

**COMPORTAMIENTO MORFOLÓGICO, DE ALGUNOS INDICADORES
DE FERTILIDAD Y LA DISPONIBILIDAD DE MACRONUTRIENTES EN
DIFERENTES USOS Y PROFUNDIDADES DE SUELO ULTISOL**

ELMIRA DOLORES OROA PFEFFERKORN

Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción como requisito para la obtención del título de *Magister Scientiae en Ciencias de Suelo y Ordenamiento Territorial*. Programa de Postgrado fortalecido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Universidad Nacional de Asunción

Facultad de Ciencias Agrarias

Dirección de Postgrado

San Lorenzo, Paraguay

2019

**COMPORTAMIENTO MORFOLÓGICO, ALGUNOS INDICADORES DE
FERTILIDAD Y LA DISPONIBILIDAD DE MACRONUTRIENTES EN
DIFERENTES USOS Y PROFUNDIDADES DE SUELO ULTISOL**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: GÉNESIS Y MORFOLOGÍA DE SUELO

ELMIRA DOLORES OROA PFEFFERKORN

COMITÉ ASESOR DE TESIS

Orientador: Prof. Ing. Agr. *Dr.* Arnulfo Encina Rojas
Co-Orientadores: Prof. Ing. Agr. *M.Sc.* Carlos Villalba Martínez
Prof. Lic. Geol. *M.Sc.* Higinio Moreno Resquín

Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción como requisito para la obtención del título de *Magister Scientiae en Ciencias de Suelo y Ordenamiento Territorial*. Programa de Postgrado fortalecido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Universidad Nacional de Asunción
Facultad de Ciencias Agrarias
Dirección de Postgrado
San Lorenzo, Paraguay

2019

Universidad Nacional de Asunción
Facultad de Ciencias Agrarias
Dirección de Postgrado

**COMPORTAMIENTO MORFOLÓGICO, ALGUNOS INDICADORES DE
FERTILIDAD Y LA DISPONIBILIDAD DE MACRONUTRIENTES EN
DIFERENTES USOS Y PROFUNDIDADES DE SUELO ULTISOL**

Esta tesis fue aprobada por la Mesa Examinadora como requisito parcial para optar por el grado de **Magister Scientiae en Ciencias de Suelo y Ordenamiento Territorial**. Programa de postgrado fortalecido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), otorgado por la Facultad de Ciencias Agrarias/UNA.

Autor: Elmira Dolores Oroa Pfefferkorn

Miembros del Comité Asesor de Tesis y Mesa Examinadora:

Prof. Ing. Agr. *Dr.* Arnulfo Encina Rojas

Prof. Ing. Agr. *M.Sc.* Carlos Villalba Martínez

Prof. Lic. Geol. *M.Sc.* Higinio Moreno Resquín

San Lorenzo, 28 de noviembre de 2019

DEDICATORIA

A mi querido papá Juan Carlos (+) y a mi amado hijo Hugo Iván.

AGRADECIMIENTO

A la Facultad Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, por brindar el espacio para el desarrollo de esta Maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por la financiación de la Maestría en Ciencia del Suelo y Ordenamiento Territorial.

A la Facultad Ciencias de la Producción, en la persona de la M.V. Lilian Rossana Morales de González, por el apoyo.

Al Ing. Agr. Carlos Villalba Martínez por la financiación de los análisis de suelo a través del Proyecto Caracterización de suelo del Departamento de Caaguazú – PROCIENCIA – CONACYT.

A la Agroganadera ALTA FLORESTA en la persona del Ing. Agr. Juan José Zárate, por brindar el espacio físico para realizar el estudio de campo.

A los alumnos del tercero y cuarto curso (2018) de la carrera Ingeniería Agronómica, Facultad Ciencias de la Producción UNCA, por la colaboración en la realización del trabajo de campo.

Al equipo docente de la Dirección de Postgrado y del área de Suelo y Ordenamiento Territorial de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, por todo el soporte brindado.

A mis compañeros de Maestría y al equipo de trabajo de la Facultad Ciencias de la Producción, Dirección de Investigación, por el apoyo constante.

COMPORTAMIENTO MORFOLÓGICO, ALGUNOS INDICADORES DE FERTILIDAD Y LA DISPONIBILIDAD DE MACRONUTRIENTES EN DIFERENTES USOS Y PROFUNDIDADES DE SUELO ULTISOL

Autor: Elmira Oroa Pfefferkorn

Orientador: Prof. Ing. Agr. Dr. Arnulfo Encina Rojas

Co-Orientador: Prof. Ing. Agr. M.Sc. Carlos Villalba Martínez

Co-Orientador: Prof. Lic. Geol. M.Sc. Higinio Moreno Resquín

Resumen

El objetivo de la investigación fue analizar el comportamiento morfológico, de los indicadores de fertilidad del suelo y los macronutrientes, bajo diferentes usos y a diferentes profundidades de suelo Ultisol. Se aplicó un diseño no experimental de alcance cuantitativo y de correlación. Se tomaron muestras de suelo en cinco usos de suelo (bosque secundario, siembra directa, sistema convencional, pastura, sistema silvopastoril) a seis profundidades (0-5; 5-15; 15-30; 30-60; 60-100; 100-150 cm), para lo cual se realizó la apertura de una calicata por cada uso. Se evaluaron: la morfología, los indicadores de fertilidad [pH, porcentaje de materia orgánica, H+Al, Al³⁺, CIC, suma de bases (Σ B) y porcentaje de saturación de bases (SB)] y concentración de macronutrientes (P-Ca-Mg-K-S). Todos los pediones expresaron horizonte A, E y B, con espesor similar y morfológica similar. Los resultados arrojaron diferencias significativas para los valores de pH, Al³⁺, suma de bases, saturación de bases, P, K⁺ y Mg²⁺ por efecto de los usos. Al evaluar los indicadores de fertilidad y los macronutrientes en las diferentes profundidades de suelo, se determinó diferencias significativas en H+Al, materia orgánica, CIC, suma de bases, P, Ca²⁺ y Mg²⁺. En cuanto a las correlaciones entre los indicadores de fertilidad y los macronutrientes, se observó que los diferentes usos y profundidades de suelo modifican las intensidades de correlación. La mayoría de los usos presentaron correlación positiva entre Ca²⁺, Mg²⁺ con la CIC, suma de bases y saturación de bases; el P con la materia orgánica y el Al³⁺ con el pH ($r > 0,80$). A nivel de profundidad de suelo, las correlaciones fueron positivas y significativas en la capa 0-5 y 5-15 cm entre la mayoría de los indicadores de fertilidad y los macronutrientes. Se concluye que el uso de suelo y la profundidad del mismo tienen efectos sobre algunos indicadores de fertilidad y la concentración de macronutrientes, así como también modifica la intensidad de correlación entre ellos.

Palabras clave: calidad, suelo, nutrientes, labranza, manejo, perfil.

COMPORTAMENTO MORFOLÓGICO, ALGUNS INDICADORES DE FERTILIDADE E A DISPONIBILIDADE DE MACRONUTRIENTES EM DIFERENTES USOS E PROFUNDIDADES DO SOLO ULTISOL

Autor: Elmira Oroa Pfefferkorn

Orientação: Prof. Ing. Agr. Dr. Arnulfo Encina Rojas

Co-orientador: Prof. Ing. Agr. M.Sc. Carlos Villalba Martínez

Co-orientador: Prof. Lic. Geol. M.Sc. Higinio Moreno Resquín

Resumo

O objetivo da pesquisa foi analisar o comportamento morfológico, de indicadores de fertilidade do solo e macronutrientes, sob diferentes usos e em diferentes profundidades em um solo Ultisol. Foi aplicado um delineamento não experimental com escopo quantitativo e correlação. Foram coletadas amostras de solo em cinco usos do solo (floresta secundária, semeadura direta, preparo convencional, pastagem, sistema silvipastoril) em seis profundidades (0-5; 5-15; 15-30; 30-60; 60-100; 100 - 150 cm), para o qual foi aberta uma calicata para cada uso. Foram avaliados: a morfologia, indicadores de fertilidade [pH, porcentagem de matéria orgânica, H + Al, Al³⁺, CTC, soma das bases (Σ B) e porcentagem de saturação das bases (SB)] y concentração de macronutrientes (P-Ca-Mg-K-S). Todos os pedions expressaram o horizonte A, E e B, com espessura e morfologia semelhantes. Os resultados mostraram diferenças significativas para os valores de pH, Al³⁺, soma de bases, saturação de bases, P, K⁺ e Mg²⁺ devido ao efeito dos usos. Ao avaliar indicadores de fertilidade e macronutrientes em diferentes profundidades do solo, foram determinadas diferenças significativas em H + Al, matéria orgânica, CTC, soma de bases, P, Ca²⁺ y Mg²⁺. Quanto às correlações entre os indicadores de fertilidade e os macronutrientes, observou-se que os diferentes usos e profundidades do solo modificam as intensidades de correlação. A maioria dos usos apresentou correlação positiva entre Ca²⁺, Mg²⁺ com CTC, soma de bases e saturação de bases, da mesma forma que fósforo com matéria orgânica e Al³⁺ com pH ($r > 0,80$). No nível de profundidade do solo, as correlações foram positivas e significativas na camada de 0-5 e 5-15 cm entre a maioria dos indicadores de fertilidade e macronutrientes. Conclui-se que o uso do solo e sua profundidade afetam alguns indicadores de fertilidade e concentração de macronutrientes, além de modificar a intensidade de correlação entre eles.

Palavras-chave: qualidade, solo, nutrientes, preparo do solo, manejo, perfil.

MORPHOLOGICAL BEHAVIOR, SOME FERTILITY INDICATORS AND THE AVAILABILITY OF MACRONUTRIENTS IN DIFFERENT USES AND DEPTHS OF ULTISOL SOIL

Author: Elmira Oroa Pfefferkorn

Orientation: Prof. Ing. Agr. Dr. Arnulfo Encina Rojas

Co-counselor: Prof. Ing. Agr. M.Sc. Carlos Villalba Martínez

Co-counselor: Prof. Lic. Geol. M.Sc. Higinio Moreno Resquín

Summary

The objective of the research was to analyze the morphological behavior of the indicators of soil fertility and macronutrients, under different uses and different depths in an Ultisol soil. A non-experimental design with a quantitative scope and correlation was applied. Soil samples were taken in five soil uses (secondary forest, direct sowing, conventional system, pasture, silvopastoral system) at six depths (0-5; 5-15; 15-30; 30-60; 60-100; 100 -150 cm), for which a calicata was opened for each use. We evaluated: morphology, fertility indicators [pH, percentage of organic matter, H + Al, Al³⁺, CIC, sum of bases (Σ B) and percentage of base saturation (SB)] and concentration of macronutrients (P-Ca -Mg-K-S). All the pedions expressed horizon A, E and B, with similar thickness and similar morphological. The results showed significant differences for the values of pH, aluminum, sum of bases, saturation of bases, phosphorus, potassium and magnesium due to the effect of uses. When evaluating fertility indicators and macronutrients at different soil depths, significant differences were determined in H+Al, organic matter, CIC, sum of bases, base saturation, P, Ca²⁺ and Mg²⁺. Regarding the correlations between the fertility indicators and the macronutrients, it was observed that the different the soil uses and depths modify the correlation intensities. The positive and significant correlations in most uses were observed between Ca²⁺, Mg²⁺ with the CIC and sum of bases, in the same way as P and organic matter, and of Al³⁺ and pH ($r > 0,80$). At the level of soil depth, positive and significant correlations occurred in the 0-5 and 5-15 centimeters layer between most fertility indicators and macronutrients. It is concluded that the use of the soil and its depth have effects on some indicators of fertility and the concentration of macronutrients, as well as modify the intensity of correlation between them.

Keyword: quality, soil, nutrients, soil preparation, management, profile.

TABLA DE CONTENIDO

Portada.....	i
Página de aprobación.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Resumen.....	v
Resumo.....	vi
Summary.....	vii
Tabla de contenido.....	viii
Lista de tablas.....	xi
Lista de figuras.....	xii
Lista de anexos.....	xiii
Lista de siglas y abreviaturas.....	xiv
Lista de abreviaturas para descripción morfológica de suelo.....	xv
Lista de unidades de medida.....	xvi
Lista de símbolos.....	xvii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. El suelo.....	3
2.2. Suelos del Caaguazú y manejo.....	3
2.3. Orden de suelo Ultisol.....	4
2.4. Calidad del Suelo.....	5
2.5. Antecedentes sobre estudios de propiedades o indicadores de calidad de los suelos.....	7
2.6. Indicadores de fertilidad y macronutrientes.....	8
2.6.1. El pH del suelo y su interacción.....	8
2.6.2. Acidez potencial (H + Al).....	9
2.6.3. Aluminio Intercambiable (Al ³⁺).....	9
2.6.4. Materia Orgánica.....	11
2.6.5. Fósforo.....	12
2.6.6. Calcio - Magnesio – Potasio.....	13
2.6.7. Azufre.....	15

2.6.8. CIC.....	16
2.7. Manejo de suelo.....	17
2.8. Relación de las propiedades del suelo y el manejo.....	18
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1. Localización de la investigación.....	21
3.2. Población de unidades y variables de medición.....	22
3.2.1. Variables Independientes.....	22
3.2.2. Historial de parcelas.....	22
3.2.3. Variables Dependientes.....	24
3.3. Diseño para la recolección de datos primarios.....	24
3.4. Recursos, materiales y equipos.....	26
3.5. Fuente de financiación.....	26
3.6. Procedimientos para la recolección de los datos de campo.....	27
3.7. Determinaciones morfológicas, físicas y químicas.....	27
3.7.1. Determinación morfológica.....	27
3.7.2. Determinación física.....	28
3.7.3. Determinación química.....	28
3.8. Métodos de control de calidad de los datos.....	29
3.9. Métodos de análisis e interpretación de los datos.....	29
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1. Propiedades morfológicas y granulometría del suelo.....	33
4.1.1. Características morfológicas de los suelos estudiados.....	32
4.2. Granulometría del suelo en diferentes usos y profundidades.....	36
4.3. Propiedades químicas.....	38
4.3.1. Indicadores de fertilidad en diferentes de suelo.....	37
4.3.2. Indicadores de fertilidad en diferentes profundidades.....	39
4.4. Características de los macronutrientes en diferentes usos y profundidades.....	41
4.5. Correlación de los macronutrientes con los indicadores de fertilidad del suelo en diferentes usos y profundidades.....	47
4.6. Comportamiento de algunos indicadores de fertilidad del suelo en los diferentes usos y profundidades (pH, Al ³⁺ , MO, CIC, %SB).....	55
4.7. Comportamiento de los macronutrientes en diferentes usos y profundidades.....	59

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
5.1.	Conclusiones.....	64
5.2.	Recomendaciones	65
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
7.	ANEXO	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Conformación de las variables independientes	25
Tabla 2. Referencia para r de correlación.....	31
Tabla 3. Rangos de referencia de los indicadores de fertilidad y nutrientes en el suelo	32
Tabla 4. Clasificación del suelo ácido según su pH	32
Tabla 5. Característica del terreno en el área de estudio	33
Tabla 6. Características morfológicas de los perfiles estudiados	34
Tabla 7. Granulometría del suelo en diferentes usos.....	37
Tabla 8. Granulometría del suelo en diferentes profundidades	37
Tabla 9. Características de los indicadores de fertilidad en diferentes usos	38
Tabla 10. Características de los indicadores de fertilidad en diferentes profundidades de suelo, sin tener en cuenta el uso.....	40
Tabla 11. Macronutrientes disponibles en el suelo considerando el uso.....	42
Tabla 12. Macronutrientes disponibles en el suelo considerando la profundidad.....	45
Tabla 13. Coeficiente de correlación de Pearson de los indicadores de fertilidad y los macronutrientes en diferentes usos.....	48
Tabla 14. Coeficiente de correlación de Pearson de los indicadores de fertilidad y los macronutrientes en diferentes profundidades	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre el pH y los cationes unidos a los coloides del suelo (Brady, 1974, citado por Juárez et al. 2006).....	10
Figura 2. Ubicación de sistemas empleados dentro de la Agroganadera Alta Foresta.	21
Figura 3. Precipitación diaria Distrito de Coronel Oviedo al 24 de octubre de 2018 ..	22
Figura 4. Comportamiento del pH del suelo y el aluminio en los diferentes usos	39
Figura 5. Comportamiento del pH del suelo en los diferentes usos y profundidades ..	55
Figura 6. Comportamiento del Al^{3+} del suelo en los diferentes usos y profundidades	56
Figura 7. Comportamiento del %MO del suelo en los diferentes usos y profundidades	57
Figura 8. Comportamiento de la CIC del suelo en los diferentes usos y profundidades	57
Figura 9. Comportamiento del %V del suelo en los diferentes usos y profundidades .	58
Figura 10. Comportamiento del Ca del suelo en los diferentes usos y profundidades.	59
Figura 11. Comportamiento del Mg del suelo en los diferentes usos y profundidades	60
Figura 12. Comportamiento del K del suelo en los diferentes usos y profundidades ..	61
Figura 13. Comportamiento del P del suelo en los diferentes usos y profundidades...	62
Figura 14. Comportamiento del S del suelo en los diferentes usos y profundidades...	63

LISTA DE ANEXOS

7.A. Localización específica del área de estudio.....	78
7.B. Planilla de descripción de perfiles de suelo. Adaptado por Encina 2018.....	79
7.C. Planilla de indicadores de campo para descripción de perfiles de suelo. Adaptado por Encina (2018).....	80
7.D. Trabajos de excavación y exposición de perfil de suelo	81
7.E. Toma de muestra del perfil de suelo	81
7.F. Lectura del perfil de suelo (A y B).....	82
7.G. Resultado de análisis de laboratorio	83
7.H. Tabla de vaciamiento de datos.....	84
7.I. Correlación de las propiedades químicas del suelo a nivel global.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS GENERALES

Al	Aluminio
B	Bosque
C	Carbono
CE	Conductividad eléctrica
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CP	Comunicación Personal
EAA	Espectrofotómetro de absorción atómica
Fe	Hierro
GPS	Sistema de posicionamiento global
H	Hidrogeno
K	Potasio
MANOVA	Análisis de varianza multivariado
Mn	Manganeso
MO/S	Materia orgánica del suelo
N	Nitrógeno
Na	Sodio
P	Fósforo
pH	Potencial hidrogeno
R2	Roundup Ready (evento transgénico)
S	Azufre
ΣB	Suma de bases
SB	Saturación de bases
SC	Sistema de labranza convencional
SD	Sistema de siembra directa
SP	Pastura
SSP	Sistema silvopastoril
UV	Ultra violeta
Zn	Zinc

LISTA DE ABREVIATURAS DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA DE SUELO

Límite de Horizontes	c-p	clara – plana
	c-o	clara - ondulada
	g-o	gradual - ondulada
	d-p	difusa - plana
Color	YR	Color Yellow red – Rojo amarillento
	R	Color Red - Rojo
Estructura		
Tipo	bsa	bloques sub angular
Clase	p	pequeña
	pm	pequeñas a mediana
	m	mediana
	g	grande
Grado	d	débil
	m	moderada
	f	fuerte
Consistencia		
En seco	b	blando
	d	duro
	md	moderadamente duro
En húmedo	fr	friable
	mfr	moderadamente friable
	f	firme
	ef	extremadamente firme
En mojado	npl	no plástico
	np	no pegajoso
	pl	plástico
	p	pegajoso
	mpl	moderadamente plástico
	mp	moderadamente pegajoso
	dpl	débilmente plástica
	dp	débilmente pegajosa
	Poros	ab
	gr	grande
	m	mediana
Raíces	cf	comunes fina
	pf	pocafina
	p m	poca mediana
	mp f	muy poca fina
	ab m	abundante mediana
	ab gr	abundante grande
	ab f	abundantes fina
	mpmf	muy poca mediana a fina
Inclusiones	nso	no se observa

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

°C	grado Celsius
cm	centímetro
Cmolc	centimol carga
dm	decímetro
g	gramo
ha	hectárea
kg	kilogramo
km	kilometro
M	molar

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Por ciento
+	Catión
-	Anión
$p < 0,05$	probabilidad menor que 0,05, indica diferencias significativas
$p > 0,05$	probabilidad mayor que 0,05, indica no significancia

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es uno de los capitales naturales más importantes para la vida; es la base fundamental para la producción agrícola, pecuaria, forestal, ambiental, para la seguridad alimentaria.

La productividad y sustentabilidad agronómica están determinadas por los efectos interactivos de los factores de calidad del suelo, de los factores ambientales y del manejo. Interpretar y predecir el comportamiento de esa interacción es la principal finalidad de la ciencia del suelo en la actualidad (Quiroga y Funaro 2003).

El uso y las prácticas de manejo aplicadas al suelo marcan principalmente el grado y la dirección de los cambios en su calidad en el tiempo y espacio (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo 2015). La evaluación de la calidad del suelo a través de la asociación de los indicadores de fertilidad y la disponibilidad de macronutrientes, permiten comprender algunas condiciones derivadas del uso actual en diferentes profundidades si es que las hay.

Los indicadores de fertilidad y los macronutrientes tienen una importante relación entre sí, por ejemplo la acidez del suelo es una condición y un proceso natural que según estudios tiene una alta correlación con los sistemas de manejo de altos rendimientos y la fertilidad del suelo (Barrientos et al 1994; Castro y Munevar 2013); este factor puede ser la causa de que se presente deficiencia, toxicidad o que los elementos nutritivos no se encuentren en niveles de disponibilidad adecuados (Benton, citado por Ibarra et al. 2009).

Los indicadores de fertilidad del suelo, tales como el pH, Al^{3+} , CIC, saturación de bases son indicadores químicos altamente modificables por efectos antrópicos. Por lo tanto, es determinante identificar si existe la influencia de estos

indicadores fundamentalmente, sobre el contenido de macronutrientes, lo que podría revelar comportamientos derivados del tipo de uso y del manejo aplicado al suelo en el corto, mediano y largo plazo, favoreciendo la mejor toma de decisiones para un uso sustentable del suelo.

La finalidad de analizar las características morfológicas, físicas y químicas del suelo es ayudar a comprender la dinámica de los nutrientes, asociado a los cambios de la fertilidad del suelo, considerando que las propiedades físicas y morfológicas estudiadas fueron similares.

El objetivo general de la investigación fue analizar el comportamiento morfológico, de los indicadores de fertilidad del suelo y los macronutrientes, bajo diferentes usos y a diferentes profundidades. Bajo la hipótesis de que existe efecto del uso y las profundidades sobre los indicadores de fertilidad y macronutrientes del suelo, por un lado, y por el otro, existe relación entre los indicadores de fertilidad del suelo y la concentración de macronutrientes en el suelo tanto por efecto de uso y de por efecto de las profundidades.

Para corroborar la hipótesis se plantearon los siguientes objetivos específicos: describir las propiedades morfológicas y físicas del suelo en los cinco sistemas de manejo y profundidades, determinar la variación de los indicadores de fertilidad y de los macronutrientes en diferentes usos y profundidades por separado, correlacionarlos indicadores de fertilidad del suelo con los macronutrientes del suelo por uso y profundidad, comparar el comportamiento de los indicadores de fertilidad y los macronutrientes en los cinco usos de suelo y en los seis estratos de profundidad.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El suelo

El suelo es un componente esencial del ambiente en el que se desarrolla la vida; es vulnerable, de difícil y larga recuperación, su formación tarda miles de años, por lo que se considera un recurso natural no renovable (Silva y Correa 2009).

A nivel mundial, el manejo intensivo de los suelos agrícolas, se ha caracterizado como el principal causante de deterioro de la calidad del suelo. El deterioro se manifiesta en problemas físicos y químicos, lo cual repercute sobre la actividad biológica ya que los microorganismos son sensibles a los cambios de calidad del suelo (Medina et al. 2011).

La habilidad que tiene el suelo de sostener la productividad biológica, está íntimamente relacionada con la calidad del suelo (Martin y Abad, citado por García et al. 2012).

El suelo es considerado como un medio de soporte de las plantas y otros organismos, lo que le convierte en uno de los factores más importantes para el correcto desarrollo de los cultivos agrícolas. El suelo debe ser reconocido como un sistema vivo y dinámico que funciona a través de un equilibrio único y la interacción de sus componentes biológicos, químicos y físicos (Moreno et al. 2015).

2.2. Suelos del Caaguazú y manejo

Según López et al. (1995), en el Departamento de Caaguazú predominan suelos arenosos fino a medios (en el centro del departamento), suelos residuales lateríticos rojos al este y al oeste mezcla de suelos residuales y transportados arcillo limosas y arena limosa.

Los suelos que presentan las mejores aptitudes para su utilización en la agricultura, con los cultivos tradicionalmente adaptados en el Paraguay, pertenecen a los órdenes Ultisol, Alfisol y Oxisol; predominantes en el departamento de Caaguazú siempre y cuando no sean pedregosos, no estén saturados con agua y no sean profundamente arenosos (López et al. 1995).

Actualmente ante la perspectiva de crecimiento futuro, y considerando la necesidad de salvaguardar la riqueza biológica y disminuir los cambios observados en el recurso suelo, a la par de planificar el usos adecuado del mismo, es necesario considerar la problemática socio-ambiental que se vive; la cual se caracteriza de dos maneras: la primera como compleja, porque es el resultado de impactos causados por diferentes actividades económicas a lo largo de su historia y; heterogénea porque la manifestación de ellos ha sido variada en el territorio (Ramírez et al. 2016), por los que cada departamento del territorio paraguayo y entre ellas el Departamento de Caaguazú se ve afectada por ese fenómeno en mayor o menor grado.

El efecto del manejo se manifiesta en cambios cualitativos y cuantitativos, que experimenta la distribución y la morfología del espacio poroso del suelo, generalmente los suelos muy intervenidos con agricultura convencional se traducen en pérdida de porosidad total, lo que modifica la relación aire/agua (Ellies 1995).

En contrapartida, la agricultura sostenible se instala como alternativa para detener el agotamiento y la destrucción de los recursos naturales y fomenta un aumento sostenido y ecológicamente viable de la producción agrícola, económicamente apropiada y socialmente aceptable (Toresani et al. 2009).

2.3. Orden de suelo Ultisol

Unos de los factores formadores más importantes para la ocurrencia de suelos del orden Ultisol, es el clima puesto que la precipitación favorece la translocación del material de una parte del perfil a zonas inferiores y manteniendo el Porcentaje de Saturación de Bases (%SB) en sus niveles adecuados para pertenecer a este orden.

De esta manera, la Precipitación tiene que ser mucho mayor a la evapotranspiración (Gisbert e Ibañez 2010).

Los Ultisoles son suelos altamente meteorizados, pero no tanto como los oxisoles, sin embargo, han sufrido un intenso lavado ocasionando el empobrecimiento de bases y la migración mecánica de las arcillas (fundamentalmente del tipo caolinita), formando así los horizontes argílicos (Centro Internacional de Agricultura Tropical 1983).

El estudio de esta tesis se centra sobre muestras de suelo del orden Ultisol, el cual se caracteriza por ser suelos muy evolucionados que presentan un horizonte iluvial que ha acumulado arcilla (Horizonte Bt), movilizado desde las partes más superficiales del suelo. Las arcillas acumuladas son de baja calidad por lo que el suelo es ácido y poco fértil (Jaramillo 2002).

El color de estos suelos se debe básicamente al grado de hidratación del Fe con tonalidades pardo rojizo o rojizo en su estado oxidado y pardo amarillento y amarillento en su forma hidratada (Chinchilla et al. 2011).

Entonces, los Ultisoles se definen básicamente como suelos minerales ácidos, fuertemente alterados y lixiviados, que no contienen ningún material calcáreo en todo el perfil, tienen menos del 10% de minerales meteorizables en la parte superior del perfil, y presentan menos del 35% de saturación en bases que suele disminuir con la profundidad (Mariscal-Sancho 2008).

2.4. Calidad del suelo

La calidad del suelo es dinámica y puede cambiar en el corto plazo, de acuerdo con el uso y prácticas de manejo (Navarrete Segueda et al.2011).El estudio de los suelos comienza con la descripción morfológica de ellos en el campo y frecuentemente sobre esta base se dan los primeros diagnósticos del suelo. Al mismo tiempo se recogen las muestras necesarias para los análisis en el laboratorio, con el fin de comprobar y afirmar los diagnósticos de campo y elaborar las medidas necesarias para una correcta utilización y mejoramiento, aplicando además una clasificación correcta (Hernández et al 2006).

El suelo desarrolla diferentes capas a diversas profundidades debajo de la superficie, que manifiestan características diferentes por efecto de los factores arriba señalados, situación que definirá la calidad de la misma; Singer y Ewing (2000), expresan que la calidad del suelo está relacionada a la multifuncionalidad de este recurso y no solo a su uso específico.

La evaluación de la calidad del suelo permite entender y revertir el deterioro de la funcionalidad ecosistémica, como sucede con: la pérdida de suelos por erosión, deposición de sedimento por viento e inundaciones, reducción de la infiltración, compactación de la capa superficial, pérdida de nutrientes, cambios en el pH, pérdida de materia orgánica, reducción de la actividad biológica, entre otros. (Navarrete Segueda et al. 2011).

Entre las propiedades químicas propuestas como indicadores por Doran y Parkin, citado por Astier-Calderón et al. (2002), fueron el contenido de materia orgánica (MO), carbono orgánico, pH, conductividad eléctrica (CE) y N, P y K, disponibles. Los indicadores que reflejan estándares de fertilidad (pH, MO, N, P y K) son importantes en términos de producción de cultivos. Propiedades químicas como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) reducen la presencia de cambios drásticos en el pH y la disminución en la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Astier-Calderón et al. 2002).

La calidad física del suelo están relacionados, con el uso eficiente del agua, los nutrientes y los pesticidas, lo cual reduce el efecto invernadero (Navarro et al. 2000) y con propiedades o indicadores que reflejan la magnitud con que un suelo acepta, retiene y proporciona agua a las plantas y además, las condiciones que limitan el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración y el movimiento del agua dentro del perfil son otros indicadores físicos que conlleva a un incremento o disminución de la producción agrícola (García et al. 2012).

La identificación de las características de los suelos que reflejen de mejor forma los cambios en su calidad, así como las diferentes formas de medición y aplicación de ellas como indicadores (Gil-Stores et al. 2005), podrían servir para

evitar la expansión de las fronteras agrícolas, a través de estrategias que promuevan la intensificación del uso del recurso tierra (López et al. 1995).

En función del tipo de uso implementado al suelo, Dalurzo et al. (2005), han evaluado y seleccionado atributos que permiten monitorear cambios en la calidad del suelo, situación importante para planificar el uso y manejo sustentable, es necesario además conocer la evolución de la calidad del suelo bajo diferentes prácticas agrícolas, utilizando indicadores que sean sensibles para detectar cambios, fáciles de medir e interpretar y accesibles para diversos usuarios.

La realización de todo lo mencionado tiene como objetivo el estudio de los suelos, lo cual es fundamental para lograr una agricultura eficiente, otro elemento importante para determinar las propiedades de los suelos es su caracterización por perfiles, tomados por elementos del paisaje (Bernal et al. 2015).

2.5. Antecedentes sobre estudios de propiedades o indicadores de calidad de los suelos

En una investigación realizada, Moreno et al. (2015), demostraron que las variables físicas y químicas no fueron sensibles a los cambios en el manejo de suelo durante el período considerado, a su vez el monitoreo del estado de la calidad de un suelo es esencial para tomar apropiadas y oportunas medidas de conservación de suelos.

El manejo agrícola convencional de suelos, con uso intensivo del arado, promueve la liberación de carbono hacia la atmósfera, mientras que el uso conservacionista favorece la acumulación de C en formas orgánicas dentro del suelo, favorece la agregación del suelo y consecuentemente interviene en la distribución del espacio poroso del suelo, afectando diversas propiedades físicas (Martínez et al. 2008).

Existe una naturaleza dinámica e interactiva de los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo, esta interconexión puede generar algunos problemas de

interpretación, por lo que se debe tener un acabado conocimiento de las diversas interacciones posibles en las diferentes asociaciones de manejo, suelo y propiedades.

Entre las propiedades químicas propuestas como indicadores, se señalan aquellas que inciden en la relación suelo-planta como: la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de nutrimentos para las plantas, entre otros (Soil Quality Institute 1996).

2.6. Indicadores de fertilidad y macronutrientes

2.6.1. El pH del suelo y su interacción

El pH del suelo es un factor que influencia la disponibilidad de los nutrientes, bajo varias condiciones; por un lado cuando predominan las condiciones de alcalinidad y por la otra, cuando predominan las condiciones de acidez; esto afectan principalmente la disponibilidad de los elementos como el nitrógeno, fósforo, potasio, molibdeno y boro, pues dependiendo del pH, muchos forman precipitados en la solución del suelo, que lo hacen no solubles y no disponibles para las raíces de las plantas (Kass 1996).

Como en este proyecto se estudiará suelos ácidos es importante dar una noción de las condiciones que causan la acidez del suelo.

Benton (2012), expresa que un suelo se acidifica por efecto de la temperatura y las precipitaciones (lixiviación del perfil del suelo), situación que puede aumentar por efecto del manejo y de la fertilización, además es importante mencionar que la tasa de disminución del pH está determinada por la capacidad amortiguadora del suelo (capacidad tampón), sus propiedades fisicoquímicas asociadas con la textura, la estructura, la mineralogía del suelo y los contenidos de materia orgánica.

Teniendo en cuenta los minerales del suelo, Robson (1989) menciona que el tipo de arcillo minerales presentes en el suelo influencia la capacidad tampón del suelo, en consecuencia, la capacidad amortiguadora del gibsita y la caolinita (que contienen el ácido bastante fuerte, Al^{3+}) es mucho menor que la de los minerales que contienen una mayor proporción de cationes ácidos débiles (por ejemplo, esmectita, illita y feldespato que contienen Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+).

Díaz-Zorita (1999), explicó que la acidez del suelo es frecuentemente modificada por las prácticas de labranza; además se mencionan otras prácticas como la fertilización nitrogenada y el encalado como agentes modificadores del pH del suelo (Chien et al. 2009; Torella et al. 2007).

Por otro lado, Zapata (2004), expresa que las raíces de las plantas toman del suelo los nutrimentos como cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+) y como aniones (H_2PO_4^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , etc.); esta absorción de nutrientes va acompañada de una transferencia de H^+ , OH^- y HCO_3^- desde la raíz hacia la solución del suelo que también acidifica el suelo.

2.6.2. Acidez potencial (H + Al)

La acidez potencial o de reserva se refiere a la concentración de iones H^+ y Al^{3+} en forma intercambiable. Y siempre es mayor a la acidez activa o pH (Casona 1996). La acidez activa y la acidez potencial se encuentran en el suelo en equilibrio dinámico. Si se elimina H^+ de la solución, se libera otros tantos H^+ adsorbidos. Como consecuencia de ello, el suelo muestra una fuerte resistencia a cualquier modificación de su pH (Casas 2012).

Fernández et al. (1991), expresó que parte del aluminio complejado en la acidez potencial y que puede activarse por ascensos del pH, el cual puede ocurrir por encalado o procesos de reducción; o bien por mineralización de la materia orgánica, liberándose el Al^+ ligado a ella.

2.6.3. Aluminio Intercambiable (Al^{3+})

Porta et al. (2003), el aluminio puede estar de forma soluble, intercambiable y tóxica para las plantas (Al^{3+}), o de forma polimerizada como hidróxidos de aluminio o aluminatos según el rango de pH del suelo.

La alta tasa de pluviosidad de las zonas tropicales, provocan el lavado de las bases del suelo Ca, Mg, K y otros, lo cual hace que el pH del suelo disminuya y aumente la disponibilidad de cationes como el Al, Fe y Mn, los cuales influyen negativamente en la productividad de los cultivos (Forero et al. 2009).

Juárez et al. (2006), en suelos moderadamente ácidos, con valores algo mayores de porcentaje de saturación en bases y pH, el aluminio, no puede existir en disolución como iones aluminio, sino que se transforma en iones hidróxido. En suelos muy ácidos dominan los iones aluminio intercambiable y el aluminio e hidrógeno enlazado. A valores altos de pH predominan las bases intercambiables, mientras que a pH intermedios son los iones hidróxido de aluminio como $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_{2+}$, los más abundantes (Figura 1).

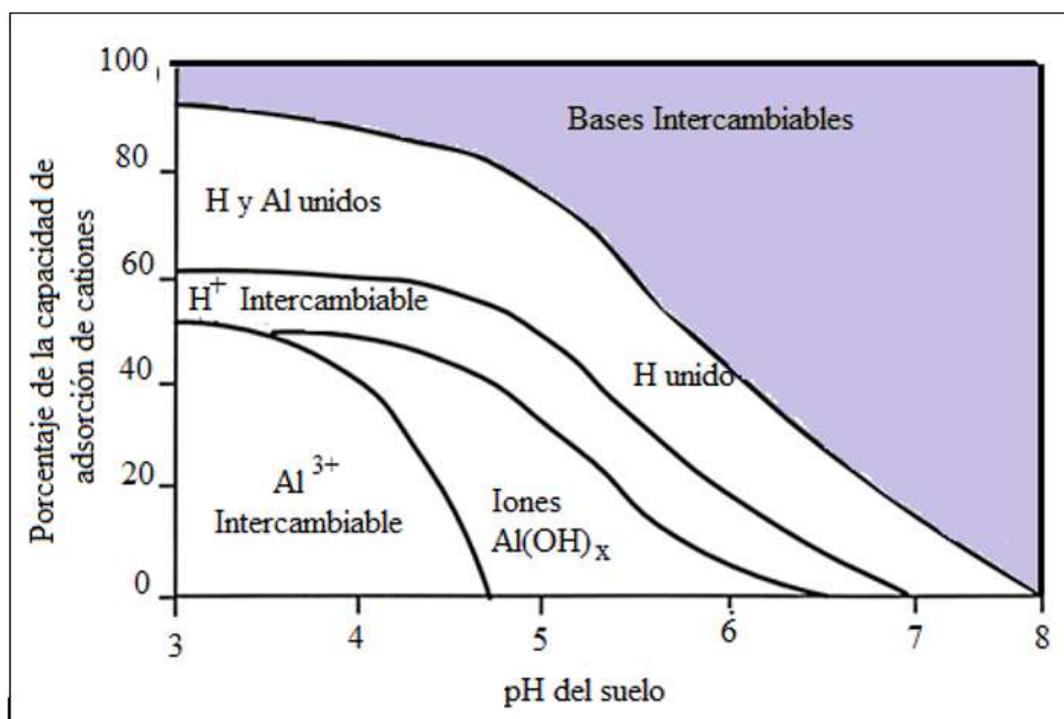


Figura 1. Relación entre el pH y los cationes unidos a los coloides del suelo (Brady, 1974, citado por Juárez et al. 2006)

Zambrosi et al. (2007) concluyeron que las formas intercambiables y no intercambiables de Al se relacionaron negativamente con el pH del suelo.

Hay tres criterios para considerar al aluminio como un problema en el suelo: cuando el contenido de Al^{3+} es superior a $2 \text{ meq} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, cuando el porcentaje de saturación de aluminio en relación con los cationes intercambiables es mayor que 25, o cuando la relación $(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K})/\text{Al}$ es menor o igual que uno. En cualquiera de estos casos es necesaria la implementación de algún correctivo con el fin de reducir el efecto tóxico del Al^{3+} para las plantas (Casierra y Aguilar 2007).

2.6.4. Materia Orgánica

La materia orgánica del suelo está constituido por restos vegetales y animales (macro, meso y micro fauna edáfica) en diferentes grados de descomposición y se compone fundamentalmente de materia orgánica no humificada (Biomasa vegetal y Biomasa microbiana) y Humus, esta última resultado de la alteración de productos sintetizados por las plantas y los microorganismos y en ese proceso de descomposición y mineralización intervienen microorganismos de la fauna edáfica tales como bacterias y hongos (Porta et al. 2003).

Juárez et al. (2006), la materia orgánica es una mezcla de ácidos débiles (ácidos húmicos y ácidos fúlvicos) estos con capaces de sufrir procesos de disociación-asociación, lo que genera la capacidad de regular el pH, de ese modo un buen contenido de materia orgánica en el suelo impide cambios bruscos del pH.

Del mismo modo Bohn et al (1993), indico que es una fuente con capacidad de intercambio catiónico y es un enorme depósito geoquímico de carbono; además su contenido varía enormemente conforme varían los tipos de suelo y por ende de los factores formadores que intervinieron en su formación. La mayoría de los suelos minerales tiene un contenido que oscila entre 0,5 y 5% de MOS.

Conforme a lo que mencionaba Juárez et al. (2006), se explica que la mayor parte de bacterias y actinomicetos se desarrollan mejor a pH neutro y ligeramente alcalino; en cambio, los hongos se desarrollan a un pH más amplio (Fassbender y Bonermisza 1987). Situación que se vio reflejada en la investigación de Ramos Vásquez y Zúñiga Dávila (2008) que el pH del suelo también resultó ser un factor limitante para la actividad microbiana. A pH 7.8 se registró la mayor actividad deshidrogenasa, descendiendo significativamente a valores de pH 4.0, 6.1 y 8.2.

Zambrosi et al. (2007) menciona que la menor toxicidad del aluminio en sistema de siembra directa está asociada a la capacidad de complejación que tiene los elementos de la materia orgánica, el cual tiene la capacidad de remover el aluminio de la solución del suelo. Situación que favorece la capacidad tampón del suelo para los cambios de pH.

La materia orgánica tiene un efecto acidificante en el suelo. En general se sabe que el horizonte A, por su mayor contenido de materia orgánica, es más ácido que el horizonte B; pero cuando se adiciona materia orgánica a los suelos ácidos produce, en general, un aumento del pH. Sin embargo, la adición de materia orgánica al suelo puede resultar en un incremento o disminución del pH, dependiendo de la influencia que tenga esta adición en el balance de protones de la capacidad neutralizante de acidez (CNA). Cuando se adiciona materia orgánica a los suelos ácidos produce, en general, un aumento del pH (Zapata 2004).

Por otro lado, es importante mencionar que la distribución de la materia orgánica expresado en carbono orgánico de suelo está afectada por el clima y el tipo de cobertura de suelo, en tal sentido Ibáñez (2006), expresó el contenido de materia orgánica en suelo depende fundamentalmente de la región bioclimática en donde se encuentra el suelo, mientras que su distribución en el perfil de suelo depende fundamentalmente de los tipos estructurales de vegetación, siendo mayor en los climas cálidos.

2.6.5. Fósforo

El fósforo no tiene fuente gaseosa como el carbono, nitrógeno y el azufre; su principal fuente se encuentra la fase mineral del suelo y en la materia orgánica, y esta segunda es la más importante pues el 30 al 50% del fósforo total disponible en el suelo proviene de la MO. El fósforo tiene una naturaleza inmóvil en la mayoría de los suelos, por lo que su pérdida no se produce por lixiviación, sino por procesos erosivos del suelo (Peña y Cardona 2010).

La interacción entre la roca, clima y los organismos, modificados por el relieve y el tiempo transcurrido de la interacción, todo ello factible de modificaciones por acción antrópicas, determinan los valores totales de fósforo del suelo, su distribución entre las distintas formas orgánicas e inorgánicas y el ambiente físico químico que regulan los factores de capacidad e intensidad o sea la disponibilidad para los cultivos (Mizuno 1981). A demás de esto, es importante recalcar lo que menciona Fassbender (1983), que la disponibilidad de fósforo en el suelo dependerá de la cobertura de suelo y del sistema de producción que se aplique.

Kass (1996), expresa que un buen ambiente de pH para la adecuada absorción del fósforo es entre 6 y 6.8, además que a un pH cercano a la neutralidad (7.0), aumenta la disponibilidad de magnesio que puede tener un efecto sinérgico, aumentando la cantidad de fósforo que absorbe la planta.

Benton (2012), indica que por debajo del pH 5.5, la disponibilidad de los elementos esenciales como el P y Mg disminuyen, mientras que la concentración de Al, Mn y para algunos suelos Cu, comienzan a avanzar hacia el rango tóxico; además, la interacción entre elementos, como P y Al, da como resultado la formación de complejos que reducen la disponibilidad de P.

Kass (1996), la retención del fósforo, a pH inferior de 5.5, es fundamentalmente por su reacción con el hierro y aluminio, precipitándose en fosfato de hierro (FePO_4) y aluminio (AlPO_4).

2.6.6. Calcio - Magnesio – Potasio

Tanto el potasio, el calcio y magnesio son absorbidos por las plantas en su forma iónica. El potasio es un elemento alcalino y monovalente, K^+ ; el calcio y magnesio son alcalinotérreos y bivalentes, Ca^{2+} y Mg^{2+} . Estos elementos son imprescindibles porque regular el balance híbrido de la planta (Fassbender 1983).

El calcio presente en el suelo, aparte de provenir de los fertilizantes o enmiendas, procede de las rocas y de los minerales de los que el suelo está formado (Navarro y Navarro 2013).

El potasio por su parte proviene de los minerales primarios como el feldespato, la mica y de los minerales secundarios (arcillas 2:1) y su disponibilidad depende de la textura del suelo, humedad y pH del suelo (Kass 1996). Este elemento es de movilidad media en el suelo por ser menor a la del nitrógeno, aunque en la planta es de alta movilidad, por lo tanto, se lava en suelos arenosos con baja capacidad de intercambio catiónico (Larriva 2003); por el contrario, en suelo arcillosos se tendrán menor pérdida de potasio por lixiviación (Navarro y Navarro 2013).

El K presenta movilidad en el suelo, pudiendo ser redistribuido en el perfil, por el flujo de agua (movilidad vertical) y por absorción y reciclaje por las plantas (movilidad horizontal). Así, la variabilidad, vertical y horizontal, de los tenores de K, normalmente, es menor que la de P (Cubilla et al. 2012).

El potasio, junto con el magnesio, son elementos que se lixivian rápidamente en comparación con el calcio; es así que, en sitios lluviosos, el contenido de potasio es bajo (Podwojewski y Poulenard, citado por Estupiñan et al. 2009).

Juárez et al. (2006), indican que el calcio y magnesio son las bases que en mayor proporción participan en el complejo de intercambio catiónico. Bajo condiciones de alta acidez disminuyen rápidamente las concentraciones de Ca, Mg y K en los suelos produciéndose deficiencias de estos elementos.

En los suelos de carga variable, el aumento de la acidez produce un aumento de la CIC, lo que reduciría la capacidad del suelo para retener K^+ , dando como resultado más K^+ en la solución del suelo. En cuanto al Ca^{2+} , en suelos ácidos, la mayor parte del Ca^{2+} presente existiría en formas solubles como Ca^{2+} y a medida que el pH cae, menos Mg se mantiene en forma intercambiable debido a la reducción en la carga variable y más está presente en la solución disponible para la pérdida por lixiviación. El magnesio es un competidor pobre con Al y Ca para los sitios de intercambio y a menudo se pierde de la capa superficial del suelo como resultado de la acidificación o la aplicación de grandes cantidades de Ca soluble (Ulrich y Sumner 1991).

Borges et al. (2012), al caracterizar las propiedades químicas del suelo y su asociación con macro elementos en áreas destinadas a pastoreo, determinaron que los contenidos de potasio mantuvieron una tendencia de alta dispersión dentro del pH, además, minerales como el fósforo y calcio estuvieron altamente asociados a las condiciones de pH en los suelos, siendo éste un factor determinante en la disponibilidad de estos elementos para la nutrición, así mismo, estos minerales se encuentran asociados entre sí, determinando estados carenciales de ambos en el mismo suelo.

Lince et al. (2015), en una investigación realizada sobre la disponibilidad de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en función de las propiedades del suelo, zona cafetera central de Colombia, demostraron que las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en la fase de cambio y la solución del suelo no presentaron diferencia estadística en los primeros 30 cm del perfil; salvo algunas excepciones, donde la concentración fue mayor en los primeros 5 cm de profundidad, posiblemente debido a la actividad orgánica en la rizosfera.

2.6.7. Azufre

El azufre es considerado el cuarto elemento más importante en la agricultura, después de nitrógeno, el fósforo y el potasio (González-Osorio y Sadeghiam 2006).

La materia orgánica es la principal fuente de azufre en la mayoría de los suelos cultivados, y su contenido es mucho menor con relación a otros componentes del ciclo del carbono, otra fuente en el suelo, es la pirita (roca ígnea) que se transforma por oxidación a sulfato el cual es tomado por las plantas y microorganismos e incorporado a la materia orgánica del suelo (Colacelli 2001).

En el suelo existen básicamente dos formas de este elemento; la orgánica, asociada a la materia orgánica y la inorgánica, dentro de la cual se incluye la forma disponible o aprovechable por las plantas llamada sulfato, SO_4^{2-} (González-Osorio et al. 2005). El sulfato tiene una gran movilidad en el suelo y se puede perder fácilmente por lavado (Kass 1996). Osorio (2006) mencionó que, en los suelos arenosos, el SO_4^{2-} tiende a moverse más rápidamente a los horizontes subsuperficiales e incluso salir del sistema terrestre por lixiviación y en general, se encuentran niveles más altos de SO_4^{2-} en los horizontes subsuperficiales, en relación con la superficie. Por otro lado, al aumentar la acidez de suelo, aumenta la retención de los iones sulfatos (Bohn et al. 1993).

El mismo autor expresa que la mineralización del S es influenciada por factores de suelo, clima y por el manejo a que el suelo es sometido. Los principales factores son formas de S inorgánico del suelo, tipo de material orgánico adicionado al suelo, población microbiana, temperatura, aireación y pH, estos son influenciados

fundamentalmente por la rotación de cultivos, adición de residuos orgánicos y la corrección del pH.

Los arriba mencionado es corroborado por Mizuno et al. (1986), que el azufre orgánico en el horizonte superficial tiende a una mayor conservación con pradera en comparación con la agricultura de cosecha. Las rotaciones con pradera tienden a conservar el valor de azufre total en el horizonte superficial, lo que indica que el sistema de manejo o uso del suelo tiene efectos significativos sobre el contenido de azufre del suelo.

En forma general se ha considerado como bajo el contenido de S en suelos tropicales, se debe a la baja materia orgánica presente, al bajo contenido de S en el material parental, a la extremada meteorización y las pérdidas producidas por lavado (Blair citado por Gualdrón y Salinas 1982).

2.6.8. CIC

La CIC, es una propiedad química del suelo estrechamente vinculada a su fertilidad, depende de los coloides inorgánicos (arcillas cristalinas, geles amorfos, óxidos y sesquióxidos de hierro y aluminio) y del contenido de MOS (Martínez et al. 2008).

Los iones intercambiables se encuentran localizados en la doble capa difusa que rodea a las partículas coloidales del suelo y en los suelos agrícolas productivos se encuentran en el siguiente orden $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ = Na^+$ (Bohn et al. 1993).

El porcentaje de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) que está ocupado por Al e H, es el mejor criterio para diagnosticar problemas de acidez, y aunque, cada cultivo tiene su grado de tolerancia a la acidez, en general, ningún cultivo soporta más de 60% de saturación de acidez y el valor deseable para la mayoría de las plantas oscila entre 10% y 25%. (López-Báez et al. 2018).

Además, la elevación del pH del suelo cambia también la selectividad catiónica porque incrementa la CIC del suelo y de esta manera aumenta también la preferencia por iones polivalentes contra los monovalentes (Bohn et al. 1993).

2.7. Manejo de suelo

El uso del suelo, es referido en su sentido más amplio, a las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal (Trucíos et al. 2013).

Sin embargo, el manejo de suelo son prácticas que se desarrollan en el suelo con la finalidad de obtener resultados favorables en la producción (FAO 2019). Desde ese punto de vista se puede mencionar que existen diversos manejos o uso dependiendo de la finalidad que se persigue. Entre ellas se detallan algunas:

Bosque es un ecosistema nativo o autóctono, intervenido o no, regenerado por sucesión natural u otras técnicas forestales, que ocupa una superficie de dos o más hectáreas, caracterizado por la presencia de árboles maduros de diferentes edades, especies y porte variado. Debe existir 70 o más arboles por hectárea con DAP de 15 cm o más, con ausencia de otros usos (Ley N° 7575).

Labranza convencional consisten en hacer uso del arado y/o del rastrillo para preparar el suelo (CIAT 1981) y por muchos años fue el único método utilizado para la preparación de suelo.

Siembra directa es colocar la semilla en contacto con el suelo eliminando el movimiento de tierra y dejando rastrojo en superficie. La salvedad es que no es lo mismo sembrar directo, para lo que es suficiente tener una sembradora que coloque la semilla en contacto con el suelo sin necesidad de laborear, que siembra directa que implica sembrar sin laboreo, pero sobre un suelo preparado manejando procesos biológicos que propician un ambiente óptimo para la siembra, germinación, implantación y crecimiento vegetal (Perrachón 2004).

Los sistemas silvopastoriles son una combinación de árboles, arbustos forrajeros y pastos con la producción ganadera en la finca. En este sistema se quiere una administración de estos recursos de manera que perduren en el tiempo los árboles y arbustos, así como su aprovechamiento en la alimentación animal (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura 2016).

Las pasturas, son ecosistemas constituido por especies exóticas o también denominadas introducidas o no nativas. Las especies exóticas son aquellas que se encuentran fuera de su área de distribución original o nativa (histórica o actual), no acorde con su potencial de dispersión natural (Demagnet sf).

2.8. Relación de las propiedades del suelo y el manejo

Navarro et al. (2000), menciona que cualquier sistema de labranza modifica la estructura del suelo, la resistencia a la penetración y al corte de la capa arable del suelo y dependiendo del contenido de humedad de éste, la labranza favorece o destruye la estructura, repercutiendo en el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Varias experiencias se dieron en el marco de estudios e investigaciones asociando las diferentes propiedades del suelo entre los que se puede mencionar trabajos de López-Mtz (2001), que apreciaron el incremento del 10% de humedad en el suelo (propiedad física) por la incorporación de diferentes tipos de abono orgánicos; corroborado por Sanzano et al. (2005), quienes expresaron que las prácticas conservacionistas, en el largo plazo, mejoraron las propiedades físicas y químicas de los suelos evaluados.

También, Trejo-Escareño et al. (2013), evaluaron el impacto de la incorporación de materia orgánica en el suelo, los mismos observaron que con 10 años de incorporación consecutiva de estiércol, es capaz de aumentar 189 y 180% la MO en el suelo, suelos que terminaron con 4 y 3.8% de MO, autores que no evaluaron la interacción de las prácticas de manejo con las propiedades físicas y químicas y su correlación con la fertilidad.

Obando et al. (2006), concluyeron que la variabilidad espacial de atributos del suelo en determinados tipos de suelo, es mayor en las propiedades químicas debido posiblemente a efectos del manejo y geomorfología del terreno.

Estudios como el de Campitelli et al. (2010), quienes buscaron seleccionar indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas, determinaron que los indicadores más sensibles y sencillos de medir para evaluar calidad de suelos y que están relacionados a la fertilidad de los mismos son:

materia orgánica del suelo, nitrógeno total, fósforo extractable y a la susceptibilidad a la erosión.

Los diferentes tipos de relieve agrega fuente de variación espacial del suelo, por ejemplo, los suelos de las laderas tienden a tener textura más fina y a ser más ácidos que los suelos de las crestas o vigas; en adición a esto, la variación bioclimática presente en esta área también influye sobre las diferencias observadas en las propiedades del suelo, bajo las mismas condiciones de relieve y formación geológica (Pineda et al. 2011).

Las condiciones químicas y físicas en la que se encuentra un suelo generalmente están asociadas a las condiciones climáticas y a la composición química de los minerales que la conforman, así como también de la vegetación, la topografía y las prácticas de manejo que se desarrollan bajo las condiciones previamente mencionadas.

López-Báez et al. (2018), expresaron en los resultados de su investigación diagnóstico de las propiedades de los suelos en áreas de bosque y productivas de la reserva de la biosfera el Triunfo (México), que el pH es probablemente la característica química más importante del suelo porque influye en casi todos los demás aspectos del mismo mencionando a los autores Bloom y Benzing. Además, expresan que el menor contenido de materia orgánica en los suelos con uso agrícola es de producto del lavado constante por la erosión y la ausencia de prácticas de conservación particularmente en los suelos cultivados con maíz, además en el mismo trabajo observaron alta variabilidad en el contenido de fósforo independientemente del uso del suelo.

Los cambios de uso de suelo afectaron significativamente algunas de las variables químicas en las dos profundidades de un vertisol estudiado. El análisis de varianza mostró diferencias en el factor uso de suelo (FA) para pH y en las concentraciones de potasio (K), magnesio (Mg), sodio (Na), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn), siendo el fósforo el único nutriente que no presentó diferencias entre los usos de suelo, mientras que para el factor de profundidad (FB) no se encontraron diferencias para los nutrientes de Na y Mn. La interacción de los dos factores (A*B) fue significativo solo para Zn y pH (Ybáñez Díaz et al. 2018).

En cuanto al comportamiento de las propiedades químicas del suelo en relación a la profundidad, Zambrosi et al. (2007), mencionan que los contenidos de MO disminuyen a lo largo del perfil del suelo. Además, existe una buena relación materia orgánica-densidad aparente, que mejora la estructura del suelo en los primeros 20 cm (Murray et al. 2014).

Además, Hansel et al. (2017) al caracterizar parcelas para investigaciones en dos localidades de Rio Grande do Sul, Brasil a través de muestras de suelo de 0 – 40 cm, encontrando lo siguiente: el pH fue mayor en las capas superficiales del suelo, de 0 a 10 osciló de 6 a 5.5; en esa misma capa se observó un contenido de materia orgánica que osciló entre 30 a 40 g kg⁻¹, así como la concentración del P – Ca – Mg fue mayor en la capa superficial de los suelos estudiados, sin embargo, la concentración de Al fue menor en la capa 0-10 y aumentó con la profundidad.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización de la investigación

La investigación se llevó a cabo en el Departamento de Caaguazú ubicado en el centro este de la Región Oriental, ubicado en la coordenada UTM 569743,1; 7186395, en la finca Agro ganadera ALTA FLORESTA (Figura 2), localizada en el Distrito de Coronel Oviedo, a 16.67 Km de la ciudad el mismo nombre, en la Colonia Mburupy, cuyo suelo fue clasificado en el Orden Ultisol, sub grupo *Arenic paleudult*, según mapa de reconocimiento de suelos de la región oriental del Paraguay de López et al. (1995).

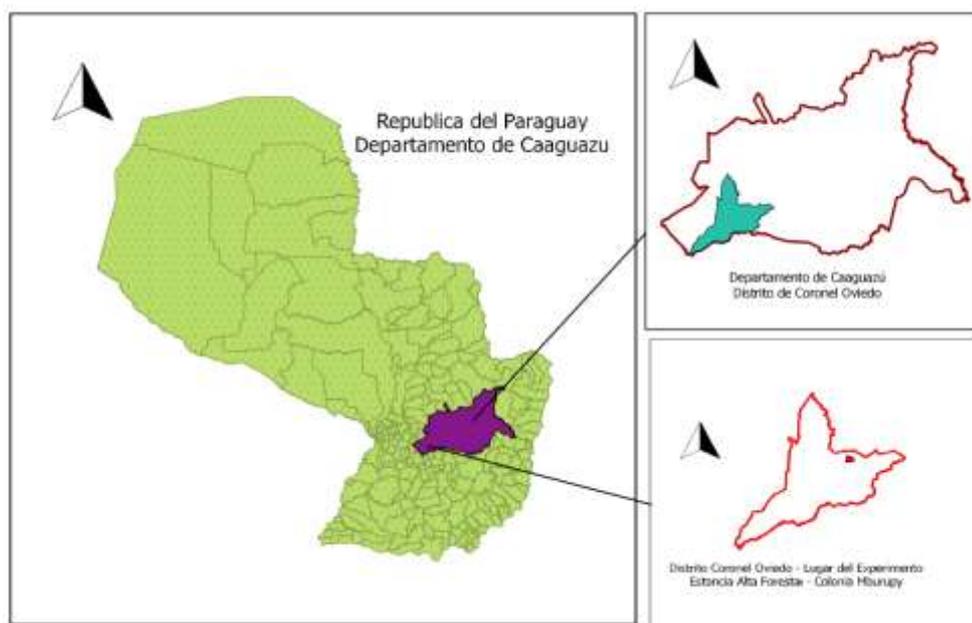


Figura 2. Ubicación de sistemas empleados dentro de la Agroganadera Alta Foresta

Según el monitoreo de la precipitación diaria generada por la Estación Meteorológica automática de Coronel Oviedo perteneciente a la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC), la localidad tuvo la siguiente característica (Figura 3).

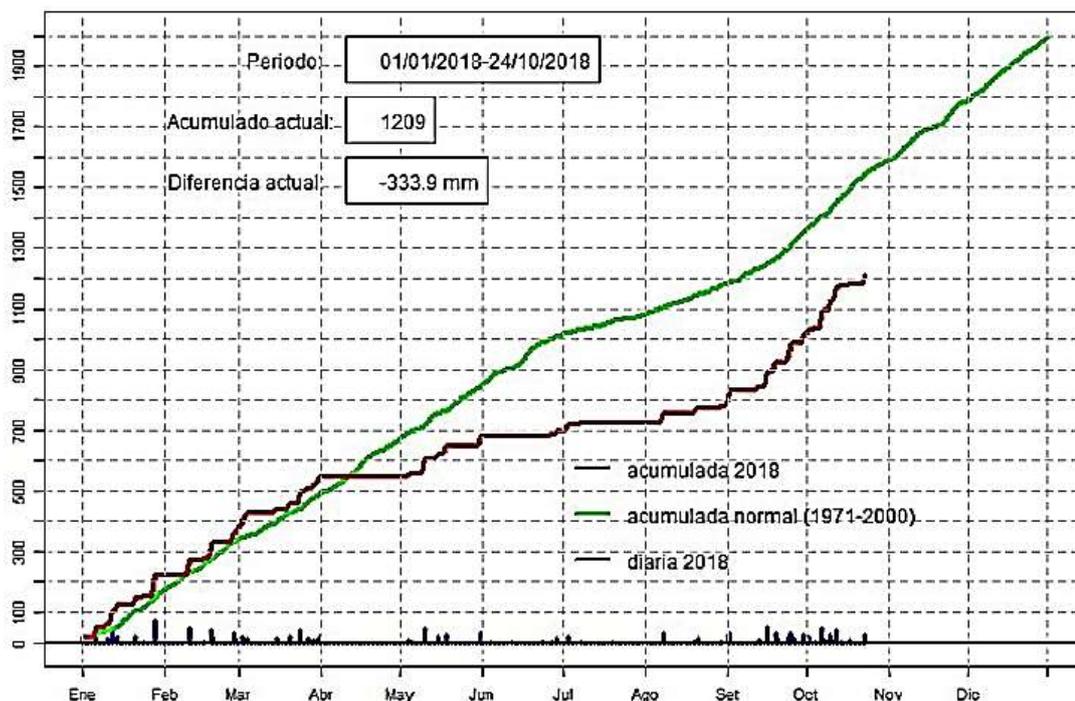


Figura 3. Precipitación diaria Distrito de Coronel Oviedo al 24 de octubre de 2018

3.2. Población de unidades y variables de medición

La investigación se realizó tomando como población de unidades un suelo Ultisol del Departamento de Caaguazú ubicado mediante mapa de reconocimiento de suelos de la región oriental de López et al. (1995), donde la selección de la muestra fue exprofeso constituida por cinco calicatas distribuidas en cinco sistemas de manejo de las que se extrajo seis muestras de suelos de diferentes profundidades, totalizando 30 muestras estudiadas, ubicados geográficamente cada uno de ellos por medio de un equipo GPS.

3.2.1. Variables Independientes

Tanto el uso o sistema de manejo y la profundidad, fueron consideradas como variables independientes de la investigación.

3.2.2. Historial de parcelas

La parcela cuyo uso es el manejo convencional actualmente es utilizada para la siembra de pasturas, donde durante nueve años se sembró maíz y otros cultivos como el sorgo; en diciembre de 2017 fue realizado doble arada y subsolado para la

implantación de una pastura *Panicum maximum* cv. Aruana, para lo cual se realizó la aplicación de cal agrícola de fuente calcítica a razón de 1400 kg por hectárea calculada a través de la capacidad tampón del suelo para esas condiciones, al momento de la siembra se realizó la fertilización de base con 15-15-15, 150 kg por hectárea. Al momento del estudio la parcela se encontraba cubierta con la pastura mencionada, cuyo propósito principal es servir de alimento para el ganado ovino.

La parcela de siembra directa, cuenta con una superficie cultivada de 25 hectáreas, en la cual se realizó principalmente siembra de maíz para alimentación animal; entre los años 2014 y 2015 se realizaron rotaciones con leguminosas y gramíneas; entre los años 2017 y 2018 se realizaron siembra de maíz transgénico R2, con la aplicación de 200 kg de fertilizante con formulación 4-30-10; esta parcela permaneció en labranza cero por más de 10 años. No se ha detectado compactación en el suelo, aunque en el lugar no ingresaron animales, pero si maquinas agrícolas. En los primeros años la cosecha fue realizada utilizando segadora picadora mecánica y en el año 2018 las dos cosechas fueron realizadas con cosechadoras.

La parcela silvopastoril con Eucalipto fue implantada en el 2011 con fines de reforestación y resguardo animal. En esta parcela en los años 2014 - 2015 fue implantada la pastura *Brachiaria brizantha* con fines de alimentación animal. En el periodo 2017 - 2018 se aplicó fertilizante con P_2O_5 a razón de 60 kg/ha, debido principalmente a la alta extracción del fósforo por las pasturas. El ingreso de animales en la parcela de investigación se produce principalmente en épocas de mucho calor y muy bajas temperaturas. Durante el periodo de este estudio se permitió el ingreso de ganado vacuno en la parcela.

La parcela de investigación que tiene como uso la pastura *Brachiaria brizantha*, implantada en el 2007, es utilizada principalmente para pastoreo de novillos; en la misma y hasta la fecha de conclusión del estudio no se han realizado prácticas de fertilización y corrección del pH.

La parcela de investigación bosque, corresponde a un bosque secundario de regeneración, cuyo borde se utiliza como recostadero de los animales bovinos. En

esta parcela no se ha aplicado ningún tipo de fertilización, tampoco se incorporó calcáreo.

3.2.3. Variables dependientes

a. Propiedades morfológicas y físicas

- Descripción morfológica del perfil en las calicatas: esta descripción se realiza con la finalidad de aportar información de las características morfológicas de cada punto de muestreo.
- La única propiedad física determinada fue la granulometría por el método de Bouyoucos.

b. Propiedades químicas

Los indicadores de fertilidad determinados fueron:

- Acidez activa (pH CaCl₂) con potenciómetro
- Acidez potencial (H + Al) por curva de SMP
- Al³⁺ por el método colorimétrico
- Materia Orgánica (%) por el método de Walkley-black
- Capacidad de intercambio de cationes (CIC): método de extracción por Acetato de amonio pH 7.
- Suma de bases (ΣB): Por fórmula matemática
- Porcentaje de Saturación de Bases (V%): Por fórmula matemática

Macronutrientes: fueron determinados los siguientes, Ca – Mg – K – P – S, cuya la metodología se detallada en página 29.

3.3. Diseño para la recolección de datos primarios

La investigación fue no experimental con enfoque cuantitativo y alcance correlacional, donde fue adoptado un diseño muestral aleatorio simple, constituido

por cinco calicatas ubicadas en cinco sistemas de manejo o usos y seis profundidades de muestreo (Tabla 1).

Se aplicó diferentes tipos de análisis tales como análisis multivariado y análisis no paramétricos por Kruskal Wallis para la comparación por uso y profundidad de suelo los cuales se detallan en el apartado 3.7.3.

Tabla 1. Conformación de las variables independientes

Ord	Manejo de Suelo	Código	Profundidades de muestreo en cm^(a)
1	Sistema Bosque	B	0 – 5
			5 – 15
			15 – 30
			30 – 60
			60 – 100
			100 – 150
2	Sistema de Labranza convencional (Al menos 10 años de uso)	SC	0 – 5
			5 – 15
			15 – 30
			30 – 60
			60 – 100
			100 – 150
3	Siembra directa (Al menos 10 años de uso)	SD	0 – 5
			5 – 15
			15 – 30
			30 – 60
			60 – 100
			100 – 150
4	Sistema silvopastoril (7 años de uso)	SSP	0 – 5
			5 – 15
			15 – 30
			30 – 60
			60 – 100
			100 – 150
5	Sistema Pastura (10 años de uso)	SP	0 – 5
			5 – 15
			15 – 30
			30 – 60
			60 – 100
			100 – 150

3.4. Recursos, materiales y equipos

3.4.1. Materiales cartográficos

Se utilizó mapas preexistentes de división política, geológica y de tipos de suelo del Departamento Caaguazú para determinar los puntos de muestreo.

3.4.2. Programas informáticos

Se utilizó programas informáticos como: Microsoft Word, Microsoft Excel, QGIS 2.18, SAS Institute Inc. 2007. SAS Online Doc® 9.2. Cary, NC: SAS Institute Inc. y el programa estadístico Infostat v.2017e.

3.4.3. Equipos, herramientas y vehículo

Para los trabajos de campo fueron utilizados pala, picos, bolsas de muestreo, etiquetas, pinceles, libreta de campo, cámara fotográfica, estacas, hilo, cilindro metálico, martillo. Para la localización precisa de cada calicata se utilizó GPS (Sistema de Posicionamiento Global) y para acceder a la zona de estudio se utilizó un vehículo todo terreno proveído por la Universidad Nacional de Caaguazú.

El procesamiento de los datos de campo requirió equipos de gabinetes tales como: notebook, impresoras, así como útiles de oficina como papelería entre otros.

3.5. Fuente de financiación

El proyecto fue financiado por tres estamentos:

- Los análisis químicos fueron financiados con recursos parte del *Proyecto caracterización física y química de suelo del Departamento Caaguazú, financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)*.
- La apertura de las calicatas y la provisión de materiales fueron financiados por la Facultad Ciencias de la Producción de la Universidad Nacional de Caaguazú.

- Los gastos de movilidad, alimentación, hospedaje y materiales de campo y de gabinete estuvo a cargo de la tesista.

3.6. Procedimientos para la recolección de los datos de campo

A través del Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando el QGIS V2.18se procedió a delimitar el área de estudio considerando la zona con presencia de suelos de la orden Ultisol. Los puntos de estudios fueron ubicados en un mismo establecimiento y todos en posición fisiográfica alta.

Una vez determinado los puntos de muestreo se procedió a excavar las calicatas en dimensiones correspondientes a 1,50 m de ancho x 2,00 m de largo y 1,50 m de profundidad.

Para la preparación de las calicatas se contó con un equipo de campo integrado por quince personales y los asesores de la investigación. La descripción de perfiles se realizó mediante la intervención del Prof. Ing. Agr. Dr. Arnulfo Encina Rojas y el Prof. Ing. Agr. M.Sc. Carlos Villalba Martínez, utilizando planillas especialmente preparadas para descripción de perfiles de suelo.

3.7. Determinaciones morfológicas, físicas y químicas

3.7.1. Determinación morfológica

Las descripciones de los perfiles de suelos se realizaron según la guía para la descripción de perfiles de suelo del Soil Survey Staff (2014) y el manual básico para la descripción de perfiles de suelo Encina (2005). Utilizando la metodología de observación en cada sistema estudiado. Posteriormente, los datos fueron recolectados en planillas de campos desarrolladas para el efecto (Anexo 7.B.).

Para la precisión de los aspectos a describir en el campo fue utilizada una planilla de indicadores de referencias adaptada por Encina (2018). Para la descripción del color del suelo, la cual se determinó en estado húmedo a nivel de campo, se utilizó la Carta de Colores Munsell.

3.7.2. Determinación física

Para determinar la granulometría del suelo equivalente al contenido de arena, limo y arcilla como única propiedad física evaluada, se utilizó el método del densímetro de Bouyoucos (1927) modificado, para medir la densidad de la solución.

3.7.3. Determinación química

Los análisis químicos se realizaron en el Laboratorio de la empresa Agronómico, ubicado en el Paraná Country Club, Distrito de Hernandarias, Departamento del Alto Paraná, siguiendo la siguiente metodología:

- a. Indicadores de fertilidad
 - Acidez Activa o pH CaCl₂: a la muestra 1:1 de suelo más agua, se agregó 20 ml de CaCl₂ H₂O 0,01 M y se agitó cada muestra por 30 segundos con varilla de vidrio. Luego de esperó 1 minuto y se colocó el electrodo del pH metro justo por encima del sedimento del suelo y se leyó el pH en CaCl₂ 0,01M.
 - Acidez intercambiable (Al³⁺ + H⁺): estimada a través de los resultados de pH SMP, curva de calibración para suelos de Paraguay, datos internos del laboratorio no publicados.
 - Al³⁺: se determinó por el método colorimétrico, utilizando como sustancia extractora KCl 1 mol L⁻¹.
 - Materia Orgánica: se aplicó el método de Walkley-black modificado, determinación por espectrofotometría UV.
 - Suma de bases (ΣB): representa la suma de calcio, magnesio, potasio y sodio, los resultados se expresaron en Cmolc/kg.

$$\Sigma B = Ca + Mg + K + Na$$

- La capacidad de intercambio catiónico (CIC): se determinó mediante extracción con Acetato de amonio 1N, con pH ajustado a 7,0 y saturación con amonio del complejo de cambio. El exceso de amonio del suelo fue eliminado lavándolo con etanol al 95%. El amonio de la porción de intercambio fue extraído por el lavado con una solución de Cloruro de sodio al 10% y una alícuota de esta solución fue destilada en un aparato de Kjeldahl,

recogiéndose el destilado en una solución de Ácido bórico y titulándose con una solución de ácido clorhídrico a 0,002N. Representa la suma de calcio, magnesio, potasio, sodio, aluminio e hidrógeno los resultados se expresaron en cmolc.dm^{-3} .

$$\text{CIC}_{\text{pH7}} = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na} + \text{Al} + \text{H}$$

- Porcentaje de saturación de bases: representa cuanto de la CIC potencial es ocupada por bases. Para determinar el porcentaje de saturación de bases se utilizó la siguiente formula.

$$SB(\%) = \left(\frac{\Sigma B}{\text{CIC}_{\text{pH7}}} \right) \cdot 100$$

- b. Macronutrientes (Ca – Mg – K – P - S): por un lado el fósforo (P) y el potasio (K) fueron determinadas mediante extracción con solución de ácido sulfúrico y ácido clorhídrico (Mehlich-1). La lectura del fósforo se realizó con espectrofotómetro colorimétrico y la lectura del potasio con el fotómetro de llamas. Se expresó en mg/kg. Por otro lado, el calcio y magnesio, fueron determinadas mediante extracción con solución de acetato de amonio ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}_2$) 1 M (pH 7) y lectura con EAA. Para determinar el azufre (S), se utilizó extracción con solución de Fosfato monobásico de calcio y lectura con espectrofotómetro de absorción atómica.

3.8. Métodos de control de calidad de los datos

Para el control de la calidad de los datos se procedió a cargar los resultados de laboratorio en planilla de Microsoft Excel, cotejando los resultados de campo con lo que evidencia la teoría.

3.9. Métodos de análisis e interpretación de los datos

- c. Los resultados registrados en las planillas de descripción de perfiles fueron presentados en tablas descriptivas por particiones (unidades de manejo).
- d. La granulometría del suelo fue la única expresión física a la que se aplicó comparaciones de medias generales, asumiendo que cada uso y cada profundidad es

un grupo. Para la comparación se realizó aplicando análisis multivariado cuyo modelo matemático es el siguiente:

$$Y = XB + \varepsilon$$

Donde:

Y es una matriz $n \times p$ con n =número de observaciones o casos del archivo y p =número de variables seleccionadas como dependientes;

X es una matriz $n \times k$ con k =número de parámetros fijos del modelo asociados a una variable;

B una matriz $k \times p$ conteniendo los parámetros fijos asociados a las p variables y;

ε una matriz $n \times p$ de términos de error. Al encontrar diferencias significativas se procedió a la prueba de Hotelling ajustado por Bonferroni para comparar los grupos.

e. Análisis de las propiedades químicas

En primer término, se realizó comparaciones por uso y por profundidad tanto de los indicadores de fertilidad del suelo y los macronutrientes, asumiendo que cada uso y profundidad como repetición, para la comparación se aplicó análisis de varianza no paramétrico Kruskal Wallis y al encontrar diferencias significativas se procedió a la comparación por pares del mismo estadístico a través de la mediana.

El estadístico está dado por el siguiente modelo matemático

$$K = (N - 1) \frac{\sum_{i=1}^g n_i (\bar{r}_{i\cdot} - \bar{r})^2}{\sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{n_i} (r_{ij} - \bar{r})^2}$$

Donde:

n_i es el número de observaciones en el grupo i

r_{ij} es el rango (entre todas las observaciones) de la observación j en el grupo i .

N es el número total de observaciones entre todos los grupos.

$$\bar{r}_{i\cdot} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} r_{ij}}{n_i},$$

$\bar{r} = (N + 1)/2$ es el promedio de r_{ij}

También se correlacionó entre sí el contenido de Al y el pH. Cuya fórmula matemática es:

$$S = \frac{(ad - bc)}{\sqrt{(a + b)(c + d)(a + c)(b + d)}}$$

Seguidamente, se realizó análisis de correlación de los indicadores de fertilidad con los de los macronutrientes por uso y por profundidad, los cuales fueron presentados en tablas.

Tabla 2. Referencia para r de correlación

R=	Interpretación
1	Correlación perfecta
$0,8 < r < 1$	Correlación muy alta
$0,6 < r < 0,8$	Correlación alta
$0,4 < r < 0,6$	Correlación moderada
$0,2 < r < 0,4$	Correlación baja
$0 < r < 0,2$	Correlación muy baja
0	Correlación nula

Riveros (2018) – CP.

El comportamiento de los indicadores de fertilidad (pH, Al^{3+} , %MO, CIC y %SB) y los macronutrientes (Ca, Mg, K, P y S) fueron expresadas en gráficos de perfiles de doble entrada.

Para interpretar el nivel de cada macronutriente, materia orgánica, el aluminio y el pH en el suelo se utilizó la referencia del Laboratorio de suelo.

Tabla 3. Rangos de referencia de los indicadores de fertilidad y nutrientes en el suelo

Nutriente	Unidad de medida	Interpretación			
		Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
MO	%	< 1,2	1,2 – 2,8	2,8	-
pH CaCl ₂	-	< 5,0	5,0 - 5,5	> 5,5	-
Al	Cmol dm ⁻³	< 0,25	0,26 – 0,50	0,51 – 0,80	> 0,81
Ca	Cmol dm ⁻³	< 5,0	5,0 - 10,0	> 10,0	-
Mg	Cmol dm ⁻³	< 0,5	0,5 - 1,5	> 1,5	-
K	Cmol dm ⁻³	< 0,45	0,45 - 0,7	0,7 - 2,0	> 2,0
P	mg dm ⁻³	<10,0	10,0 - 20,0	21,0 - 40,0	> 40,0
S	mg dm ⁻³	< 5,0	5,0 - 10,0	10,0 - 20,0	> 20,0
SB	%	0 - 40	41 - 60	61 – 80	> 80
CIC	Cmol dm ⁻³	0-5	5,1 - 10	>10	-

Fuente: Laboratorio de la Empresa Agronómico (2019).

Tabla 4. Clasificación del suelo ácido según su pH

Valor	Clasificación
< 3,5	Ultra ácido
3,5 – 4,4	Extremadamente ácido
4,5 – 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 – 5,5	Fuertemente ácido
5,6 – 6,0	Moderadamente ácido
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido
6,6 – 7,3	Neutro

Tomado de: Zapata (2004)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Propiedades morfológicas y granulometría del suelo

4.1.1. Características morfológicas de los suelos estudiados

Inicialmente en la Tabla 5, se observa las características del terreno del área de estudio en cada tipo de uso. De manera general, el terreno presenta un paisaje con topografía ondulada, los suelos en estudio ocupan una posición fisiográfica alta con una pendiente de 3 a 8% lo cual implica riesgo de erosión y que la misma requiere de un manejo de suelo adecuado para reducir la misma; el drenaje del terreno y la permeabilidad del suelo son buenos; el nivel freático es profundo en todos los usos.

Tabla 5. Característica del terreno en el área de estudio

Características del Paisaje	Bosque	Siembra convencional	Pastura	Siembra Directa	Silvopastoril
Topografía	Ondulada	Ondulada	Ondulada	Ondulada	Ondulada
Posición fisiográfica	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Pendiente	3-8	3-8	3-8	3-8	3-8
Drenaje	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Permeabilidad	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Nivel Freático	Profundo	Profundo	Profundo	Profundo	Profundo
Material Parental	Arenisca	Arenisca	Arenisca	Arenisca	Arenisca
Pedregosidad	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula
Rociedad	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula
Vegetación Natural	Regeneración Natural	Implantada	Implantada	Barbecho	Implantada
Uso Actual	Bosque	Pastura Panicum maximun cv aruana	Pastura en descanso Brachiaria brizantha	Siembra directa - Maíz	Eucalipto / pastura
Erosión	No aparente	No aparente	No aparente	No aparente	No aparente

Los suelos tienen su origen en roca sedimentaria tipo arenisca y no se observaron presencia de piedras y rocas tanto superficial como internamente. En el lugar de estudio no se encontró vegetación natural original, parte de la vegetación existen fueron implantadas y los bosques se formaron por regeneración natural.

Tabla 6. Características morfológicas de los perfiles estudiados

Bosque													
Horizonte Genético	Profundidad (cm)	Limite	Color		Estructura			Consistencia en			Poros	Raíces	Inclusiones
			Seco	Húmedo	Tipo	Clase	Grado	Seco	Húmedo	Mojado			
A1	0-23		7,5 YR 4/3	7,5 YR 3/4	bsa	p	d	b	fr	np/np	ab gr	p m	nso
A2	23-63	c-p	5 YR 4/6	5 YR 5/8	bsa	p	d	d	mfr	np/np	ab gr	p m	nso
E	63-91	c-p	7,5 YR 5/8	7,5 YR 5/6	bsa	p	d	b	fr	np/np	ab gr	p m	nso
B1	91-112	c-p	2,5 YR 3/4	2,5 YR 3/4	bsa	pm	f	md	ef	mpl/mp	ab m	mp f	nso
B2	112-150	c-p	2,5 YR 2,5/42,5	YR 2,5/4	bsa	pm	f	md	ef	pl/p	ab m	mp f	nso
Siembra Convencional													
Horizonte Genético	Profundidad (cm)	Limite	Color		Estructura			Consistencia en			Poros	Raíces	Inclusiones
			Seco	Húmedo	Tipo	Clase	Grado	Seco	Húmedo	Mojado			
A1	0-18		7,5 YR 5/2	7,5 YR 5/4	bsa	p	d	b	fr	np/np	ab gr	ab f	nso
A2	18-51	c-p	7,5 YR 5/4	7,5 YR 5/6	bsa	p	d	b	fr	np/np	ab gr	c f	nso
E	51-76	c-p	7,5 YR 5/4	7,5 YR 5/6	bsa	p	d	b	mf	np/np	ab gr	c f	nso
EB	76-91	c-p	7,5 YR 4/6	7,5 YR 5/4	bsa	p	m	b	f	dp/dp	ab gr	c f	nso
B1	91-107	c-p	5 YR 4/6	7,5 YR 4/6	bsa	m	f	d	f	pl/p	ab m	p f	nso
B2	107-150	c-p	2,5 YR 4/6	2,5 YR 3/6	bsa	mg	f	d	f	pl/p	ab m	p f	nso
Pastura													
Horizonte Genético	Profundidad (cm)	Limite	Color		Estructura			Consistencia en			Poros	Raíces	Inclusiones
			Seco	Húmedo	Tipo	Clase	Grado	Seco	Húmedo	Mojado			
A	0-29		5 YR 5/4	7,5 YR 4/4	bsa	pm	d	b	fr	np/np	ab gr	c f	nso
E	29-48	c-p	7,5 YR 4/4	7,5 YR 4/4	bsa	pm	d	b	fr	np/np	ab gr	p f	nso
B1	48-71	c-p	2,5 YR 4/6	2,5 YR 3/4	bsa	mg	f	d	f	pl/p	ab gr/r	p f	carbón
B2	71-74	c-p	2,5 YR 2,5/42,5	YR 2,5/4	bsa	mg	f	d	ef	pl/p	ab m	mp mf	nso
B3	74-150	g-o	2,5 YR 2,5/42,5	YR 2,5/4	bsa	g	f	d	ef	mpl/mp	ab m	mp mf	nso
Siembra Directa													
Horizonte Genético	Profundidad (cm)	Limite	Color		Estructura			Consistencia en			Poros	Raíces	Inclusiones
			Seco	Húmedo	Tipo	Clase	Grado	Seco	Húmedo	Mojado			
A	0-25		7,5 YR 5/2	7,5 YR 4/3	bsa	p	d	b	fr	np/np	ab gr	c f	nso
E	25-95	c-p	7,5 YR 5/4	7,5 YR 5/4	bsa	p	d	b	fr	np/np	ab gr	p f	carbón
EB	95-120	c-p	7,5 YR 4/4	7,5 YR 4/4	bsa	m	m	b	fr	dp/dp	ab gr	p f	carbón
B	120-150	c-p	2,5 YR 3/4	2,5 YR 2,5/4	bsa	g	f	d	f	pl/p	ab m	p f	nso
Silvopastoril													
Horizonte Genético	Profundidad (cm)	Limite	Color		Estructura			Consistencia en			Poros	Raíces	Inclusiones
			Seco	Húmedo	Tipo	Clase	Grado	Seco	Húmedo	Mojado			
A1	0-10		7,5 YR 5/4	7,5 YR 5/4	bsa	pm	d	b	fr	np/np	ab gr	p m	carbón
A2	10-45	c-o	7,5 YR 4/4	5 YR 4/6	bsa	pm	d	b	fr	np/np	ab gr	p m	carbón
E	45-60	c-o	7,5 YR 5/8	5 YR 5/8	bsa	p	d	b	fr	np/np	ab gr	p m	carbón
B1	60-79	c-o	5 YR 4/6	2,5 YR 3/6	bsa	mg	f	d	f	pl/p	ab m	mp m	carbón
B2	79-150	d-p	2,5 YR 3/6	10 R 3/6	bsa	mg	f	d	ef	mpl/mp	ab m	mp m	nso

En cuanto a las características morfológicas de los perfiles estudiados, se identificó fundamentalmente tres horizontes genéticos (A-E-B), cada una con capas y se observó horizonte de transición en el sistema de labranza convencional y en el sistema de siembra directa.

Tanto el uso bosque, sistemas convencionales y silvopastoril presentaron características morfológicas similares. Los mismos presentaron horizonte A con subdivisiones en capas (A1 y A2). El uso bosque presentó un horizonte A1 de 0 a 23 cm y el A2 se extendió de 23 a 63 cm, por lo que el bosque fue el uso que presentó el horizonte A de mayor profundidad, seguido del uso agricultura con sistema convencional con horizonte A1 de 0 a 18 cm y horizonte A2 de 18 a 51 cm; el uso silvopastoril presentó horizonte A1 con una profundidad de 0 a 10 cm y A2 de 10 a 45 cm. Por otro lado, los uso siembra directa y pastura presentaron horizonte A sin capas y de profundidades que van de 0-25 y 0-29 cm respectivamente.

En cuanto a la profundidad y espesor del Horizonte E, se observó que el uso bosque (63 – 91 cm) y siembra directa (25 – 95 cm) presentaron este horizonte con mayor espesor y profundidad. En tanto que el uso siembra directa fue el uso que presentó horizonte de transición de mayor espesor (95 – 120 cm), el sistema de agricultura convencional fue el otro uso en el que se observó horizonte de transición fue el sistema convencional (76 – 91 cm).

Todos los pediones fueron evaluados hasta la profundidad máxima de 150 cm donde el horizonte B tuvo diversos espesores conforme el uso. El sistema pastura fue el suelo con horizonte B de mayor espesor (48-150 cm), seguido del sistema silvopastoril (60 – 150 cm). Sin embargo, la exposición del Horizonte B en los sistemas bosque, convencional y siembra directa se dio a mayor profundidad, a los 91 cm los dos primeros sistemas y a los 120 cm en el sistema de siembra directa.

En cuanto a las características macro morfológicas de los horizontes se observó que el límite de horizontes, en lo que respecta a la claridad y topografía, la mayoría fue claro (c) y plano (p). Los pediones en todo el perfil presentaron estructura de bloques sub angulares, los horizontes A y E presentaron estructuras de tamaño pequeño con grado débil; sin embargo, el horizonte B en todos los pediones el tamaño de la estructura fue mediana a grande, con grado fuerte.

La consistencia fue evaluada en seco, húmeda y mojada. La consistencia de los pediones estuvo muy determinada por la profundidad de estudio, por ejemplo, los horizontes A y E presentaron consistencia blanda en seco, friable en húmedo y no presentaron plasticidad y pegajosidad alguna en mojado; sin embargo, el horizonte B presentó consistencia dura en seco, firme y extremadamente firme en húmedo, y plástico y pegajoso en mojado.

En las capas superficiales tales como los Horizontes A y E, presentaron abundante cantidad de macro poros; sin embargo, en los horizontes sub superficiales se observó mayor cantidad de meso poros o poros de tamaño mediano.

Cada uso presentó características diferentes en cuanto a la presencia de raíces, por ejemplo, el uso bosque presentó pocas raíces de tamaño mediano en el horizonte A y E, sin embargo, en el horizonte B, se observaron muy pocas raíces de tamaño fino. En el uso de labranza convencional, se determinó la presencia de raíces finas en todo el perfil, variando de abundantes en el horizonte A1, a comunes en los horizontes A2, E y EB, y pocas raíces en el horizonte B; esta tendencia se observó en los demás usos, donde la cantidad de raíces fue superior en los horizontes superiores, mientras que decrece a medida que la profundidad del suelo fue mayor. No se registró inclusiones en los perfiles evaluados.

4.2. Granulometría del suelo en diferentes usos y profundidades

La siguiente tabla muestra los resultados del MANOVA (análisis de varianza multivariado) aplicado a los agregados del suelo en su conjunto, la misma reveló que no existe diferencias significativas entre las proporciones de arena, limo y arcilla en los diferentes usos ($p > 0.05$), no existe un cambio significativo entre las proporciones de arena, limo y arcilla asociado al uso del suelo.

La teoría revela que la textura es la madre de las propiedades físicas y la proporción de cada uno de los agregados del suelo es producto fundamentalmente del tipo de material parental que dio origen a ese suelo y no podrá ser modificado por el tipo de cultivo presente en él.

Tabla 7. Granulometría del suelo en diferentes usos

USO	Agregados del suelo		
	Arena	Limo	Arcilla
	%		
Bosque	80,21	8,30	11,49 ^a
Labranza convencional	81,33	12,65	6,02 ^a
Pastura	76,00	10,37	13,64 ^a
Siembra Directa	85,01	8,04	6,96 ^a
Silvopastoril	79,00	7,34	13,66 ^a
p-valor	0,0674		

Fuente: Propia – Prueba de MANOVA

Sin embargo, al estudiar la proporción de arena, limo y arcilla teniendo en cuenta la profundidad del suelo, el análisis de MANOVA revela que existe una dependencia significativa entre los cambios en la proporción de arena, limo y arcilla y la profundidad del suelo. En este caso, se observa que de 0 a 60 cm de profundidad las proporciones son similares entre sí; sin embargo, la profundidad 60-100 cm, fue similar a los horizontes superficiales e inferiores; mientras que la profundidad 100-150, reveló mayor contenido de arcilla y una disminución significativa de la arena y el limo, dando como resultado diferencias estadísticas con relación a los horizontes o profundidades de 0-60 cm.

Tabla 8. Granulometría del suelo en diferentes profundidades

Profundidad	Agregados del suelo		
	Arena	Limo	Arcilla
	%		
0-5	85,84	9,31	4,86 ^b
5-15	85,10	8,54	6,36 ^b
15-30	82,91	12,23	4,86 ^b
30-60	82,93	11,84	5,23 ^b
60-100	78,67	8,41	12,92 ^{ab}
100-150	66,42	5,7	27,88 ^a
p-valor	<0,0001		

Fuente: Propia – Prueba de MANOVA

4.3. Propiedades químicas

4.3.1. Indicadores de fertilidad en diferentes usos de suelo

En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos para la comparación de los indicadores de fertilidad en los diferentes usos. Al estudiar los indicadores de fertilidad en los diferentes usos, se determinó que existen asociación significativa entre el pH y el uso a que fue sometido el suelo.

Tabla 9. Características de los indicadores de fertilidad en diferentes usos

Uso	Indicadores de fertilidad del suelo						
	pH	H+Al	Al ³⁺	MO	CIC	ΣB	SB
	CaCl ₂	Cmolc dm ⁻³		%	Cmolc dm ⁻³		%
B	5,69 ^a	1,78 ^a	0,00 ^a	0,60 ^a	6,09 ^a	4,35 ^a	71,94 ^a
SC	4,90 ^{bc}	2,46 ^a	0,08 ^{bc}	0,59 ^a	4,79 ^a	1,97 ^{bc}	45,11 ^b
SP	5,16 ^{ab}	2,39 ^a	0,05 ^{ab}	0,57 ^a	5,86 ^a	3,37 ^{ab}	57,46 ^{ab}
SD	4,83 ^c	2,27 ^a	0,10 ^c	0,51 ^a	4,03 ^a	1,58 ^c	43,70 ^b
SSP	4,78 ^c	3,00 ^a	0,05 ^{bc}	0,65 ^a	6,10 ^a	2,69 ^{abc}	49,75 ^b
p-valor	0,0008	0,1420	0,0005	0,8790	0,2888	0,0309	0,0182

Fuente: Propia – Análisis de Kruskal Wallis

B= Bosque; SC: Sistema de Labranza Convencional; SP: Sistema pastura; SD: Siembra Directa; SSP: Sistema silvopastoril; MO: Materia orgánica en porcentaje; CIC: Capacidad de intercambio catiónico; ΣB: Suma de bases; SB: Porcentaje de saturación de bases.

El uso bosque arrojó un pH con una mediana de 5,69 el cual corresponde a un suelo moderadamente ácido según referencia tomada de Zapata (2004); la mediana del uso silvopastoril fue de 5,16, estadísticamente similar al uso bosque, pero al ser menor a 5,5 el valor del pH, el mismo corresponde a un suelo fuertemente ácido, donde existirá dificultad de desarrollo de la mayoría de los cultivos y dificultad de retención de muchos nutrientes (Garrido 1994); los demás usos arrojaron valores de pH inferiores a 5, similares entre sí ($p > 0,05$).

Zapata (2004), expresa que el aluminio es el tercer elemento más abundante en la tierra después del oxígeno y del silicio, pero se encuentra muy inmovilizado en forma de minerales insolubles tales como la caolinita, pero cuando el pH de la

solución del suelo es menor a 5 el aluminio se moviliza de los minerales y se vuelve sustancialmente tóxica para las plantas Fassbender y Bornemisza (1987); tal caso se puede ver en la tabla 9, donde se observa diferencias significativas en la concentración de Al^{3+} en los diferentes usos, incrementando en concentración en los usos con pH menor a 5,69. Situación que determinó la aplicación de una correlación de Pearson, el cual determinó lo siguiente: La correlación entre el pH y el Al^{3+} fue muy alta ($r > 0,80$) en el sistema convencional, siembra directa y sistema silvopastoril, y alta ($r = 0,79$) en la pastura. Aunque en el tipo de uso bosque (B) el pH de suelo fue superior a 5,5 y no se observó presencia de aluminio en la solución del suelo, sin embargo, a medida que pH del suelo fue disminuyendo, la concentración del Aluminio fue aumentando (Figura 4).

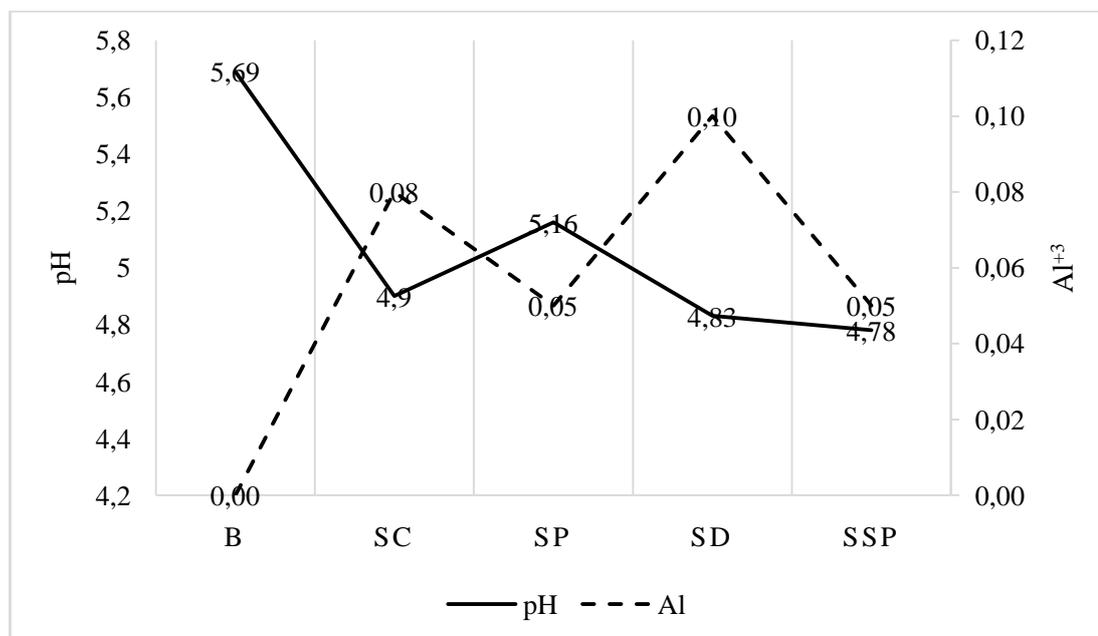


Figura 4. Comportamiento del pH del suelo y el aluminio en los diferentes usos.

La materia orgánica, $H+Al$ y la CIC no registraron diferencias significativas entre los usos. La suma y el porcentaje de saturación de bases expresaron diferencias significativas entre los usos de suelo. El bosque, la pastura y el uso silvopastoril arrojaron los valores de mediana más altos para la suma de bases, similares estadísticamente entre sí con 4,35, 3,37 y 2,69 $Cmol_c dm^{-3}$ respectivamente.

En cuanto al porcentaje de saturación de bases, el uso bosque arrojó el mayor valor con diferencias estadísticas a los demás usos a excepción de la pastura con un porcentaje de saturación de bases del 71,94%, seguido de la pastura con 57,46%.

Esto concuerda con lo que expresan Verhulst et al. (2015) que las prácticas de labranza y el cultivo no parecen tener un efecto sobre la CIC.

4.3.2. Indicadores de fertilidad en diferentes profundidades

Al evaluar los indicadores de fertilidad considerando la profundidad de estudio y teniendo a los usos como repeticiones, se observó que el comportamiento del pH no se modifica sustancialmente al aumentar la profundidad de muestreo ($p>0,05$), todas las muestras arrojaron pH muy ácido.

Tabla 10. Características de los indicadores de fertilidad en diferentes profundidades de suelo, sin tener en cuenta el uso

Profundidad	Indicadores de fertilidad del suelo						
	pH	H+Al	Al ³⁺	MO	CIC	ΣB	SB
	CaCl ₂	Cmolc dm ⁻³		%	Cmolc dm ⁻³		%
0-5	4,80 ^a	3,41 ^a	0,03 ^a	1,80 ^a	6,39 ^{ab}	2,99 ^{ab}	46,48 ^{bc}
5-15	4,50 ^a	3,09 ^a	0,10 ^a	1,06 ^a	4,94 ^{bc}	1,85 ^b	47,41 ^{bc}
15-30	4,87 ^a	2,14 ^{ab}	0,08 ^a	0,60 ^{ab}	4,63 ^c	2,38 ^b	43,42 ^{bc}
30-60	5,02 ^a	1,66 ^b	0,05 ^a	0,34 ^b	3,71 ^c	2,14 ^b	53,02 ^{bc}
60-100	5,10 ^a	1,61 ^b	0,00 ^a	0,43 ^b	4,94 ^{bc}	3,74 ^{ab}	63,95 ^{ab}
100-150	5,29 ^a	2,23 ^{ab}	0,04 ^a	0,48 ^b	8,86 ^a	6,42 ^a	74,24 ^a
p-valor	0,6687	0,0229	0,5057	0,0002	0,0049	0,0234	0,0240

Fuente: Propia – Análisis de Kruskal Wallis

MO: Materia orgánica en porcentaje; CIC: Capacidad de intercambio catiónico; ΣB: Suma de bases; SB: Porcentaje de saturación de bases.

Uno de los factores de mayor importancia que causa acidez en los suelos, es la lluvia. El peso de la capa de agua dejada por una fuerte lluvia, hace que esta atraviese el suelo hasta estratos profundos para, finalmente, depositarse en algún acuífero subterráneo, arrastrando consigo nutrientes del suelo, en especial cationes como el calcio, magnesio, sodio y potasio.

Estos espacios dejados por los nutrientes son ocupados por hidrógeno (que también tiene carga positiva, H^+) (Toledo 2016). En este punto es importante significar que se aplicó una correlación entre el pH y el contenido de materia orgánica del suelo y como resultado se observó una alta correlación lineal positiva entre ambos en la camada 0-15 cm ($r>0,80$ / $p<0,05$).

La materia orgánica del suelo afecta la reacción del suelo (pH) debido a los diversos grupos activos que aportan grados de acidez, a las bases de cambio y al contenido de nitrógeno presente en los residuos orgánicos aportados al suelo (Aguilera 2000), así mismo, la materia orgánica también colabora con la capacidad tampón del suelo. Reflejado entre las camadas 0-5 y 5-15 cm. A mayor contenido de materia orgánica menor acidez y a menor contenido de materia orgánica mayor acidez del suelo. Por otro lado, Rodríguez et al. (1993) expresa que la fracción humus del suelo contiene grupos reactivos que poseen H^+ en su estructura, el cual es liberado al suelo en el proceso de descomposición.

En cuanto al $H+Al$ se observó que existe diferencias significativas entre las profundidades de muestreo; el estudio indica que las muestras de suelo obtenidas entre 0 y 15 cm arrojaron el mayor contenido de $H+Al$ y consiguientemente, este fue disminuyendo en las capas entre 15 a 100 cm. Por otro lado, el aluminio no presentó diferencias significativas entre las profundidades, pues el mismo está directamente relacionado al pH del suelo, y en este caso al encontrar valores de pH inferiores a 5,5 todas las profundidades presentaron presencia de aluminio en la muestra.

Por otro lado, la MO, la CIC y el %SB tuvieron diferencias estadísticas conforme la profundidad aumentó; encontrando hasta la camada 0 a 15 cm el mayor contenido de MO con una media de 1,45%; Gaitán et al. (2005) expresó que la MO disminuye a medida que aumenta la profundidad del suelo, es importante reconocer que la principal fuente de adición de MO al suelo son los restos vegetales y animales (meso y micro fauna edáfica) parcial o totalmente descompuesto, pero la distribución del carbono a medida que aumenta la profundidad en los suelos se atribuye a ingresos provenientes de las raíces, por translocación de la fase líquida y por dispersión del carbono debido al mezclado con la matriz del suelo (Rumpel y Kögel-Knabner; Braakhekke et al., citados por Paz y Etchevers 2016).

La CIC y el %SB fueron mayores en las capas más profundas, ambas situaciones son explicadas posteriormente por las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en el suelo, en las distintas capas del suelo, debido a que valor de esos indicadores depende de estos cationes.

Verhulst et al (2015), el alto contenido de materia orgánica en la superficie del suelo, normalmente observada con agricultura de conservación, puede incrementar la CIC de la capa superficial del suelo. La retención de residuos del cultivo, sin embargo, puede incrementar de manera significativa la CIC en la capa de 0-5 cm en comparación con el suelo en el cual se retiraron los residuos.

Ozuna et al. (2018), al analizar las propiedades químicas del suelo en dos profundidades en el Sistema Siembra Directa, concluyeron que los parámetros de pH, materia orgánica y carbono varía entre las profundidades (0-10 y 10-20), sin embargo, la CIC, SB y Al, no variaron entre las profundidades.

4.4. Características de los macronutrientes en diferentes usos y profundidades

Considerando todo el perfil del suelo existió diferencias significativas en la concentración de macronutrientes disponibles en los diferentes usos, tales como el P, K^+ , Mg^{2+} y S-SO_4^{2-} .

Tabla 11. Macronutrientes disponibles en el suelo considerando el uso

Uso	Macronutrientes				
	P	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	S-SO_4^{2-}
	mgdm ⁻³		Cmolc dm ⁻³		mg dm ⁻³
Bosque	33,02 ^a	0,68 ^a	2,78 ^a	0,90 ^a	4,06 ^a
Labranza convencional	0,72 ^b	0,06 ^c	1,67 ^a	0,29 ^{bc}	3,00 ^a
Pastura	0,79 ^b	0,09 ^{bc}	2,63 ^a	0,55 ^{ab}	2,35 ^a
Siembra Directa	0,51 ^b	0,05 ^c	1,42 ^a	0,12 ^c	2,10 ^a
Silvopastoril	0,79 ^b	0,15 ^{ab}	2,15 ^a	0,36 ^{abc}	3,28 ^a
p-valor	0,0679	0,0002	0,0723	0,0306	0,0630

Fuente: Propia– Análisis de Kruskal Wallis

El fósforo no registró diferencia entre los usos sistema de labranza convencional, pastura, siembra directa y sistema silvopastoril, pero con relación al bosque si se registró diferencias significativas, este último presentó la mayor concentración del elemento en todo el perfil con una mediada de $33,02 \text{ mg dm}^{-3}$.

Galantini et al. (2007), expresa que el sistema de siembra directa produce una mayor concentración y disponibilidad del P en el suelo superficial que el logrado con labranza convencional. La tendencia general del P fue presentar valores semejantes entre labranzas y con una paulatina disminución de la profundidad. Por otro lado, el potasio presentó diferencias significativas entre los diferentes usos, aunque el uso bosque fue el uso con mayor contenido de este nutriente.

FAO (1992), expresa que el fósforo es un elemento con un comportamiento bien definido en diferentes sistemas de labranza. Debido a su escasa movilidad, el P se queda donde el sistema de cultivo o la labranza lo ubica, tal es el caso, que en un sistema de siembra directa, el P permanece en la capa 0-5 cm y en una parcela de labranza convencional es distribuido uniformemente en la capa 0-20, lo cual coincide con lo que se obtuvo en esta investigación.

Lozano et al. (2012), evaluaron la disponibilidad de fósforo en un suelo de las sabanas bien drenadas venezolanas, bajo diferentes coberturas y tipos de fertilización. En la primera variable determinaron diferencias significativas en los contenidos de fósforo conforme el tipo de cobertura.

El potasio registró diferencia entre los usos bosque, sistema de labranza convencional, sistema de siembra directa y el uso pastura, siendo los tres últimos similares entre sí; por otro lado, el sistema de silvopastoril fue similar al uso bosque. La mayor concentración de potasio se registró en el uso bosque con una mediada de $0,68 \text{ Cmolc dm}^{-3}$.

La FAO (1992), expresa que al ser el potasio un elemento soluble y móvil en el suelo, su disponibilidad se ve menos afectada por los sistemas de labranza.

Los mayores niveles de K en los sistemas de bosque y silvopastoril, puede explicarse con lo reportado por Verhulst et al. (2015), que indican que el aumento en la cantidad de residuos retenidos también puede llevar a un aumento en la

concentración de potasio en la parte superficial del suelo, aunque este efecto es dependiente del cultivo.

El calcio no presentó diferencias estadísticas entre los diferentes usos; sin embargo, el magnesio registró diferencias significativas entre los usos siendo el uso bosque el de mayor concentración ($0,90 \text{ Cmolc dm}^{-3}$), por otro lado, el sistema pastura fue similar al uso bosque con una mediana de $0,55 \text{ Cmolc dm}^{-3}$, seguido del sistema silvopastoril con $0,36 \text{ Cmolc dm}^{-3}$. El sistema de siembra directa fue el uso con menor concentración de Mg^{2+} en todo el perfil con una mediana de $0,12 \text{ Cmolc dm}^{-3}$.

Verhulst et al. (2015), mencionan que varias investigaciones han mostrado que la labranza no afecta las concentraciones de calcio y magnesio extraíbles, lo cual coincide con los resultados obtenidos en esta tesis.

Por último, el S-SO_4^{2-} tampoco registró diferencias significativas entre las mediadas obtenidas en los diferentes sistemas de manejo considerando todo el perfil del suelo.

Prause y Soler (2001), estudiaron los cambios producidos en un suelo bajo labranza conservacionista y siembra directa, con respecto a los valores de P, Ca y Mg no se encontraron diferencias entre ambas labranzas para las dos profundidades del suelo muestreadas, lo cual coincide con los resultados obtenidos en esta investigación.

En un trabajo similar realizada en Minga Guazú (Paraguay), Rojas et al. (2019), reportaron que las concentraciones de calcio, magnesio y potasio fueron influenciadas significativamente por los distintos manejos de suelo (Bosque, Siembra directa, Siembra Convencional y Pastura).

Stern (2016), estudió la influencia de los sistemas de manejo, sobre las propiedades químicas del suelo y el mismo determinó que el calcio y el magnesio variaron conforme varió la cobertura de suelo, siendo menor en suelos con cobertura vegetal abundante (abonos verdes). Ybañez et al. (2018), reportó diferencias no significativas entre usos y profundidades para los nutrientes potasio y calcio, y significativo para el magnesio.

En la Tabla 12, se observa la comparación de las seis profundidades entre sí tomando los usos como repeticiones. La misma arrojó diferencias significativas para la disponibilidad de P, Ca y Mg ($p < 0,05$), y no significativo para el K y S ($p > 0,05$).

Tabla 12. Macronutrientes disponibles en el suelo considerando la profundidad

Profundidad	Macronutrientes				
	P mg/dm ⁻³	K ⁺	Ca ²⁺ Cmolc dm ⁻³	Mg ²⁺	S-SO ₄ ²⁻ mg/dm ⁻³
0-5	9,91 ^a	0,21 ^a	2,27 ^{ab}	0,51 ^{ab}	3,36 ^a
5-15	1,71 ^{ab}	0,10 ^a	1,49 ^b	0,26 ^{bc}	2,63 ^a
15-30	0,93 ^{abc}	0,08 ^a	1,92 ^b	0,20 ^c	2,30 ^a
30-60	0,51 ^{bc}	0,11 ^a	1,38 ^b	0,22 ^c	2,39 ^a
60-100	0,30 ^c	0,08 ^a	2,22 ^{ab}	0,46 ^{abc}	3,85 ^a
100-150	0,51 ^c	0,07 ^a	4,80 ^a	1,03 ^a	5,32 ^a
p-valor	0,0059	0,4431	0,0194	0,0273	0,2486

Fuente: Propia– Análisis de Kruskal Wallis

El mayor contenido de P, se determinó en la capa 0-5 cm con un concentración media según los rangos de referencia proveído por el laboratorio, y a medida que la profundidad del suelo fue mayor, la concentración del elemento disminuyó siendo caracterizados como bajo, esta situación se atribuye a que el fósforo es un elemento inmóvil o de escasa movilidad en el suelo, y generalmente existe un mayor contenido de este nutriente en las capas superficiales, y el contenido variará en cantidad dependiendo de la naturaleza del material original, su grado de meteorización, de las características climáticas y de los efectos antrópicos (Galantini et al. 2007); uno de los efectos antrópicos sobre la disponibilidad de fósforo en el suelo es la fertilización fosfatada de los cultivo y en el caso de la presente investigación existe una constante adición de estiércol vacuno al suelo por el manejo de actividad ganadera en el lugar.

Ekeberg y Riley (1997), explican que al aplicar sistema de labranza conservacionista al suelo como siembra directa o labranza mínima se promueve el aumento de fósforo fundamentalmente en superficie, atribuido a la naturaleza poco

móvil del elemento, a la aplicación superficial de los fertilizantes fosforados y a la descomposición de los residuos orgánicos. Lozano et al. (2012), evaluaron la disponibilidad de fósforo en un suelo de las sabanas bien drenadas venezolanas, bajo diferentes coberturas y tipos de fertilización. Los autores determinaron diferencias significativas en los contenidos de fósforo en las diferentes profundidades del suelo (0-5, 5-15 y 15-30cm), resultados similares se obtuvo en esta investigación.

Ozuna et al. (2018), al analizar las propiedades químicas del suelo en dos profundidades en el Sistema Siembra Directa, concluyeron que para la variable fósforo en la profundidad 0-10 cm se constató diferencia estadística en comparación al aumento de la profundidad donde se registró mayores niveles en las capas superficiales con una concentración de 18,95 mg dm⁻³. Sin embargo, para los niveles de potasio, calcio y magnesio no arrojaron diferencia significativa entre las dos profundidades de suelo, sin embargo, el potasio, calcio y magnesio no se modificó entre las profundidades.

La distribución del K en las diferentes capas del suelo, no fueron muy diferentes entre sí; el perfil del suelo en estudio presentó una media de 0.10 Cmolc dm⁻³, considerado bajo; estos resultados se atribuye a lo indicado por Kass (1996), que el contenido y disponibilidad de potasio en el suelo depende del material de origen y el tipo de arcilla presente, al tipo de labranza y a la movilidad media del nutrientes que según Murada (2013), en suelos arenosos es posible que se presenten movimientos verticales del potasio en el perfil y pérdidas por lixiviación, generando una distribución homogénea del nutriente en el perfil del suelo, lo que concuerda con lo reportado por González et al. (2009) quienes expresaron que existe escasa variación de potasio en el perfil de un suelo clasificado como Alfisol.

En cuanto al Ca²⁺ y Mg²⁺, fueron significativamente superiores en la capa 0 – 5 cm revelando una correlación perfecta entre ellos (r=0,99); Díaz et al. (2007) menciona que el calcio tiene escasa movilidad en el perfil del suelo, lo cual confirma el comportamiento del calcio en los perfiles estudiados en profundidad de 0 a 60 cm.

De igual modo Lince et al. (2015) expresó que las concentraciones de Ca²⁺ y Mg²⁺ en la solución del suelo no presentaron diferencia estadística en los primeros 30 cm del perfil; salvo algunas excepciones, donde la concentración fue mayor en los

primeros 5 cm de profundidad, este autor atribuyó este comportamiento a la actividad orgánica en la rizosfera, esto tiende a producir una distribución de nutrientes que decrece con la profundidad, esto generalmente ocurre con los macronutrientes, que tienden a aparecer más concentrados cerca de la superficie (Pozo 2008).

En un trabajo similar realizada en Minga Guazú (Paraguay), Rojas et al. (2019), reportaron que las concentraciones de calcio, magnesio y potasio disminuyeron con el aumento de la profundidad de suelo.

Por otro lado, existió un aumento de ambos nutrientes Ca^{2+} y Mg^{2+} en las capas subsuperficiales entre 60 – 150 cm, esto pudo deberse a la movilidad del magnesio en el suelo el cual pudo aumentar en profundidad por el lavado a largo plazo del nutriente por las altas precipitaciones de la zona, al igual que pudo ocurrir con el calcio, explicado por Thompson y Troeh (2002), que las bajas concentraciones de calcio se dan en suelo muy lavados de las regiones tropicales, depositando mucho del calcio en las capas profundas del suelo.

No existieron diferencias significativas entre las profundidades del perfil para la concentración S-SO_4^{2-} . Si bien no existe diferencias significativas entre las profundidades del perfil de suelo, se puede notar mayor acumulación en la camada superficial y en las capas más profundas (100 – 150 cm).

Esa situación se puede explicar con lo que refiere Osorio (2006), en los suelos arenosos, el SO_4^{2-} tiende a moverse más rápidamente a los horizontes subsuperficiales e incluso salir del sistema terrestre por lixiviación y en general, se encuentran niveles más altos de SO_4^{2-} en los horizontes subsuperficiales, en relación con la superficie. Por otro lado, al aumentar la acidez de suelo, aumenta la retención de los iones sulfatos (Bohn et al.1993).

4.5. Correlación de los macronutrientes con los indicadores de fertilidad del suelo en diferentes usos y profundidades

En la Tabla 13, se presenta la correlación de los macronutrientes y los indicadores de fertilidad del suelo en los diferentes usos.

Tabla 13. Coeficiente de correlación de Pearson de los indicadores de fertilidad y los macronutrientes en diferentes usos

<i>Bosque</i>							
	pH	H+Al	Al ³⁺	%MO	CIC	ΣB	%SB
Ca ²⁺	-0,20	0,79	0,00	0,70	1,00	1,00	0,85
Mg ²⁺	-0,02	0,82	0,00	0,83	0,98	0,98	0,81
K ⁺	0,12	0,34	0,00	0,52	0,79	0,84	0,92
P	0,21	0,69	0,00	0,90	0,48	0,42	0,05
S-SO ₄ ²⁻	-0,71	0,20	0,00	-0,27	0,42	0,45	0,51

<i>Sistema Silvopastoril</i>							
	pH	H+Al	Al ³⁺	%MO	CIC	ΣB	%SB
Ca ²⁺	0,94	-0,55	-0,69	-0,34	0,93	1,00	0,94
Mg ²⁺	0,85	-0,26	-0,63	0,10	0,95	0,92	0,76
K ⁺	0,18	0,39	-0,26	0,86	0,36	0,19	-0,02
P	-0,31	0,62	0,09	0,99	-0,20	-0,38	-0,50
S-SO ₄ ²⁻	0,77	-0,35	-0,54	-0,09	0,86	0,87	0,72

<i>Sistema Pastura</i>							
	pH	H+Al	Al ³⁺	%MO	CIC	ΣB	%SB
Ca ²⁺	0,13	0,58	-0,29	-0,38	0,97	0,99	0,99
Mg ²⁺	0,47	0,82	-0,62	-0,17	0,98	0,96	0,94
K ⁺	0,53	0,39	-0,50	0,90	-0,21	-0,28	-0,29
P	0,77	0,54	-0,60	0,96	-0,07	-0,14	-0,18
S-SO ₄ ²⁻	0,43	0,49	-0,17	0,54	0,44	0,42	0,40

<i>Sistema de Labranza Convencional</i>							
	pH	H+Al	Al ³⁺	%MO	CIC	ΣB	%SB
Ca ²⁺	0,28	-0,11	0,15	-0,12	0,90	1,00	0,87
Mg ²⁺	0,15	0,03	0,25	0,00	0,95	0,99	0,77
K ⁺	-0,57	0,84	0,22	0,88	0,36	0,04	-0,36
P	-0,59	0,80	0,14	0,87	0,09	-0,24	-0,56
S-SO ₄ ²⁻	0,88	-0,92	-0,69	-0,79	-0,18	0,19	0,67

<i>Sistema de Siembra Directa</i>							
	pH	H+Al	Al ³⁺	%MO	CIC	ΣB	%SB
Ca ²⁺	0,05	0,32	0,28	-0,07	0,86	0,99	0,85
Mg ²⁺	-0,19	0,77	0,09	0,67	0,91	0,78	0,38
K ⁺	-0,31	0,80	-0,09	0,97	0,54	0,26	-0,18
P	-0,29	0,67	-0,21	0,97	0,27	-0,03	-0,41
S-SO ₄ ²⁻	0,25	0,10	0,13	-0,25	0,72	0,93	0,93

El pH del suelo tuvo una correlación positiva muy alta en el sistema silvopastoril con el Ca^{2+} y el Mg^{2+} , y una baja correlación en los demás usos o sistemas de manejo. De manera general, el pH tuvo una correlación positiva baja con el calcio y moderada con el magnesio y ambos con significancia (Anexo 7.I).

En los sistemas bosque y silvopastoril, la correlación del pH con el potasio fue bajo, en la pastura fue moderado y en el sistema convencional y siembra directa las correlaciones fueron inversas. Sin embargo, la correlación fue alta y con significancia, teniendo en cuenta todas las muestras estudiadas (Anexo 7.I).

En cuanto al pH/P, considerando todas las muestras estudiadas, se encontró una correlación positiva moderada ($r=0,55$; $p<0,001$), además se observó que la correlación entre ambos se modificó en los diferentes usos. Fue baja en bosque y en siembra directa; sin embargo, fue bajo y moderado pero inverso en el sistema silvopastoril y sistema convencional.

La correlación del pH/S fue alta en los sistemas de siembra convencional y silvopastoril, por otro lado, al cambiar la cobertura de suelo como pastura o siembra directa la correlación fue baja; sin embargo, el bosque tuvo una correlación inversa muy alta; con estos resultados se anticipa que el azufre tiene un comportamiento muy variable en el suelo.

En el contexto general la correlación del pH/S fue nula. Esto indica que conforme fueron variando las coberturas de suelo o usos de suelo, la correlación de los macronutrientes con el pH del suelo se fue modificando.

Rosas-Patiño et al. (2017), reportaron correlaciones lineales positivas y significativas para el calcio y magnesio con relación al pH del suelo, lo cual coincide con los resultados obtenido en este estudio; por otro lado, también reportaron una baja correlación K/pH. Así también, Ybañez et al. (2018), revelaron en su investigación una correlación lineal positiva y significativa entre el pH/K y pH/Mg.

En un trabajo realizado por Villalba y Encina (2018), en un sistema de pastura encontraron baja correlación entre el pH/P ($r=0,30$), el cual no concuerda con el presente estudio.

Navarro y Navarro (2013), expresa que el pH del suelo está relacionado no sólo con la naturaleza de los cationes adsorbidos si no también con las cantidades relativas de cada uno de ellos, por lo que el Ca y Mg presentan menor influencia sobre el pH con relación al Na. El calcio y magnesio esta disponibles para la planta a pH superiores a 6.

En cuanto al aluminio, también se observaron cambios conforme fue variando el uso, de modo general (Anexo 7.I.), se observó que el aluminio tuvo una correlación lineal inversa y significativa con el Ca, Mg, K y P; la misma fue alta para el Mg y K, y baja para el Ca y el P.

Rosas-Patiño et al. (2017), encontraron una correlación lineal inversa entre el pH y Ca – Mg – K. lo cual concuerda con esta investigación. Así también Fassbender y Bornemisza (1987), expresa que la presencia de aluminio en el suelo interfiere con la disponibilidad del P y Ca principalmente. Así también la FAO (2013), menciona que al existir aluminio en el suelo posiblemente se tendrá deficiencia de P, Ca y Mg.

La materia orgánica en todos los casos se correlacionó positivamente con el P y el K+. En cuanto al porcentaje de materia orgánica de suelo (MO) se halló una correlación alta ($r < 0.80$) y muy alta ($r > 0.80$) con el Ca^{2+} , el Mg^{2+} , esto refleja que la concentración del calcio, del magnesio y del fósforo en el perfil del suelo fue significativamente dependiente de la materia orgánica del suelo.

Bravo et al. (2013), reportaron en su investigación que el contenido de fósforo disponible en el suelo aumentó a mayores tenores de materia orgánica en el mismo. Lo cual coincide con esta investigación. En el uso Bosque, la CIC y la suma de bases (ΣB), tuvo una perfecta correlación con el Ca^{2+} del suelo ($r=1$), así también la correlación fue muy alta con el Mg^{2+} y el K^+ . Lo que indica que el Ca^{2+} es el principal nutriente relacionado con los cambios de la CIC y ΣB .

Del mismo modo, en el sistema silvopastoril, la CIC (0,93), la suma de bases (1,00) y el porcentaje de saturación de bases (0,94), tuvo una muy alta y perfecta correlación con la disponibilidad del calcio en el suelo; así también la correlación del potasio fue muy alta y alta con esos indicadores (0,95, 0,92, 0,76).

Así como se vio anteriormente en el uso bosque y como se verá en los demás usos, el Ca^{2+} y Mg^{2+} se correlacionan positivamente con los indicadores de fertilidad del suelo. El sistema pastura, en el sistema convencional y siembra directa presentaron correlaciones muy altas para estas variables ($0,80 < r < 1$) con $p < 0,05$.

Arteaga et al. (2016), evaluaron el comportamiento de variables químicas de un suelo sometido a distintos usos y encontró que el calcio, el magnesio y el potasio se correlacionan positivamente con la CIC de suelo.

El mismo autor cita a (Fassbender y Bornemisza, 1987) quienes explican que esa situación se explica debido a que en el proceso de mineralización que conlleva a la disociación de NO^{-3} , SO^{-4} y coloides húmicos, cuyas cargas resultantes son electronegativas, son las que proporcionan el incremento sustancial en la capacidad de cambio, brindando una mayor posibilidad de retener Ca y Mg en el suelo

En cuanto al azufre se presentó una correlación positiva alta a muy alta con la CIC, ΣB y % SB del suelo en sistema silvopastoril y siembra directa; se correlacionó negativamente con la materia orgánica en todos los usos, excepto en el uso pasturas que la correlación fue moderada, sin embargo, la correlación debió ser lineal según expresa la FAO (2013).

Está claro que los diferentes usos tienen influencia sobre la forma en que correlacionarán los macronutrientes y los indicadores de fertilidad del suelo, demostrando la teoría de que el uso afecta la calidad del suelo en sus diferentes expresiones.

En la Tabla 14, se presentan los coeficientes de correlación de Pearson de los indicadores de fertilidad del suelo con los macronutrientes con relación a la profundidad del suelo en estudio, sin considerar el efecto del uso.

En la profundidad 0 – 5 cm, se observa que el pH, la materia orgánica, la CIC, la suma de bases y el porcentaje de saturación de bases presentó, una correlación positiva alta a muy alta con los cationes del suelo (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+}), el P y el S-SO_4^{2-} ; por otro lado los macronutrientes presentaron una correlación inversa muy alta con el H+Al; en esta profundidad el aluminio fue afectado negativamente por la disponibilidad de S-SO_4^{2-} . La correlación del aluminio con los cationes fue inversa

en la camada superficial, siendo muy alta con el azufre y moderada con el fósforo. Con respecto al K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} fue moderada.

Tabla 14. Coeficiente de correlación de Pearson de los indicadores de fertilidad y los macronutrientes en diferentes profundidades

<i>Profundidad 0-5 cm</i>							
Variables	pH	H+Al	Al ³⁺	%MO	CIC	ΣB	V
Ca ²⁺	0,93	-0,90	-0,70	0,99	0,99	1,00	0,97
Mg ²⁺	0,95	-0,93	-0,69	1,00	0,98	0,99	0,98
K ⁺	0,89	-0,86	-0,61	0,99	1,00	0,99	0,94
P	0,84	-0,83	-0,51	0,96	0,97	0,96	0,88
S-SO ₄ ²⁻	0,84	-0,81	-0,98	0,71	0,73	0,77	0,86
<i>Profundidad 5-15 cm</i>							
Variables	pH	H+Al	Al ³⁺	%MO	CIC	ΣB	V
Ca ²⁺	0,95	-0,76	-0,93	0,93	0,77	0,99	0,98
Mg ²⁺	0,77	-0,51	-0,80	0,99	0,93	0,97	0,85
K ⁺	0,77	-0,47	-0,76	0,95	0,95	0,97	0,84
P	0,79	-0,54	-0,80	0,98	0,91	0,98	0,86
S-SO ₄ ²⁻	0,72	-0,42	-0,76	0,89	0,88	0,89	0,80
<i>Profundidad 15-30 cm</i>							
Variables	pH	H+Al	Al ³⁺	%MO	CIC	ΣB	V
Ca ²⁺	0,15	0,25	-0,45	0,56	0,80	0,81	0,48
Mg ²⁺	0,80	-0,38	-0,93	0,84	0,33	0,82	0,84
K ⁺	0,77	-0,43	-0,90	0,90	0,31	0,84	0,88
P	0,89	-0,60	-0,93	0,78	0,10	0,73	0,90
S-SO ₄ ²⁻	-0,27	0,62	-0,05	0,73	0,80	0,46	-0,01
<i>Profundidad 30-60 cm</i>							
Variables	pH	H+Al	Al ³⁺	%MO	CIC	ΣB	V
Ca ²⁺	-0,25	0,96	-0,29	0,96	0,97	0,89	0,46
Mg ²⁺	0,82	0,16	-0,86	0,17	0,52	0,66	0,82
K ⁺	0,88	-0,29	-0,90	-0,10	0,18	0,41	0,87
P	0,93	-0,48	-0,82	-0,31	-0,03	0,21	0,75
S-SO ₄ ²⁻	0,11	-0,27	0,13	-0,63	-0,41	-0,45	-0,36
<i>Profundidad 60-100 cm</i>							
Variables	pH	H+Al	Al ³⁺	%MO	CIC	ΣB	V
Ca ²⁺	-0,15	0,88	-0,16	0,93	0,99	0,96	0,58
Mg ²⁺	0,33	0,37	-0,48	0,74	0,80	0,89	0,85
K ⁺	0,97	-0,46	-0,90	0,10	-0,06	0,07	0,64
P	0,97	-0,57	-0,86	-0,03	-0,18	-0,04	0,57
S-SO ₄ ²⁻	0,70	-0,26	-0,77	0,02	0,14	0,26	0,69

Variables	<i>Profundidad 100-150 cm</i>						
	pH	H+Al	Al ³⁺	%MO	CIC	ΣB	V
Ca ²⁺	0,63	-0,62	-0,36	0,78	0,84	0,85	0,74
Mg ²⁺	0,53	0,00	-0,75	-0,45	0,41	0,32	0,27
K ⁺	0,41	-0,64	-0,46	-0,47	0,09	0,26	0,49
P	0,77	-0,14	-0,93	-0,53	0,56	0,49	0,39
S-SO ₄ ²⁻	0,31	-0,60	-0,37	-0,48	-0,01	0,17	0,42

Del mismo modo se comportaron en la profundidad 5-15 cm, con correlaciones positivas altas a muy altas entre los indicadores de fertilidad y los macronutrientes del suelo, a excepción del H+Al que tuvo una alta correlación negativa con el calcio; los demás macronutrientes presentaron correlación negativa moderada. Zambrosi et al. (2007) concluyeron que las formas intercambiables y no intercambiables de Al se relacionaron negativamente con el pH del suelo.

En las profundidades 15 – 30 cm y 30 – 60 cm, se observaron cambios en el nivel de correlación de los indicadores de fertilidad y los macronutrientes.

En la camada 15-30 cm, se mantuvo muy alta la correlación del Ca²⁺ y la CIC y la suma de bases. La correlación fue muy baja entre el Ca²⁺ y el pH, baja a moderada con el H+Al, Al³⁺, el porcentaje de saturación de bases y el porcentaje de materia orgánica.

Por otro lado, el magnesio, el potasio y el fósforo mantuvieron su alta correlación positiva con el pH, con el porcentaje de materia orgánica, la suma de bases y el porcentaje de saturación de bases. En esta camada de 15 a 30 cm aumentó la correlación inversa del Al³⁺ con los macronutrientes mencionado. Y la correlación del azufre con el Al³⁺ fue nula. La correlación de la CIC en esa camada con el Mg²⁺, K⁺ y el P fue baja.

En la profundidad 30-60 cm, el pH y el porcentaje de saturación de bases expresó un ajuste lineal positivo muy alto con el Mg²⁺, K⁺ y el P; y un ajuste lineal negativo con el Al³⁺. Por su parte, el H+Al, el % MO, la CIC y la suma de bases se correlacionaron altamente con el contenido de Ca²⁺. Este comportamiento no se modificó en la camada 60-100 cm y 100 – 150 cm del perfil.

En cuanto al magnesio se correlacionó positivamente en la profundidad 60-100 cm con el contenido de materia orgánica, CIC, suma de bases y porcentaje de saturación de bases. Por su lado, el potasio, el fósforo y el azufre se correlacionaron positivamente con el pH y negativamente con el Al^{3+} . Individualmente la materia orgánica se correlacionó positivamente con el azufre hasta los 30 cm, a partir de la cual la correlación disminuye. En la camada 100-150 cm, queda significar la correlación inversa negativa muy alta del fósforo con el Al^{3+} del suelo.

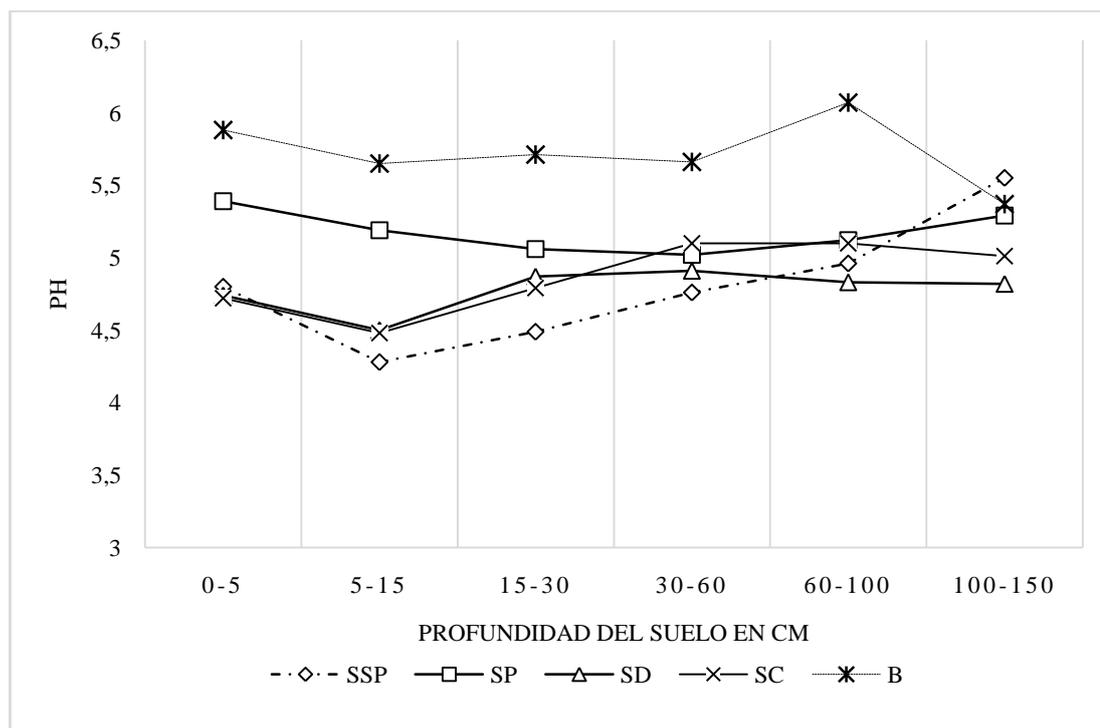
Tiecher et al. (2012), en el suelo, el azufre (S) se encuentra predominantemente en forma orgánica. Arteaga et al. (2016), expresan que la materia orgánica del suelo es el principal factor de variación de azufre en el suelo lo que la mineralización de dicho elemento, que a su vez depende de los factores que regulan la acumulación y mineralización de la materia orgánica, en su investigación el azufre presentó correlación positiva y significativa con el porcentaje de MO ($r=0,73$) a profundidad 0-20.

Según la FAO (2013), hay una fuerte correlación entre los niveles de azufre y de materia orgánica, la reducción en los niveles de materia orgánica normalmente tiene una deficiencia de azufre. Lo cual se reflejó en las correlaciones obtenidas, donde si disminuye el contenido de materia orgánica en el suelo disminuye también el azufre hasta los 30 cm de profundidad. Para determinar el nivel de azufre en el suelo deben tomarse muestras a 0 a 20 cm y 20 a 40 cm de profundidad, debido a que el azufre tiene una tendencia a concentrarse en el subsuelo.

En la mayoría de los casos se puede decir que la profundidad de suelo no afecta la correlación de los indicadores de fertilidad de suelo con los macronutrientes hasta las 30 cm. A partir de los 30 cm se inician los cambios de manera individual. El cual puede ser afectado por los cambios de arcilla y materia orgánica en el perfil.

4.6. Comportamiento de algunos indicadores de fertilidad del suelo en los diferentes usos y profundidades (pH, Al^{3+} , MO, CIC, V)

En las figuras subsiguientes se aprecia el comportamiento de los diferentes indicadores de fertilidad del suelo considerando el uso y las profundidades de muestreo.

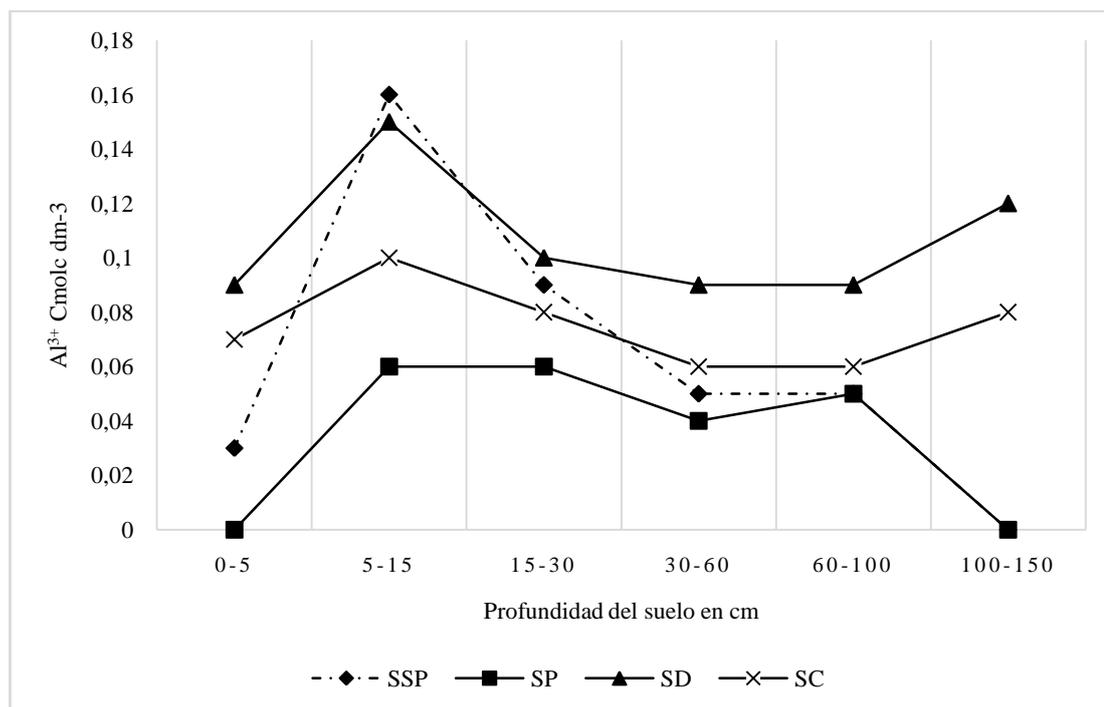


Referencia: B= Bosque; SC: Sistema de Labranza Convencional; SP: Sistema pastura; SD: Siembra Directa; SSP: Sistema silvopastoril

Figura 5. Comportamiento del pH del suelo en los diferentes usos y profundidades

En la Figura 5, se observa el comportamiento del pH en el perfil de suelo, cuya curva en cada uso es más o menos similar. El pH del suelo fue mayor en la cama superficial disminuyendo hasta los 15 cm de profundidad a partir del cual vuelve a aumentar, el cual podría estar relacionado con los cambios en el contenido de materia orgánica y arcilla a través del perfil del suelo.

En todos los casos el uso bosque tuvo un comportamiento diferente con relación al demás usos, el cual arrojó pH mayor a 5,5. De mismo modo, Bernal y Hernández (2017), reportaron las propiedades químicas de suelos de bosques, parcelas de frutales y cultivos varios hasta los 100 cm de profundidad, donde el pH fue mayor en la camada superficial en todos los usos, sin embargo, a medida que aumento la profundidad de muestreo aumento la acidez del mismo.

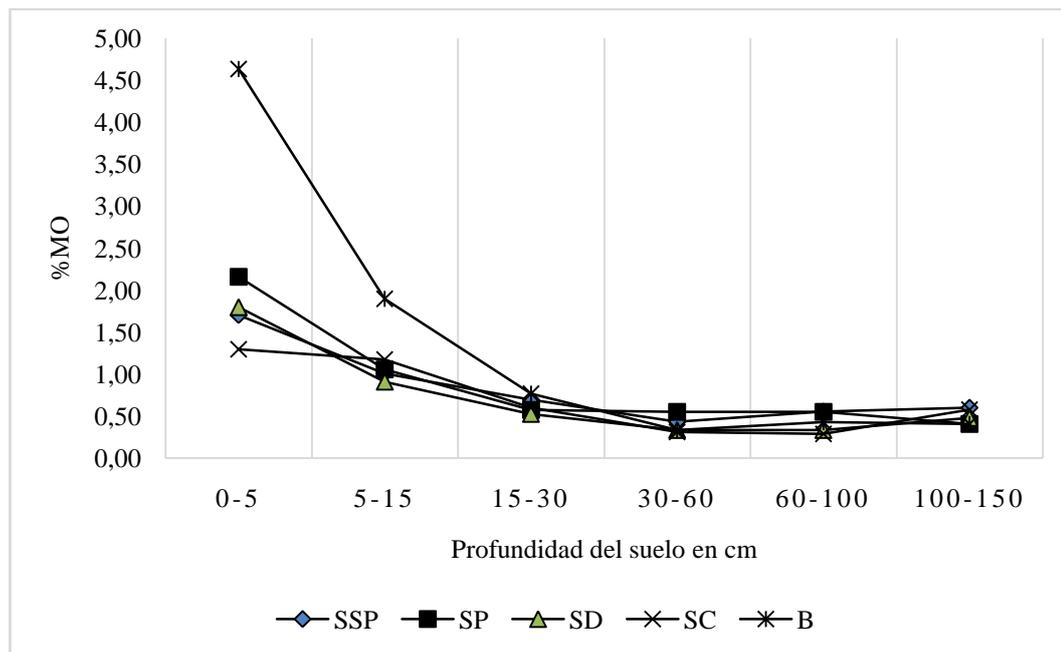


Referencia: SC: Sistema de Labranza Convencional; SP: Sistema pastura; SD: Siembra Directa; SSP: Sistema silvopastoril

Figura 6. Comportamiento del Al^{3+} del suelo en los diferentes usos y profundidades

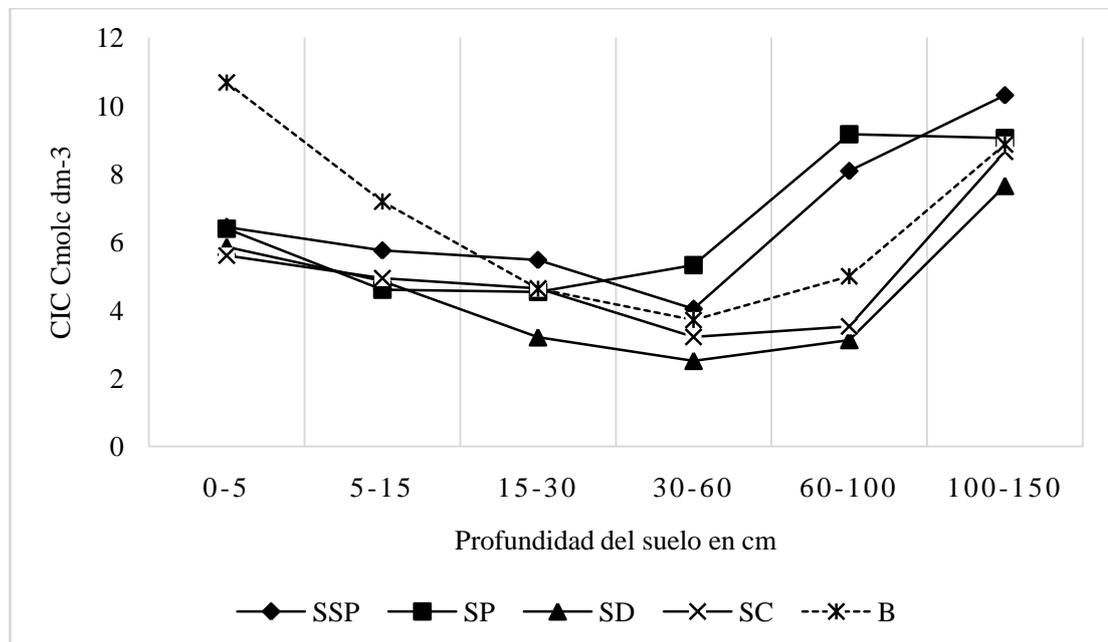
En la Figura 6, se presenta el contenido de Al^{3+} a través del perfil de suelo, el cual tuvo un comportamiento inverso al pH; Este catión presentó menor concentración en las capas superficiales, aumentando en hasta los 15 cm de profundidad aproximadamente, a partir de cual vuelve a disminuir hasta los 60 cm, donde inicia un comportamiento irregular conforme el uso. El bosque no reveló presencia de Al^{3+} .

Por otro lado, la materia orgánica (Figura 7), presentó un comportamiento más uniforme en el perfil de suelo, siendo mayor en las capas superficiales y a medida que aumenta la profundidad del suelo disminuyó la concentración de materia orgánica. En el cual resalta en cuanto a contenido el uso Bosque, que registró mayor contenido de materia orgánica hasta los 15 cm de profundidad.



Referencia: B= Bosque; SC: Sistema de Labranza Convencional; SP: Sistema pastura; SD: Siembra Directa; SSP: Sistema silvopastoril

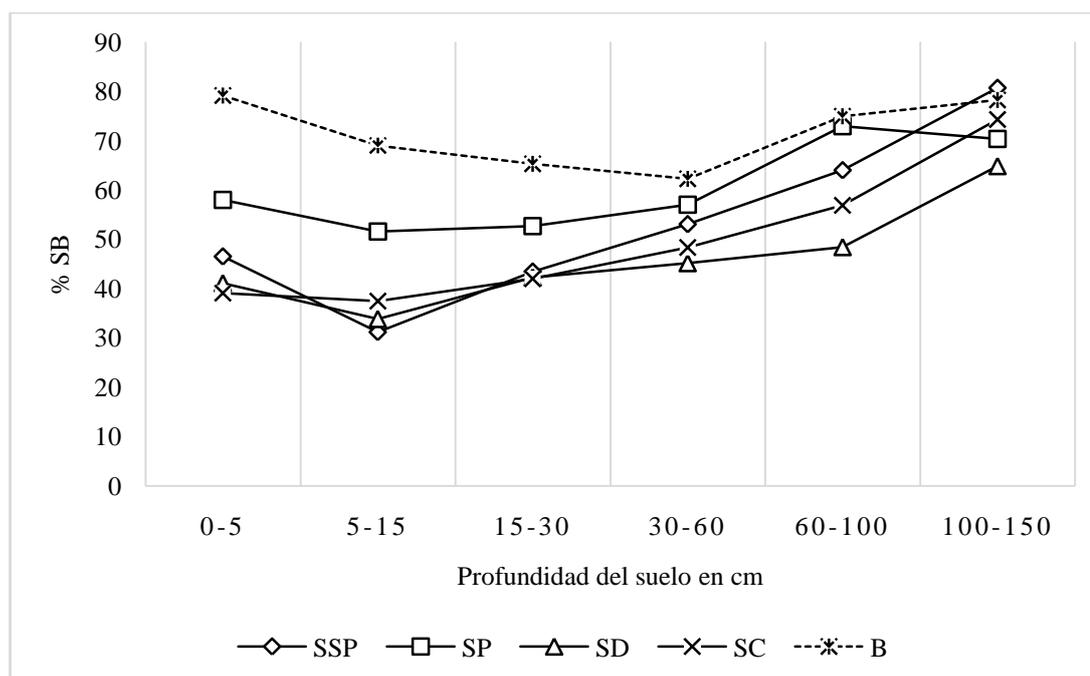
Figura 7. Comportamiento del %MO del suelo en los diferentes usos y profundidades



Referencia: B= Bosque; SC: Sistema de Labranza Convencional; SP: Sistema pastura; SD: Siembra Directa; SSP: Sistema silvopastoril

Figura 8. Comportamiento de la CIC del suelo en los diferentes usos y profundidades

En cuanto a la CIC (Figura 8), se observa que todos los usos de suelo presentaron la misma curva de comportamiento, siendo mayor en las capas superficiales; realizando un descenso lineal hasta los 60 cm de profundidad, a partir del cual nuevamente empieza a aumentar, el cual podría estar directamente relacionado con el aumento del contenido de arcilla a partir de esa camada.



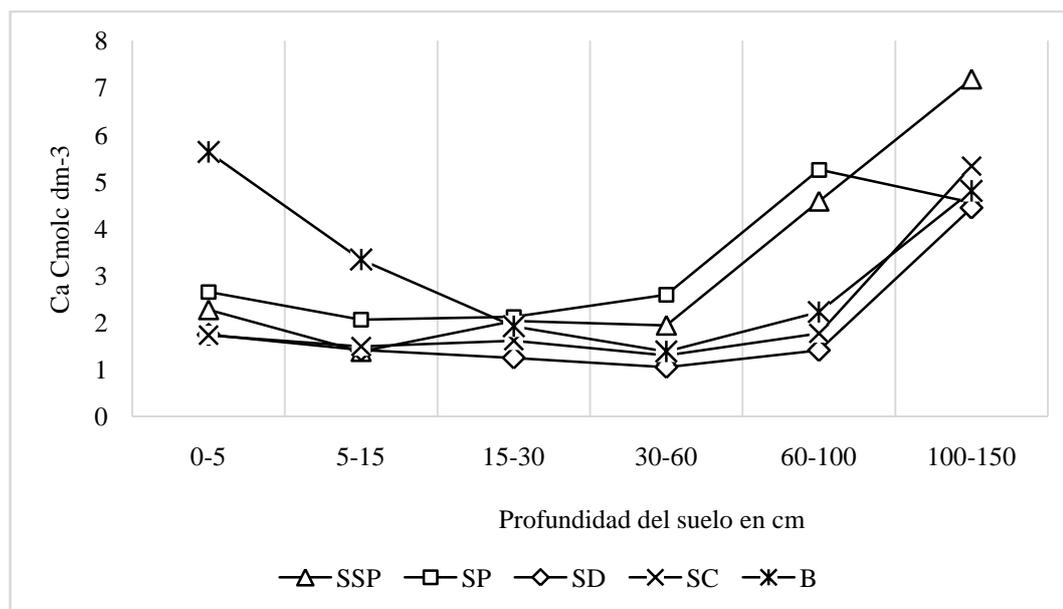
Referencia: B= Bosque; SC: Sistema de Labranza Convencional; SP: Sistema pastura; SD: Siembra Directa; SSP: Sistema silvopastoril

Figura 9. Comportamiento del %SB del suelo en los diferentes usos y profundidades

Por su parte, la Figura 9 representa el comportamiento del porcentaje de saturación de bases en perfil del suelo, donde las curvas del mismo reflejan un comportamiento similar entre todos los usos. Los usos con mayores valores son el bosque y la pastura en los primeros 60 cm de profundidad, el cual se produce descenso de los mismos y a partir del cual se produce nuevamente un ligero aumento. Sin embargo, los usos silvopastoril, siembra directa y siembra convencional, presentan los menores valores del porcentaje de saturación de bases, con descenso hasta los 15 cm de profundidad, a partir de cual se produce un aumento, sin alcanzar los valores del bosque y la pastura.

4.7. Comportamiento de los macronutrientes en diferentes usos y profundidades

En la figura siguiente se observa el comportamiento del calcio en los diferentes usos y profundidades.

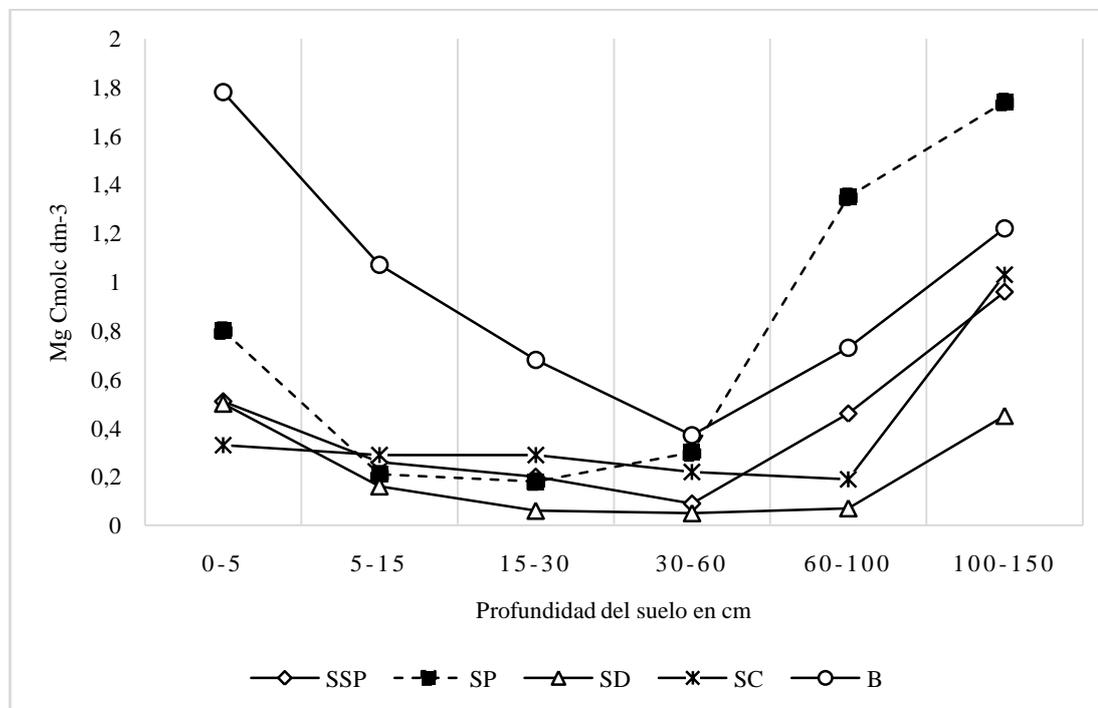


Referencia: B= Bosque; SC: Sistema de Labranza Convencional; SP: Sistema pastura; SD: Siembra Directa; SSP: Sistema silvopastoril

Figura 10. Comportamiento del Ca del suelo en los diferentes usos y profundidades

La distribución del calcio en el perfil de suelo es similar en todos los usos, modificándose solo los tenores del mismo. Existe un descenso en todos los usos desde la camada superficial hasta la capa 15 – 30 cm. El mayor contenido de calcio se registró en el uso siembra convencional, el cual puede deberse al subsolado-arado de suelo y aplicación de cal agrícola en el suelo realizado en el año 2017; los demás usos presentan menores concentraciones de calcio en las camadas superficiales, manteniéndose hasta los 60 cm, a partir del cual la concentración del nutriente aumenta, el cual resalta en el sistema silvopastoril, el cual se atribuye a la distribución de las raíces del eucalipto. El suelo del sistema de siembra directa presento mejor distribución del Ca^{2+} .

En cuanto al comportamiento del magnesio se observa en la figura 11, que la tendencia de distribución en el perfil del suelo es similar, modificándose el contenido conforme cambia el uso del suelo.

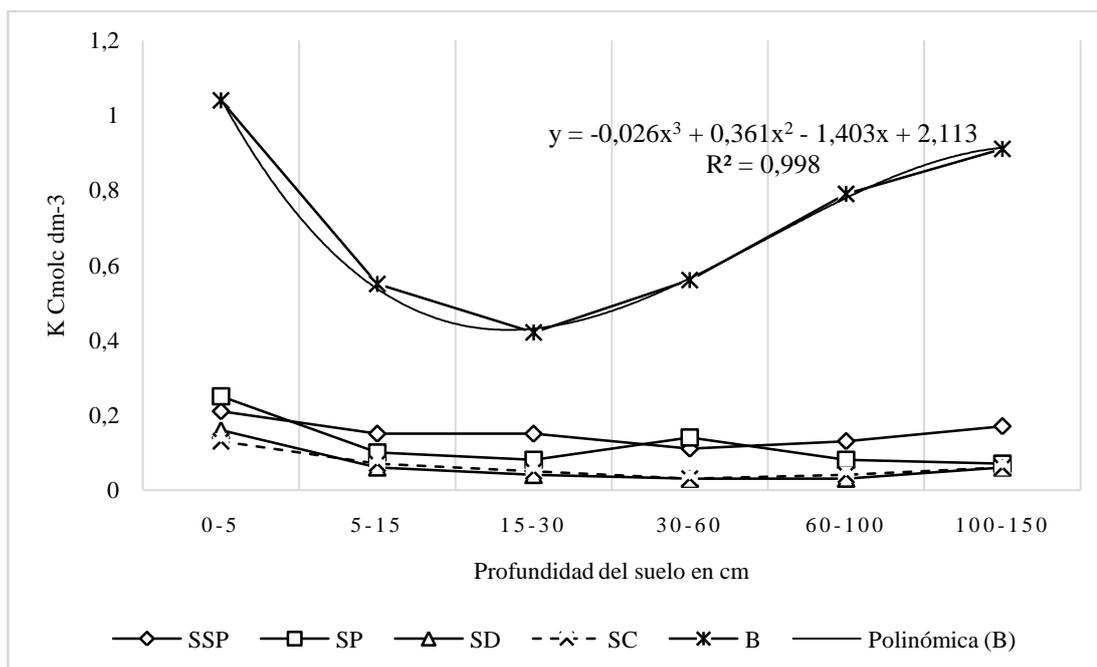


Referencia: B= Bosque; SC: Sistema de Labranza Convencional; SP: Sistema pastura; SD: Siembra Directa; SSP: Sistema silvopastoril

Figura 11. Comportamiento del Mg del suelo en los diferentes usos y profundidades

Se presentaron concentraciones medias de magnesio en el uso bosque solo en la capa 0-5, el cual fue disminuyendo en las capas subsuperficiales hasta los 60 cm, al igual que los demás usos; excepto el uso para siembras convencionales, que distribuyo homogéneamente hasta los 100 cm, a partir de cual la concentración de magnesio aumentó. El suelo del sistema de siembra directa presento mejor distribución del Mg^{2+} .

Por su parte Verhulst et al (2015), mencionó que la estratificación vertical del calcio y del magnesio no parece ser afectada por la labranza y el cultivo. Por su parte Gutiérrez et al. (2015), indicó que a medida que disminuye la intensidad de la labranza la estratificación vertical de Calcio y Magnesio también puede estar afectada por la labranza o el cultivo o no tener ninguna diferencia vertical.

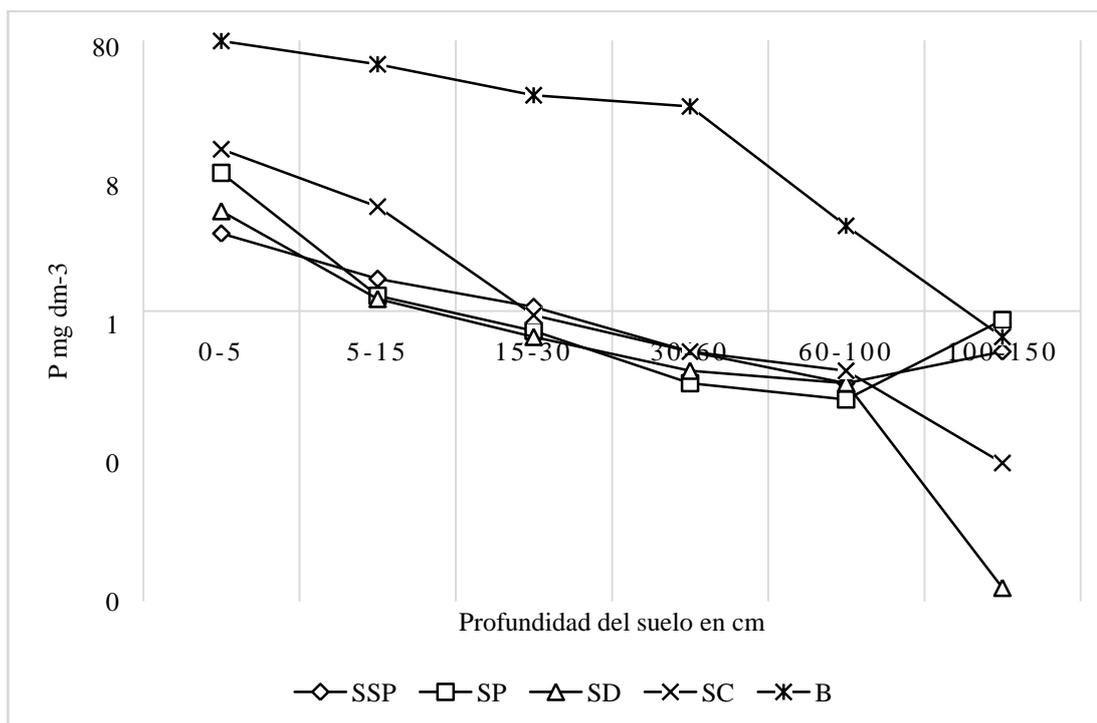


Referencia: B= Bosque; SC: Sistema de Labranza Convencional; SP: Sistema pastura; SD: Siembra Directa; SSP: Sistema silvopastoril

Figura 12. Comportamiento del K del suelo en los diferentes usos y profundidades

El contenido de potasio fue mayor en uso bosque con una curva polinómica de tercer grado con un 99% de ajuste. Lo que indica que el movimiento del potasio se estratifica en la profundidad del suelo; sin embargo, la distribución del potasio fue diferente en los demás usos, siendo la misma más o menos homogénea en todo el perfil del suelo.

Gaspari et al. (2006), mencionaron que cada nutriente muestra una dinámica particular, de acuerdo a la naturaleza del elemento y sus reacciones fisicoquímicas; por lo que el calcio, magnesio y potasio se pueden producir, un enriquecimiento hasta el nivel de horizontes profundos, debido a procesos de des carbonatación de horizontes superficiales y carbonatación en profundidad. Por otro lado, el potasio es capaz de mantenerse o aumentar cerca de la camada superficial del suelo por efecto de la labranza de conservación, donde las raíces de los cultivos son abundantes (Govaerts et al. 2007).

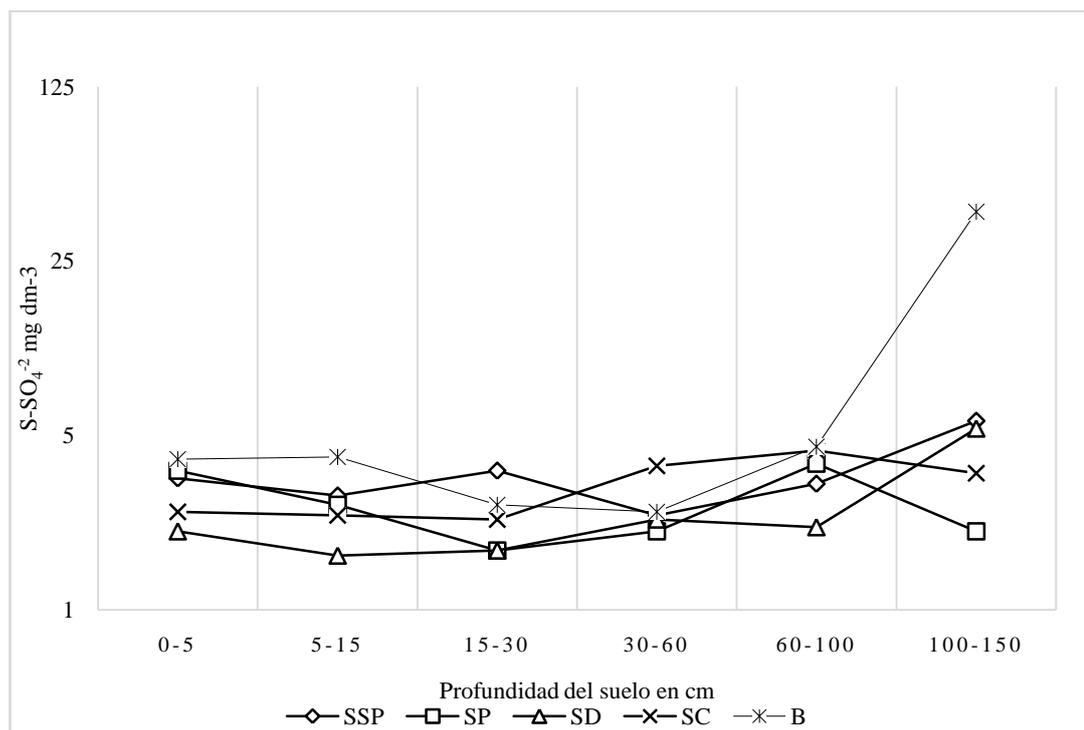


Referencia: B= Bosque; SC: Sistema de Labranza Convencional; SP: Sistema pastura; SD: Siembra Directa; SSP: Sistema silvopastoril

Figura 13. Comportamiento del P del suelo en los diferentes usos y profundidades

El fósforo es un elemento inmóvil o de escasa movilidad en el suelo, y generalmente existe un mayor contenido de este elemento las capas superficiales del suelo, este contenido varía en cantidad dependiendo de la naturaleza del material original y su grado de meteorización, de las características climáticas y de los efectos antrópicos (Galantini et al. 2007).

El presente estudio demostró que la mayor concentración de fósforo se observó en la capa 0 – 5 cm disminuyendo a medida que aumenta la profundidad de suelo; así también el contenido de fósforo determinado en las profundidades 5 – 15 y 15 – 30 cm fueron similares entre sí y semejantes a las demás profundidades. Los niveles de fósforo fueron muy altos en el uso bosque, el cual se atribuye a capacidad de reciclaje del fósforo por los bosques (Sánchez y Palm 1996) y a la deposición de animales bovino a lo largo de los años en el sistema.



Referencia: B= Bosque; SC: Sistema de Labranza Convencional; SP: Sistema pastura; SD: Siembra Directa; SSP: Sistema silvopastoril

Figura 14. Comportamiento del S del suelo en los diferentes usos y profundidades

Por último, el azufre, presentó niveles bajos en todos los usos, siendo más o menos similares en todas las profundidades, excepto el uso bosque que registró niveles altos de azufre en la profundidad 100-150 cm, esto se atribuye a que unas de las fuentes principales de azufre en el suelo se debe a la materia orgánica remanente de plantaciones y de la crianza de ganado y que por acción microbiana se mineraliza a sulfato (Corrales et al. 2014), el cual tiene una gran movilidad en suelos ácidos y que es fácilmente lixiviado a capas más profundas (Kass 1996).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Morfológicamente el suelo estudiado se ubicó en terreno con topografía ondulada, pendiente con riesgo de erosión, drenaje y permeabilidad buena, con nivel freático profundo y posición fisiográfica alta; el suelo se observó horizontes genéticos A-E-B, con más o menos similar espesor, color, estructura y consistencia. Los usos no presentaron cambios en la textura de suelo, pero los contenidos de arcilla se modificaron a los 60 cm de profundidad.

En cuanto a los indicadores de fertilidad, el pH, Al, la suma de bases y porcentaje de saturación de bases presentaron diferencias significativas por efecto del uso, siendo el bosque y la pastura los usos similares entre sí y mejores condiciones químicas. A nivel de profundidad, se observaron cambios en el H+Al, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, suma de bases y saturación de bases los cuales se atribuyen a la distribución de los macronutrientes en el perfil del suelo, fundamentalmente del calcio, magnesio y del fósforo.

Se encontraron diferencias significativas en la concentración de los macronutrientes fósforo, potasio y magnesio por efecto del uso. La mayor concentración de fósforo se determinó en uso bosque; el potasio mostró mayores concentraciones, también en el bosque y en el sistema silvopastoril; y el magnesio fue mayor en el bosque, pastura y sistema silvopastoril.

La distribución de los macronutrientes en el perfil del suelo observó diferencias significativas para el fósforo, calcio y magnesio, lo cual se atribuye a la movilidad de cada uno y a su capacidad de adherencia a los coloides del suelo.

El Calcio y Magnesio presentaron similar correlación positiva con la capacidad de intercambio catiónico, suma de bases y saturación de bases, en todos

los usos estudiados; del mismo modo que la materia orgánica con el fósforo; por otro lado, el aluminio presentó correlación inversa con la mayoría de los macronutrientes, aunque con diferentes grados de intensidad entre sí.

Por otro lado, los indicadores de fertilidad de suelo presentaron alta correlación positiva con los macronutrientes excepto el aluminio que fue inverso hasta los 15 cm de profundidad, por otro lado, a partir de los 15 cm de profundidad las correlaciones fueron menos intensas.

En cuanto al perfil de comportamiento se determinó que la mayoría de los indicadores de fertilidad y macronutrientes tuvo el mismo comportamiento en todos los usos y profundidades modificándose la concentración de cada uno por efecto del uso.

5.2. Recomendaciones

Para futuras investigaciones se recomienda realizar repeticiones por cada uso de suelo en cada pared de la calicata para aumentar la homogeneidad de las muestras y tomar muestras conforme los horizontes estudiados.

Por otro lado, a más de lo mencionado es importante realizar este estudio en otros usos y/o sistemas de manejo como por ejemplo manejos de alta producción, así como también distintas épocas del año y posiciones fisiográficas de suelo diferentes como la zona media y baja.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, SM. 2000. Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo. Boletín N° 14. Valdivia, Chile, p. 77-85.
- Arteaga J, JC; Navia E, JF; Castillo, JA. 2016. Comportamiento de variables químicas de un suelo sometido a distintos usos, departamento de Nariño, Colombia. *Rev. Cienc. Agr.* 33(2): 62-75
- Astier Calderón, M; Maass Moreno, M; Etchevers Barra, J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*,36(5): 605-620.
- Barrientos D, L; Campillo R, R; Méndez A, E. 1994. La acidez del suelo y su efecto sobre la fijación simbiótica de nitrógeno en leguminosas forrajeras. *Agricultura técnica (Chile)* 54(2): 118 – 123.
- Benton, J. 2012. *Plant Nutritin and Soil Fertility Manual*. (digital - PDF) 2 ed. CRC PRESS. Boca Ratón. Florida. USA. 450 p. ISBN 13: 978-1-4398-1610-3
- Bernal, A; Hernández, A; Mesa, M; Rodríguez, O; González, PJ; Reyes, R. 2015. Características de los suelos y sus factores limitantes de la región de murgas, provincia La Habana (en línea). *Cultivos Tropicales* 36(2): 30-40. Consultado 18 oct 2017. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362015000200005&lng=es&tlng=es.
- Bernal F, A; Hernández J, A. 2017. Influencia de diferentes sistemas de uso del suelo sobre su estructura. *Cultivos Tropicales* 38(4): 50- 57
- Bohn, HL; Mcneal, BL; O Connor, GA. 1993. *Química del suelo*. Limusa. México. 370 p. ISBN: 9789681844318
- Borges, JA; Barrios, M; Sandoval, E; Bastardo, Y; Márquez, O. 2012. Características físico-químicas del suelo y su asociación con macroelementos en áreas destinadas a pastoreo en el estado Yaracuy (en línea). *Bioagro* 24(2): 121-126. Consultado el 23 oct 2018. Disponible en http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612012000200006&lng=es&tlng=es.

- Bravo, I; Montoya, JC; Menjivar, JC. 2013. Retención y disponibilidad de fósforo asociado a la materia orgánica en un Typic Melanudands del departamento del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*. 62(3): 261-267
- Campitelli, P; Aoki, A; Gudelj, O; Rubenacker, A; Sereno, R. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la Región Central de Córdoba (en línea). *CI Suelo (Argentina)* 28(2): 223-231. Consultado el 11 may 2018. Disponible en [https://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_28n2/28\(2\)%20223-231.pdf](https://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_28n2/28(2)%20223-231.pdf)
- Casas Flores, R. 2012. El suelo de cultivo y las condiciones climáticas. Ediciones Paraninfos S.A. España. 235 p.
- Casierra-Posada, F; Aguilar-Avenidaño, OE. 2007. Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 1(2): 246-257
- Casona Olivo, EF. 1996. Introducción a la ciencia del suelo. Caracas, Colombia. UCV. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. 487 p.
- Castro, H; Munevar, Ó. 2013. Mejoramiento químico de suelos ácidos mediante el uso combinado de materiales encalantes(en línea).*Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 16 (2): 409 – 416. Consultado 27 oct 2018. Disponible en www.scielo.org.co/pdf/rudca/v16n2/v16n2a15.pdf
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1981. Establecimiento de Praderas en Sabanas Bien Drenadas de Los Llanos Orientales de Colombia. J. Spain (ed). Cali, Colombia. CIAT. 40 p.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1983. Oxisoles y Ultisoles en América Tropical. Distribución, Importancia y Propiedades físicas. J. Salinas, C. Valencia (eds). Cali, Colombia. CIAT. 56 p.
- Chien, SH; Gearhart, M; Collamer, DJ. 2009. Acidez generada por los fertilizantes nitrogenados: Nueva evaluación de los requerimientos de cal. *Informaciones Agronómicas* N° 41:16-17
- Chinchilla, M; Mata, R; Alvarado, A. 2011. Caracterización y clasificación de algunos Ultisoles de la Región de los Santos, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 35(1): 59-81. ISSN:0377-9424
- Colacelli, N. 2001. Azufre en el suelo. 1 ed. Librería y Editorial Alsina. Buenos Aires, Argentina. ISBN 950-553-104-4
- Corrales-Maldonado, CG; Vargas-Arispuro, I; Vallejo-Cohén, S; Martínez-Téllez, MA. 2014. Deficiencia de azufre en suelos cultivables y su efecto en la productividad. *Biotecnia* XVI (1): 38-44

- Cubilla A, MM; Wendling, A; Eltz, F; Amado, T; Mielniczuk, J. 2012. Recomendaciones de fertilización para soja, trigo, maíz y girasol bajo el sistema de siembra directa en el Paraguay. Asunción. CAPECO, 88 p. ISBN 978-99953-849-5-1
- Dalurzo, HC; Toledo, D; Vásquez, S. 2005. Estimación de parámetros químicos y biológicos en Oxisoles con uso citrícola (en línea). *Ciencias del Suelo Argentina* 23(2): 159-165. Consultado 18 oct 2017. Disponible en http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672005000200006&lng=es&nrm=iso
- Díaz-Zorita, M. 1999. Efectos de seis años de labranzas en un Hapludul de noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo* 17 (1):31-36
- Díaz, A; Cayón, G; Mira, JJ. 2007. Metabolismo del calcio y su relación con la “mancha de madurez” del fruto de banano: Una revisión. *Agronomía Colombiana* 25(2): 280-287
- Demagnet Filippi, R. sf. Praderas y Pasturas (en línea). Temuco, Chile. Universidad de La Frontera. Consultado 6 nov 2019. Disponible en <http://praderasypasturas.com/new/>
- Ellies, A. 1995. Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos (en línea). *Bosque* 16(2): 101-110. Consultado 18 oct 2017. Disponible en <http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v16n2/art09.pdf>
- Ekeberg, E; Riley, H. 1997. Tillage intensity effects on soil properties and crop yields in a longterm trial on Morainic loam soil in southeast Norway. *Soil Till. Res.* 42: 277-293
- Encina Rojas, A. 2005. Manual básico para la descripción de perfiles de suelo. San Lorenzo, Paraguay, FCA-UNA.
- Estupiñán, LH; Gómez, JE; Barrantes, VJ; Limas, LF. 2009. Efecto de actividades agropecuarias en las características del suelo en el Páramo El Granizo, (Cundinamarca - Colombia). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 12(2): 79-89
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1992. Manual de sistemas de labranza para América Latina (en línea). Roma, Italia. Consultado 21 set 2019. Disponible en <https://books.google.com.py/books?id=bpHSafz3...>
- _____. 2013. El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas (en línea). Roma, Italia. Consultado 21 set 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i3361s.pdf>
- _____. 2019. Definiciones Clave: Manejo de suelo (en línea). FAO. Consultado 6 nov 2019. Disponible en <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/es/>

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación); GTIS (Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo). 2015. Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) (en línea). Resumen Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo, Roma, Italia. Consultado: 5 nov 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- Fassbender, HW. 1983. Suelos y sistemas de producción agroforestales. Turrialba, Costa Rica. CATIE/GTZ. 152 p.
- Fassbender, HW; Bornemisza, E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. 2 ed. San José, Costa Rica, IICA. 420 p. ISBN 92-9039-124.3
- Fernández S, MJ; Urrutia, M; García-Rodeja, E. 1991. Efecto del encalado de base y de mantenimiento sobre las propiedades de un suelo sobre esquistos de Galicia. *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)* 2:65-78
- Forero-Ulloa, FE; Serrano-Cely, PA; Balaguera López, WA. 2009. El aluminio en el suelo y algunas estrategias de manejo. *Ciencia y Agricultura* 7(1): 19-28.
- Gaitán, JJ; Penón; Costa, MC. 2005. Distribución de raíces finas de *Eucalyptus globulus* ssp. *Maidenii* y su relación con algunas propiedades del suelo. *Ciencia Florestal*, 15(1):33-41
- Galantini, JA; Suñer, LG; Iglesias, JO. 2007. Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense: efectos de largo plazo sobre las formas de fósforo en el suelo. *RIA*, 36 (1): 63-81
- García, Y; Ramírez, W; Sánchez, S. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso (en línea). *Pastos y Forrajes* 35(2): 125-138. Consultado 22 oct 2017. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001&lng=es&nrm=iso. ISSN 0864-0394.
- Garrido Valero, S. 1994. Interpretación de análisis de suelo (en línea). Hoja divulgadora N° 5. Editorial Rivadeneira, S. A. Madrid, España. ISBN 84-341-0810-0.
- Gaspari, FJ; Vázquez, M; Lanfranco, J. 2006. Relación entre la erosión hídrica superficial y la distribución de la pérdida de calcio, magnesio y potasio del suelo. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 106(1): 47-56.
- Gil-Stores, F; Trasar-Cepeda, C; Leiros, MC; Seoane, S. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties (en línea). *Soil Biology and Biochemistry* 37(5):877-887. Consultado 18 oct 2017. Disponible en www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071704003785

- Gisbert, JM; Ibañez, S. 2010. "Génesis del suelo". Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
- González-Osorio, H; Sadeghiam, S; Mejía Muñoz, B. 2005. El azufre en los suelos de la zona cafetera colombiana. *Avances Técnicos* 332. ISSN - 0120 - 0178
- González-Osorio, H; Sadeghiam-Khalajabadi, S. 2006. Efecto de corto plazo de distintas fuentes de azufre sobre la acidez y la disponibilidad de este elemento en la zona radical del café. *Cenicafé* 57(2): 132-145
- González, E; Pedraza, A; Pérez, M. 2009. Caracterización agrológica del suelo y diagnóstico de su fertilidad en la estación experimental del Campus Nueva Granada, Cajicá (Cundinamarca, Colombia). *Revista Facultad de Ciencias Básicas* 4(1):82-104
- Govaerts, B; Sayre, KD; Lichter, K; Dendooven, L; Deckers, J. 2007. Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain fed maize/wheat systems. *Plant Soil*. 291:39-54
- Gualdrón, R; Salinas, JG. 1982. El azufre en suelos de los llanos orientales de Colombia. *Suelos Ecuatoriales* XII (2): 221-230
- Gutiérrez Castorena, E; Gutiérrez Castorena, M; Ortiz Solorio, CA. 2015. Manejo integrado de nutrientes en sistemas agrícolas intensivos: revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6(1): 201-215
- Hansel, FD; Amado, TJC; Ruiz Díaz, DA; Rosso, LHM; Nicoloso, FT; Schorr, M. 2017. Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. *Agronomy Journal* 109(3): 1091 - 1098
- Hernández Jiménez, A; Ascanio García, MO; Morales Díaz, M; Bojórquez Serrano, JI; García Calderón. NE; García Paredes, JD. 2006. El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo. (en línea) Universidad Autónoma de Nayarit. ISBN: 968833072-8
- Ibañez, JJ. 2006. La Distribución de la Materia Orgánica del Suelo en Profundidad por Climas y Tipos de Vegetación (en línea). Consejo superior de Investigación Científica (CSIC). España. Blog profesional. Consultado 7 oct 2019. Disponible en <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/11/17/51410>
- Ibarra Castillo, D; Ruiz Corral, JA; González Eguiarte, DR; Flores Garnica, JG; Díaz Padilla, G. 2009. Distribución espacial del pH de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México (en línea). *Agricultura Técnica en México* 35(3): 267-276. Consultado 31 oct 2018. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000300003&lng=es&tlng=es.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 2016. establecimiento y uso de sistemas silvopastoriles en República Dominicana. Santo Domingo, República Dominicana. IICA. 36 p.

- Jaramillo Jaramillo, D. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. Medellín, Colombia. UNC. 619 p.
- Juárez Sanz, M; Sánchez Andreu, J; Sánchez Sánchez, A. 2006. Química del suelo y medio ambiente. 1 ed. Universidad Alacant San Vicente del Raspeig: Digitalia. 744 p. ISBN: 8479088931
- Kass, D. 1996. Fertilidad de Suelos. Editorial EUNED, San José, Costa Rica. 272 p.
- Larriva Coronel, N. 2003. Síntesis de la importancia del potasio en el suelo y planta. La granjaN°2:23-24
- Ley Forestal N° 7575. Art. 3. Gaceta N° 72. Costa Rica. 16 abr 1996
- Lince Salazar, LA; Rodríguez Valencia, N; Sadeghiam Khalajabadi, S. 2015. Disponibilidad de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ en función de las propiedades del suelo, zona cafetera Central de Colombia Revista de Investigación Agraria y Ambiental 6(1): 29 – 42. ISSN 2145-6097
- López-Báez, W; Ramírez-Vilchis, CE; Reynoso-Santos, R; Cadena-Iñiguez, P. 2018. Diagnóstico de las propiedades de los suelos en áreas de bosque, y productivas de la reserva de la biosfera El Triunfo (en línea). Agroproductividad 11(3): 108-114. Consultado 26 oct 2018. Disponible en <http://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/225/168>
- López Gorostiaga, O; González Erico, E; Llamas G, PA de; Molinas M, AM; Franco S, ES; García S, S; Ríos A, EO. 1995. Estudio de reconocimiento de suelos, capacidad de uso de la tierra y propuesta de ordenamiento territorial preliminar de la Región Oriental del Paraguay (en línea). Proyecto de racionalización del uso de la tierra. Asunción, Paraguay. 246 p. Consultado 17 oct 2017. Disponible en <http://www.geologiadelparaguay.com/Estudio-de-Reconocimiento-de-Suelos-Regi%C3%B3n-Oriental-Paraguay.pdf>
- López Mtz, JD; Díaz Estrada, A; Martínez Rubín, E; Valdez Cepeda, RD. 2001. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. (en línea) Terra Latinoamericana, 19(4): 293-299. Consultado 22 oct 2017. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57319401>
- Lozano P, Z; Hernández Hernández, RM; Bravo, C; Rivero, C; Delgado, M. 2012. Disponibilidad de fósforo en un suelo de las sabanas bien drenadas venezolanas, bajo diferentes coberturas y tipos de fertilización. Interciencia, 37(11): 820-827.
- Mariscal-Sancho, I. 2008. Recuperación de la calidad de Ultisoles mediterráneos degradados, mediante la aplicación de enmiendas y formas alternativas de uso (en línea). Tesis Doctoral. Madrid, España. Universidad Pontificia de Madrid. 296 p.
- Martínez H, E; Fuentes E, JP; Acevedo H, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Soil Sc. Plant Nutr. 8(1): 68-96.

- Medina, S; López, M; Vilorio, J. 2011. Evaluación de la biofertilización en el cultivo maíz en suelo del estado Guárico. *In* Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo (19, Calabozo, Estado Guárico, 21 al 25 nov. 2011). *Fuente Original*: M Jaurixje; D Torres; B Mendoza; M Henríquez; J Contreras. 2013. Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quíbor, Estado Lara. *Biaogro* 25(1): 47-56.
- Mizuno, I. 1981. Fósforo en suelos argentinos (en línea). Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria n° 6: 5-15. Consultado 8 ene 2019. Disponible en http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/29331/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Mizuno, I; Chamorro, E; Lafaille, B; Sangüesa, A; Moretti, MC de; Igne, DE de. 1986. Azufre del suelo: Efectos del manejo sobre el azufre del suelo. *Rev. Facultad de Agronomía*, 7(1): 17-23.
- Moreno, C; González, MI; Egido, JA. 2015. Influencia del manejo sobre la calidad del suelo (en línea). *Revista Científica Ecuatorial* 2(1): 33 – 40. Consultado 21 set 2018. Disponible en <http://www.agrocalidad.gob.ec/revistaecuadorescalidad/index.php/revista/article/viewFile/4/6>
- Murada Cano, V. 2013. Efecto de enmiendas orgánicas a base de lodos de depuradora, sobre la lixiviación y biodisponibilidad de elementos traza, procedente de suelos contaminados en cultivo en bandejas de lechuga. Tesis Ing. Técnica Agrícola. España. Universidad de Almería. 117 p.
- Murray, RM; Orozco, MG; Hernández, A; Lemus, C; Nájera, O. 2014. El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. *Aia*. 18(1): 23-31. ISSN 0188789-0
- Navarrete Segueda, A; Vela Correa, G; López Blanco, J; Rodríguez Gamiño, ML. 2011. Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. (en línea) *Revista Contactos* v. 80: 29-37.
- Navarro Bravo, A; Figueroa Sandoval, B; Ordaz Chaparro, VM; González Cossio, FV. 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol (en línea). *Terra Latinoamericana* 18(1): 61-69. Consultado 22 oct 2017. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/573/57318107.pdf>
- Navarro García, G; Navarro García, S. 2013. Química agrícola: Química del suelo y de nutrientes esencial. 3 ed. Mundi-Prensa Libros. Madrid, España. 508 p.
- Obando Moncayo, FH; Villegas Hincapié, AM; Betancur P, JH; Echeverri Tafur, L. 2006. Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un *Typicudi vitrands*, arenoso de la Región Andina Central Colombiana (en línea). *Revista Facultad Nacional de Agronomía* 59(1): 3217-3235. Consultado 22 oct 2017. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179914074009>

- Osorio Filho, BD. 2006. Dinâmica de enxofre no sistema solo e resposta das culturas à adubação sulfatada (en línea). Dissertação de mestrado. Santa Maria, RS, Brasil. Universidade Federal de Santa Maria. 76 p. Consultado 21 set 2019. Disponible en <http://w3.ufsm.br/ppgcs/images/Dissertacoes/BENJAMIN-DIAS-OSORIO-FILHO.pdf>
- Ozuna, L; González, L; Narváez, N; Karajallo, J; Guerrero, D; Paster, E; Duarte, L; Espínola, J. 2018. Análisis de las propiedades químicas del suelo en dos profundidades bajo siembra directa. In. Congreso de Suelos del Departamento del Alto Paraná. (1a:2018 oct. 5; Minga Guazú, Paraguay). (en línea). Trabajos presentados 1(1):92. Consultado 21 set 2019. Disponible en <https://sopacis.org.py/wp-content/uploads/2019/03/I-CONGRESO-ALTO-PARANA.pdf>
- Paz, F; Etchevers, J. 2016. Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana* 34: 339-355
- Peña-Venegas, CP; Cardona, GI. 2010. Dinámica de suelos amazónicos: Procesos de degradación y alternativas para su recuperación. Bogotá Colombia. Instituto Sinchi. 122 p.
- Perrachón, J. 2004. Siembra Directa: ¿qué es? (en línea). *Revista del Plan Agropecuario* pp 54-57. Consultado 6 nov. 2019. Disponible en https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R110/R110_54.pdf
- Pineda, MC; Elizalde, G; Viloria, J. 2011. Relación suelo-paisaje en un sector de la cuenca del río Caramacate, Aragua, Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (UCV)* 37(1): 27-38
- Porta C, J, López-Acevedo R, M; Roquero, C. 2003. *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3 ed. Madrid, España. Ediciones Mundi Prensa. 960 p.
- Pozo Mateos, M del. 2008. Variación vertical de las propiedades del suelo en un bosque mixto de Quercíneas del parque natural de los Alcornocales. (en línea). Trabajo final de grado. Sevilla, España. Universidad de Sevilla. 88 p.
- Prause, J; Soler, J. 2001. Cambios producidos en un Suelo Bajo Labranza Conservacionista y Siembra Directa de Algodón en el Chaco, Argentina. *Agricultura Técnica*, 61(4): 527-532.
- Quiroga, A; Funaro, D. 2003. Indicadores de calidad de suelos (en línea). Consultado 11 nov 2017. Disponible en <http://www.aacrea.org.ar/soft/nro275.htm#notatapa>
- Ramírez García, AG; Cruz León, A; Morales Carrillo, N; Monterroso Rivas, AI. 2016. El ordenamiento ecológico territorial instrumento de política ambiental para la planeación del desarrollo local. *Revista Estudios Sociales* 26 (48): 71 – 99.
- Ramos Vásquez, E; Zúñiga Dávila, D. 2008. Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio (en línea). *Ecol.*

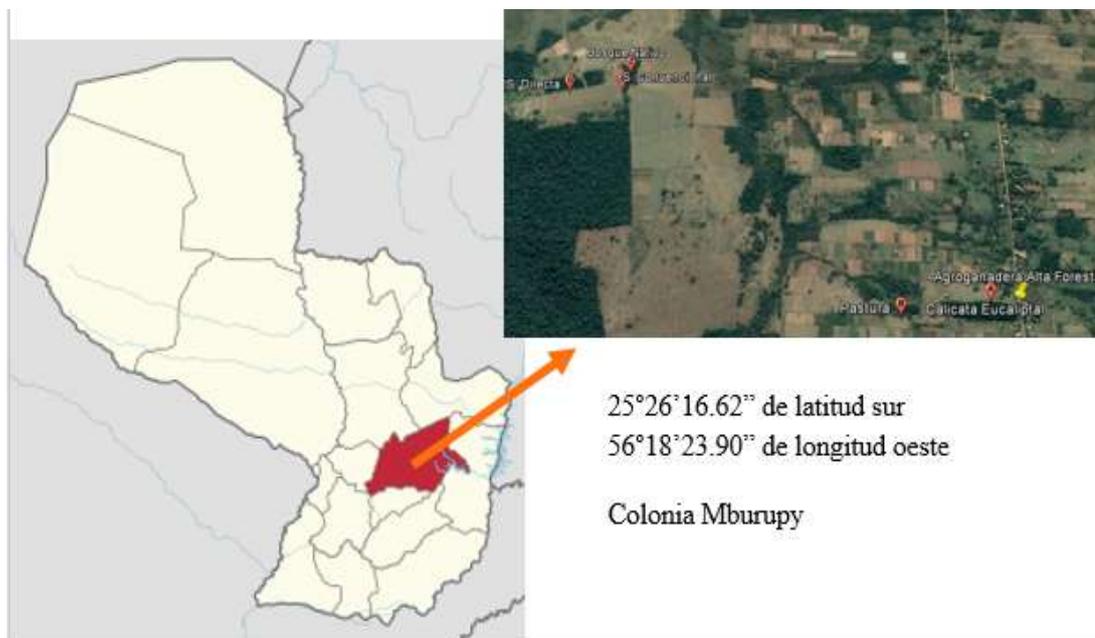
- Apl. 7(1-2): 123-130. Consultado 29 oct 2018. Disponible en <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v7n1-2/a15v7n1-2.pdf>
- Rivero Insfrán, U. 9 set 2018. Escala de coeficiente de correlación de Pearson (comunicación personal). San Lorenzo, Paraguay. FCA-UNA.
- Robson, AD. 1989. Soil acidity and plant growth. Academic Press Australia. Australia. 306 p.
- Rodríguez S, N; Ruz J, E; Chavarría R, J. 1993. Principios básicos de acidez del suelo. IPA QUILAMAPU n° 57: 21-25
- Rosas-Patiño, G; Puentes-Páramo, YJ; Menjivar-Flores, JC. 2017. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un Entisol de la Amazonia colombiana. Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecuaria 18(3):529-541
- Sánchez, P; Palm, C. 1996. Reciclaje de nutrientes y agrosilvicultura en África. *Agroforestry Systems*, 30(1):5-55.
- Sanzano, GA; Corbella, RD; García, JR; Fadda, GS. 2005. Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Revista Ciencias del Suelo (Argentina)* 23(1): 93-100
- Silva Arroyave, SM; Correa Restrepo, FJ. 2009. Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de la regulación económica (en línea). *Semestre Económico* 12(23):13-34. Consultado 09 feb 2018. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/seec/v12n23/v12n23a2.pdf>
- Singer, MJ; Ewing, S. 2000. Soil Quality. En *Handbook of Soil Science*. Chapter 11 (ed. Sumner, M.E.), 271-298, CRC Press, Boca Ratón, Florida.
- SQI (Soil Quality Institute). 1996. Indicators for soil quality evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service/The National Soil Survey Center / The Soil Quality Institute, NRCS, USDA/The National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- Stern Calderón, N. 2016. Influencia de sistemas de manejo sobre las propiedades químicas del suelo y el rendimiento de maíz (*Zea mays L.*) (en línea). Tesis de Grado. Ing. Agr. San Pedro, San Pedro. FCA – UNA.
- Soil Survey Staff. 2014. Claves para la Taxonomía de Suelos (en línea). 10 ed. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Washington, DC. USA. Consultado 15 jul 2018. Disponible en http://www.soils.usda.gov/technical/classification/tax_keys
- Rojas Nerhot, P; Rolón Núñez, D; Ramírez Monzón, D; Cantero Piñanez, JR; Encina Rojas, A. 2019. Niveles de calcio, magnesio y potasio en suelo con diferentes manejos y profundidades. In *Congreso Paraguayo de Ciencia del Suelo* (3, 2019 oct 3-5: Caaguazú, Paraguay.). JW Rasche, CA Leguizamón, PJ Rojas (eds). SOPACIS Trabajos presentados pp 101 – 104.

- Thompson, LM; Troeh, FR. 2002. Los suelos y su fertilidad. 4th ed. Editorial Reverté, Barcelona, España. ISBN 10: 8429110410
- Tiecher, T; Santos, DR dos; Rasche, JWA; Brunetto, G; Mallmann, FJK; Piccin, R. 2012. Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidos à adubação sulfatada. *Bragantia*, 71(4): 518-527.
- Toledo, M. 2016. Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras: conceptos y métodos. Honduras: IICA. 152 p
- Torella, JL; Garuzzo, R; Faita, EC. 2007. Efecto del encalado sobre las propiedades químicas del suelo y la germinación del trébol rojo (*Trifolium pratense*). *Informaciones Agronómicas* n° 36: 13-16.
- Toresani, S; Bonel, B; Ferreras, L; Magra, G; Dickie, MJ; Galarza, C; Faggioli, V. 2009. Indicadores biológicos, físicos y químicos del suelo en sistemas de labranza y fertilización. INTA EEA Oliveros p. 77-81.
- Trejo-Escareno, HI; Salazar-Sosa, E; López-Martínez, JD; Vázquez-Vázquez, C. 2013. Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción de forraje de maíz (en línea). *Rev. Mex. Cienc. Agríc*, 4(5): 727-738. Consultado 17 oct 2017. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342013000500006&lng=es&nrm=iso. ISSN 2007-0934.
- Trucíos Cacicano, R; Rivera González, M; Delgado Ramírez, G; Estrada Ávalos, J; Cerano Paredes, J. 2013. Análisis sobre cambio de uso de suelo en dos escalas de trabajo (en línea). *Terra Latinoamericana*, 31(4):339-346. Consultado 21 ene 2019. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792013000500339&lng=es&tlng=es.
- Verhulst, N; François, I; Govaerts, B. 2015. Agricultura de conservación: ¿mejora la calidad del suelo a fin de obtener sistemas de producción sustentables? México. CIMMYT
- Villalba-Martínez, CJ y Encina Rojas, A. 2018. Relación entre la concentración de fósforo en suelos bajo pasturas y su relación con pH y aluminio en un Ultisol. In. Congreso de Suelos del Departamento del Alto Paraná. (1a:2018 oct. 5; Minga Guazú, Paraguay) (en línea). *Trabajos presentados* 1(1):73. Consultado 21 set 2019. Disponible en <https://sopacis.org.py/wp-content/uploads/2019/03/I-CONGRESO-ALTO-PARANA.pdf>
- Ulrich, B; Sumner, ME (Eds). 1991. *Soil Acidity*. Berlín, Alemania. 224 p.
- Ybañez Díaz, MI; Cantú Silva, I; González Rodríguez, H. 2018. Efecto del cambio de uso de suelo en las propiedades químicas de un vertisol. *Terra Latinoamericana* 36(4) 369-379. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.349>

Zambrosi, FCB; Alleoni, LRF; Caires, EF. 2007. Teores de alumínio trocável e não trocável após calagem e gessagem em latossolo sob sistema plantio direto (en línea). *Bragantia*, Campinas 66(3): 487-495. Consultado 28 oct 2018. Disponible en <http://www.scielo.br/pdf/brag/v66n3/a16v66n3.pdf>

Zapata Hernández, RD. 2004. *Química de la acidez del suelo*. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 197 p.

7. ANEXO



7.A. Localización específica del área de estudio



7.A. Clasificación del suelo según López Gorostiaga et al. (1995)

Descripción Morfológica de Suelo Prof. Dr. Arnulfo Encina Rojas Ajustado 13 Febrero 2018

Topografía p: plana lo: ligerament ondulada o: ondulada fo: fuertemen ondulada e: escarpada	Posición Fisiográfica b: baja bm: baja media m: media a: alta am: media alta	Pendiente % A: plana a casi plana 0 - 2 B: lig. Inclinada 2 - 6 C: inclinada 6 - 12 D: fuert. inclinada 12 - 25 E: extrem. inclinada 25 - 50	Drenaje l: nulo 1: lento 2: moderado 3: rápido 4: muy rápido 5: extremad rápido	Permeabilidad l: lenta m: moderada r: rápida mr: muy rápida e: extremadamen rápida	Pedregosidad: i. Distancia entre piedras 0: no pedregosa 1: lig. Pedregosa mayor a 30 m 2: mod. Pedregosa 10-30 m 3: pedregosa 2-10 m 4: muy pedregosa 1-2 m 5: extrem. Pedregosa menor a 1 m	Roccosidad % 0: nula 1: lig. rocosa 2: mod. rocosa 3: rocosa 4: muy rocosa 5: extrem. rocosa mayor a 90
---	--	--	--	--	--	--

Erosion 0: no aparente 1: laminar ligero a moderado. 2: laminar severa 3: surcos sup. Ocasionales 4: surcos sup. Frecuentes 5: surcos prof. Ocasionales 6: surcos prof. Frecuentes 7: cárcavas	Transición: Limite cm a: abrupta 0 - 2,5 c: clara 2,5 - 6,5 g: gradual 6,5 - 12,5 d: difusa > 12,5	Grado Textural a: arena L: limo A: arcilla F: franco otra textura: Especificar	Estructura: Tipo o Forma l: laminar pr: prismática co: columnar ba: bloques angulares bs: bloques subangulares gr: granular mi: migajoso m: masiva	Estructura: pr-co altura mm bs-b ancho mm gr-ex diámetro mm	Estructura: Grado a: sin estructura d: débil m: moderada f: fuerte
	Transición: Topografía p: plana o: ondulada q: quebrada		Clase o tamaño mp: muy pequeña p: pequeña m: mediana g: grande mg: muy grande	espesor mm 1 10 1-2 10-20 2-5 20-50 5-10 50-100 > 10 > 100	

Poros (cantidad) p: pocos m: moderados a: abundantes	Raíces (cantidad) p: pocas c: comunes a: abundantes	Cutanes (cavidad) p: pocas c: comunes a: abundantes	Moteados (cantidad) p: pocos c: comunes a: abundantes	Consistencia en seco s: suelta b: blanda ld: ligeramente dura d: dura md: muy dura ed: extremadamente dura	Consistencia en mojado (cont) Pegajosidad: np: no pegajosa pe: pegajosa dp: débilmente pegajosa mp: muy pegajosa
Poros (tamaño) f: finos 1 mm mf: muy finos 1-2 mm m: medianos 2-5 mm gr: grandes > 5 mm	Raíces (tamaño) mf: muy finos 1 mm f: finos 1-2 mm m: medianos 2-5 mm gr: grandes > 5 mm	Cutanes (desarrollo) d: débil m: moderada f: fuerte	Moteados (tamaño) f: finos 5-15 m: medianos 5-15 gr: grandes > 15	Consistencia en húmedo mf: muy friable fr: friable f: firme ef: extrem. firme	
			Concreciones tamaño mm p: pequeños menor 5 m: medianos 5 - 15 g: grandes > 15	Consistencia en mojado Plasticidad: npi: no plástico dpi: débilmente plástico pi: plástico mpi: muy plástico	
			Concreciones cavidad p: pocas c: comunes a: abundantes		
			Concreciones dureza b: blandas d: duras		
			Concreciones color Númericas Intensidad de reacción 0: ausente 1: débil 2: moderada 3: fuerte		

7.C. Planilla de indicadores de campo para descripción de perfiles de suelo.
Adaptado por Encina (2018)



7.D. Trabajos de excavación y exposición de perfil de suelo



7.E. Toma de muestra del perfil de suelo



7.F. Lectura del perfil de suelo (A y B)

Resultados de Analisis de Suelo

Solicitante: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU
 Propietario: CARLOS JAVIER MARTINEZ
 Id. Muestra: null - EUCALIPTO / P1M 04 30-60 cm
 Ambiente:

Fecha entrada: 24/09/2018
 Fecha salida: 11/10/2018
 N° Muestra: 24735/2018

CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA

ACIDEZ	unidad	valor	nivel
pH CaCl ₂		4,76	bajo
H + Al	Hidrogeno + Aluminio	cmol _c dm ⁻³	1,90 medio
Al ³⁺	Aluminio	cmol _c dm ⁻³	0,05 bajo
m	Saturacion de Al	%	2,28 bajo
CO	Carbono Organico	g kg ⁻¹	2,51 bajo
MO	Materia Organica	g kg ⁻¹	4,32 bajo

ELECTRO-QUIMICA	unidad	valor	nivel
CIC	Capac. Interc. Cation	cmol _c dm ⁻³	4,04 bajo
SB	Suma de Bases	cmol _c dm ⁻³	2,14 bajo
V	Saturacion de Bases	%	53,02 bajo

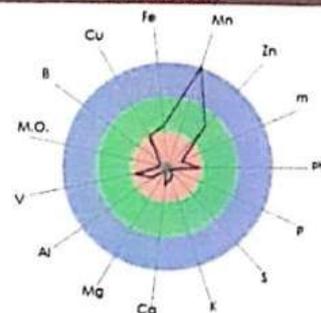
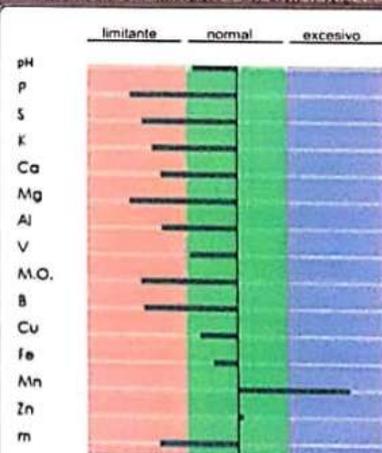
MACRONUTRIENTES	unidad	valor	nivel
Ca ²⁺	Calcio	cmol _c dm ⁻³	1,94 bajo
Mg ²⁺	Magnesio	cmol _c dm ⁻³	0,09 bajo
K ⁺	Potasio	cmol _c dm ⁻³	0,11 bajo
P	Fosforo	mg dm ⁻³	0,51 bajo
P-Rem	Fosforo Remanescente	mg dm ⁻³	48,61 alto
P Relativo	Fosforo Relativo	%	2,11 bajo
NCP	Nivel critico P	mg dm ⁻³	24,20 alto
S-SO ₄ ²⁻	Azufre	mg dm ⁻³	2,39 bajo

% DE MACRONUTRIENTES	unidad	valor	nivel
Ca	Calcio	%	48,07 medio
Mg	Magnesio	%	2,23 bajo
K	Potasio	%	2,72 medio

RELACIONES	unidad	valor	nivel
Ca / Mg	Calcio / Magnesio	21,58	alto
Ca / K	Calcio / Potasio	17,65	medio
Mg / K	Magnesio / Potasio	0,82	bajo

MICRONUTRIENTES	unidad	valor	nivel
Fe	Hierro	mg dm ⁻³	23,70 medio
Mn	Manganeso	mg dm ⁻³	86,52 alto
Cu	Cobre	mg dm ⁻³	2,04 medio
Zn	Zinc	mg dm ⁻³	3,76 medio
B	Boro	mg dm ⁻³	0,16 bajo

GRANULOMETRIA	unidad	valor	nivel
Arena (>0,02 mm)	%	84,36	
Limo (0,002 - 0,02 mm)	%	11,15	
Arcilla (<0,002 mm)	%	4,49	

**INTERPRETACIONES
FERTIGRAMA**

GRAFICO DE LIMITANTES NUTRICIONALES

Metodos de Analisis (consulte www.agronomico.com.py)

Anál. Quím. p/ Avaliação da Fert. do Solo. Doc. nº 3 IESN 1414-8153. 1996. Empresa Solos. Método 3.3.2 [Ca²⁺ e Mg²⁺] EAA. Extrator KCl 1 mol L⁻¹ - Método 4.3 [P] Colorimétrico Método 4.4 [K⁺] Fotométrico de Chamas - Método 4.6 (Micronutrientes). Extrator Mellich 1 [P, K⁺] - Método 6 [SB, CTC, V] - Anál. Quím. para Avaliação da Fert. de Solos Tropicais. Campinas, IAC, 2001. Cap. 9 (Matéria Orgânica) Método Colorimétrico - Cap. 15 (Boro) Colorimétrico - Azocina-H Aquecido com Microondas - Cap. 12 [Al³⁺] Método Colorimétrico. Extrator KCl 1 mol L⁻¹ - Cap. 14 [S-SO₄²⁻] Extrator Ca(H₂PO₄)₂ 0.01 mol L⁻¹ - Cap. 10 [pH CaCl₂ 0.01 mol L⁻¹] (H⁺+Al) Estimada através dos resultados do pH SMP; curva de calibração para o Paraguai, dados internos não publicados. Cernigliaro, O. S.; Moniz, A. C.; Jorge, J. A.; Valadez, J. M. e S. Métodos de Anál. Quím. - Mineralógica e física de solos do IAC, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106) Método do densímetro (Bouyoucos, 1927, modificado).
 Los resultados de estos análisis tienen un significado estricto y se aplican solamente a las muestras analizadas.
 Este informe de análisis solo puede ser reproducido por completo y sin ninguna alteración.

Ing. Agr. DSc. Andre V. Zabini
 Director Técnico

Ing. Agr. MSc. Carlos Fomasari
 Resp. Técnico

Av. Paraná, Paraná Country Club - Área Comercial, Ed. Azar, 2o piso.
 Fone. +595 21 338 1881 (www.agronomico.com.py)

7.G. Resultado de análisis de laboratorio

7.H. Tabla de vaciamiento de datos

Descripción	Profundidad		Acidez								Electro-Química			Macronutrientes					
	Id	LI	LS	pH	H+Al	Al3+	m	CO	CO	MO	MO	CIC	SB	V	Ca+2	Mg+2	K+	P	S-SO4 2-
Unidad	cm		CaCl2	cmolc dm-3	cmolc dm-3	%	g kg-1	%	g kg-1	%	cmolc dm-3	cmolc dm-3	%	cmolc dm-3	cmolc dm-3	cmolc dm-3	mg dm-3	mg dm-3	mg dm-3
Eucaliptal	0	5	4,8	3,45	0,03	0,99	9,88	0,99	17,04	1,70	6,44	2,99	46,48	2,27	0,51	0,21	3,62	3,36	
Eucaliptal	5	15	4,28	3,96	0,16	8,21	5,85	0,59	10,08	1,01	5,75	1,79	31,17	1,38	0,26	0,15	1,71	2,87	
Eucaliptal	15	30	4,49	3,09	0,09	3,64	4,04	0,40	6,96	0,70	5,47	2,38	43,42	2,03	0,2	0,15	1,07	3,61	
Eucaliptal	30	60	4,76	1,9	0,05	2,28	2,51	0,25	4,32	0,43	4,04	2,14	53,02	1,94	0,09	0,11	0,51	2,39	
Eucaliptal	60	100	4,96	2,91	0,05	0,96	3,2	0,32	5,52	0,55	8,08	5,17	63,95	4,58	0,46	0,13	0,3	3,2	
Eucaliptal	100	150	5,55	1,99	0	0	3,48	0,35	6	0,60	10,3	8,31	80,63	7,18	0,96	0,17	0,51	5,72	
Pastura	0	5	5,39	2,69	0	0	12,53	1,25	21,6	2,16	6,39	3,7	57,93	2,65	0,8	0,25	9,91	3,61	
Pastura	5	15	5,19	2,23	0,06	2,47	6,13	0,61	10,56	1,06	4,6	2,37	51,52	2,06	0,21	0,1	1,29	2,63	
Pastura	15	30	5,06	2,14	0,06	2,46	3,34	0,33	5,76	0,58	4,53	2,38	52,65	2,12	0,18	0,08	0,72	1,73	
Pastura	30	60	5,02	2,29	0,04	1,3	3,2	0,32	5,52	0,55	5,32	3,03	56,99	2,59	0,3	0,14	0,3	2,06	
Pastura	60	100	5,12	2,48	0,05	0,74	3,2	0,32	5,52	0,55	9,16	6,68	72,89	5,25	1,35	0,08	0,23	3,85	
Pastura	100	150	5,29	2,69	0	0	2,37	0,24	4,08	0,41	9,05	6,36	70,3	4,55	1,74	0,07	0,86	2,06	
Siembra Directa	0	5	4,74	3,45	0,09	3,61	10,44	1,04	18	1,80	5,85	2,4	41,08	1,74	0,5	0,16	5,24	2,06	
Siembra Directa	5	15	4,5	3,21	0,15	8,38	5,29	0,53	9,12	0,91	4,85	1,64	33,81	1,42	0,16	0,06	1,22	1,65	
Siembra Directa	15	30	4,87	1,85	0,1	6,9	3,06	0,31	5,28	0,53	3,2	1,35	42,25	1,25	0,06	0,04	0,65	1,73	
Siembra Directa	30	60	4,91	1,38	0,09	7,38	1,95	0,20	3,36	0,34	2,51	1,13	45,14	1,05	0,05	0,03	0,37	2,3	
Siembra Directa	60	100	4,83	1,61	0,09	5,62	1,95	0,20	3,36	0,34	3,12	1,51	48,4	1,41	0,07	0,03	0,3	2,14	
Siembra Directa	100	150	4,82	2,69	0,12	2,37	2,78	0,28	4,8	0,48	7,64	4,95	64,83	4,44	0,45	0,06	0,01	5,32	
S. Convencional	0	5	4,72	3,41	0,07	3,1	7,52	0,75	12,96	1,30	5,6	2,19	39,05	1,73	0,33	0,13	14,71	2,47	
S. Convencional	5	15	4,48	3,09	0,1	5,13	6,82	0,68	11,76	1,18	4,94	1,85	37,41	1,49	0,29	0,07	5,67	2,39	
S. Convencional	15	30	4,79	2,69	0,08	3,96	3,48	0,35	6	0,60	4,64	1,94	41,92	1,61	0,29	0,05	0,93	2,3	
S. Convencional	30	60	5,1	1,66	0,06	3,73	1,81	0,18	3,12	0,31	3,21	1,55	48,29	1,3	0,22	0,03	0,51	3,77	
S. Convencional	60	100	5,1	1,52	0,06	2,91	1,67	0,17	2,88	0,29	3,52	2	56,82	1,77	0,19	0,04	0,37	4,34	
S. Convencional	100	150	5,01	2,23	0,08	1,23	3,34	0,33	5,76	0,58	8,65	6,42	74,24	5,33	1,03	0,06	0,08	3,53	
Bosque Nativo	0	5	5,88	2,23	0,00	0,00	26,87	2,69	46,32	4,63	10,68	8,45	79,12	5,63	1,78	1,04	89,12	4,01	
Bosque Nativo	5	15	5,65	2,23	0,00	0,00	11	1,10	18,96	1,90	7,19	4,96	68,98	3,34	1,07	0,55	60,49	4,1	
Bosque Nativo	15	30	5,71	1,61	0,00	0,00	4,45	0,45	7,68	0,77	4,63	3,02	65,23	1,92	0,68	0,42	36,13	2,63	
Bosque Nativo	30	60	5,66	1,4	0,00	0,00	1,95	0,20	3,36	0,34	3,71	2,31	62,21	1,38	0,37	0,56	29,91	2,47	
Bosque Nativo	60	100	6,07	1,25	0,00	0,00	2,51	0,25	4,32	0,43	4,99	3,74	74,89	2,22	0,73	0,79	4,11	4,5	
Bosque Nativo	100	150	5,37	1,93	0,00	0,00	2,37	0,24	4,08	0,41	8,86	6,93	78,19	4,8	1,22	0,91	0,65	39,36	

7.I. Correlación de las propiedades químicas del suelo pareado todos los usos y profundidades

Correlación	pH	Al3+	%MO	CIC	SB	V	Ca+2	Mg+2	K+	P	S-SO4 2-
pH	1	<0,0001	0,21	0,10	<0,0001	<0,0001	0,03	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,31
Al3+	-0,86	1	0,25	0,04	<0,0001	<0,0001	0,02	<0,0001	<0,0001	0,01	0,15
MO1	0,24	-0,22	1	0,03	0,09	0,60	0,27	0,02	0,01	<0,0001	0,65
CIC	0,30	-0,37	0,41	1	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,04	0,12	0,08
SB	0,53	-0,54	0,32	0,95	1	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,01	0,07	0,04
V	0,80	-0,75	0,10	0,68	0,86	1	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,07	0,04
Ca+2	0,40	-0,42	0,21	0,93	0,97	0,81	1	<0,0001	0,12	0,31	0,08
Mg+2	0,59	-0,61	0,44	0,85	0,89	0,77	0,78	1	<0,0001	0,01	0,09
K+	0,71	-0,62	0,50	0,37	0,47	0,56	0,29	0,55	1	<0,0001	<0,0001
P	0,55	-0,44	0,77	0,29	0,34	0,34	0,19	0,48	0,68	1	0,79
S-SO4 2-	0,19	-0,27	-0,09	0,32	0,38	0,38	0,33	0,32	0,51	-0,05	1