador de la actividad microbiana y de la descomposición de sustratos específicos del suelo. Estos parámetros indican de manera fehaciente la mineralización que ocurre en el sustrato orgánico del suelo y son indicadores de la calidad de la materia orgánica y salud del suelo.

Tras el análisis de la biomasa microbiana y la respiración del suelo, se recomienda estudiar la “cinética de mineralización del carbono”, que se realiza a través de la velocidad a la que se reduce la proporción del carbono residual (materia orgánica del suelo) durante el periodo de incubación, siguiendo una cinética de primer orden. También se calcula el *índice de mineralización*, que es la proporción estimada de CO₂ en función al C-total del suelo (%), y el *cociente metabólico* [55] o índice de qCO₂ (µg · mg⁻¹ h⁻¹), que relaciona la actividad a través de la respiración microbiana (µg C-CO₂) y la cantidad de biomasa microbiana (mg C-biomasa) por unidad de tiempo (hora); éste fue descrito por primera vez por Anderson y Domsch [56] como un índice sencillo de la actividad biológica del suelo; está basado en la hipótesis de la optimización energética de los ecosistemas, derivada de la teoría ecológica de Odum (1985) sobre la sucesión de los ecosistemas y la eficiencia metabólica de la microflora edáfica. Así, en ecosistemas jóvenes (inmaduros) el valor de qCO₂ debe ser elevado y es bajo al referirse a ecosistemas maduros; es decir, la relación entre la respiración total y la biomasa total de un ecosistema debe disminuir progresivamente a medida que el ecosistema alcanza el estado de equilibrio o de estabilidad, salvo que las condiciones sean adversas para el buen funcionamiento del mismo.

3.10 ENZIMAS DEL SUELO Y SU IMPORTANCIA

El suelo es un recurso natural clave para la vida. Este hecho hace que haya sido muy estudiado desde multitud de puntos de vista, encuadrándose dichos estudios dentro de lo que se hoy conocemos como Ciencia del Suelo. En este contexto, el conocimiento sobre las enzimas del suelo es hoy en día una línea de investigación de futuro para conocer su funcionalidad y sostenibilidad [57].

La importancia fundamental de la actividad de las enzimas del suelo radica en que el funcionamiento de ese ecosistema no se puede entender correctamente sin la participación de los procesos enzimáticos, ya que las enzimas determinan la pauta

de gran parte de las transformaciones químicas que se producen en dicho suelo. En 1978 se realizó el primer estudio serio sobre las enzimas del suelo en el que se recoge su origen, rango, cinética e historia, e incluye temas aún hoy en día tan actuales como la interacción de las enzimas y diversos agroquímicos, su significado, y algunos aspectos metodológicos [58].

Las enzimas del suelo más estudiadas son las oxidoreductasas (deshidrogenasas, catalasas y peroxidasas) y las hidrolasas (sobre todo fosfatasas, proteasas y ureasa). Una parte de las enzimas del suelo son extracelulares, siendo liberadas durante el metabolismo y muerte celular. Otras son intracelulares, formando parte de la biomasa microbiana. Por último, existen las enzimas inmovilizadas que son las que pueden mantener un nivel constante y estable de actividad enzimática en el suelo, independiente de la proliferación microbiana y de las formas usuales de regulación de la síntesis y secreción de enzimas [57,58].

Las enzimas del suelo ofrecen información sobre su capacidad potencial para llevar a cabo reacciones específicas, las cuales son importantes dentro del ciclo de nutrientes importantes tales como el C, N, P y S, pudiendo aportar información clave sobre aspectos relacionados con la Calidad de los Suelos. Ciertas enzimas muestran una gran sensibilidad frente a procesos no deseables tales como la contaminación de suelos, su degradación e incluso su desertificación. De ahí que si bien la componente física y química del suelo es importante para el mismo, ésta puede considerarse relativamente estable.

La actividad enzimática es usada frecuentemente como un indicador de la actividad microbiana del suelo [59,60], se ha encontrado que la actividad enzimática está fuertemente correlacionada con la biomasa microbiana, medida a través del contenido de fosfolípidos de ácidos grasos en suelos bajo diferentes cultivos y prácticas de manejo [61]. La actividad de las enzimas del suelo es un indicador de cambios en sus propiedades inducidos por el manejo del suelo [62].

Sin embargo, considerando la flexibilidad del ecosistema suelo (lo definimos como un ente vivo y dinámico), podemos pensar que cualquier cambio puede ser detectado en su inicio por su componente biológica (ejemplo: la actividad enzimática). De ahí que las enzimas del suelo (su existencia o deficiencia) pueden ser consideradas como una «alerta» ante un posible colapso ambiental, permitiéndonos entonces reaccionar a tiempo antes de que pueda ocurrir un daño irreversible para el mencionado suelo [57, 58].

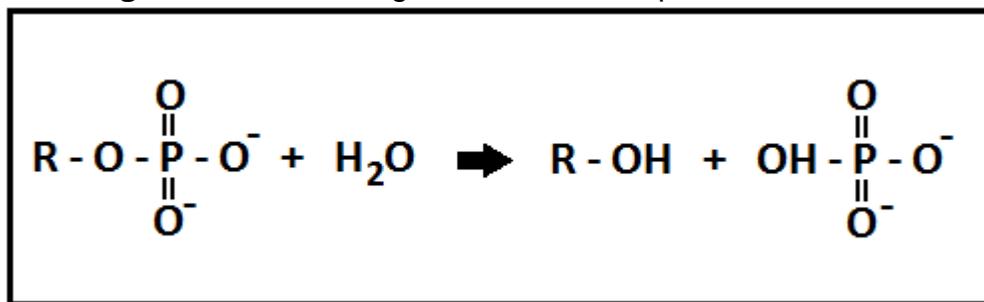
3.11 LAS FOSFATASAS

Las fosfatasas son enzimas producidas preferentemente en el suelo si la disponibilidad de fosfato es baja. Las fosfatasas del suelo pueden provenir de las raíces de plantas como también de microorganismos. En el suelo dominan las

fosfatasa de origen microbiano. Estas enzimas se clasifican en 5 grupos principales, siendo las hidrolasas monoester y diester fosfórica las más importantes en los suelos [62].

Las fosfatasa son enzimas que catalizan la hidrólisis de ésteres y anhídridos del Ácido fosfórico (**Figura 13**); dentro del grupo de las fosfatasa se encuentra la monoesterfosfato hidrolasa que catalizan la hidrólisis de glicerofosfatos y se diferencian por el pH óptimo de actuación en fosfatasa Ácida y/o alcalina [63]. En la mineralización bioquímica de la materia orgánica [63] por la fosfatasa Ácida (FA) influyen las propiedades del suelo, los sistemas de producción y factores ambientales como temperatura y grado de humedad [64].

Figura 13. Reacción general catalizada por las fosfatasa



Las fosfatasa son enzimas responsables de la hidrólisis de grupos fosfatos de mucha clase de moléculas, entre las que se encuentran nucleótidos, proteínas y alcaloides [65]. Las fosfatasa ácidas se encuentran principalmente en suelos ácidos, mientras que las alcalinas predominan en suelos con pH básico [66].

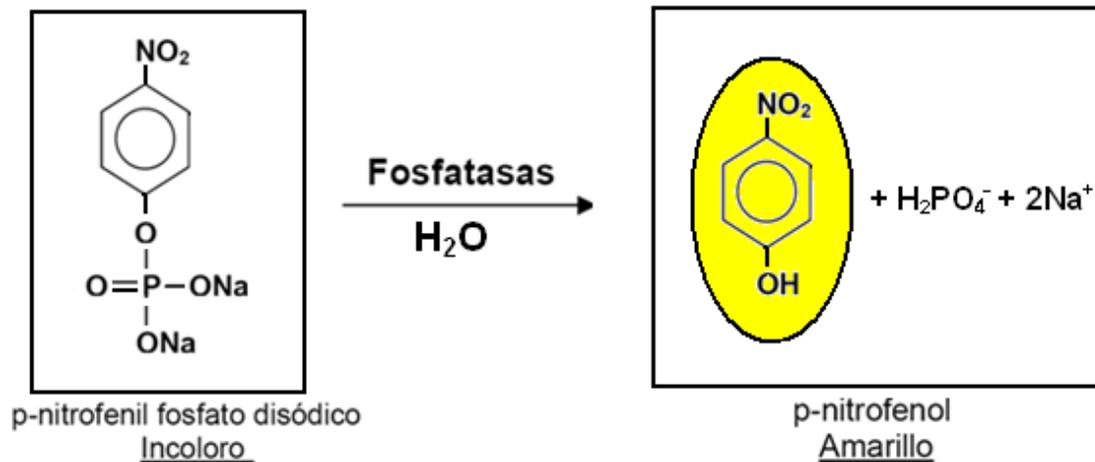
La actividad de estas enzimas se ve influenciada por factores como los son: La humedad, temperatura, aireación, pH, contenido de coloides orgánicos e inorgánicos del suelo y la presencia de sustancias importantes que suplen los organismos del suelo con nutrientes. Además de la vegetación, la calidad y cantidad de materia orgánica, y también por los activadores e inhibidores, utilizados comúnmente para corregir la acidez del suelo mediante el encalado [67, 68].

3.12 PRINCIPIO DEL MÉTODO DE TABATABAI PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LAS FOSFATASAS

El procedimiento descrito para la determinación de la actividad de fosfomonoesterasas está basado en la estimación colorimétrica de p-nitrofenol liberado cuando el suelo es incubado con una solución buffer (pH 6.5 para la actividad de la fosfatasa ácida y un pH de 11 para la actividad de la fosfatasa alcalina) de p-nitrofenil fosfato de sodio y tolueno. El procedimiento colorimétrico usado para la estimación de p-nitrofenol se basa en el hecho de que las

soluciones alcalinas de este p-nitrofenol tienen color amarillo y pueden ser medidas a 400nm (soluciones ácidas de p-nitrofenol y soluciones ácidas y alcalinas de p-nitrofenil fosfato son incoloras). Un previo tratamiento con CaCl_2 y NaOH realizan la extracción del producto formado y contribuyen a la dispersión de arcillas y la eliminación de la materia orgánica respectivamente [69] **(Figura 14)**.

Figura 14. Reacción actividad de las fosfatasas método de Tabatabai

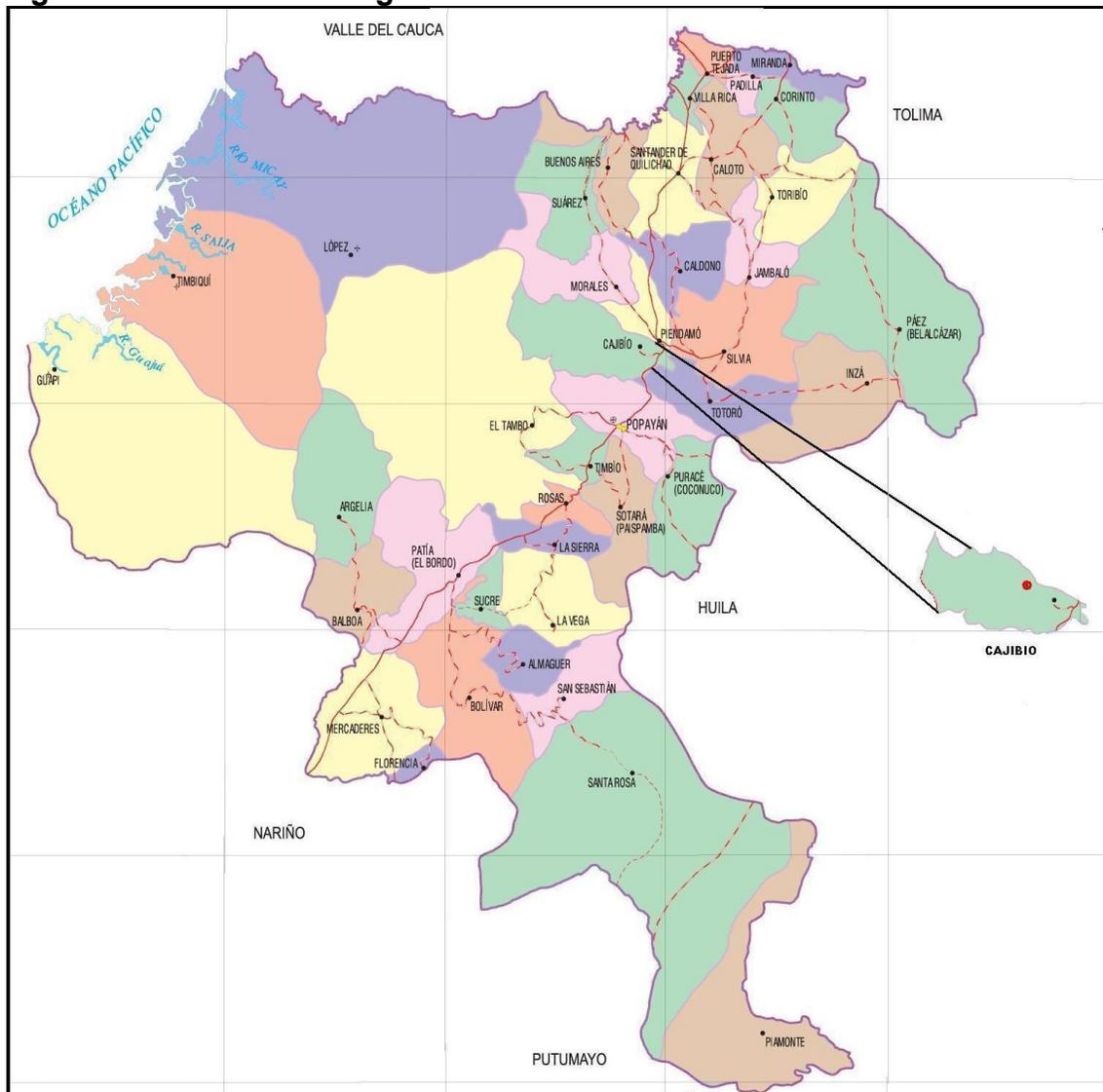


4. METODOLOGÍA

4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El suelo estudiado se encuentra ubicado en el Departamento del Cauca: Finca Santa Rosa, Vereda Aurelia, Municipio de Cajibío a 1740 msnm, con una precipitación pluvial de 1500 mm y una temperatura promedio de 19°C. Suelo dedicado al cultivo de café (Figura 15).

Figura 15. Ubicación Geográfica de la zona de muestreo



4.2 TOMA DE MUESTRAS

Para la toma de muestras de suelo estudiado, se dividió el área y se identificaron las respectivas unidades de muestreo de acuerdo a la altura, topografía o relieve, tipo de cultivo, vegetación, etc. Se selecciono una unidad de muestreo y se cruzó en zig. – zag, haciendo sondeos en la capa arable a dos profundidades de 0 - 10cm y de 10 - 20cm. Se tomaron entre 10 y 15 submuestras mezclándolas homogéneamente y formando con estas una muestra compuesta de 1Kg. El área muestreada comprende una Hectárea.

Las muestras compuestas se llevaron al laboratorio de agroquímica, se determinó inmediatamente la densidad aparente, la humedad de campo y posteriormente se secaron al aire por 24 horas, se molieron y se pasaron por tamiz de 2 mm [70]. Otra porción de 4.5kg de muestra fue tomada en las mismas condiciones para el estudio de la Actividad de la Fosfatasa ácida, en sendas bolsas de polietileno color negro de 200, almacenándolas a 4°C hasta el análisis respectivo.

4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO

Con el objeto de identificar el tipo de 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 [70].

4.3.1 Análisis Físicos

- **Humedad:** Se refiere al contenido de agua con relación al peso o volumen de la masa de suelo. Se expresa en forma gravimétrica cuando tiene relación con la masa del suelo y volumétrica cuando se relaciona con el volumen del suelo [70].

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 [70].

- **Densidad Aparente:** Es la relación entre la masa del suelo y su volumen. La densidad aparente es uno de los parámetros mínimos para evaluar la calidad de un suelo, indicando tanto su estructura, su resistencia mecánica y la cohesión del mismo. Esto tiene gran incidencia en el crecimiento de las plantas. Este procedimiento mide la compactación del suelo o espacio de poros [70].

Para determinar la densidad aparente se pesaron por separado cinco cilindros para tal fin, vacíos y limpios, seguidamente cada cilindro se saturó de suelo y se compactó, nuevamente se pesó por separado cada uno, considerando los pesos y conocidas las dimensiones, se calculó el volumen de acuerdo a la fórmula:

$$V_{\text{CILINDRO}} = \pi r^2 H,$$

Donde r es el radio del cilindro y H la altura del mismo.

Densidad aparente = suelo seco (g) / volumen suelo (cm^3)

- **Textura:** Se refiere específicamente a las proporciones de arena limo y arcilla (partículas menores de 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 [70].

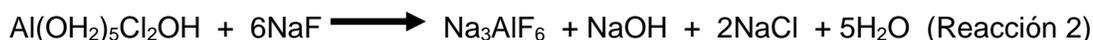
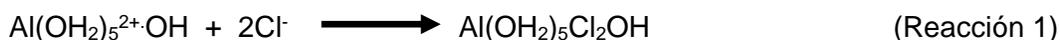
Se determinó mediante el método de Bouyoucos el cual consiste en determinar la cantidad de sólidos en suspensión por medio de un hidrómetro. La profundidad del centro de flotación del Hidrómetro varía con la densidad de la suspensión y también con la textura. Después de 40 segundos, todas las partículas mayores de 50 micras sedimentarán de tal manera que no tendrán influencia sobre el hidrómetro. Las lecturas realizadas una hora después, corresponden a partículas mayores de 5 micras y a las dos horas a partículas menores de 2 micras. El método se fundamenta en la ley de Stockes que dice que la velocidad de caída de las partículas de diferente tamaño en un medio líquido es directamente proporcional al cuadrado del radio de la partícula de donde $V = k \times r^2$.

4.3.2 Análisis Químicos

Los análisis químicos comprenden las siguientes determinaciones:

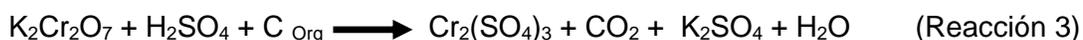
- **pH:** Se determinó mediante el método potenciométrico, en una pasta saturada de suelo y también en una suspensión suelo: agua, en relación 1:1 utilizando un pH – metro METROHM E-744[®] con electrodo combinado de vidrio [70].
- **Acidez Intercambiable:** Se determinó mediante el método de desplazamiento, 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 $\text{Al}(\text{OH}_2)_5^{2+}$ y se valorará el Al^{3+} presente en forma hidratada de acuerdo a las siguientes reacciones [70] :



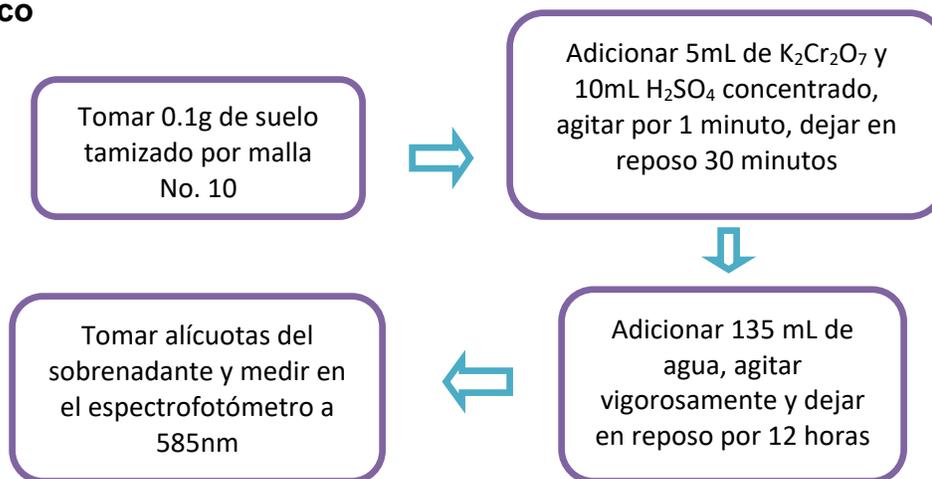
El NaOH producido se tituló con HCl y como la cantidad de NaOH depende de la cantidad de AlCl_3 , el número de miliequivalentes de ácido clorhídrico empleados para neutralizar el NaOH es igual al número de miliequivalentes de Al^{3+} . La acidez intercambiabile menos acidez de aluminio es igual a la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

- **Materia Orgánica:** Se realizó mediante el método colorimétrico, el cual consiste en oxidar el carbono orgánico presente en el suelo con un oxidante en medio ácido, utilizando como oxidante $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1N y como medio ácido sulfúrico concentrado. Luego de 12 horas de reposo, cada muestra se leyó en un espectrofotómetro SPECTRONIC GENESYS 20[®]. visible a 585nm [70].



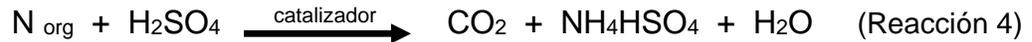
El contenido de carbono orgánico ($\%C_{\text{Org}}$) en la muestra de suelo se obtuvo al interpolar el valor de absorbancia en una curva de calibración realizada con sacarosa [71] (**Figura 16**).

Figura 16. Diagrama de determinación de materia orgánica por el método colorimétrico



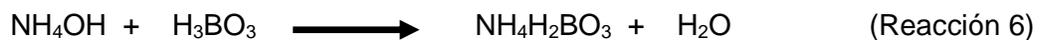
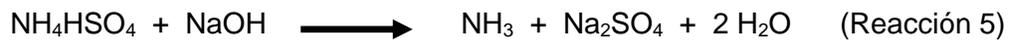
- **Determinación de Nitrógeno por el Método de Kjeldahl:** El método empleado es el utilizado universalmente en la determinación cuantitativa de N procedente de diversos materiales; consta de tres etapas [70] :

Oxidación de la muestra: Las muestras de suelo son tratadas separadamente con H₂SO₄ y una mezcla catalizadora de CuSO₄, Selenio y K₂SO₄ para oxidar la materia orgánica y convertir el nitrógeno en sulfato ácido de amonio según la siguiente reacción:



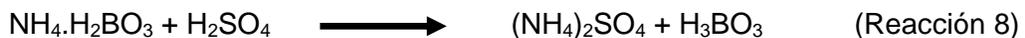
El equipo utilizado en la digestión fue el BÜCHI B-426

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®

Titulación del borato de amonio: El borato de amonio formado en el paso anterior se valora con HCl o H₂SO₄ 0.1N utilizando como indicadores una mezcla de rojo de metilo y verde de bromocresol. La reacción es la siguiente:



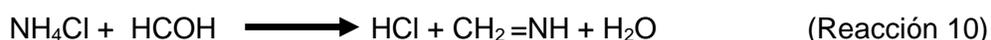
- **Determinación de fósforo disponible:** El método utilizado para esta determinación en suelos ácidos fue el Bray II, en el cual el ión fluoruro precipita el calcio soluble, extrayendo así las formas de P-Ca más solubles. Una vez extraído el fósforo, se procedió a su determinación por el método colorimétrico, el cual consistió en formar un complejo del fósforo con ácido molíbdico que absorbe a 660nm [70]. 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:



El heterocompuesto incoloro [P (Mo₃O₁₀)₄] formado, por reducción con ácido ascórbico forma un compuesto de color azul que absorbe a 660nm.

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

- **Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC):** Consiste en desplazar todos los cationes del suelo y reemplazarlos por iones NH_4^+ ; el suelo seco, tamizado y muy fino, se satura con NH_4^+ . Posteriormente, hay un desplazamiento de los iones NH_4^+ adsorbidos con NaCl , al 10% obteniéndose NH_4Cl en solución, que se trata con formaldehído neutro. El HCl obtenido se titula con NaOH 0,1N [70]. La siguiente reacción muestra lo ocurrido:



- **Determinación de las bases Intercambiables:** Correspondientes al Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio. Se determinan con el primer extracto del tratamiento con acetato de amonio (AcONH_4) 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 [70].
- **Microelementos:** Se determinaron los contenidos de Cobre, Hierro, Cinc y Manganeso. Para ello se usa como solución extractante de DTPA en presencia de CaCl_2 tamponada con trietanolamina [70]. La cuantificación se realizó por espectrofotometría de Absorción Atómica, en el equipo Perkin Elmer 3100® de la secretaria de agricultura, del Departamento del Cauca.

4.4 EVALUACIÓN DEL GRADO DE HUMIFICACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

Con el objeto de determinar el extracto húmico total y de valorar las sustancias húmicas, se separan los compuestos húmicos de la materia orgánica no humificada, empleando el método granulométrico de tamizaje en húmedo con mallas comprendidas entre N°. 53 y 106 μm . Para fraccionar las sustancias húmicas se empleó el método de extracción con soluciones básicas [72,73].

- **Método Granulométrico:** Se fundamenta en que los agregados del suelo considerados normalmente estables en agua, se disocian por tratamiento mecánico moderado, en microagregados y complejos orgánico-arcillosos, que posteriormente serán separados por granulometría. Este método garantiza una mínima desnaturalización de las estructuras de las sustancias húmicas. Consistió en utilizar la diferencia de tamaño molecular de la materia orgánica humificada y la materia orgánica fresca (no humificada). La fracción menor de 53 μ corresponde a la materia orgánica humificada y la fracción mayor de 106 μ corresponde a la materia orgánica fresca. Para separar dichas fracciones, se utilizó un tamizador automático (Retsch As200®).

- **Método de Extracción y Valoración de Sustancias Húmicas:** Después de la separación de la materia orgánica humificada, se procedió al fraccionamiento de las sustancias húmicas, con el propósito de evaluar el contenido de fracción fúlvica, ácidos húmicos, huminas y así evaluar el grado de humificación de la materia orgánica de los suelos. El procedimiento se relaciona en la **Figuras 17, 18, 19 y 20.**

Figura 17. Diagrama de separación Granulométrica de la MO

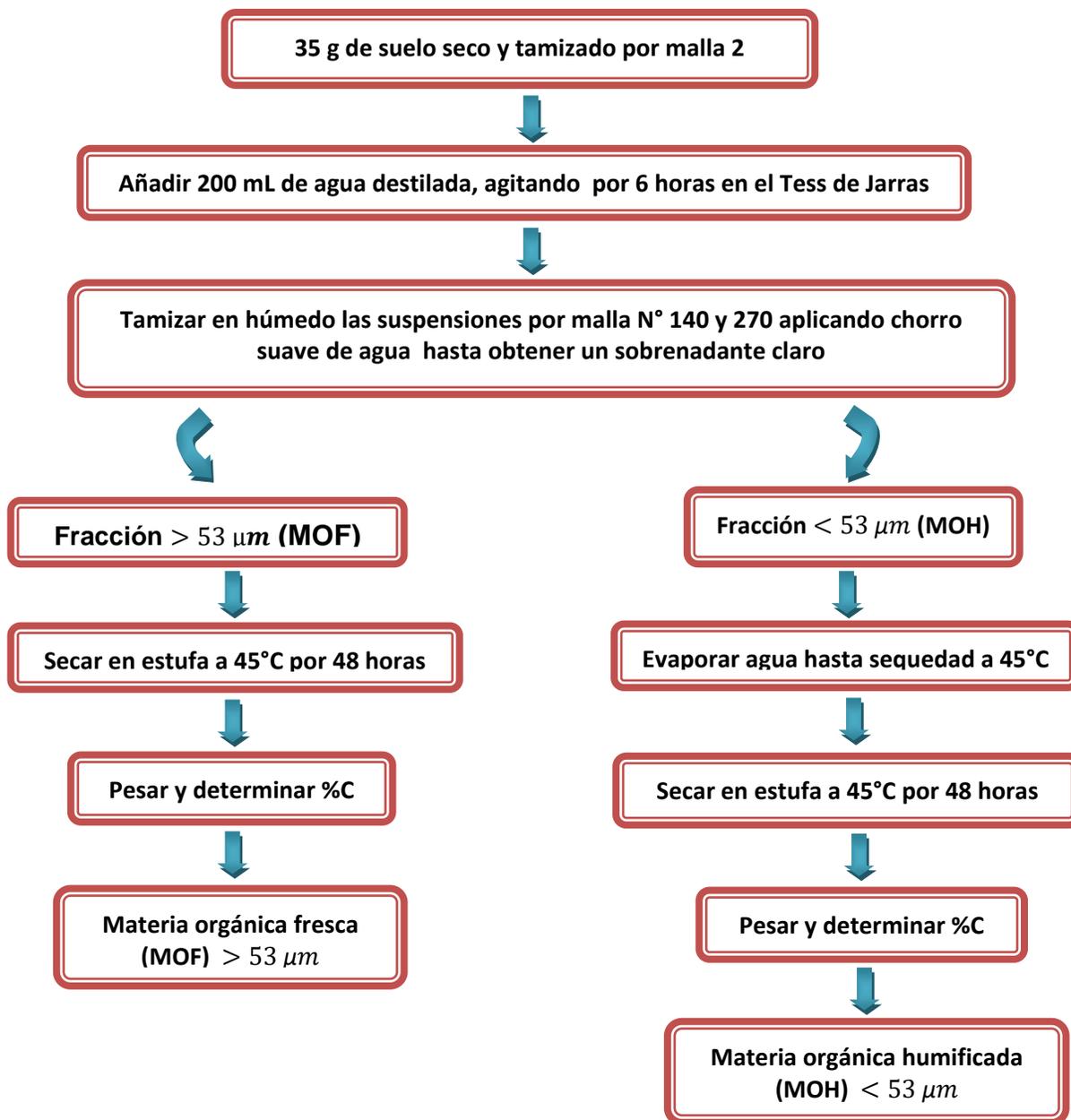
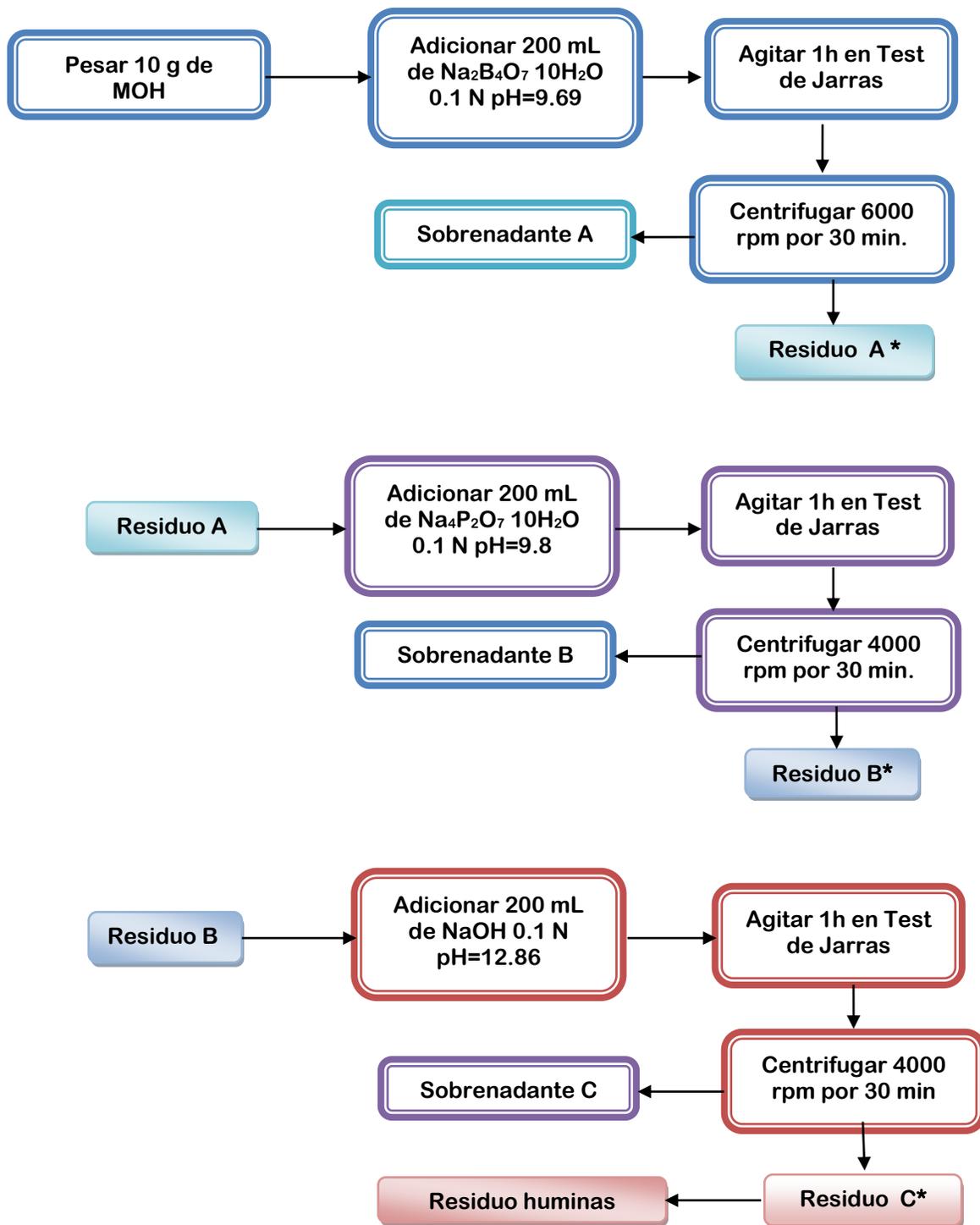


Figura 18. Extracción de las Sustancias Húmicas



*Continuar extracción hasta obtener una solución clara

Figura 19. Floculación de Arcillas

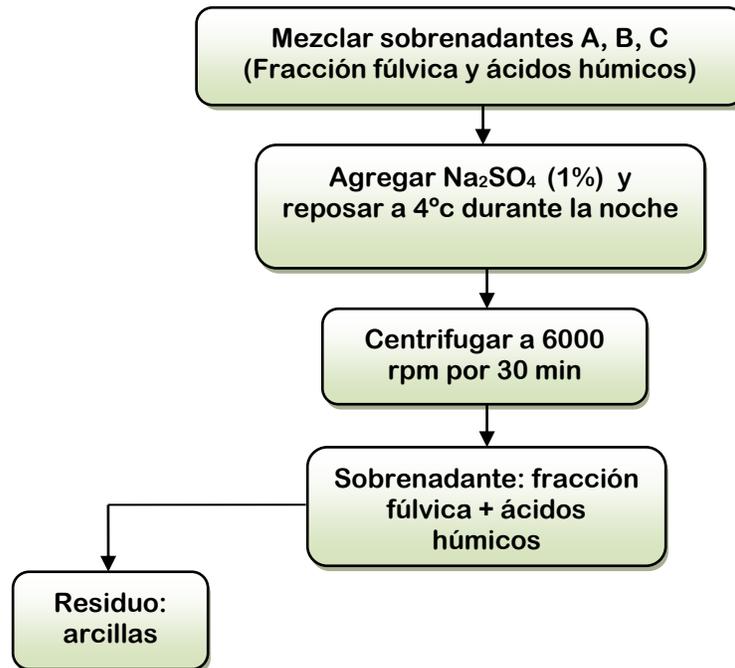
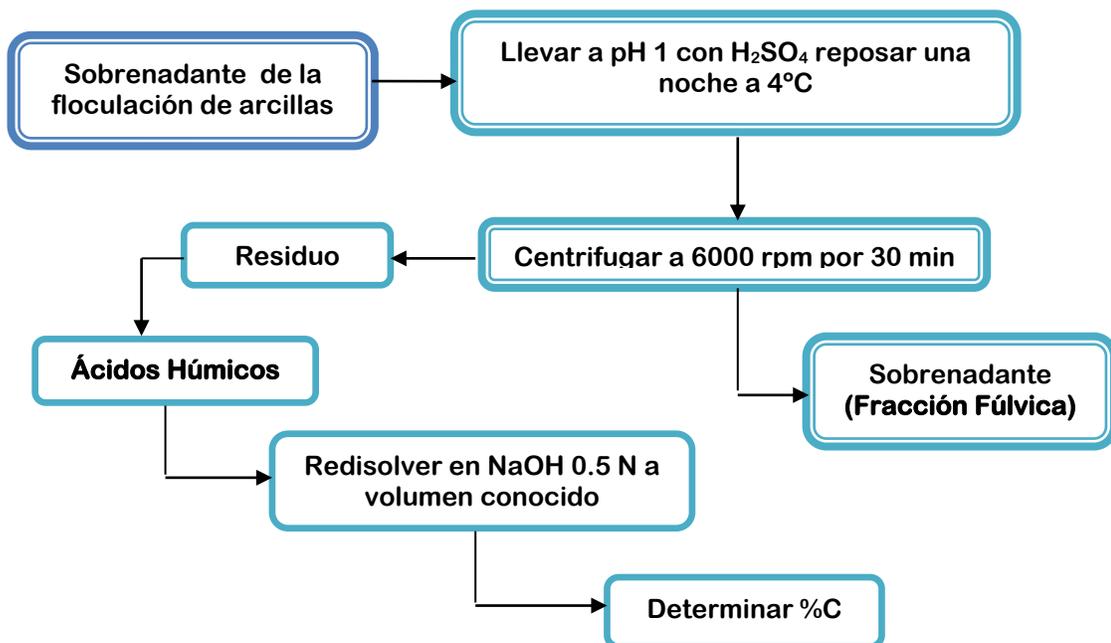


Figura 20. Separación de los Ácidos Húmicos y Fracción Fúlvica



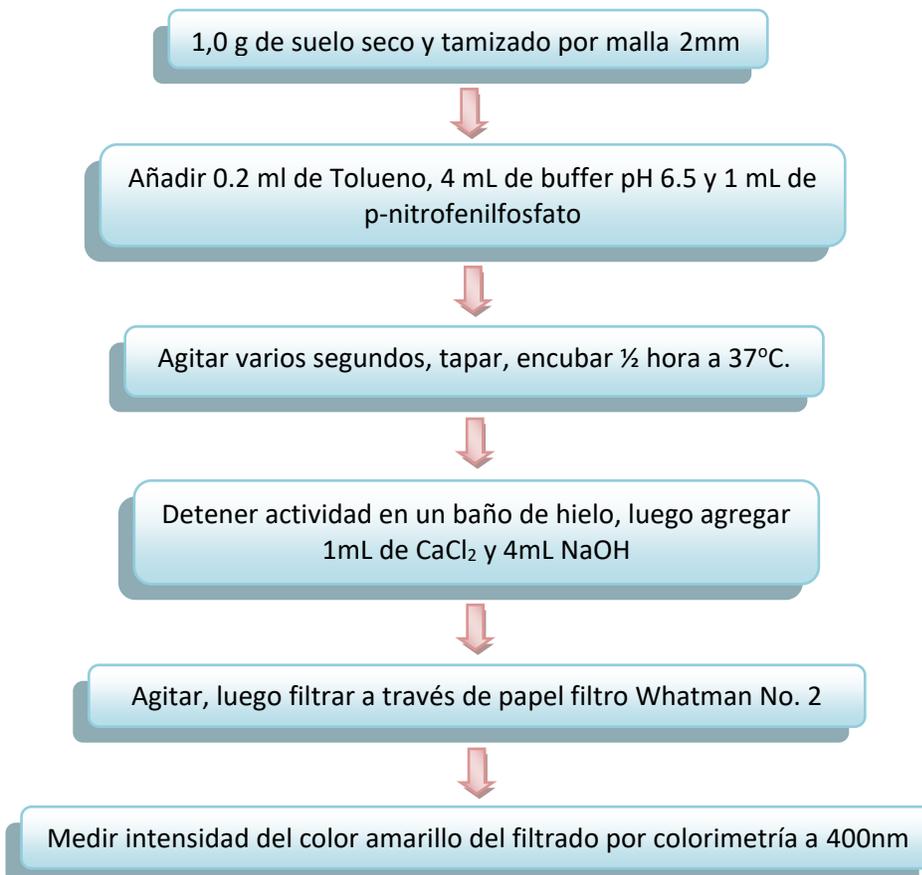
4.5 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE DOS TIPOS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS SOBRE LA ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA PRESENTE EN EL SUELO

Con base en el método reportado por Tabatabai y Bremner (1994) modificado y debidamente estandarizado en el Laboratorio de Agroquímica [74,75]. Se determinó colorimétricamente la actividad de la fosfatasa ácida empleando como sustrato p-nitrofenilfosfato 0.05M a pH 6.5, el cual por acción de la enzima se escinde en p-nitrofenol (p-NF) y ácido fosfórico en un tiempo de incubación a 37°C [76,77]. El p-NF absorbe a una longitud de onda de 400nm.

Para la determinación se realizó una curva de calibración con p-nitrofenol, en diferentes concentraciones ajustándola a la Ley de Beer, utilizando un Espectrofotómetro SPECTRONIC GENESYS 20[®].

Extracción de la Enzima del suelo: La actividad enzimática de la fosfatasa ácida en el suelo se evaluó utilizando muestras de suelo incubadas con p-NF a 37°C en un tiempo determinado en las mismas condiciones de la curva de calibración. Esta determinación se hizo mensualmente durante un período de tres meses siguiendo el diseño descrito más adelante (**Figura 21**).

Figura 21. Diagrama para determinación de la fosfatasa ácida en suelo



Para evaluar el efecto de los fertilizantes sobre la actividad de la fosfatasa ácida se aplicó un diseño experimental completamente aleatorio, con tres tratamientos y cinco réplicas por tratamiento, utilizando una dosis de dos fuentes: Triple 15 (fertilizante 1) y KH_2PO_4 (fertilizante 2), con tres períodos de incubación, para un total de 45 tratamientos. Las variables dependientes serán la actividad de la fosfatasa ácida, el P disponible y el P orgánico. Se utilizará el método en paralelo. En la **Figura 22** se muestra el diagrama correspondiente.

Figura 22. Diagrama de diseño experimental para la evaluación del efecto de fertilizantes fosfatados sobre la actividad de la fosfatasa ácida



T: tratamiento realizado; T1: suelo sin fertilizante; T2: suelo con fertilizante 1; T3: suelo con fertilizante 2; R1: Réplica 1; R2: Réplica 2; R3: Réplica 3; R4: Réplica 4; R5: Réplica 5.

4.6 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS FERTILIZANTES SOBRE DIFERENTES FRACCIONES DE P EN LA MUESTRA DE SUELO.

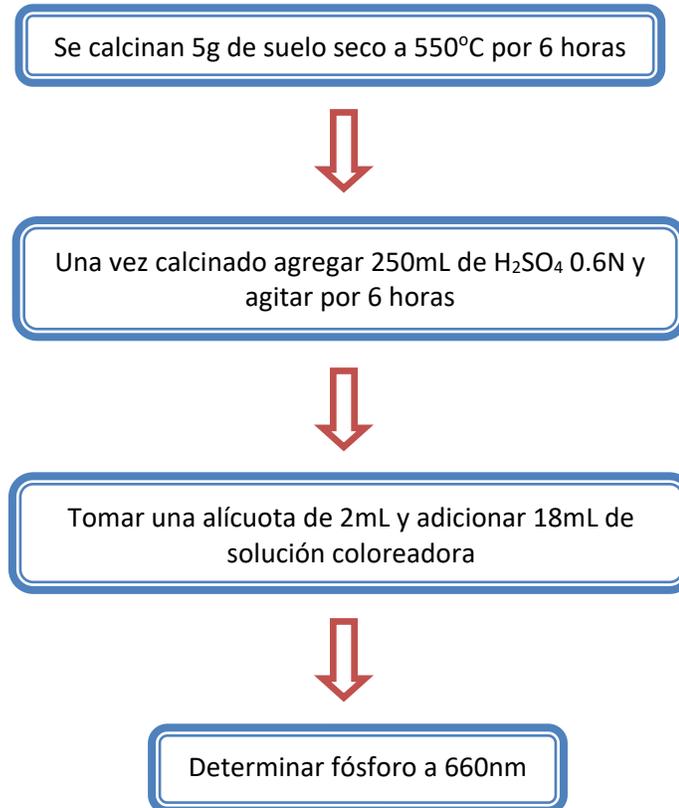
Con el propósito de evaluar el efecto de los fertilizantes sobre diferentes fracciones de P en el suelo (P disponible, Orgánico y Total) y su correlación con la actividad de la fosfatasa ácida, se realizó un seguimiento mensual del contenido de fósforo en sus diferentes formas

El fósforo disponible se determinó por el método de Bray II, utilizando 20 mL de solución extractora, agitando por 40 segundos e inmediatamente después se filtró, se tomó una alícuota de 2 mL y se adicionó 18 mL de una solución coloreadora y pasado 15 minutos se determina por colorimetría [70].

El fósforo orgánico se determinó por calcinación del suelo a 550° C durante 6 horas, una vez calcinado se adicionó ácido sulfúrico 0.6N y se agitó por 6 horas. Se tomó una alícuota de 2 mL y se adicionó 18 mL de solución coloreadora. Se aplica el mismo procedimiento a una muestra sin calcinar, se cuantifica por el

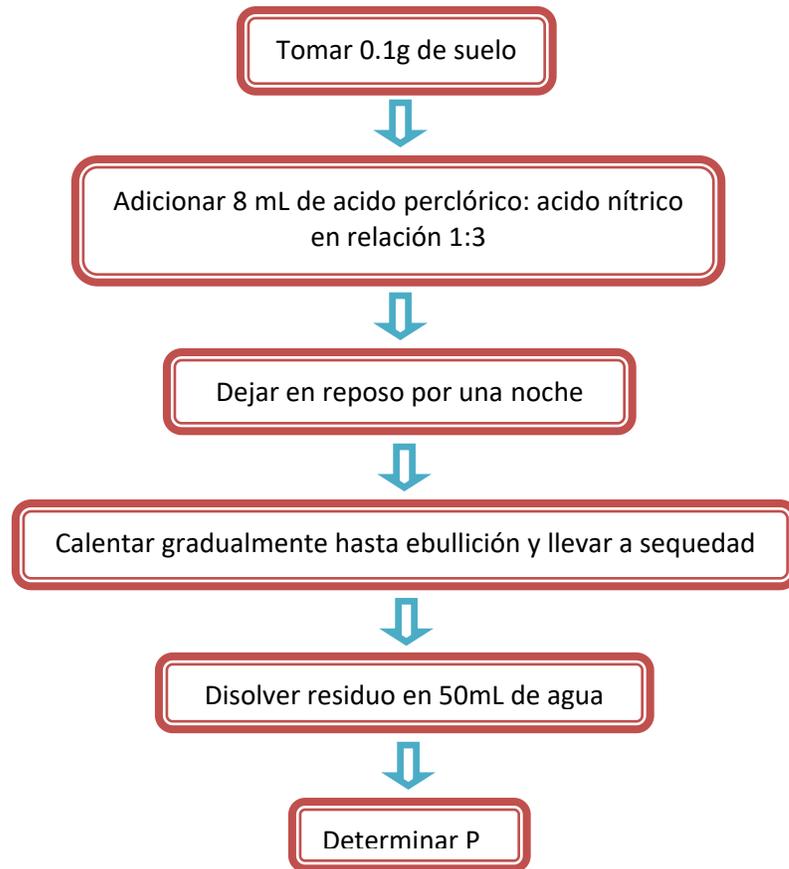
método colorimétrico usando curva de calibración y por diferencia entre las dos extracciones se determina el P orgánico [78] (**Figura 23**).

Figura 23. Diagrama de determinación de fósforo orgánico



El fósforo total se determinó por digestión del suelo con una mezcla de ácido perclórico/ ácido nítrico en relación 1:3, se calienta suavemente hasta llevar a sequedad y posteriormente se llevará hasta un volumen final de 50mL con agua destilada. Se tomará una alícuota de 2 mL, se adicionará 18 mL de solución coloreadora y pasado 15 minutos se determina por el método colorimétrico [78] (**Figura 24**).

Figura 24. Diagrama para la determinación de fósforo total



4.7 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS FERTILIZANTES SOBRE EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA EN LA MUESTRA DE SUELO

Para evaluar el efecto de los fertilizantes sobre el contenido de MO se evalúa cada mes durante tres meses, usando el método colorimétrico para la determinación del carbono orgánico en la muestra de suelo como se explicó anteriormente.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO

En la tabla 6 se presenta los resultados de los análisis físicos y químicos realizados a la muestra de suelo en esta investigación. Para la interpretación de los resultados se utiliza como patrón de referencia, los datos reportados por Silva [79], (anexo 1).

Tabla 6. Análisis Físico y Químico del Suelo

Propiedades Físicas						
Suelo	Humedad Higroscópica (%)	Densidad aparente (g/cm ³)	Granulometría (%)			Textura
			Arena	Arcilla	Limo	
Andisol	17,729	0,925	63,81	6,66	29,53	Franco Arenoso

Propiedades Químicas										
pH	C (%)	MO (%)	N (%)	C/N	P (ppm)	Acidez intercambiable meq/100g suelo	Al ³⁺ Intercambiable meq/100g suelo	H ⁺ Intercambiable meq/100g suelo	Acidez titulable meq/100g suelo	CIC meq/100g suelo
4,93	9,8	16,9	0,67	14,62	3,44	0,530	-ND-	0,530	58,44	40,77

Bases de Cambio (meq/100g suelo)					Capacidad de Intercambio Efectiva (meq/100g)	Microelementos (mg/kg)			
Ca	Mg	Na	K	Ca/Mg		Fe	Cu	Mn	Zn
0,353	0,318	0,391	0,532	1,14	1,59	2,326	0,611	2,317	1,069

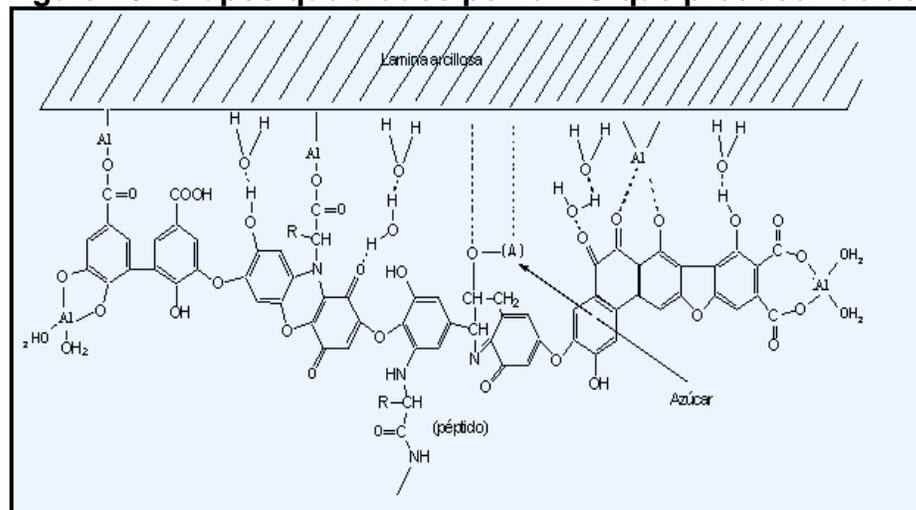
La zona rural del municipio de Cajibío (Departamento del Cauca), se caracteriza por presentar suelos con una alta humedad. El suelo estudiado proveniente de esta zona presenta un color oscuro, con una humedad higroscópica de 17,729%, comprendida dentro del rango normal (15% - 25%). La textura Franco-Arenosa con un contenido bajo en arcillas (6,66%), indica que la retención de humedad se debe al alto contenido de Materia Orgánica (16,90%) y a la presencia de alófanos en este suelo.

El valor de la densidad 0, 925 g/mL, indica un suelo de rango bajo a normal influenciado por el alto contenido de materia orgánica.

El valor del pH es de 4,93, clasificando al suelo estudiado como muy fuertemente ácido, afectando la disponibilidad de muchos nutrientes para la planta; a este pH, se favorece la adsorción de fósforo, boro, azufre y molibdeno en la fase coloidal, ya que pueden intercambiarse aniónicamente puesto que se favorece la capacidad de intercambio aniónico. Además se puede presentar lavado de nutrientes como el Ca, Mg o K, lo cual se confirma con el bajo valor de CIC efectiva que es menor de 4, valor por debajo del cual indica un fuerte lavado de nutrientes en general.

El valor de la acidez intercambiable es bajo y al no encontrarse aluminio de cambio la acidez es debida al hidrogeno de cambio proveniente principalmente a la MO, y a especies de Al y de H no intercambiables como se demuestra por la alta acidez Titulable. Es probable que el Al esté siendo quelatado fuertemente por la MO (**Figura 25**).

Figura 25. Grupos quelatados por la MO que producen acidez



La capacidad de intercambio catiónico presenta un valor de 40,77 meq/100 de suelo, valor alto atribuible principalmente al alto contenido de MO. En los suelos ácidos, la determinación más apropiada, es la suma de las bases de cambio y de la acidez de cambio; esta capacidad de cambio se denomina real o efectiva y en este suelo presenta un valor de 1,59 que indica un fuerte lavado de cationes, de tal manera que los contenidos de Ca y Mg son muy bajos, lo mismo que sus saturaciones. El nivel de K se encuentra en el rango alto proveniente del tipo de arcillas presentes en este suelo. La relación Ca/Mg es de 1,14 valor bajo, acentuando la deficiencia de Ca.

El porcentaje de nitrógeno total presente en el suelo es de 0,67% aunque el porcentaje de nitrógeno es alto, proveniente del alto nivel de MO, no se puede asegurar su alta disponibilidad para la absorción por las plantas, debido a que ese valor incluye tanto el nitrógeno en forma orgánica como inorgánica. La forma orgánica que representa casi la totalidad del nitrógeno en el suelo no puede ser

utilizada por la planta mientras no se transforme previamente en nitrógeno inorgánico, mediante una serie de procesos fundamentalmente de tipo bioquímico, en los cuales influyen factores tales como la temperatura, el pH y la humedad.

La valor de la relación C/N (14,62) para este suelo indica un proceso de lenta mineralización confirmado por la acumulación de capas de MO sin transformar, debido a las inadecuadas características químicas del suelo como son la muy fuerte acidez, por lo que los microorganismos no están desarrollando sus actividades adecuadamente en la degradación de la materia orgánica, y están causando inmovilización del N, 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 3,44 ppm, atribuible a la fuerte acidez, siendo posible que esté intercambiado aniónicamente o precipitado en forma de fosfatos de Al y de Fe. Aunque el nivel de materia orgánica es alto, produce acidez favoreciendo así la retención de P en el suelo. Esta retención también se puede atribuir quizás a la presencia de alófanos en este suelo, según nos muestra sus propiedades físicas y químicas tales como: la alta retención de humedad, la fuerte acidez y probablemente a la baja densidad, formando el complejo humus-aluminio- P.

Se observa una fuerte deficiencia de los micronutrientes, con excepción del Zn, atribuida al quelatación por parte de la MO.

5.2 EVALUACIÓN DEL GRADO DE HUMIFICACIÓN DE LA MATERIA ORGANICA

Para evaluar el grado de humificación inicialmente se realizó el fraccionamiento de la materia orgánica del suelo, con el objeto de separar las sustancias húmicas de la materia orgánica fresca (MOF) o no humificada. Estas sustancias húmicas son sustancias que han sido alteradas por acción química o biológica, representan la fracción más activa de la materia orgánica, porque participan en un gran número de reacciones con otras moléculas como: coloides minerales e iones inorgánicos, que son capaces de retener reversiblemente tanto moléculas de agua como otros iones, formando así un complejo denominado humus – alófana o humus – Al, para este tipo de suelos.

Los resultados de la obtención de las fracciones de MOH se presentan en la **Tabla 7**, porcentajes correspondientes a las diferentes fracciones separadas.

Tabla 7. Porcentaje de fracciones de MOH y MOF obtenidas por separación granulométrica

FRACCIÓN	Valor
En Proceso de Humificación	13,911 %
% MOF	35,467 %
% MOH	50,622 %
Relación de Humificación	0,700

En la **Tabla 7** se puede observar que más del 50% de la MO presente en la muestra de suelo se encuentra como Materia Orgánica Humificada (MOH) unida a la fracción mineral, un 35,467% se encuentra como Materia Orgánica Libre (MOF) y un 13,911% está en la etapa intermedia. Como se puede notar el valor que se obtiene para la relación de humificación ($\%C \text{ fracción MOF} / \%C \text{ Fracción MOH}$) es menor a 1, señalando que en este suelo predomina el carbono de material humificado sobre el de materia orgánica fresca. Predominando en este suelo compuestos de carácter aromático dentro del material humificado, como también se observa en otros estudios realizados en el departamento del Cauca, en donde existe un predominio de la MOH en el suelo y por tanto del material humificado [72, 78].

Tras la separación de las sustancias húmicas se procedió a determinar el porcentaje de carbono para cada una de las fracciones incluyendo la MOH, MOF, AH, FF y huminas, resultados que se pueden observar en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Porcentaje de Carbono de la Materia Orgánica Libre, Humificada, Ácidos Húmicos, Fracción fúlvica y huminas

Fracción	% de C	% MO
MOF	5,643	9,73
MOH	8,608	14,84
AH	0,593	1,02
FF	1,020	1,76
Huminas	1,834	3,16

Comparando los resultados obtenidos para el % de C tanto de la MOF, MOH y de las sustancias húmicas, el valor superior obtenido en la fracción MOH es

atribuido a un mayor contenido de carbono fácilmente oxidable presente en las sustancias húmicas como lo son: los ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas en esta fracción. El % C de las SH es bajo si se compara con estudios ya realizados en suelos del Departamento del Cauca [72, 78]. Donde además de encontrarse una % elevado de MOH, también se observa un contenido de SH mayor, lo cual está relacionado con los procesos de humificación que presenta la MO presente en los suelos estudiados.

El grado de humificación de la MOH se evaluó mediante índices, los resultados son presentados en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Grado de humificación de la MOH

ÍNDICE	VALOR
HR	44,46 %
HI	3,49
HR ₁	0,581
% AH	6,88 %

HR = C MOH/ C total;

HR₁ = AH/FF;

HI = CMOF/CAH+CAF (Índice de Sequi);

% HA = CAH/ CMOH

Observando el valor de **HR** que hace referencia al grado de humificación, este indica que solo el 44,46% de la MOH que se obtuvo luego del fraccionamiento de la MO es en realidad materia orgánica humificada, indicando que los procesos de humificación de la MO son lentos y que pueden estar influenciados también por el contenido de alófanos y minerales que forman complejos con el humus del suelo.

El valor del **HI** que es el índice de Sequi, muestra un valor de 3,49, valor superior a 1, que indica que existe un bajo índice de humificación para la MO presente en suelo, esto muestra que al ser lo procesos de humificación lentos hay una cantidad muy pequeña de ácidos húmicos y fracción fúlvica, además de tener un porcentaje de MOH bajo para la MO del suelo.

El valor de **HR₁** que hace referencia al grado de condensación de las sustancias húmicas, muestra un valor de 0,581, valor inferior a 1, lo cual indica un bajo grado de condensación de la sustancias húmicas, como lo son los ácidos húmicos, en donde predomina la fracción fúlvica sobre el contenido de AH, explicado por el bajo grado de humificación que hace que la cantidad de AH y FF sea muy baja y no se alcance un nivel óptimo para el desarrollo de la estructura molecular

compleja que presentan los ácidos húmicos. Además de observarse un valor de % **AH** muy pequeño lo cual indica un menor grado de humificación por parte de la MOH, que repercute también en el contenido y desarrollo de las sustancias húmicas dentro de este suelo. El predominio de la Fracción Fúlvica sobre los AH puede generar más acidez al suelo debido a la extracción de Al por parte de la primera fracción, de esta manera se acentúa la adsorción de P en estos suelos incidiendo sobre la calidad del suelo, afectando la actividad de las enzimas.

5.3 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE DOS TIPOS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS SOBRE LA ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA PRESENTE EN EL SUELO

Con el propósito de evaluar el efecto producido por la fertilización fosfatada sobre la calidad del suelo y calidad del medio ambiente, se eligió como indicador bioquímico la Actividad de la Fosfatasa Acida (AFA), que brinda información a corto plazo, en este caso bajo diferentes condiciones de fertilización fosfatada, ya que el suelo seleccionado presenta una fuerte acidez y serias deficiencias de fósforo, para lo cual los agricultores aplican altas y repetidas dosis de fertilizantes para suplir estas deficiencias nutricionales del suelo, afectando de esta manera su calidad a largo tiempo, que involucra no solo factores físicos y químicos del suelo sino también factores ambientales.

Se seleccionaron dos tipos de fertilizantes fosfatados: triple 15 y fosfato diácido de potasio (KH_2PO_4) con una composición de 15 y 52% de fósforo expresado en forma de P_2O_5 , respectivamente, ambos son de conocido uso comercial en el departamento del Cauca.

Se evaluó el requerimiento de fertilizante necesario para llevar el nivel de P disponible del suelo hasta 30ppm, con base a esto se seleccionó la dosis necesaria de fertilizante para alcanzar dicho nivel de P en 100g de suelo. Los resultados se muestran en la **tabla 10**.

Tabla 10. Dosis necesaria de fertilizante para alcanzar 30ppm de P disponible

FERTILIZANTE	DOSIS * (g fertilizante/100g suelo)	DOSIS (Ton/Ha)
<i>Triple 15</i>	0,200	2.580
<i>KH_2PO_4</i>	0,059	0.757

* Masa de fertilizante necesaria para llevar la concentración de P disponible de 100g de suelo hasta 30ppm.

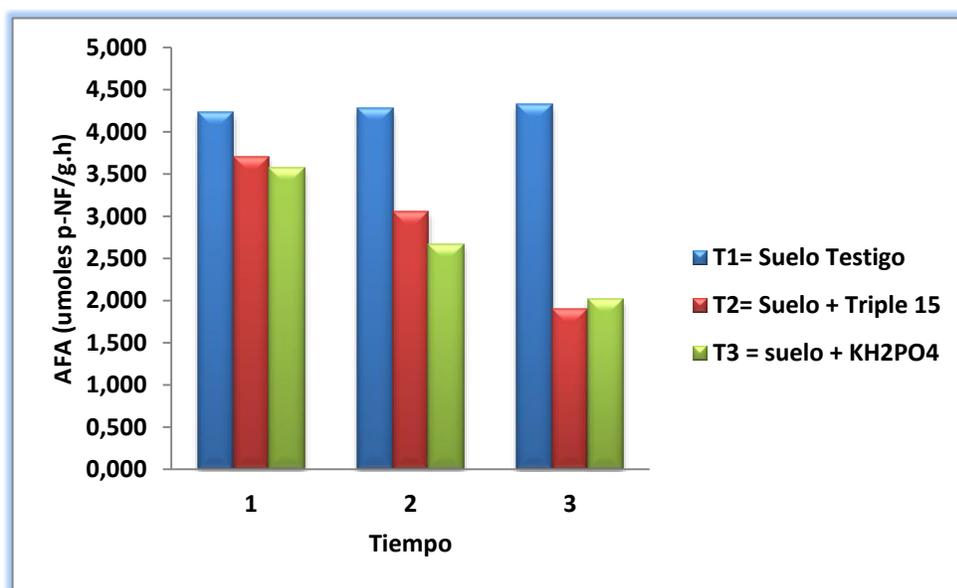
En la tabla 11 y figura 26 se presentan los resultados obtenidos para la actividad de la fosfatasa ácida (AFA) en μmoles de p-nitrofenol/g.h, para los diferentes tratamientos.

Tabla 11. Efecto de la Fertilización sobre la Actividad de la Fosfatasa Acida

TRATAMIENTO	AFA ($\mu\text{moles p-NF/g.h}$)*		
	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3
T1 = Suelo Testigo	4,236	4,278	4,327
T2 = Fertilizante Triple 15	3,711	3,053	1,901
T3 = Fertilizante KH_2PO_4	3,577	2,671	2,019

* La AFA se expresa en $\mu\text{moles p-NF/g h}$, que representa la cantidad en micromoles de p-Nitrofenol formado por gramo de suelo por hora.

Figura 26. Efecto de la Fertilización sobre la Actividad de la Fosfatasa Acida en función del Tiempo



Tiempo 1 = mes 0; Tiempo 2 = mes 1; Tiempo 3 = mes 2

En la tabla 11 y figura 26 se puede observar que la AFA para los tratamientos T2 y T3, disminuye en todo el tiempo del estudio, mientras para el suelo testigo (T1) permanece constante y alrededor de 4,3 μmoles de p-nitrofenol/g.h.

En el **tiempo 1**, se observa que los fertilizantes Triple 15 (T2) y fosfato diácido de potasio (T3) afectan de forma negativa el valor de la AFA, disminuyéndolo en un 12% y 15,5% respectivamente, siendo esta disminución significativa como lo

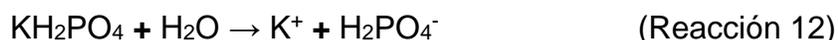
muestra la prueba estadística de Duncan (Tabla 12, anexo 2), confirmando esta disminución, ya que el valor de la AFA en estos dos tratamientos es significativamente inferior al del testigo (T1). Sin embargo, revela que no existe diferencia de AFA entre ellos dos (Sig. =0, 441). Este incremento se atribuye al aporte de P disponible por parte de estos fertilizantes, que inhibe la AFA a medida que transcurre el tiempo.

En el **tiempo 2**, (un mes después de la aplicación de los fertilizantes), el triple 15 (T2), genera una disminución del 28%, mientras el fosfato diácido de potasio (T3) reduce el valor de la AFA en un 37%, al igual que en el tiempo 1, la prueba estadística de Duncan (tabla 12, anexos 2), revela una disminución significativa de la AFA para los tratamientos 2 y 3, entre los cuales no hay diferencias (sig. = 0,058), explicable por la continua solubilización de los fertilizantes y su aporte de P disponible al suelo, al término de un mes.

En el **tiempo 3**, se nota una disminución apreciable en el valor de la AFA, en un 56% para el triple 15 (T2) y en un 53% para el KH_2PO_4 , resultado confirmado por la Prueba de Duncan (tabla 12, anexo 2), la cual revela una disminución significativa para estos tratamientos, sin existir diferencia entre ellos (sig. = 0,354), comportamiento que se venía observando para los otros tiempos, explicable por la alta disponibilidad de P que presenta el suelo a este tiempo de ensayo.

Los fertilizantes fosfatados como el KH_2PO_4 y el triple 15, no solo aportan fósforo al suelo sino que también causan acidificación, tras la liberación de iones H^+ como se muestra en las siguientes reacciones de solubilización de cada tipo de fertilizante en el suelo.

Acidez generada por fertilizantes fosfatados.



El K^+ puede lixiviarse fácilmente debido al tipo de textura quedando en el suelo la especie H_2PO_4^- y por esto se genera una fuerte acidez

Acidez generada por fertilizantes nitrogenados.



En este caso, la acidez producida por los fertilizantes también influye en la AFA, ya que el rango óptimo para su máxima actividad se encuentra por encima de un pH de 5.0 hasta un pH de 6.5, valores de pH cercanos a la neutralidad donde la enzima se desempeña de forma adecuada. Aún cuando el alto contenido de MO

ejerce un efecto tampón en este suelo, se observa una disminución en el valor de pH en función del tiempo por efecto de los fertilizantes, influyendo de esta manera en la disminución de la AFA. Además del efecto indirecto relacionado con el incremento en el contenido de P disponible que induce también a una disminución en la actividad de esta enzima.

El tratamiento estadístico para el conjunto de los datos de la AFA, iniciado con las pruebas de normalidad muestra que estos valores con respecto al **tiempo** se ajustan a la normalidad (tabla 7, anexo 2). Con la prueba de ANOVA (tabla 12) se observan diferencias significativas (sig. = 0,004).

Tabla 12. Prueba de ANOVA para la AFA en función del tiempo

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
AFA	Inter-grupos	8,961	2	4,480	6,453	,004
	Intra-grupos	29,161	42	,694		
	Total	38,121	44			

La prueba de Duncan (tabla 13) demuestra que el valor de la AFA en tiempo 1, es significativamente superior al del tiempo 3, No existiendo diferencias entre la AFA del tiempo 2 y el tiempo 3, ni del tiempo 1 con el 2. Indicando que a medida que aumenta el tiempo el valor de la AFA disminuye, debido a la continua solubilización y aporte de P disponible por parte de los fertilizantes aplicados.

Tabla 13. Prueba de Duncan para AFA en función del tiempo

Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
3	15	2,74907	
2	15	3,33373	3,33373
1	15		3,84120
Sig.		,061	,103

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
 a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 15,000.

En función del **tratamiento** los valores de la AFA también se ajustaron a la normalidad (tabla 8, anexo 2), la prueba de ANOVA aplicada (tabla 14), revela que existe diferencias significativas en función del tratamiento (sig. = 0,000).

Tabla 14. Prueba de ANOVA para la AFA en función del tratamiento

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
AFA	Inter-grupos	21,404	2	10,702	26,888	,000
	Intra-grupos	16,717	42	,398		
	Total	38,121	44			

La prueba de Duncan (tabla 15) muestra que el mayor valor de AFA lo presenta el tratamiento 1, siendo significativamente superior al valor de la AFA de los tratamientos 2 y 3, entre los cuales no existe diferencia. Lo anterior indica claramente que la fertilización causa un efecto adverso sobre la AFA disminuyendo su valor, debido al aumento en el P disponible en el medio, lo que hace que los microorganismos no mineralicen más P orgánico y disminuya su actividad, que también es influenciada por lo cambios de pH.

Tabla 15. Prueba de Duncan para la AFA en función del tratamiento

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
3	15	2,75553	4,28033
2	15	2,88813	
1	15		
Sig.		,568	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
 a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 15,000

Igual efecto se observó en estudios realizados en Suelos Altoandinos [80], en donde la aplicación de fertilizantes fosfatados al suelo causó una disminución en el valor de la AFA, como consecuencia del aporte de P disponible a la solución de suelo por parte de los fertilizantes aplicados, que de alguna manera inhibieron la AFA y su valor decreció al pasar el tiempo. De acuerdo a otros estudios, la disminución en el valor de la AFA para los suelos fertilizados en función del tiempo es atribuible al efecto inhibitor de tipo competitivo que ejerce el fósforo inorgánico sobre la actividad enzimática de fosfatasa ácida [81,82,83,84].

Aplicando la prueba de Correlación de Pearson (tabla16) se puede apreciar que existe una correlación altamente significativa y negativa entre la AFA y el tiempo, indicando que a medida que transcurre el tiempo disminuye el valor la AFA, corroborando el efecto causado por los fertilizantes fosfatados, debido a que su solubilización no es inmediata si no que está gobernada por una cinética de solubilización dependiente de: la reacción del suelo, temperatura, tamaño de partícula, relación agua: fertilizante, entre otros, es decir, son fertilizantes de

liberación lenta. También se observa una correlación altamente significativa y positiva entre la AFA y el pH, mostrando que al disminuir el valor del pH (Tabla 17), disminuye también el valor de la AFA, efecto relacionado con la acidez producida por los fertilizantes, a medida que transcurre el tiempo.

Tabla 16. Correlaciones de Pearson para la AFA

		Tiempo	Tratamiento	pH	P disponible	P orgánico	P total	MO
AFA	Correlación de Pearson	-,484(**)	-,676(**)	,637(**)	-,782 (**)	-,760(**)	-,886(**)	-.246
	Sig. (bilateral)	,001	,000	,000	,000	,000	,000	,103
	N	45	45	45	45	45	45	45

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

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Igualmente se observa una correlación altamente significativa y negativa entre la AFA y el P disponible, indicando que al aumentar el P disponible disminuye la AFA, puesto que los microorganismos responsables no tendrían necesidad de mineralizar P para su neosíntesis, puesto que tienen suficiente en el medio.

Existe una correlación altamente significativa y negativa entre la AFA y el P total indicando que al aumentar el P total disminuye la AFA, explicable por la correlación también positiva y altamente significativa entre el P total y el P disponible. Esto se corrobora con la correlación altamente significativa y negativa entre la AFA y el P orgánico, demostrando que al aumentar la AFA disminuye el P orgánico, de tal manera que la mineralización de este último se debe a la actividad de la FA.

De acuerdo a los resultados anteriores, la AFA se ve afectada en gran medida por la aplicación de fertilizantes fosfatados, siendo el fertilizante KH_2PO_4 (0,059mg P/100g suelo) el que produjo mayor efecto durante el transcurso del estudio, aún cuando no exista diferencia significativa con el efecto producido por el fertilizante Triple 15 (0,2mg P/100gsuelo).

5.4 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE ALGUNOS PARÁMETROS QUÍMICOS DEL SUELO

Para evaluar el efecto que produce la fertilización con diferentes fertilizantes fosfatados y sus respectivas dosis sobre las propiedades del suelo, se evaluaron parámetros como: pH, P disponible, P orgánico y P total, y la MO.

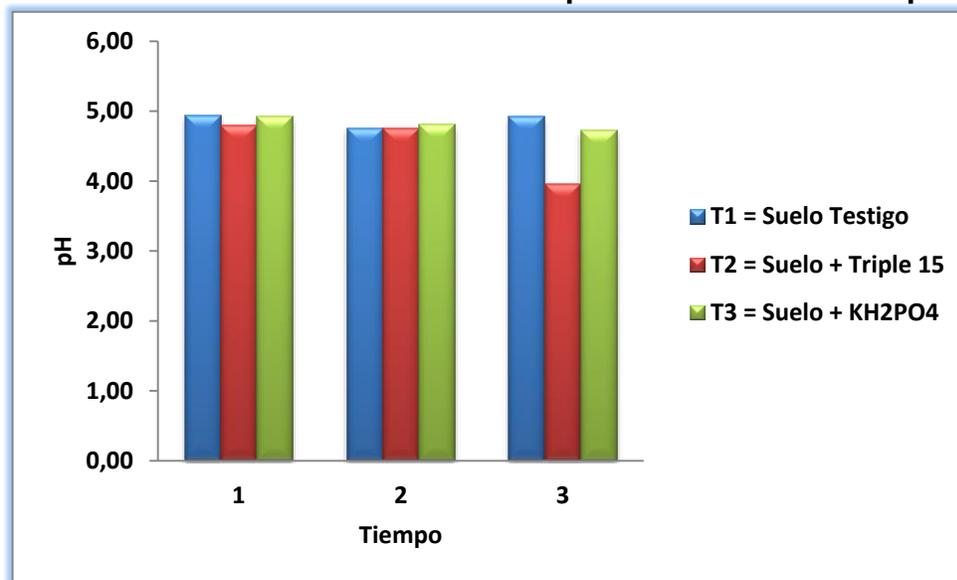
5.4.1 Efecto de la fertilización sobre el valor del pH en función del tiempo

Los resultados obtenidos para el pH se representan en la tabla 17 y figura 27.

Tabla 17. Efecto de la fertilización sobre el pH

Tratamiento	pH Tiempo 1	pH Tiempo 2	pH Tiempo 3
T1 = Suelo Testigo	4,94	4,76	4,93
T2 = Fertilizante Triple 15	4,79	4,75	3,96
T3 = Fertilizante KH ₂ PO ₄	4,93	4,82	4,73

Figura 27. Efecto de la fertilización sobre el pH en función del tiempo



Tiempo 1 = mes 0; Tiempo 2 = mes 1; Tiempo 3 = mes 2

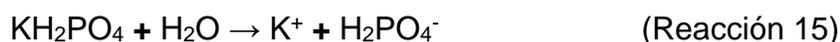
En la figura 27 y tabla 17, se observa el efecto causado por la fertilización fosfatada sobre el pH. En el **tiempo 1**, se aprecia una disminución significativa en el valor del pH solamente para el tratamiento T2, (Prueba de Duncan, tabla 13, anexo 2), posiblemente por el efecto del N aplicado con este fertilizante.

En el **tiempo 2**, la disminución del pH por parte de los fertilizantes no fue significativa, esto se verificó con la prueba de Duncan (tabla 13, anexo 2), donde la sig. = 0,065.

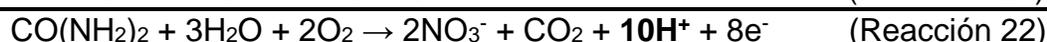
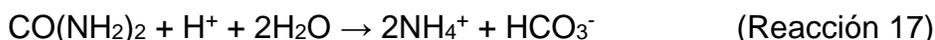
En el **tiempo 3**, se observa que el tratamiento T2 produce una disminución significativa del pH. Esto se aprecia en la prueba de Duncan (tabla 13, anexo 2). La baja de pH observada en este tiempo es causada por la lenta liberación de P disponible a la solución del suelo, en este caso originada por la fuente de P y la fuente de Nitrógeno provenientes del fertilizante Triple 15, como lo muestran las reacciones 15, 16 y 22. En este tiempo también se aprecia que el tratamiento T3 logra alcanzar el valor de pH inicial del suelo.

Analizando integradamente todos los datos de pH se podría deducir que a medida que transcurre el tiempo, al entrar en contacto con el suelo los dos fertilizantes liberan además del fósforo, iones H⁺ a su solución generando acidez y por esto disminución en el valor de pH. Esto se puede demostrar con las reacciones 15 -22

Acidez generada por fertilizantes fosfatados (Fosfato diácido de potasio).



Acidez generada por un fertilizante nitrogenado (Urea): *nitrificación del amoníaco*.



Analizando estadísticamente el conjunto de los resultados de pH teniendo como variable de agrupación el **tiempo**, éstos no se ajustaron a la normalidad (tabla 7, anexo 2), por esta razón se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis (**tabla 18**), en la cual se muestra que existen diferencias significativas (sig. = 0,001).

Tabla 18. Prueba de Kruskal-Wallis para pH en función del tiempo

	pH
Chi-cuadrado	14,989
gl	2
Sig. asintót.	,001

a Prueba de Kruskal-Wallis

b Variable de agrupación: Tiempo

La prueba de Tukey (**Tabla 19**), revela que el valor del pH disminuye significativamente en el tiempo 3, como se demostró anteriormente, comportamiento explicado por la acidificación causada los fertilizantes, debido a su continua y lenta solubilización y liberación de iones H^+ a la solución del suelo.

Tabla 19. Prueba de Tukey para pH en función del tiempo

Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
3	15	4,5380	
2	15		4,7753
1	15		4,8853
Sig.		1,000	,480

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 15,000.

Con respecto al **tratamiento** los valores de pH se ajustaron a la normalidad (tabla 8, anexo 2), La prueba de ANOVA (**tabla 20**) muestra que existen diferencias significativas (sig. = 0.000) en el tiempo del estudio.

Tabla 20. Prueba de ANOVA para pH en función del tratamiento

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
pH	Inter-grupos	1,240	2	,620	10,371	,000
	Intra-grupos	2,510	42	,060		
	Total	3,750	44			

La prueba de Duncan (**Tabla 21**), revela que el pH del tratamiento 2 presentó un pH significativamente inferior al de los tratamientos 1 y 2, siendo esta disminución más notoria en el tiempo 3, indicando una mayor acidificación del suelo por parte del triple 15 tras la liberación de P disponible a la solución del suelo.

Tabla 21. Prueba de Duncan para pH en función del tratamiento

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
2	15	4,5000	
3	15		4,8240
1	15		4,8747
Sig.		1,000	,573

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 15,000.

En la **tabla 22** se muestran las correlaciones de Rho de Spearman para el pH. Existe una correlación altamente significativa y negativa con el tiempo, lo que indica que al transcurrir el tiempo disminuye el valor del pH. Además, hay una correlación positiva entre el pH y la AFA, pero que no es significativa, lo que indica que tanto la disminución del pH como la disminución de la AFA son producidas por efecto de la aplicación de los fertilizantes fosfatados al suelo. Las correlaciones con el tratamiento, la AFA, P disponible, P orgánico, P total y MO no son significativas.

Tabla 22. Correlaciones de Rho de Spearman para pH

		Tiempo	Tratamiento	AFA	P disponible	P orgánico	P total	MO
pH	Coefficiente de correlación	-,526(**)	-,156	,594(**)	-,607(**)	-,419(**)	-,533(**)	-,125
	Sig. (bilateral)	,000	,305	,000	,000	,004	,000	,412
	N	45	45	45	45	45	45	45

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

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

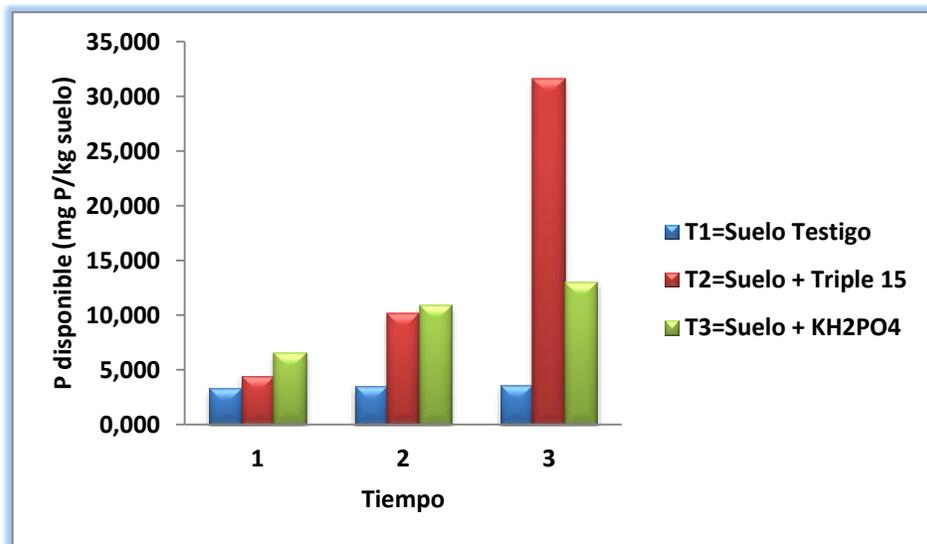
5.4.2 Efecto de la fertilización sobre el valor del P Disponible en función del tiempo

Los resultados obtenidos para P disponible se representan en la tabla 23 y figura 28.

Tabla 23. Efecto de la fertilización sobre el P Disponible

Tratamiento	P disponible Tiempo 1	P disponible Tiempo 2	P disponible Tiempo 3
T1 = Suelo Testigo	3,318	3,561	3,584
T2 = Fertilizante Triple 15	4,477	10,181	31,652
T3 = Fertilizante KH ₂ PO ₄	6,560	10,950	13,024

Figura 28. Efecto de la fertilización sobre el valor del P Disponible en función del tiempo



Tiempo 1 = mes 0; Tiempo 2 = mes 1; Tiempo 3 = mes 2

El contenido fósforo disponible se observa en la figura 28, en el **tiempo 1** (momento de la aplicación) se genera un incremento por parte del fertilizante Triple 15 del 35% mientras que el KH_2PO_4 lo incrementa tres veces más, en un 97%, indicando un apreciable grado de solubilización de los fertilizantes, predominando la de este último, desde el inicio de su aplicación. Sin embargo, la prueba estadística de Duncan en este tiempo indica que el incremento por parte del triple 15 (T2) no es significativo (sig. = 0.069) (anexo 14, tabla 2), pero sí lo es el del tratamiento 3.

En el **tiempo 2**, el incremento generado por el Tratamiento T2 es del 186%, mientras que el del T3 corresponde a un 207%. Estos incrementos a su vez son superiores a los generados en el tiempo 1, indicando que la solubilización de ellos es progresiva, proceso adecuado para este tipo de suelos que tienen la capacidad de alta fijación de P. De acuerdo a la prueba estadística de Duncan, en este tiempo, el incremento de parte de ambos fertilizantes es altamente significativo, sin existir diferencia entre ellos dos (sig. = 0.636) (tabla 14, anexo 2).

El incremento del P disponible en el **tiempo 3**, por el tratamiento 2 corresponde a un 783%, atribuible a la solubilización total del fertilizante Triple 15, Mientras que el incremento por parte del tratamiento T3, fue del 263%, tres veces menos que el generado por el triple 15. La prueba estadística de Duncan (tabla 14, anexo 2) en este caso confirma que el efecto producido por el fertilizante triple 15 es significativamente superior al producido por el fosfato de Potasio. Este comportamiento indica que la solubilización del Triple 15 es más lenta siendo éste fertilizante de lenta liberación, comparado con el Fosfato de Potasio. Se denota

que con el Triple 15 se logra el valor óptimo cercano a 30 ppm y que para su solubilización total se necesita en las condiciones de este suelo, un tiempo de dos meses, mientras que con el fertilizante Fosfatado aún cuando es más soluble no se alcanza el valor óptimo, fenómeno atribuible a la extremada acidez producida por éste, alcanzado un valor de pH inferior a 4, en el cual se aumenta la capacidad de intercambio aniónico y de esta manera el P es fuertemente fijado, también puede precipitarse como fosfatos de hierro y aluminio. Estudios similares se han realizado en el departamento del Cauca mostrando como la fertilización fosfatada incrementa los índices de P disponible en el suelo, pero a su vez disminuyen considerablemente el valor del pH [80].

El tratamiento estadístico para el conjunto de los datos de P disponible, iniciado con las pruebas de normalidad muestra que estos valores con respecto al **tiempo** se ajustan a la normalidad (tabla 7, anexo 2). Con la prueba de ANOVA (**tabla 24**) se observan diferencias significativas (sig. = 0,001).

Tabla 24. Prueba de ANOVA para P disponible en función del tiempo

P disponible	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	1006,573	2	503,287	8,500	,001
Intra-grupos	2486,796	42	59,209		
Total	3493,370	44			

La prueba de Duncan (**tabla 25**) demuestra que el valor de P disponible en tiempo 3, es significativamente superior al de los tiempos 2 y 1 respectivamente, corroborando como se dijo anteriormente la lenta liberación por parte de los dos fertilizantes, lo cual es ventajoso debido a que se impide su rápida adsorción en la fase coloidal.

Tabla 25. Prueba de Duncan para P disponible en función del tiempo

Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
1	15	4,78487	
2	15	8,23080	
3	15		16,08653
Sig.		,227	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 15,000.

Considerando como variable de agrupación el **tratamiento**, los valores de P disponible se ajustaron a la normalidad (tabla 8, anexo 2) y la prueba de ANOVA

(tabla 26) muestra diferencias altamente significativas (sig. = 0,000) para los diferentes tratamientos.

Tabla 26. Prueba de ANOVA para P disponible en función del tratamiento

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
P disponible	Inter-grupos	1075,924	2	537,962	9,346	,000
	Intra-grupos	2417,445	42	57,558		
	Total	3493,370	44			

De acuerdo a la prueba de Duncan (tabla 27), se observa que los valores de P de los tratamientos 2 y 3 correspondientes a la aplicación de fertilizantes son significativamente superiores a los del suelo testigo (T1), corroborando el aporte de P de parte de ellos.

Tabla 27. Prueba de Duncan para P disponible en función del tratamiento

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
1	15	3,48780	
3	15		10,17780
2	15		15,43660
Sig.		1,000	,065

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 15,000.

Aplicando la prueba de correlación de Pearson a estos datos, (tabla 28), se observa que existe una correlación altamente significativa y positiva con: el tiempo, el P orgánico y el P total, confirmando que al transcurrir el tiempo se incrementa el contenido de P disponible por el aporte de los fertilizantes y de esta manera el contenido de P total. La correlación altamente significativa y positiva del P disponible con el P orgánico se puede explicar porque al aumentar el P disponible, no es necesaria la mineralización de P orgánico. Además esto se comprueba con la correlación altamente significativa y negativa del P disponible con la AFA, ya que cuando se incrementa el P disponible se disminuye la AFA, y por lo tanto no se disminuye el valor de P orgánico.

Tabla 28. Correlaciones de Pearson para P disponible

		Tiempo	Tratamiento	AFA	pH	P orgánico	P total	MO
P disponible	Correlación de Pearson	,524(**)	,310(*)	-,782(**)	-,895(**)	,667(**)	,876(**)	,182
	Sig. (bilateral)	,000	,038	,000	,000	,000	,000	,232
	N	45	45	45	45	45	45	45

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

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

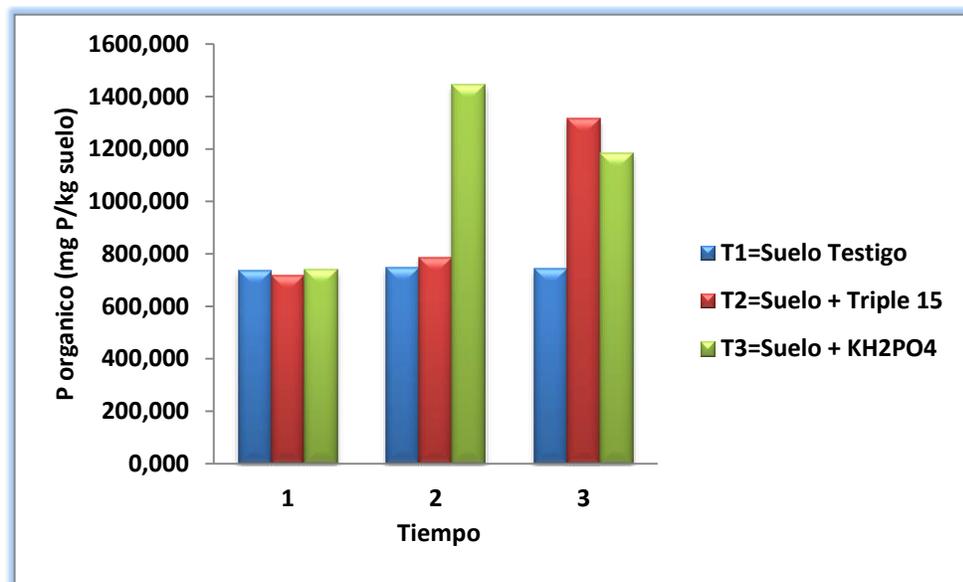
5.4.3 Efecto de la fertilización sobre el valor del P Orgánico en función del tiempo

Los resultados obtenidos para P orgánico se representan en la tabla 29 y figura 29.

Tabla 29. Efecto de la fertilización sobre el P Orgánico

Tratamiento	P orgánico Tiempo 1	P orgánico Tiempo 2	P orgánico Tiempo 3
T1 = Suelo Testigo	737,400	749,795	743,597
T2 = Fertilizante Triple 15	717,420	787,302	1315,504
T3 = Fertilizante KH_2PO_4	740,985	1443,993	1185,309

Figura 29. Efecto de la fertilización sobre el valor del P Orgánico en función del tiempo



Tiempo 1 = mes 0; Tiempo 2 = mes 1; Tiempo 3 = mes 2

En la figura 29 y tabla 29 se puede observar que en el momento de la aplicación **Tiempo 1**, los fertilizantes no producen cambios apreciables en el contenido de P orgánico, como era de esperarse. Esta afirmación se corrobora aplicando la prueba estadística de Duncan (Tabla 15, anexo 2).

En el **tiempo 2**, (un mes después de la aplicación de los fertilizantes), el triple 15 (tratamiento T2), genera un incremento del 5% en el contenido de P orgánico, sin embargo el análisis estadístico, Prueba de Duncan (Tabla 15, anexo 2), muestra que esta diferencia no es significativa, indicando que tampoco existe efecto de este fertilizante sobre el contenido de P orgánico en el tiempo 2. En cambio, el fertilizante fosfatado de Potasio (T3) produce un incremento del 92.5% en el contenido de esta fracción de P, siendo su aporte altamente significativo como se puede comprobar mediante el análisis estadístico Prueba de Duncan, que muestra una diferencia altamente significativa con los otros tratamientos. Este incremento se podría atribuir a que parte del P aportado a la solución del suelo la aprovechan los microorganismos para su neosíntesis incrementando así la masa microbiana y de esta manera el P orgánico.

En el **tiempo 3**, se observan aportes apreciables por parte de los dos fertilizantes al P orgánico, de tal manera que el Triple 15 (T2), incrementa su contenido en un 76% y el otro fertilizante (T3) lo incrementa en un 59%. El tratamiento estadístico, prueba de Duncan (tabla 15, anexo 2), confirma este aporte, ya que los contenidos de P orgánico en estos dos tratamientos son significativamente superiores al del testigo (T1). Sin embargo, muestra que no existe diferencia en el aporte hecho por ellos dos (Sig. =0.099).

Este aumento del P orgánico durante todo el tiempo del estudio, posiblemente está relacionado con la disminución del valor del AFA en función del tiempo, ya que la adición de fertilizante suministra el P necesario para el metabolismo de los microorganismos, sin ser necesaria la mineralización del P orgánico por parte de la FA. Además se puede atribuir como se manifestó anteriormente, al aumento del P disponible, siendo asimilado por los microorganismos e incorporado a su propio metabolismo, de esta manera aumenta la concentración del P orgánico. Resultados similares reportan un incremento hasta del 50% del P orgánico en muestras de suelo fertilizadas con fosfatos inorgánicos, indicando que parte de este fósforo pudo pasar a formas orgánicas por la absorción por parte de los cultivos, e incorporarse como residuos y raíces, o inmovilizarse por los microorganismos del suelo; además concluyen que el empleo de fertilizantes fosfatados influye en mantener e incrementar los reservorios de P orgánico y el P total del suelo fertilizado respecto a las situaciones naturales [85].

Analizando estadísticamente el conjunto de los resultados de P orgánico teniendo como variable de agrupación el **tiempo**, éstos no se ajustaron a la normalidad (tabla 7, anexo 2), por esta razón se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis (tabla 30), en la cual se muestra que existen diferencias significativas (sig. = 0,014).

Tabla 30. Prueba de Kruskal-Wallis para P orgánico en función del tiempo

	P orgánico
Chi-cuadrado	8,489
gl	2
Sig. asintót.	,014

a Prueba de Kruskal-Wallis

b Variable de agrupación: tiempo

La prueba de Tukey (Tabla 31), revela que el contenido de P orgánico se incrementa significativamente en los tiempos 2 y 3 como se demostró anteriormente, sin existir diferencia entre ellos dos.

Tabla 31. Prueba de Tukey para P orgánico en función del tiempo

Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
1	15	731,93533	
2	15		993,69687
3	15		1081,47033
Sig.		1,000	,641

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

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 15,000.

Teniendo como variable de agrupación el **tratamiento**, la prueba de ANOVA (tabla 32), muestra que existen diferencias altamente significativas para los valores de P orgánico.

Tabla 32. Prueba de ANOVA para P orgánico en función del tratamiento

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
P orgánico	Inter-grupos	1082472,468	2	541236,234	7,904	,001
	Intra-grupos	2875958,406	42	68475,200		
	Total	3958430,874	44			

La prueba de Duncan (tabla 33) para esta misma variable, confirma nuevamente el incremento significativo en el contenido de P orgánico en los suelos fertilizados.

Tabla 33. Prueba de Duncan para P orgánico en función del tratamiento

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
1	15	743,59753	
2	15		940,07560
3	15		1123,42940
Sig.		1,000	,062

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

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 15,000.

Aplicando la correlación de Pearson a estos resultados, (tabla 34), se observa una correlación altamente significativa y positiva entre el P orgánico y el tiempo, corroborando que al aumentar el tiempo aumenta el P orgánico. También se puede observar una correlación altamente significativa y positiva entre el P orgánico y las otras fracciones de fósforo. Además existe una correlación altamente significativa y negativa con la AFA, demostrando que al disminuir la AFA aumenta el P orgánico, lo cual es causado por la aplicación de fertilizantes fosfatados, que incrementan el contenido de fósforo en el suelo y afectan de forma directa la AFA como se mencionó anteriormente. También se observa una correlación negativa con el pH pero no es significativa.

Tabla 34. Correlaciones de Pearson para P orgánico

		Tiempo	Tratamiento	AFA	pH	P disponible	P total	MO
P orgánico	Correlación de Pearson	,481(**)	,523(**)	-,760(**)	-,496(**)	,667(**)	,818(**)	,104
	Sig. (bilateral)	,001	,000	,000	,143	,000	,000	,496
	N	45	45	45	45	45	45	45

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

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

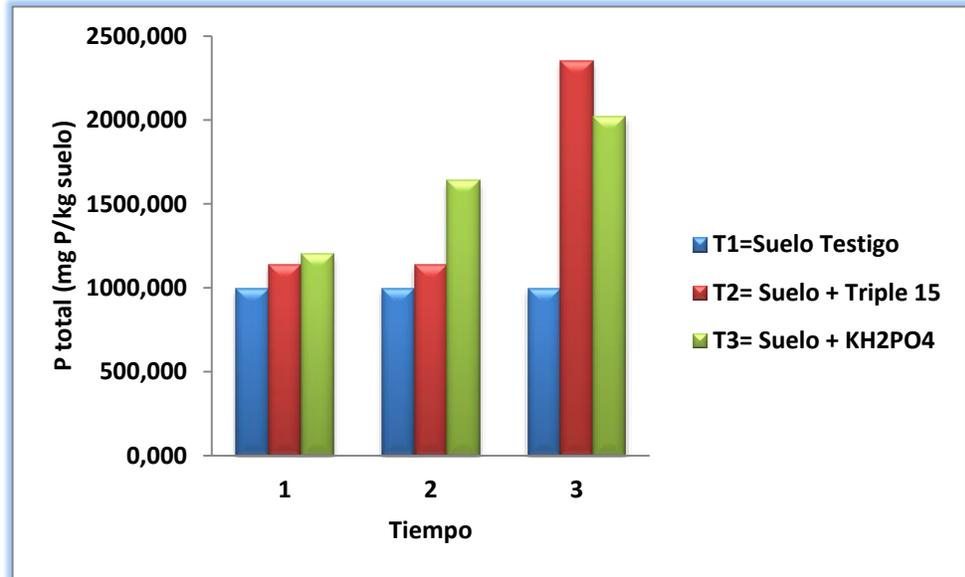
5.4.4 Efecto de la fertilización sobre el valor del P total en función del tiempo

Los resultados obtenidos para P total se representan en la tabla 35 y figura 30.

Tabla 35. Efecto de la fertilización sobre el P total

Tratamiento	P total Tiempo 1	P total Tiempo 2	P total Tiempo 3
T1 = Suelo Testigo	992,399	994,457	993,428
T2 = Fertilizante Triple 15	1140,058	1136,750	2350,047
T3 = Fertilizante KH₂PO₄	1200,721	1641,506	2018,332

Figura 30. Efecto de la fertilización sobre el valor del P total en función del tiempo



Tiempo 1 = mes 0; Tiempo 2 = mes 1; Tiempo 3 = mes 2

En la figura 30 y tabla 35, se puede observar el efecto que ejerce la fertilización sobre el contenido de P total en la muestra de suelo. En el **tiempo 1**, se observa que los fertilizantes Triple 15 (T2) y fosfato de potasio (T3) hacen un aporte en el contenido de de P total al suelo, comprendido entre un 15 % y 21% respectivamente, La prueba de Duncan (Tabla 16, anexo 2) muestra que dicho aporte es significativo, pero que el incremento por parte de los dos fertilizantes no es significativamente diferente. Este incremento se atribuye lógicamente al aporte de P disponible por parte de estos fertilizantes.

En el **tiempo 2**, el incremento del P total por parte del Triple 15 (T2) es del 14%, pero la prueba de Duncan muestra que este incremento no es significativo, ya que no difiere significativamente del suelo testigo (T1). Aun cuando este tratamiento produjo incremento de P disponible, no se incrementó en este tiempo ni el P Orgánico ni el total, indicando, que los microorganismo no utilizaron el P liberado por este fertilizante. El incremento lo hace en cambio el tratamiento T3 (fertilizante fosfatado) en un 65%, el cual sí es significativo de acuerdo a la prueba de Duncan (tabla 16, anexo 2), obedeciendo al incremento tanto del P disponible como del P orgánico.

Por último en **el tiempo 3**, se aprecia un incremento en el contenido de P total de parte de los fertilizantes, tratamientos T2 y T3, notándose un mayor aumento para el tratamiento T2. La prueba de Duncan (tabla 16, anexo 2) muestra que efectivamente el incremento es significativo en ambos casos. Este incremento está relacionado de manera directa con el aporte de P a la solución del suelo.

Analizando estadísticamente el conjunto de los valores de P total con respecto al **tiempo**, la prueba de Kruskal-Wallis (tabla 36), indica que hay diferencias significativas para los valores de P total en función del tiempo (sig. = 0,034).

Tabla 36. Prueba de Kruskal -Wallis para P total en función del tiempo

	P total
Chi-cuadrado	6,749
gl	2
Sig. asintót.	,034

a Prueba de Kruskal-Wallis

b Variable de agrupación: tiempo

La prueba de Tukey (tabla 37) muestra que el incremento significativo del P total está únicamente en el tiempo 3. Este aumento en función del tiempo se atribuye a la alta disponibilidad de fósforo tras la aplicación de los fertilizantes que aumentan las demás fracciones de P al pasar el tiempo.

Tabla 37. Prueba de Tukey para P total en función del tiempo

Tiempo	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
1	15	1111,05940	
2	15	1257,57100	
3	15		1787,26940
Sig.		,584	1,000

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

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 15,000.

Considerando como variable de agrupación la variable **tratamiento**, la prueba de ANOVA (tabla 38), muestra que existen diferencias significativas entre los valores de P total en función del tratamiento.

Tabla 38. Prueba de ANOVA para P total en función del tratamiento

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
P total	Inter-grupos	3500694,730	2	1750347,365	10,326	,000
	Intra-grupos	7119075,499	42	169501,798		
	Total	10619770,230	44			

La prueba de Duncan tabla 39 muestra efectivamente los tratamientos T2 y T3 incrementan significativamente el contenido de P total, pero no existe diferencia significativa entre el incremento por parte de ellos dos como se describió anteriormente.

Tabla 39. Prueba de Duncan para P total en función del tratamiento

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
1	15	993,42807	
2	15		1542,28520
3	15		1620,18653
Sig.		1,000	,607

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

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 15,000.

La tabla 40, muestra las correlaciones de Pearson para P total. Se observa una correlación altamente significativa y positiva entre el P total, con el tiempo, el tratamiento, el P disponible y el P orgánico, indicando que la aplicación de fertilizante fosfatado al pasar el tiempo, aumenta de forma directa el contenido de P disponible que hace que se aumente el P orgánico y total, disminuyendo de forma altamente significativa el valor de la AFA por el alto contenido de P en el medio, que también se ve afectado por la acidificación producida por la continua solubilización de los fertilizantes en el suelo.

Tabla 40. Correlaciones de Pearson para P total

		Tiempo	Tratamiento	AFA	pH	P disponible	P orgánico	MO
P total	Correlación de Pearson	,568(**)	,527(**)	-,886(**)	-,751(**)	,876(**)	,818(**)	,284
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,026	,000	,000	,059
	N	45	45	45	45	45	45	45

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

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

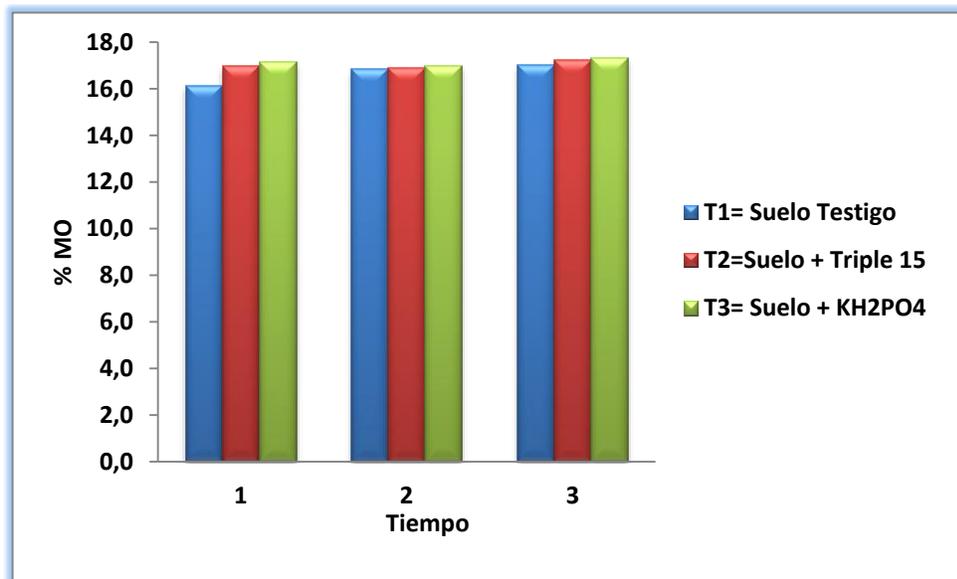
5.4.5 Efecto de la fertilización sobre el valor de la MO en función del tiempo

Los resultados obtenidos para MO se representan en la tabla 41 y figura 31.

Tabla 41. Efecto de la fertilización sobre la Materia Orgánica

Tratamiento	MO Tiempo 1	MO Tiempo 2	MO Tiempo 3
T1 = Suelo Testigo	16,147	16,843	17,026
T2 = Fertilizante Triple 15	16,968	16,897	17,251
T3 = Fertilizante KH ₂ PO ₄	17,164	16,987	17,338

Figura 31. Efecto de la fertilización sobre el valor de la MO en función del tiempo



Tiempo 1 = mes 0; Tiempo 2 = mes 1; Tiempo 3 = mes 2

En la figura 31 y tabla 41 se puede observar el efecto que ejerce la fertilización sobre el contenido de MO en la muestra de suelo. Durante el transcurso del estudio se observa claramente que el contenido de MO se mantiene constante, con pequeños incrementos y disminuciones que no son significativos, como se deduce del análisis estadístico mediante la prueba de ANOVA (Tabla 42), Como era de esperarse, ya que a corto plazo el contenido de MO no cambia y esto se ve reflejado en los resultados obtenidos para este parámetro importante para la calidad del suelo.

Tabla 42. Prueba de ANOVA para MO en función del tiempo y del tratamiento

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
MO tiempo	Inter-grupos	1,543	2	,772	,984	,382
	Intra-grupos	32,938	42	,784		
	Total	34,481	44			
MO tratamiento	Inter-grupos	1,958	2	,979	1,264	,293
	Intra-grupos	32,523	42	,774		
	Total	34,481	44			

Observando las correlaciones de Pearson para MO (tabla 43), estas no son significativas en ningún caso, con los demás parámetros, indicando que su variación es muy pequeña y se mantiene constante durante todo el tiempo de análisis.

Tabla 43. Correlaciones de Pearson para MO

		Tiempo	Tratamiento	AFA	pH	P disponible	P orgánico	P total
MO	Correlación de Pearson	,208	,229	-,246	-,140	,182	,104	,284
	Sig. (bilateral)	,171	,130	,103	,376	,232	,496	,059
	N	45	45	45	45	45	45	45

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

* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

6. CONCLUSIONES

- El suelo estudiado es de carácter fuertemente ácido, atribuible principalmente al H^+ y especies de Al no intercambiables demostrado por el alto valor de la acidez titulable. Presenta alto contenido de nitrógeno, con fuerte deficiencia de nutrientes principalmente P, bases de cambio y microelementos. Su relación C/N muestra un proceso de lenta mineralización. Además de presentar altos contenidos de MO que explican su alta CIC.
- El fraccionamiento de la materia orgánica muestra que la MOH es mayor al 50%, y aún cuando este valor es alto, únicamente un 44,46% del peso total obtenido de MOH está bajo condiciones de humificación adecuadas como lo muestra el índice HR, indicando que los procesos de humificación son lentos, lo cual conlleva a un contenido de sustancias húmicas bajo, con bajos grados de complejidad.
- Las condiciones de baja humificación de la MO del suelo, muestran también un bajo contenido de AH y FF, que a su vez muestran un bajo grado de condensación de los AH, además de los bajos porcentajes de carbono que presentan estas sustancias húmicas presentes en el suelo estudiado.
- La fertilización con Triple 15 y KH_2PO_4 afecta de manera progresiva y significativa la AFA, efecto denotado por la disminución de su valor desde su aplicación entre un 12 y 15 %, un mes después entre un 28 y 37% , llegando dos meses después a una disminución comprendida entre un 53% y 56% respectivamente. Este efecto está estrechamente y significativamente relacionado con la disminución del valor del pH, afectando así la calidad y condiciones ambientales del suelo.
- La fertilización fosfatada causa una disminución significativa del pH, siendo más notoria al inicio y al final del estudio para el fertilizante triple 15, atribuible a su reacción ácida, afectando la actividad catalítica de FA.
- La aplicación de fertilizantes fosfatados Triple 15 y KH_2PO_4 además tiene repercusión sobre el contenido de P disponible, incrementando su valor

entre un 35% y 783% y entre 97% y 263% respectivamente en el tiempo de estudio. Efecto beneficioso para las plantas, pero que con el paso del tiempo causa graves problemas de acidez en el suelo.

- Los fertilizantes aplicados incrementan además el P orgánico, en un 76%, por parte del triple 15, y entre un 59% y 93% por parte del KH_2PO_4 . Incremento atribuible probablemente a la incorporación del P disponible por los microorganismos a su metabolismo con una alta inmovilización de P y proliferación de los mismos.
- También se observa efecto sobre el P total, los dos fertilizantes aplicados aumentaron su contenido, notándose un incremento para el triple 15 entre un 15% y 136% y para el KH_2PO_4 entre un 21% y 103% durante los tres tiempos de estudio.
- Aún cuando el suelo estudiado presenta un alto contenido de MO, se observan cambios en el valor de pH por acción de los fertilizantes aplicados, efecto que se puede acentuar con su continua y repetida aplicación. La falta de efecto tampón podría correlacionarse con el lento y bajo grado de humificación de la MO.
- No se observaron diferencias significativas con el paso del tiempo tras la fertilización en el contenido de MO, comportamiento que era de esperarse ya que en estudios realizados a corto plazo el valor de la MO permanece constante.
- Se observó que los fertilizantes utilizados afectaron no solo el pH del suelo, sino que de esta manera se conlleva a un más bajo grado de humificación de la MO implicando pérdida de nutrientes por lavado y adsorción.

BIBLIOGRAFÍA

1. BRAVO, I., MARTÍNEZ, L., POTOSÍ, S. (2007). Fraccionamiento del Fósforo y correlación con la materia orgánica en dos suelos del departamento del Cauca. *Suelos Ecuatoriales Revista de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo*. Volumen 37 No.2, pp 147-154. Bogotá, Colombia ISSN 0562-5351
2. VELASCO, W; MONTOYA S, J; BRAVO, I; MENJIVAR, J. (2008). Relación de diferentes formas de Fósforo con la materia orgánica Del suelo en dos Andisoles bajo Diferentes sistemas de cultivo. *Memorias En XIV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo "Manejo del Suelo para la Mitigación del Cambio Climático"* Villavicencio.
3. MALAGON. C, Dimas. PULIDO.R, Carlos. (1995). *Suelos de Colombia, origen, evolución, clasificación*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. pp 289-326
4. ESPINOSA, J. (2008). Distribución, uso y manejo de los suelos de la región Andina. *Memorias del XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*. Quito, Ecuador.
5. <http://www.cafedecolombia.com>. Accesado lunes 10 de mayo de 2010.
6. <http://cenicafe.org>. *Unidades de Suelos. Características de los Suelos de la Zona Cafetera y su origen*. Accesado miércoles 27 de Enero de 2010.
7. ARSHAD, M.A. y COEN, G.M. (1992). Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *American J. of Alternative Agriculture* 7: 25-31.
8. SANCHES J., V. (2009). *Fertilidad del suelo y nutrición mineral de plantas; conceptos básicos*. FERTITEC. S.A.
9. LEÓN, L.A. (2001). Evaluación de la fertilidad del suelo. In *Fertilidad de suelos: diagnóstico y control*, 2º ed. por F.S.Silva, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Colombia. p. 155-183.
10. FAO e IFA. (2002). *LOS FERTILIZANTES Y SU USO*. Cuarta edición, Resisada, Roma.

11. ARCILA P., FARFAN F., MORENO A., SALAZAR F., HINCAPIE E. (2007). Sistemas de producción de café en Colombia. Federación Nacional de Cafeteros. Cenicafé.
12. <http://www.contaminacion-ambiente.blogspot.com/>. Accesado el viernes 2 de octubre de 2009.
13. <http://www.mural.uv.es/marfuba/contaminacion.ppt>. Accesado lunes 10 de mayo de 2010.
14. <http://www.paginasprodigy.com/kakao/CONTAMINACIÓNDELSUELO.ppt>. Accesado lunes 10 de mayo de 2010.
15. ALBERT, A., LILIA. (1995). Contaminación ambiental. Origen, clases, fuentes y efectos. Sociedad mexicana de toxicología. Centro d ecología y desarrollo, A.C., México, DF.
16. <http://www.Polucionhuelva.blogspot.com>. Accesado el lunes 10 de mayo de 2010.
17. CARVALHO, F. ZHONG, N., TAVAREZ Y KLAINE S. (1998). Rastreo de plaguicidas en los trópicos. Boletín del OEIA No 40.
18. HENDI, EJ Y PEAKE, BM. (1996). Organochlorine pesticides in a dated sediment core from Mapua, Waiwea Inlet, New Zeland. Marine Pollution Bulletin. 32:10 751-754. New Zeland.
19. DUA, VK., PANT, CS. y SHARMA, VP. (1996). Determination of level of HCH and DDT in soil, water, and whole blood from bioenvironmental and insecticide sprayed areas of malaria control. Indian Journal of Malariology. 33:1 7-15 India.
20. http://www.miliarium.com/Proyectos/SuelosContaminados/Manuales/Contaminación_fertilizantes.asp, accesado el viernes 2 de octubre de 2009.
21. http://www3.uva.es/cc_agrof/eq8P.doc, el Fosforo, accesado sábado 10 de octubre de 2009.
22. NAVARRO BLAYA y NAVARRO GARCÍA. (1984). El suelo y los elementos esenciales para la vida vegetal” de Editorial Academia S.A. León .Ed.
23. GARAVITO, F. (1974). Propiedades Químicas de los Suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Vol 10. No 11. Bogotá.

24. GIRALDO, E. (2002). Agroquímica: Un Estudio de los Nutrientes Esenciales en la Producción Agrícola. Universidad del Cauca. Popayán.
25. FASSBENDER, H., and BOMEMISZA, E. (1987). Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina. Costa Rica. pp. 7, 11 y 121-124.
26. TSAI, S.M. y ROSSETTO R. (1992). Transformacoes microbianas do fósforo. In Microbiologia do Solo. Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo. Campinas, Brasil.
27. ROBERT, M. (2002). Captura de Carbono en los suelos para un mejor manejo de la Tierra. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. pp 37-39.
28. MARTINEZ, L., POTOSÍ, S. (2005). Fraccionamiento de Fosforo y su Correlación con la Materia Orgánica y otras Propiedades de los suelos del Departamento del Cauca. Trabajo de grado (Químico).Universidad del Cauca. Popayán.
29. STEVENSON, F.J. (1986). *Cycles of soil (carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients)*. John Wiley and Sons, New York. pp 231 – 28.
30. ŠARAPATKA, B. (2003). Phosphatase activities (ACP, ALP) in agroecosystem soils. Department of Ecology and Crop Production Science Uppsala. Sueciae. Doctoral thesis. Universitatis Agriculturae Sueciae.
31. HARRISON, A.F. (1987). *Soils organic phosphorus*. C.A.B. International United Kingdom. pp 257
32. NAVARRO BLAYA y NAVARRO GARCÍA. (1984). El suelo y los elementos esenciales para la vida vegetal” de Editorial Academia S.A. León .Ed. de
33. JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. (1981). Microbial biomass in soils: measurement and turnover. *En: E. A. Paul & J. N. Ladd (eds.), Soil Biochemistry Vol. 5*. Marcel Dekker, New York. pp 415-417.
34. GALLARDO. L. JUAN. (2006). Mineralización y Humificación de la Materia Orgánica del suelo: Consecuencias sobre la contaminación. X Congreso de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp. 142-152.
35. SHIBU.M.E, LEFFELAAR.P.A, and VAN KEULEN.H. (2006). Quantitative description of soil organic matter dynamics- A review of approaches with reference to rice- based cropping systems. *Geoderma*. 137: 1-18.

36. DATTARI. (2004). La Importancia De La Materia Orgánica En El Suelo. Revista Terralia. Julio.
37. PICCOLO, A. (2001). The Supramolecular Structure of Humic Substances. Soil Science. 166: 810-832.
38. COLOMBO, S. M, SANTOS, L. B. O, MASINI, J. C. (2007). Propriedades Acido-Base e de Complexação de Acidos Húmico e Fúlvico isolados de Vermicomposto. Química Nova, v. 30, pp. 1261-1266.
39. OSTERBERG, R., LINDOVIST .I.K. (1993). Particle Size of Humic Acid. Soil Science Society of America. 57: 283-285.
40. STEVENSON, F. (1985). Cycles of Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. New York, USA: A Wiley-Interscience publication, pp.1-42.
41. BREEMEN. N, BUURMAN. P. (2002). Soil Formation. Laboratory of Soil Science and Geology. Kluwer Academic Publishers, 2ªed. New York, Dordrecht. pp 95-100.
42. PANKHURST, C. E. (1997). Biodiversity of soils organisms as an indicator of soil health. In: C. E. Pankhurst & B. M. Doube, V. V. S. R. Gupta (eds.), biological indicators of soil health. Chap 12. CAB in., U.K.
43. BLUM, W. E. H. (1998). Problems of soil conservation. Council of Europe, Strasbourg. Nature and Environmental. Series 39: 62.
44. VANHALA, P; KAPANEN A; FRITZE, H; MAARIT NIEMI, R. (1988). Microbial Activity and biomass in four finnish couniferous forest soils – spatial variability and effect of heavy metals. Boreal environmetal research 3: 287-295.
45. BROOKES, P. C. (1985). Microbial Biomass and activity measurements in soil. J. Sc. Food Agric. 36: 269-271.
46. NANNIPIERI, P. C. (1994). The potencial use of soil enzymes as indicators of productivity, sutainability and pollution. In: C. E. Pankhurst, B. M. Doube, VVSR. Grupa & P. R. Grace (eds.). Soil Biota: Management in sustainable farming systems. Commonwealth Scientific Investigation Research Organization, Adelaide. CSIRO, Aust.
47. ACUÑA. O., *et al.* (2006). Importancia de los microorganismos en la calidad y salud de los suelos. Centro de investigaciones agronómicas, laboratorio de bioquímica, Universidad de costa rica, San Jose de Costa Rica.

48. DUCHAFOUR, Ph. (1984). Edafología: I: Edafogénesis y clasificación. Versión española por T. Carballas (CSIS). T-Masson ed., Barcelona.
49. DORAN, J. W; PARKIN, T. V. (1994). Defining and assessing soil quality. In: J. Doran, D. Coleman, D. Bezdisek & B. Stewart, SSA Sp. Pub. 35, Madison.
50. ANDERSON, J.; DOMSCH, K. H. (1980). Quantities of plant nutrients in the microbial biomass in the selected soil. *Soil Science* 130: 211-216.
51. GARCÍA, C.; HERNÁNDEZ, M. T. (2000). Investigación y perspectivas de la enzimología de suelos en España. C.S.I.C., Murcia.
52. ALEF, K; NANNIPIERI, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Acad. Press. London.
53. GARCÍA, C; GIL-SOTRES, F; HERNANDEZ, T; TRASAR-CEPEDA, C. (2003). Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: medidas de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. Mundi-Prensa. Madrid. 371p.
54. PEÑA, W. (2004). Los suelos desarrollados sobre serpentinitas y su relación con la flora endémica. Tesis doctoral, Universidad Santiago de Compostela. España. 404p.
55. ANDERSON, T-H; DOMSCH, K. H. (1993). The metabolic quotient for CO₂ (q_{CO_2}) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Short Communication, Soil Biology and Biochemistry* 25 (3): 393-395.
56. ANDERSON, J. P; DOMSCH, K. H. (1985). Determination of ecophysiological maintenance carbón requeriments of soil microorganisms in a dormant state. *Biology and Fertility of soils* 1: 81 – 89.
57. <http://www.laverdad.es/alicante/20081115/sociedad-murcia/enzimas-suelo-importancia-20081115.html>, Accesado el sábado 10 de octubre de 2009.
58. GARCÍA IZQUIERDO, C. (2003). Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos, Edición Ilustrada, Mundi prensa libros. 371p.
59. CASIDA, I. E. (1977). Microbial metabolic activity in soil as measured by dehidrogenasa determinations. *Appl. Environ. Microbiol.* 34: 630-636.

60. FRANKENBERGER, W.T. AND W.A. DICK. (1983). Relationships between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soils: Method of assay. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:282-287.
61. ZELLES, L., QY BAI, T. BECK AND F. BEESE. (1992). Signature fatty acids in phospholipids and lipopolysaccharides as indicator of microbial biomass and community structure in agricultural soils. *Soil. Biol. Biochem.* 24:317-323.
62. STEUBING, L. GODOY, R. ALBERDI, M. (2002). Métodos de ecología vegetal, Colección Textos universitarios, Editorial Universitaria S.A. Santiago de Chile. 345pp.
63. GÓMEZ-GUIÑAN, Y. (2004). Actividad de las fosfatasas Ácidas y alcalinas (extracelulares e intracelulares) en hongos de la rizosfera de *Arachis hypogaea* (Papilionaceae). *Rev Biol Trop* 52(1): 287-295.
64. TABATABAI. M. (1982). Soil enzymes. In: Page, A.L.; Millar, R.H.; Kennedy. D.R. (Ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological properties.* pp. 937-940.
65. <http://es.wikipedia.org/wiki/Fosfatasa>, accesado el sábado 10 de octubre de 2009.
66. TABATABAI, MA. (1994). Soil enzymes. *Methods of Soil Analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties.* Ed. A. Klute. Second Edition. SSSA, Madison. pp. 788-826.
67. DICK, R.P. (1992). Long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. *Agric. Ecosyst. Environ.* 40:25-36.
68. FINCH, ARNOLD. (1988). *Fertilizantes y fertilización.* Editorial Reverte. S.A. Barcelona. España. 439p.
69. TRASAR, C.; GIL SOTRES, F. y LEIROS, M. (2003). Determinación de la actividad fosfatasa del suelo. Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos. Madrid: Mundi-prensa. pp 52-76.
70. BRAVO, I. y GIRALDO, E. (2003). *Manual de prácticas de química agrícola: Análisis de suelos.* Departamento de Química: Universidad del Cauca. Popayán.
71. BRAVO I. VALENCIA A. (2008). Implementación y Validación de un método Colorimétrico para la Determinación de MO en suelos. Informe de Actividades Proyecto ID 2282 Colciencias Unicauca, Popayán.

72. MORENO M., SUAREZ M. (2009.) 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. Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. Popayán.
73. MOSQUERA C. (2006). Caracterización Preliminar de la Estructura de los Ácidos Húmicos de un suelo Andisol del Departamento del Cauca. Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. Popayán.
74. ANTE LIBARDO. (2010). Fosfatasa acida como indicador bioquímico de cambios a corto plazo por efecto del manejo orgánico de un suelo. Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. Popayán.
75. ARBOLEDA CAMILO. (2010). Evaluación del efecto del enclamiento sobre un indicador bioquímico de la calidad del suelo. Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. Popayán.
76. EIVAZI F, TABATABAI A. (1977). Phosphatases in Soils. Soil. Biol., Biochem. pp 167-172.
77. TABATABAI M., BREMNER J. (1969). Use of p-nitrophenylphosphate for assay of soil phosphatase activity. Soil Biol. Biochem. pp. 301-307.
78. MARTINEZ L., POTOSÍ S. (2005). Fraccionamiento de Fosforo y su Correlación con la Materia Orgánica y otras Propiedades de los suelos del Departamento del Cauca. Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. Popayán.
79. 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.
80. HOYOS, A. (2010). Valoración del efecto de fertilizantes sobre la fosfatasa ácida como indicador de la calidad de un suelo correspondiente a una microcuenca del río piedras. Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. Popayán.
81. GUIJA, E., SOBERÓN, M., HAAK-MARES, H. (2007). Mecanismo de acción de las fosfatasas ácidas de bajo peso molecular. *An. Fac. Med.* Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Volumen 68, fascículo 4. Lima, Perú. pp. 356-362.
82. HALSTEAD, R.L. (1964). Phosphatase activity of soils as influenced by lime and other treatments. *Can. J. Soil Sci.* 44: 137-144.

- 83.** JUMA, N., A. TABATABAI. (1978). Distribution of phosphomonoesterases in soils. *Soil Sci.* 126: 101-108.
- 84.** TRASAR-CEPEDA, M.C. & F. GIL-SOTRES. (1987). Phosphatase activity in acid high organic matter soils in Galicia (NW Spain). *Soil Biol. Biochem.* 19: 281-287.
- 85.** ARZUAGA, S. A., C. FERNÁNDEZ LÓPEZ, H. C. DALURZO, Y. S. VÁZQUEZ. (2005). Fósforo total, fósforo orgánico y fosfatasa acida, en entisoles, alfisoles y vertisoles de Corrientes con diferentes usos agrícolas. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas Resumen A-066.* pp. 1-4.

ANEXOS

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

Tabla 1. Nivel de densidad real

Nivel	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
Densidad (g/cm ³)	2.1 – 2.3	2.3 – 2.5	2.6 – 2.8	> 2.8

Tabla 2. Nivel de MO en suelo de clima medio

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

Tabla 3. 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 4. Toxicidad de aluminio en el suelo (S.C.C.S. 2000)

Al Intercambiable 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
% Saturación de aluminio	> 60 Reducción severa del crecimiento de plantas	30-60 Reduce moderadamente el crecimiento y desarrollo	< 30 Generalmente no tóxica

Tabla 5. 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 6. Disponibilidad del fósforo para el método de Bray II

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

Anexo 2. Tratamiento estadístico

Tabla 7. Prueba de Normalidad en función del tiempo

	tiempo	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
AFA	1	,944	15	,433
	2	,887	15	,060
	3	,734	15	,001
pH	1	,749	15	,001
	2	,957	15	,641
	3	,806	15	,004
P disponible	1	,900	15	,094
	2	,916	15	,167
	3	,861	15	,025
P orgánico	1	,792	15	,003
	2	,744	15	,001
	3	,894	15	,076
P total	1	,941	15	,399
	2	,833	15	,010
	3	,840	15	,012
MO	1	,900	15	,096
	2	,937	15	,342
	3	,936	15	,332

Tabla 8. Prueba de Normalidad en función del tratamiento

	tratamiento	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
AFA	1	,973	15	,899
	2	,882	15	,051
	3	,930	15	,270
pH	1	,911	15	,141
	2	,710	15	,000
	3	,914	15	,153
P disponible	1	,924	15	,225
	2	,823	15	,007
	3	,947	15	,485
P orgánico	1	,898	15	,088
	2	,912	15	,145
	3	,908	15	,125
P total	1	,950	15	,521
	2	,733	15	,001
	3	,961	15	,708
MO	1	,952	15	,554
	2	,888	15	,064
	3	,893	15	,073

Tabla 9. Prueba de Normalidad en función del tratamiento, tiempo 1

	tratamiento	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
AFA	1	,815	5	,107
	2	,778	5	,053
	3	,934	5	,622
pH	1	,771	5	,046
	2	,828	5	,135
	3	,979	5	,928
P disponible	1	,758	5	,035
	2	,735	5	,021
	3	,823	5	,124
P orgánico	1	,865	5	,245
	2	,848	5	,189
	3	,925	5	,561
P total	1	,943	5	,689
	2	,882	5	,320
	3	,809	5	,095
MO	1	,905	5	,439
	2	,992	5	,987
	3	,910	5	,468

Tabla 10. Prueba de Normalidad en función del tratamiento, tiempo 2

	tratamiento	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
AFA	1	,976	5	,910
	2	,885	5	,331
	3	,959	5	,800
pH	1	,766	5	,041
	2	,963	5	,832
	3	,908	5	,455
P disponible	1	,855	5	,210
	2	,917	5	,514
	3	,984	5	,955
P orgánico	1	,903	5	,425
	2	,871	5	,270
	3	,687	5	,007
P total	1	,913	5	,484
	2	,809	5	,096
	3	,845	5	,178
MO	1	,953	5	,758
	2	,917	5	,510
	3	,871	5	,269

Tabla 11. Prueba de Normalidad en función del tratamiento, tiempo 3

	tratamiento	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
AFA	1	,832	5	,143
	2	,918	5	,518
	3	,944	5	,697
pH	1	,827	5	,132
	2	,996	5	,995
	3	,718	5	,015
P disponible	1	,935	5	,629
	2	,921	5	,537
	3	,831	5	,142
P orgánico	1	,903	5	,425
	2	,924	5	,557
	3	,976	5	,910
P total	1	,903	5	,429
	2	,940	5	,669
	3	,846	5	,181
MO	1	,890	5	,357
	2	,882	5	,318
	3	,889	5	,351

Tabla 12. Prueba de Duncan AFA para todos los tiempos

Tiempo	Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
			1	2
Tiempo 1	3	5	3,57680	
	2	5	3,71080	
	1	5		4,23600
	Sig.		,411	1,000
Tiempo 2	Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
			1	2
Tiempo 2	3	5	2,67040	
	2	5	3,05240	
	1	5		4,27840
	Sig.		,058	1,000
Tiempo 3	Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
			1	2
Tiempo 3	2	5	1,90120	
	3	5	2,01940	
	1	5		4,32660
	Sig.		,354	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
 a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000

Tabla 13. Prueba de Duncan para pH en cada tiempo

Tiempo	Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
Tiempo 1	2	5	4,7920		
	3	5		4,9280	
	1	5		4,9360	
	Sig.		1,000		,377
Tiempo 2	Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
Tiempo 2	2	5		4,7500	
	1	5		4,7580	
	3	5		4,8180	
	Sig.				,065
Tiempo 3	Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
Tiempo 3	2	5	3,9580		
	3	5		4,7260	
	1	5			4,9300
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
 a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000

Tabla 14. Prueba de Duncan para P disponible en cada tiempo

Tiempo	tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
Tiempo 1	1	5	3,31840		
	2	5	4,47680		
	3	5		6,55940	
	Sig.		,156		1,000
Tiempo 2	1	5	3,56100		
	2	5		10,18140	
	3	5		10,95000	
	Sig.		1,000		,636
Tiempo 3	1	5	3,58400		
	3	5		13,02400	
	2	5			31,65160
	Sig.		1,000	1,000	1,000

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

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000.

Tabla 15. Prueba de Duncan para P orgánico en cada tiempo

Tiempo	tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
			1	2
Tiempo 1				
	2	5		717,42020
	1	5		737,40020
	3	5		740,98560
	Sig.			,728
Tiempo 2				
	1	5	749,79480	
	2	5	787,30240	
	3	5		1443,99340
	Sig.		,697	1,000
Tiempo 3				
	1	5	743,59760	
	3	5		1185,30920
	2	5		1315,50420
	Sig.		1,000	,099

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

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000.

Tabla 16. Prueba de Duncan para P total en cada tiempo

Tiempo	tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
	Tiempo 1	1	5	992,39880	
	2	5		1140,05840	
	3	5		1200,72100	
	Sig.		1,000		,290
Tiempo 2	tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
		1	5	994,45720	
	2	5	1136,74960		
	3	5		1641,50620	
	Sig.		,077		1,000
Tiempo 3	tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
		1	5	993,42820	
	3	5		2018,3324	
	2	5			2350,0476
	Sig.		1,000	1,000	1,000

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

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000.

Tabla 17. Prueba de Duncan para MO en cada tiempo

Tiempo	tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
Tiempo 1					
	1	5		16,14680	
	2	5		16,96740	
	3	5		17,16420	
	Sig.				,071
Tiempo 2	tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
		1	5		16,84300
	2	5		16,89720	
	3	5		16,98720	
	Sig.				,804
Tiempo 3	tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
		1	5		17,02580
	2	5		17,25120	
	3	5		17,33840	
	Sig.				,669

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

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000.

Tabla 18. Tabla general de correlaciones de Pearson

		tiempo	tratamiento	AFA	pH	P disponible	P orgánico	P total	MO
tiempo	Correlación de Pearson	1	,000	-,484(**)	-,491(**)	,524(**)	,481(**)	,568(**)	,208
	Sig. (bilateral)	.	1,000	,001	,001	,000	,001	,000	,171
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
tratamiento	Correlación de Pearson	,000	1	-,676(**)	-,072	,310(*)	,523(**)	,527(**)	,229
	Sig. (bilateral)	1,000	.	,000	,640	,038	,000	,000	,130
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
AFA	Correlación de Pearson	-,484(**)	-,676(**)	1	,637(**)	-,782(**)	-,760(**)	-,886(**)	-,246
	Sig. (bilateral)	,001	,000	.	,000	,000	,000	,000	,103
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
pH	Correlación de Pearson	-,491(**)	-,072	,637(**)	1	-,895(**)	-,496(**)	-,751(**)	-,140
	Sig. (bilateral)	,001	,640	,000	.	,000	,001	,000	,358
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
P disponible	Correlación de Pearson	,524(**)	,310(*)	-,782(**)	-,895(**)	1	,667(**)	,876(**)	,182
	Sig. (bilateral)	,000	,038	,000	,000	.	,000	,000	,232
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
P orgánico	Correlación de Pearson	,481(**)	,523(**)	-,760(**)	-,496(**)	,667(**)	1	,818(**)	,104
	Sig. (bilateral)	,001	,000	,000	,001	,000	.	,000	,496
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
P total	Correlación de Pearson	,568(**)	,527(**)	-,886(**)	-,751(**)	,876(**)	,818(**)	1	,284
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.	,059
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
MO	Correlación de Pearson	,208	,229	-,246	-,140	,182	,104	,284	1
	Sig. (bilateral)	,171	,130	,103	,358	,232	,496	,059	.
	N	45	45	45	45	45	45	45	45

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

* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 19. Tabla general de correlaciones de Rho de Spearman

Rho de Spearman		tiempo	tratamiento	AFA	pH	P disponible	P orgánico	P total	MO
tiempo	Coefficiente de correlación	1,000	,000	-,421(**)	-,526(**)	,474(**)	,434(**)	,375(*)	,211
	Sig. (bilateral)	.	1,000	,004	,000	,001	,003	,011	,165
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
tratamiento	Coefficiente de correlación	,000	1,000	-,723(**)	-,156	,662(**)	,503(**)	,704(**)	,188
	Sig. (bilateral)	1,000	.	,000	,305	,000	,000	,000	,217
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
AFA	Coefficiente de correlación	-,421(**)	-,723(**)	1,000	,594(**)	-,867(**)	-,640(**)	-,874(**)	-,184
	Sig. (bilateral)	,004	,000	.	,000	,000	,000	,000	,227
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
pH	Coefficiente de correlación	-,526(**)	-,156	,594(**)	1,000	-,607(**)	-,419(**)	-,533(**)	-,125
	Sig. (bilateral)	,000	,305	,000	.	,000	,004	,000	,412
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
P disponible	Coefficiente de correlación	,474(**)	,662(**)	-,867(**)	-,607(**)	1,000	,683(**)	,834(**)	,139
	Sig. (bilateral)	,001	,000	,000	,000	.	,000	,000	,363
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
P orgánico	Coefficiente de correlación	,434(**)	,503(**)	-,640(**)	-,419(**)	,683(**)	1,000	,774(**)	,040
	Sig. (bilateral)	,003	,000	,000	,004	,000	.	,000	,793
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
P total	Coefficiente de correlación	,375(*)	,704(**)	-,874(**)	-,533(**)	,834(**)	,774(**)	1,000	,253
	Sig. (bilateral)	,011	,000	,000	,000	,000	,000	.	,094
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
MO	Coefficiente de correlación	,211	,188	-,184	-,125	,139	,040	,253	1,000
	Sig. (bilateral)	,165	,217	,227	,412	,363	,793	,094	.
	N	45	45	45	45	45	45	45	45

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

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Anexo 3. Valores de actividad fosfomonoesterasa obtenidos a partir de datos bibliográficos.

SUELO	RANGO DE ACTIVIDAD	REFERENCIA
Horizonte A de suelos de pradera	3,8 – 8,4	Speir, 1977
	1,2 – 9,1	Speirs y McGill, 1979
Horizonte A de suelos de turberas	5,0	Mathur y Levesque, 1980
Horizonte A de suelos Mediterráneos	22,5	Nannipieri <i>et al</i> , 1980
Horizonte A de suelos árticos	11,8 – 31,3	Neal, 1982
Horizontes superficiales de suelos forestales, pradera y cultivados	4,3 – 6,1	De Prado, 1982
Horizontes superficiales de suelos forestales	0,3 – 19,1	Harrison, 1983
Horizonte A de suelos sin cultivar	0,2 – 2,0	Frankenberger y Dick, 1983
Horizontes superficiales de suelos de pradera	0,7 – 7,8	Speir <i>et al</i> , 1984
Horizontes superficiales de suelos de prado	5,4 – 32,8	Saratchandra <i>et al</i> , 1984
Horizontes superficiales de suelos de cultivo	0,9 – 2,1	Bolton <i>et al</i> , 1985
Horizonte Ah de suelos forestales	1,4 – 7,2	Pang y Kolenko, 1986
Horizontes Ah de suelos forestales y de pradera	0,8 – 15,6	Baligar <i>et al</i> , 1988
Horizontes Ah de suelos forestales	0,3 – 0,6	Rastin <i>et al</i> , 1988
Horizonte Ah de un suelo forestal	1,7	Hauslin y Marschner, 1989
Horizonte Ah de suelos forestales	0,4 – 0,8	Rastin <i>et al</i> , 1990 a.b
Horizonte Ah de suelos forestales	9,6 – 38,1	Badalucco <i>et al</i> , 1992
Horizontes Ah de suelos forestales	3,6 – 18,0	Fox y Comerford, 1992
Suelos sin vegetación zona árida	0,3 – 0,9	Garcia <i>et al</i> , 1994
Suelos forestales zona árida	1,3	Pascual <i>et al</i> , 2000
Suelos agrícolas abandonados	0,2 – 0,5	Pascual <i>et al</i> , 2000
Fornas de suelos de robledal	9,2 – 47,5	Trassar-Cepeda <i>et al</i> , 2000a
Horizontes Ah de suelos de robledal	2,2 – 15,8	Trassar-Cepeda <i>et al</i> , 2000a
Horizontes superficiales de suelos de pradera	2,2 – 5,8	Trassar-Cepeda <i>et al</i> , 2000b