

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN CONSERVACIÓN DE
SUELOS Y AGUA



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL
SUELO POR UNIDADES FISIAGRÁFICAS EN EL FUNDO LIVIAC, CASERÍO RÍO
NEGRO, DISTRITO DE LUYANDO

Tesis

Para optar el título de:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. Paredes', is written over a horizontal line.

INGENIERO EN CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA

PRESENTADO POR:

BRILLITH PAREDES ARMAS

Tingo María – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 063-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 24 de marzo de 2025, a horas 03. p.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:


“DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO POR UNIDADES FISIOGRAFICAS EN EL FUNDO LIVIAC, CASERÍO RÍO NEGRO, DISTRITO DE LUYANDO”

Presentado por la Bachiller: **PAREDES ARMAS, BRILLITH**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN CONSERVACION DE SUELOS Y AGUA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 21 de mayo de 2025


Dr. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUAREZ
PRÉSIDENTE


Ing. JAIME TORRES GARCIA
MIEMBRO


Ing. MSc. JUAN PABLO RENGIFO TRIGOZO
MIEMBRO




Dr. SANDRO JUNIOR RUIZ CASTRE
ASESOR



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 186 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional
-------	---	------------------------------------

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO POR UNIDADES FISIOGRAFICAS EN EL FUNDO LIVIAC, CASERÍO RÍO NEGRO, DISTRITO DE LUYANDO	BRILLITH PAREDES ARMAS	20 % Veinte

Tingo María, 16 de junio de 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Dr. Tomás Menacho Mallqui
JEFE

C.C. Archivo

DEDICATORIA

A Dios por haber permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos además de su infinita bondad y amor.

A mis queridos padres, Jorge Paredes y Rita Armas, por la paciencia, comprensión y colaboración que han brindado a lo largo de mi viaje de estudios académicos y por ser el pilar de mi vida.

A mis hermanos, sobrinos y abuelitos por ser mi fortaleza y quienes llenan mi vida de alegría.

También dedico a Henry Liviak por el apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Recursos Naturales Renovables, especialidad de Conservación Suelos y Agua, de la Universidad Nacional Agraria de la Selva por sus enseñanzas brindadas a lo largo de mi vida académica.

A mi asesor M. Sc. Ruíz Castré, Sandro Junior, por sus valiosos consejos para seguir adelante, terminar lo que empecé; por sus enseñanzas y apoyo a lo largo del proceso de investigación.

A mis padres; gracias a ellos por siempre confiar en mí y en sus palabras de aliento; que siempre confiaron en mi a pesar de mis errores nunca dejaron de apoyarme. Esto es el fruto de sus esfuerzos que sus hijos sean profesionales.

A los productores que me brindaron la facilidad para la obtención de las muestras de dichas parcelas para dicha investigación.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCION.....	
¡Error! Marcador no definido.	
II. REVISION DE LITERATURA.....	4
2.1.Marco conceptual.....	4
2.1.1.Distribución espacial.....	4
2.1.2.Mapeo digital del suelo.....	6
2.1.3.Método de interpolación y extrapolación.....	7
2.1.4.Sistemas de uso del suelo.....	9
2.1.5. Suelo.....	10
2.1.6.Estudio del suelo.....	10
2.1.7.Levantamiento de suelos.....	11
2.1.8.Modelo de mapa.....	11
2.1.9.Propiedades físicas del suelo.....	11
2.2.Estado del arte.....	24
III. MATERIALES Y METODOS.....	29
3.1.Lugar de ejecución del trabajo de investigación.....	29
3.1.1.Ubicación política.....	29
3.1.2.Ubicación geográfica.....	29
3.1.3.Clima.....	29
3.1.4.Zona de vida.....	30
3.1.5.Suelos.....	30
3.1.6.Fisiografía.....	30
3.1.7.Hidrografía.....	30
3.1.18.Accesibilidad.....	30
3.2.Materiales y equipos.....	31
3.2.1.Materiales.....	31
3.2.2.Equipos.....	31
3.3.Generalidades de la investigación.....	31
3.3.1.Tipo de estudio.....	31
3.3.2.Nivel de estudio.....	31
3.3.3.Análisis de datos.....	31
3.3.4.Variable en estudio.....	32

3.4. Metodología.....	
3.4.1. Caracterizar los parámetros físicos (textura, densidad aparente y resistencia mecánica a la penetración) y químicos (pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio y conductividad eléctrica) en tres sistemas de uso del suelo por unidades fisiográficas en el fundo Liviac caserío río Negro, distrito Luyando.....	32
3.4.2. Representar cartográficamente la distribución espacial de los indicadores físicos y químicos de los suelos en tres sistemas de uso por unidades fisiográficas en el fundo Liviac, caserío río Negro, distrito Luyando.....	36
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
4.1. Caracterizar los parámetros físicos (textura, densidad aparente y resistencia mecánica a la penetración) y químicos (pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico, calcio magnesio y conductividad eléctrica) en tres sistemas de uso del suelo por unidades fisiográficas en el fundo Liviac caserío río Negro, distrito Luyando.....	38
4.2. Representar cartográficamente la distribución espacial de los indicadores químicos de los suelos en tres sistemas de uso por unidades fisiográficas en el fundo Liviac, caserío río Negro, distrito Luyando.....	54
V. CONCLUSIONES.....	69
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	70
VII. REFERENCIAS.....	71
ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Propiedades físicas de los indicadores de la calidad del suelo.....	12
2. Relación entre densidad aparente y crecimiento radicular, en base a textura del suelo.....	14
3. Valores de la resistencia mecánica a la penetración del suelo.....	15
4. Propiedades químicas indicadoras de la calidad del suelo.....	16
5. Niveles de pH en el suelo	17
6. Rangos interpretativos para la conductividad eléctrica	17
7. Rangos interpretativos para el contenido de materia orgánica.....	18
8. Rangos interpretativos para la capacidad de intercambio catiónico.....	19
9. Rangos interpretativos para el fósforo disponible	20
10. Rangos interpretativos para potasio.....	20
11. Rangos interpretativos para el nitrógeno total.....	21
12. Rangos interpretativos para el calcio intercambiable	22
13. Rangos interpretativos para el magnesio intercambiable	23
14. Rangos interpretativos para el potasio intercambiable	23
15. Rangos interpretativos para el sodio intercambiable.....	24
16. Coordenadas UTM de los tres sistemas de uso del fundo Liviac.....	29
17. Indicadores físicos y químicos	34
18. Descripción de los tratamientos en estudio	36
19. Textura de los suelos en los tres sistemas de uso	38
20. Valores de la densidad aparente (g/cm^3) en los tres sistemas de uso	40
21. Valores para la resistencia mecánica a la penetración (kg/cm^2) en los tres sistemas de uso del suelo.....	41
22. Valores para la reacción o pH del suelo en los sistemas de uso.....	43
23. Valores para la materia orgánica (%) en los tres sistemas de uso del suelo.....	45
24. Valores para nitrógeno (%) en los tres sistemas de uso del suelo	46
25. Valores para el fósforo total (ppm) en los tres sistemas de uso del suelo	48
26. Valores para el potasio total (kg/ha) en los tres sistemas de uso del suelo	49
27. Valores para la capacidad de intercambio catiónico en los tres sistemas de uso	51
28. Valores para el calcio (meq/100 g suelo) en los tres sistemas de uso del suelo.....	52
29. Valores para el magnesio (meq/100 g suelo) en los tres sistemas de uso del suelo	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diagrama de muestreo de suelos para análisis fisicoquímico de los tres sistemas de uso.....	33
2. Diagrama metodológico del trabajo de campo utilizado en la elaboración de los mapas para la distribución espacial de las propiedades físicas y químicas de los tres sistemas de uso del suelo.....	35
3. Diagrama metodológico para elaborar mapas temáticos de la distribución espacial de los suelos en los tres sistemas de uso	37
4. Diagrama metodológico para elaborar mapas temáticos de la distribución espacial de las propiedades físicas y químicas en los tres sistemas de uso del suelo.....	37
5. Valores en proporción de arena, arcilla y limo en los tres sistemas de uso del suelo.....	39
6. Valores de la densidad aparente en los tres sistemas de uso del suelo.....	41
7. Valores para la resistencia mecánica a la penetración en los tres sistemas de uso.....	42
8. Valores para el pH en los tres sistemas de uso del suelo.....	44
9. Valores para la materia orgánica en los tres sistemas de uso del suelo.....	46
10. Valores para el nitrógeno en los tres sistemas de uso del suelo	47
11. Valores para el fósforo total en los tres sistemas de uso del suelo	49
12. valores para el potasio total en los tres sistemas de uso del suelo.....	50
13. Valores para la Capacidad de Intercambio Catiónica en los tres sistemas de uso	51
14. Valores para el calcio en los tres sistemas de uso	53
15. Valores para el magnesio en los tres sistemas de uso del suelo	54
16. Mapa de pH del suelo de los tres sistemas de uso.....	56
17. Mapa de materia orgánica del suelo en los tres sistemas de uso	57
18. Mapa de nitrógeno del suelo en los tres sistemas de uso.....	58
19. Mapa de fósforo disponible del suelo en los tres sistemas de uso.....	59
20. Mapa de potasio disponible del suelo en los tres sistemas de uso.....	60
21. Mapa de capacidad de intercambio catiónico del suelo en los tres sistemas de uso.....	62
22. Mapa de conductividad eléctrica del suelo en los tres sistemas de uso.....	63
23. Mapa de calcio en el suelo en los tres sistemas de uso.....	64
24. Mapa de magnesio del suelo en los tres sistemas de uso.....	65
25. Mapa de potasio en el suelo en los tres sistemas de uso.....	66
26. Mapa de sodio en el suelo en los tres sistemas de uso.....	68
1. Diagrama de muestreo de suelos para análisis fisicoquímico de los tres sistemas de uso.....	33

2. Diagrama metodológico del trabajo de campo utilizado en la elaboración de los mapas para la distribución espacial de las propiedades físicas y químicas de los tres sistemas de uso del suelo.....	35
3. Diagrama metodológico para elaborar mapas temáticos de la distribución espacial de los suelos en los tres sistemas de uso	37
4. Diagrama metodológico para elaborar mapas temáticos de la distribución espacial de las propiedades físicas y químicas en los tres sistemas de uso del suelo.....	37
5. Valores en proporción de arena, arcilla y limo en los tres sistemas de uso del suelo.....	39
6. Valores de la densidad aparente en los tres sistemas de uso del suelo.....	41
7. Valores para la resistencia mecánica a la penetración en los tres sistemas de uso.....	42
8. Valores para el pH en los tres sistemas de uso del suelo.....	44
9. Valores para la materia orgánica en los tres sistemas de uso del suelo.....	46
10. Valores para el nitrógeno en los tres sistemas de uso del suelo	47
11. Valores para el fósforo total en los tres sistemas de uso del suelo	49
12. valores para el potasio total en los tres sistemas de uso del suelo.....	50
13. Valores para la Capacidad de Intercambio Catiónica en los tres sistemas de uso	51
14. Valores para el calcio en los tres sistemas de uso	53
15. Valores para el magnesio en los tres sistemas de uso del suelo	54
16. Mapa de pH del suelo de los tres sistemas de uso.....	56
17. Mapa de materia orgánica del suelo en los tres sistemas de uso	57
18. Mapa de nitrógeno del suelo en los tres sistemas de uso.....	58
19. Mapa de fósforo disponible del suelo en los tres sistemas de uso.....	59
20. Mapa de potasio disponible del suelo en los tres sistemas de uso.....	60
21. Mapa de capacidad de intercambio catiónico del suelo en los tres sistemas de uso.....	62
22. Mapa de conductividad eléctrica del suelo en los tres sistemas de uso.....	63
23. Mapa de calcio en el suelo en los tres sistemas de uso.....	64
24. Mapa de magnesio del suelo en los tres sistemas de uso.....	65
25. Mapa de potasio en el suelo en los tres sistemas de uso.....	66
26. Mapa de sodio en el suelo en los tres sistemas de uso.....	68
27. Toma de coordenadas con GPS en los sistemas de uso fundo Liviác.....	86
28. Muestreo de suelo en el sistema de uso con maíz.....	86
29. Muestra de suelo del sistema de uso con capirona.....	87
30. Medición de resistencia mecánica a la penetración sistema de uso cacao fundo Liviác...	87
31. Muestra de suelo del sistema de uso con cacao fundo Liviác.....	88

32. Muestreo de suelo en el sistema de uso con capirona fundo Liviac.....	88
33. Muestreo de suelo en el sistema de uso con cacao fundo Liviac.....	89
34. Muestras de suelos para ser secados y analizados en el laboratorio.....	89
35. Pesado del cilindro con muestra de suelo.....	90
36. Cilindros de aluminio enrasado con muestras de suelos para su secado en la estufa.....	90
37. Mapa de los tres sistemas de uso del suelo.....	91
38. Análisis de suelos de los tres sistemas de uso del fundo Liviac.....	92

RESUMEN

El estudio evaluó la distribución espacial de los parámetros físicos y químicos del suelo en tres sistemas de uso por unidades fisiográficas en el fundo Liviac, caserío Río Negro, distrito de Luyando. Se caracterizaron la textura, densidad aparente, resistencia mecánica a la penetración, pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio y conductividad eléctrica. Se emplearon análisis de laboratorio y herramientas cartográficas para visualizar la variabilidad espacial de estos parámetros. Los resultados indicaron que los suelos presentan textura franca, densidad aparente adecuada y resistencia mecánica baja, lo que facilita su manejo agrícola. Los valores de materia orgánica, nitrógeno y fósforo fueron medios, mientras que el potasio y la capacidad de intercambio catiónico resultaron bajos, afectando la fertilidad del suelo. El pH osciló entre moderadamente ácido y neutro, favorable para cultivos, aunque con baja disponibilidad de calcio y magnesio, lo que puede limitar la productividad. La conductividad eléctrica fue baja, descartando riesgos de salinidad. Se concluye que la variabilidad espacial de los parámetros edáficos influye en la planificación agrícola y el manejo del suelo. Se recomienda aplicar enmiendas orgánicas y fertilización equilibrada para mejorar la calidad del suelo. Además, es necesario realizar estudios en diferentes épocas del año para monitorear la evolución de estos parámetros y optimizar su manejo.

Palabras clave: distribución espacial, propiedades del suelo, fertilidad, sistemas de uso, manejo sostenible.

ABSTRACT

The study evaluated the spatial distribution of soil physical and chemical parameters in three land use systems by physiographic units in the Liviach farm, Río Negro hamlet, Luyando district. Texture, bulk density, mechanical resistance to penetration, pH, organic matter, nitrogen, phosphorus, potassium, cation exchange capacity, calcium, magnesium, and electrical conductivity were characterized. Laboratory analyses and cartographic tools were used to visualize the spatial variability of these parameters. The results indicated that the soils have a loamy texture, adequate bulk density, and low mechanical resistance, facilitating agricultural management. Organic matter, nitrogen, and phosphorus levels were moderate, while potassium and cation exchange capacity were low, affecting soil fertility. The pH ranged from moderately acidic to neutral, favorable for crops, but with low calcium and magnesium availability, which may limit productivity. Electrical conductivity was low, ruling out salinity risks. It is concluded that the spatial variability of soil parameters influences agricultural planning and soil management. It is recommended to apply organic amendments and balanced fertilization to improve soil quality. Additionally, further studies in different seasons are necessary to monitor the evolution of these parameters and optimize soil management strategies.

Keywords: spatial distribution, soil properties, fertility, land use systems, sustainable management.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio del suelo y su distribución espacial es esencial para comprender su impacto en la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental. Los parámetros fisicoquímicos del suelo determinan su calidad y aptitud para diferentes usos, como la agricultura, la silvicultura y el pastoreo. Sin embargo, en muchas regiones, la falta de información detallada sobre estos parámetros limita una gestión eficiente del recurso edáfico.

En el fundo Liviac, caserío Río Negro, distrito de Luyando, no se cuenta con información precisa sobre la distribución espacial de los parámetros físicoquímicos del suelo en relación con los sistemas de uso y las unidades fisiográficas. Esta carencia dificulta la toma de decisiones para un manejo adecuado y sostenible. Ante ello, surge la pregunta: **¿Cómo se distribuyen espacialmente los parámetros físicos y químicos del suelo en los diferentes sistemas de uso y unidades fisiográficas del fundo Liviac?**

La justificación de esta investigación generará información detallada sobre la variabilidad espacial del suelo es clave para mejorar su manejo y prevenir la degradación. Los resultados de este estudio permitirán identificar áreas críticas, optimizar la fertilidad del suelo y contribuir a la sostenibilidad del ecosistema.

El alcance de este estudio analiza y mapea la distribución espacial de los parámetros físicoquímicos del suelo en tres sistemas de uso dentro de las unidades fisiográficas del fundo Liviac, empleando herramientas SIG para generar representaciones detalladas de su variabilidad.

De este modo, el estudio no solo busca contribuir al conocimiento científico sobre los suelos del Fundo Liviac, sino también servir como base para futuras investigaciones y acciones concretas que promuevan la sostenibilidad ambiental y productiva en la región.

1.1. Hipótesis

“La distribución espacial de los parámetros físicos y químicos del suelo varía significativamente entre los sistemas de uso y unidades fisiográficas, influyendo en su calidad, aptitud productiva y susceptibilidad a la degradación”.

1.2. Objetivo general

Evaluar la distribución espacial de los parámetros físicos y químicos del suelo en tres sistemas de uso por unidades fisiográficas en el fundo Liviac, caserío río Negro, distrito Luyando.

1.3. Objetivos específicos

- Caracterizar los parámetros físicos (textura, densidad aparente y resistencia a la penetración) y químicos (pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, y conductividad eléctrica) en tres sistemas de uso del suelo por unidades fisiográficas en el fundo Liviac, caserío rio Negro, distrito Luyando.
- Representar cartográficamente la distribución espacial de los indicadores físicos y químicos de los suelos en tres sistemas de uso por unidades fisiográficas en el fundo Liviac, caserío rio Negro, distrito Luyando.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Distribución espacial

La variabilidad espacial de los parámetros físicos del suelo en campos agrícolas es inherente a su geología, aunque puede ser influenciada por la labranza y otras técnicas de empleo. Estos factores interactúan a diversas escalas espaciales y temporales, y se ven afectados localmente por erosión y deposición. (IQBAL et al, 2005).

Las variaciones del suelo se analizan mediante técnicas geoestadísticas que facilitan la elaboración de mapas para definir zonas de manejo diferenciado. “Los suelos son cuerpos variables, incluso en distancias cortas, y esta variabilidad resulta de las interacciones entre los factores y procesos que los forman” (Andriotti, 2010). Un mapa no representa la realidad del terreno, sino que es una representación estructurada del conocimiento sobre la distribución de suelos en un paisaje. Su precisión depende de la densidad de observaciones y de la escala utilizada. La representación cartográfica de los suelos brinda una visualización de sus propiedades intrínsecas y define su ámbito de distribución (Sandoval y Mata, 2015).

Evaluar la variabilidad espacial de los parámetros fisicoquímicos de la tierra bajo diferentes sistemas de manejo es esencial para optimizar la productividad agrícola. Un estudio en Colombia evidenció que las prácticas de manejo impactan significativamente en la distribución de estas propiedades, afectando la fertilidad y sostenibilidad del suelo (Arciniegas y Gómez, 2018).

Dividir un paisaje en áreas supuestamente homogéneas es un ejercicio de modelización que refleja la distribución de los suelos. La cartografía de esta información representa un notable esfuerzo de síntesis y concreción. Un mapa de suelos debe armonizar la escala de trabajo, la cantidad y calidad de la información representada, y la capacidad de interpretación de los usuarios (Ligier, 2014).

IICA (2016) señala que la elaboración de un mapa digital de suelos varía entre países, principalmente por las diferencias en recursos económicos, tecnología y capital humano especializado. El proceso general para crear un mapa digital de suelos en formato vectorial o raster, o para mejorar mapas existentes, se divide en tres fases:

Fase de diagnóstico: Se evalúan las capacidades institucionales del país para elaborar mapas de suelos, recopilando información generada por actores públicos y privados, y realizando un estudio sobre las oportunidades para el desarrollo de estas herramientas tecnológicas.

Fase operativa, que se subdivide en: **Fase operativa inicial**: Inicia con la recopilación de datos bibliográficos y el diseño del metadato y la estructura de la base de datos. **Fase operativa avanzada**: Implica la revisión, introducción y armonización de datos, así como la cartografía de suelos o la actualización de un mapa existente.

Fase de validación: Consiste en verificar la información del mapa digital de suelos contrastándola con la realidad en campo.

Ligier (2014) define la cartografía de suelos como una representación precisa de la distribución geográfica de los suelos en una región, reflejando sus características y su relación con la geomorfología, geología, uso actual y potencial. Los mapas de suelos son "cartas sintéticas" que integran datos que fortalecen diagnósticos sobre el medio ambiente, delimitando unidades cartográficas en un área geográfica específica que contienen diferentes tipos de suelos, tanto a nivel taxonómico como utilitario.

El análisis espacial resuelve problemas complejos relacionados con la ubicación, identifica patrones, evalúa tendencias y facilita la toma de decisiones. Además de la representación cartográfica, permite evaluar los parámetros de los lugares y las relaciones entre ellos, aportando nuevas perspectivas en la toma de decisiones (ArcGIS, 2020).

2.1.2. Mapeo digital del suelo

Un mapa es una representación estructurada del conocimiento sobre la distribución de suelos en el paisaje, no la realidad misma. Su precisión depende de la densidad de observaciones y de la escala utilizada. La representación cartográfica de los suelos ofrece una visualización de sus propiedades intrínsecas y delimita su ámbito de distribución (Sandoval y Mata, 2016).

Dividir un paisaje en áreas homogéneas es un ejercicio de modelización que refleja esta distribución. Crear un mapa de suelos implica un notable esfuerzo de síntesis que debe equilibrar la escala de trabajo, la cantidad de información, la calidad de las unidades definidas y la capacidad de interpretación del usuario (Ligier, 2014).

El mapeo digital de suelos (MDS) permite determinar y cuantificar la distribución espacial de los atributos y tipos de suelos mediante sistemas empíricos que relacionan observaciones de suelo con variables representativas del paisaje (Lagacherie 2008, Grimm y Behrens 2010, Malone et al. 2017).

Las ventajas del MDS incluyen la generación de productos a menor costo y tiempo, la inferencia estadística a partir de muestras y características ambientales, la creación de representaciones gráficas bajo un modelo de variación espacial continua, y su utilidad en

áreas con acceso e información limitados. En contextos parecidos, los modelos lineales suelen desempeñarse mejor en la modelización, presentando menor incertidumbre que técnicas no paramétricas como Random Forest, las cuales son más difíciles de interpretar. (Richardson et al. 2017, Búcaro 2017).

2.1.3. Métodos de interpolación y extrapolación

El análisis espacial permite combinar información de diversas fuentes y generar nuevos conocimientos mediante operadores espaciales. Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es fundamental para este análisis, ya que ofrece herramientas para calcular estadísticas de entidades y realizar geoprocésamiento, como la interpolación de datos (ArcGIS, 2020).

2.1.3.1. Kriging

Según Webster y Oliver (2007), Kriging permite realizar interpolaciones óptimas y no sesgadas de variables regionalizadas en ubicaciones no muestreadas, utilizando los parámetros estructurales de un semivariograma y un conjunto de datos iniciales. Su principal ventaja es que cada valor interpolado calcula un error asociado, lo que proporciona una medida de precisión que también se puede mapear, destacando las zonas de mayor y menor fiabilidad en las estimaciones.

El método Kriging se fundamenta en lo siguiente:

$$Z(x) = m(x) + E'(x) + E''$$

Donde $Z(x)$ representa la variación espacial, $m(x)$ es el componente estructural, $E'(x)$ es la variable regionalizada y E'' es el error no correlacionado espacialmente

Se utiliza el método de geoestadística para cuantificar los datos y su autocorrección mediante variogramas para realizar predicciones (Villatoro et al., 2008). Es fundamental que las predicciones de Kriging tengan varianzas positivas, lo que requiere un ajuste del modelo al semivariograma empírico. Existen varios modelos a los que se puede ajustar un semivariograma, como el circular, esférico, exponencial y gaussiano, entre otros (ArcMap, 2016).

Este método es extremadamente flexible, permitiendo su uso con casi cualquier tipo de datos. En general, se considera que Kriging es uno de los mejores métodos de interpolación debido a que proporciona estimaciones insesgadas y de mínima varianza (Fallas, 2003). Aunque Kriging es más adecuado para estudios edáficos, cada región presenta particularidades que requieren pruebas de diferentes métodos de interpolación disponibles en sistemas de información geográfica. (Villatoro et al., 2008).

2.1.3.2. Curvatura mínima (Spline)

La herramienta Spline interpola valores minimizando la curvatura de la superficie mediante una función matemática, generando una superficie suave que atraviesa los puntos de entrada. Conceptualmente, ajusta una lámina de goma a los puntos de muestra extruidos por su magnitud, minimizando la curvatura total al ajustar una función matemática a los puntos de entrada cercanos. (Franke, 1982).

Los Splines son un método de interpolación que busca una superficie suave que pase por los puntos deseados mediante polinomios conectados en subintervalos, cumpliendo condiciones de continuidad (Chica, 2018).

La interpolación Spline impone dos condiciones: la superficie debe pasar por los datos y tener una curvatura mínima. La suma de los cuadrados de los términos de la segunda derivada sobre cada punto debe ser mínima. Esta técnica, conocida como interpolación por lámina delgada, asegura una superficie continua y diferenciable, aunque puede presentar cambios abruptos en la pendiente cerca de los datos, lo cual la hace inadecuada para estimar la segunda. (curvatura) (Mitas y Mitsova, 1988).

2.1.3.3. Interpolación ponderada por el inverso a la distancia (IDW)

La interpolación por distancia inversa ponderada estima los valores de celda mediante una combinación lineal ponderada de puntos de muestra, donde la ponderación es inversamente proporcional a la distancia. Este método asume que la influencia de una variable disminuye con la distancia desde el punto de muestreo, siendo adecuado para variables dependientes de la ubicación. (Philip y Watson, 1982).

La distancia inversa ponderada (IDW) es una técnica de interpolación determinista que utiliza datos muestreados, valorándolos según su proximidad al punto de interés. Este método asigna pesos a los puntos en función del inverso del cuadrado de la distancia, de modo que la influencia de un punto disminuye con la distancia (ArcGIS, 2020). La potencia aplicada permite ajustar el peso de los puntos cercanos en relación con el punto de referencia: a mayor potencia, mayor influencia de los puntos cercanos en los valores interpolados.

El modelo de interpolación IDW estima los valores de un parámetro según su ubicación, asignando pesos a los datos circundantes en inversa proporción a la distancia que los separa del punto considerado. Así, los puntos más cercanos al centroide “z” tienen mayor influencia en el valor final de la propiedad. Además, si las distancias se ajustan con un exponente de ponderación, un valor mayor de este exponente incrementa la contribución de los puntos cercanos. (Guerrero, 2015).

2.1.3.4. Red irregular de triangulación (TIN)

Fallas (2003) describe un modelo TIN como un conjunto de triángulos adyacentes no superpuestos, creado a partir de puntos con espaciamiento irregular. Este modelo conserva datos topológicos sobre las relaciones entre los triángulos y sus vecinos, siendo útil para representar irregularidades del terreno y calcular métricas como pendiente, aspecto y sombreado.

Una superficie es una distribución continua de un atributo en una región bidimensional, generalmente utilizada para representar la forma del terreno, aunque también puede reflejar otros fenómenos espaciales como densidad de población, datos de lluvia y gradientes de presión atmosférica. (Felicísimo, 1992)

2.1.3.5. Método modificado de shepard

El método modificado de Shepard se basa en el IDW, variando solo en la distribución de pesos de los datos vecinos. Utiliza una función que considera no solo la distancia entre el punto a interpolar y los datos cercanos, sino también la distancia respecto a datos más lejanos. (Esri, 2006).

2.1.4. Sistemas de uso del suelo

Los sistemas de uso del suelo son las diversas maneras en que se gestionan y aprovechan las tierras para actividades como la agricultura, la ganadería, la silvicultura y otros usos humanos. La comprensión y evaluación de estos sistemas son fundamentales para promover prácticas sostenibles que optimicen la productividad y preserven la salud del suelo. (USDA, 1999)

La selección adecuada de cultivos según los parámetros de la tierra y el estado climático es esencial para maximizar la productividad y sostenibilidad. Una revisión sistemática de la literatura identifica diversos sistemas que ayudan en la selección óptima de cultivos, considerando factores como la adaptabilidad, rotación y demanda del mercado.

En resumen, se destaca la importancia de adoptar sistemas de uso del suelo que integren prácticas sostenibles, promuevan la salud de la tierra y optimicen la productividad agrícola. La implementación de enfoques integrados y la evaluación continua de la calidad del suelo son esenciales logrando una gestión eficiente y sostenible de los recursos edáficos.

2.1.5. Suelo

Es un sistema dinámico y complejo donde suceden fenómenos fisicoquímicos y biológicos de variada intensidad, que se extiende sobre la superficie terrestre

(Ministerio de Agricultura [MINAG], 2011).

Junto con el agua, el suelo es esencial para el desarrollo y sustento de la vida en la Tierra, siendo el componente principal de los ecosistemas, que sostiene una amplia gama de seres vivos y regula el agua (López et al., 2014).

Su límite superior es el aire o las aguas someras, mientras que su margen inferior, en contacto con el no suelo, es más difícil de definir (USDA, 2014).

El suelo es crucial para la vida en el planeta y constituye la base para la explotación agrícola y forestal. Como sistema natural y social, cumple funciones biológicas, alimentarias, depuradoras y de soporte mecánico, además de albergar una rica diversidad de especies microbianas, animales y vegetales que son esenciales para su formación, funcionamiento y fertilidad. Sin embargo, los diferentes usos del suelo generan diversos grados de perturbación. (Navarro et al., 2018; Rosa et al., 2017; Azañero, et al., 2020).

2.1.6. Estudio del suelo

En el país, hay una fuerte tendencia a ocupar la región amazónica para cultivos y pastos, debido a la creciente presión poblacional sobre las tierras cultivables en las zonas altas y costeras. La ocupación de la Amazonía ha sido, en muchos casos, espontánea y desordenada, lo que ha generado desmontes y quemas innecesarias, erosión del suelo, contaminación del agua, arrastre de sedimentos, colmatación de ríos y pérdida de recursos genéticos (Sancho et al, 1993).

Por ello, emplear datos de los recursos naturales es complejo y requiere la sistematización informática de la cartografía, con el fin de optimizar la toma de decisiones en los sectores agropecuario y forestal, y conservar los recursos para futuras generaciones. Esto implica la recopilación de información sobre los suelos con dos objetivos principales: mostrar su distribución espacial en un mapa y proporcionar datos sobre los suelos en la zona mapeada, facilitando la planificación del empleo del suelo. (Diaz et al, 1996).

2.1.7. Levantamiento de suelos

Implica el análisis, clasificación y mapeo de los suelos en un área para su aprovechamiento económico, incluyendo el análisis morfológico, la delimitación de sus límites en un mapa y la interpretación de las unidades analizadas.

2.1.8. Modelo de mapa

Para crear un modelo, se puede seguir un conjunto de pasos conceptuales. Comience resolviendo un problema de muestra para familiarizarse con la secuencia de pasos. Como urbanista, tiene la tarea de encontrar ubicaciones adecuadas para un nuevo colegio. Puede

utilizar herramientas de la extensión ArcGIS Spatial Analyst para identificar emplazamientos potenciales. Primero, defina el problema y el objetivo que desea alcanzar. Elabore un concepto del resultado previsto para visualizar el mapa que desea producir. (Comas y Ruiz, 1993).

2.1.9. Propiedades físicas del suelo

Singer & Ewing (2000), los parámetros físicos del suelo son elementos esenciales que se consideran en la evaluación del suelo, ya que son difíciles de mejorar de manera rápida o sencilla ya que influyen en la capacidad del suelo para retener y transportar agua, permitir la penetración de las raíces de las plantas.

2.1.9.1. Parámetros físicos

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO, 2002) indica que la textura de la tierra como la proporción de partículas de distintos tamaños, como arena, limo y arcilla. Esta textura influye en la facilidad de trabajo del suelo y en la disponibilidad de nutrientes, agua y aire, elementos esenciales para el crecimiento de las plantas.

Tabla 1. Propiedades físicas de los indicadores de la calidad del suelo.

Propiedad	Relación con la condición y función del suelo
Textura	Retención y transporte de agua y compuestos químicos; erosión del suelo
Profundidad del suelo, suelo superficial y raíces	Estima la productividad potencial y la erosión
Infiltración y densidad Aparente	Potencial de lavado; productividad y erosividad
Capacidad de retención de agua	Relación con la retención de agua, transporte y erosividad; humedad aprovechable, textura y materia orgánica

Fuente: Doran y Parkin, 1994, citado por SAGARPA (2012).

Textura. - Según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2017), la textura del suelo se define por la proporción de partículas de arena, arcilla y limo (diámetro < 2 mm). En edafología, se distinguen partículas gruesas (> 2 mm) y finas (< 2 mm), siendo estas últimas las que definen la textura del suelo.

La FAO (2019) también definen la textura de la tierra como la proporción de partículas de diferentes tamaños, destacando que esta propiedad afecta la facilidad del empleo, la retención de agua y aire, y la velocidad de infiltración del agua.

La textura de la tierra se expresa como el porcentaje de arena, limo y arcilla (excluyendo piedra y grava) y puede estimarse en campo (textura al tacto) o determinarse mediante el triángulo textural en estudios y clasificaciones de suelos (Hang 2014).

El porcentaje de arena, limo y arcilla es constante y afecta el valor económico de un área. Los suelos con más proporción de arcilla son más adecuados para la agricultura debido a sus propiedades químicas y físicas, ya que la distribución de tamaño de los poros impacta en la compactación y la disponibilidad de agua (Klein 2008).

Los tres tipos de partículas del suelo varían en tamaño, influyendo en su capacidad de retención de nutrientes; la arcilla retiene más nutrientes que la arena y, por lo tanto, puede liberar más nutrientes para los cultivos. (FAO 2015).

Densidad aparente y porosidad total. - La DA es la relación entre la masa del suelo seco y su volumen total, que abarca tanto las partículas como los espacios porosos. La porosidad indica el porcentaje de espacios vacíos en el suelo e incluye la macroporosidad (poros grandes que contienen aire) y la microporosidad (poros pequeños que retienen agua) (Porta et al., 2003).

Los valores de DA varían según la textura, el contenido de MO y el empleo del suelo, dificultando su comparación entre diferentes tipos (Taboada y Álvarez, 2008).

Una alta densidad aparente sugiere compactación o un alto contenido de partículas granulares, como arena, mientras que una baja densidad no siempre indica condiciones óptimas para el crecimiento vegetal (FAO, 2017).

Reinert *et al.* (2001) identificaron valores críticos de densidad de suelo de aproximadamente 1,45 g/m³ para suelos con más del 55% de arcilla, 1,55 g/m³ para suelos de textura media (20-55% de arcilla) y entre 1,65 y 1,55 g/m³ para suelos arenosos (menos del 20% de arcilla). Las densidades aparentes de la tierra suelen fluctuar entre 1,0 y 1,7 g/m³, aumentando generalmente con la profundidad del perfil. (USDA, 2017).

Tabla 2. Relación entre densidad aparente y crecimiento radicular, en base a la textura del suelo.

Textura del suelo	Densidades aparentes ideales (g.cm ⁻³)	Densidades aparentes que pueden afectar el Crecimiento radicular (g.cm ⁻³)	Densidades aparentes que restringen el crecimiento radicular (g.cm ⁻³)
Areno, areno-franco	< 1,60	1,69	>1,80
Franco-arenosa, franco	< 1,40	1,63	>1,80
Franco-arcilla-arenosa, franco, franco-arcillosa	< 1,40	1,60	> 1,75
Limosa, franco-limosa	< 1,30	1,60	> 1,75
Franco-limosa, franco arcillo - Limosa	< 1,40	1,55	> 1,65
Arcillo-arenosa, arcillo-limosa, franco arcillosas (35- 45% de arcilla)	< 1,10	1,39	> 1,58
Arcillosa (>45% de arcilla)	< 1,10	1,39	1,39 > 1,47

Fuente: SAGARPA (2017).

La densidad real del suelo, tan primordial como la DA, se define midiendo el peso seco de la muestra y el volumen de los sólidos con un picnómetro, utilizando el principio de Arquímedes para medir el volumen de agua desplazado (Rucks et al. 2004). Según la FAO (2017), la densidad real de suelos sin proporciones anormales de minerales pesados es aproximadamente 2,65 g/cm³, siempre que el contenido de MO no supere el 1%.

La resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) es un parámetro físico influyente en la evaluación y la producción del maíz, pues afecta la capacidad del sistema radicular para penetrar. Además, este parámetro está vinculado a la velocidad de emergencia de las semillas. Rucks et al. (2004) indican que la resistencia del suelo a la penetración es un indicador integral de la compactación, contenido de humedad, textura y tipo de arcilla. Para medirla se utiliza un penetrógrafo, que evalúa la fuerza necesaria para perforar el suelo con una sonda.

La resistencia a la penetración indica el grado de compactación del suelo, lo que limita el crecimiento radicular y la disponibilidad de aire y agua para las raíces (Lampurlanés & Cantero-Martínez, 2003). Para medirla, se calcula la resistencia del suelo al

movimiento de un penetrómetro y se divide por la profundidad de penetración (Herrick & Jones, 2002).

Según Souza et al. (2001), la RMPS se determina por la relación entre la fuerza requerida para penetrar la tierra y la presión ejercida por el cono del penetrómetro, cuyo área basal es constante.

La RMPS es una de las parámetros físicos más utilizadas para evaluar la compactación del suelo, aunque debe complementarse con las variables de humedad y densidad para una interpretación más certera (Freddi et al., 2006).

Imhoff et al. (2001) señalaron en su estudio sobre la calidad física de la tierra bajo pastoreo que la RMPS cambia con la humedad y densidad del suelo, encontrando una correlación negativa con la humedad y positiva con la densidad.

Tabla 3. Valores de la resistencia mecánica a la penetración del suelo.

kg/cm²	Nivel de resistencia
< 1	Suelos muy suaves
1 - 2	Suelos suaves
2 - 3	Suelos duros
3 - 4	Suelos muy duros
> 4	Suelos extremadamente duros

Fuente: Bazán (2017)

2.1.9.2. Parámetros químicos

Los parámetros químicos de calidad del suelo abarcan parámetros influyendo en las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad de amortiguación y la disponibilidad de agua y nutrientes para cultivos y microorganismos (Acevedo et al., 2005). Según Chen (2000), los indicadores clave incluyen el contenido de MO, C y nitrógeno orgánico, pH, CE, así como N, P y K disponibles. Los indicadores de fertilidad, como pH, MO, N, P y K, son esenciales para la producción de cultivos. Martínez (2003) destaca que la MO del suelo es el indicador más relevante de calidad, fundamental para conservar la estructura de la tierra, retener agua y actuar como reserva nutritiva.

Los indicadores químicos más comunes son la disponibilidad de nutrientes, pH, CE, C orgánico total y lábil, MO, CIC, N total y mineralizado, capacidad de adsorción de fosfatos y disponibilidad de micronutrientes. (Bautista et al., 2004; Bautista & Etchevers, 2014).

Tabla 4. Propiedades químicas indicadoras de la calidad del suelo.

Propiedad	Relación con la condición y función del suelo
Materia orgánica (N y C Total)	Define la fertilidad del suelo; estabilidad; erosión
Ph	Define la actividad química y biológica
Conductividad eléctrica	Define la actividad vegetal y microbiana
P, N, y K extractables	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida potencial de N; productividad e indicadores de la calidad ambiental

Fuente: Doran y Parkin, 1994, citado por SAGARPA (2012).

pH del suelo. - El pH del suelo daña indirectamente procesos químicos, la disponibilidad de nutrientes, la actividad biológica y microbiana. Normalmente, el pH del suelo varía de 3.5 a 9, sin alcanzar los extremos de 0 o 14, ya que la solución del suelo es coloidal.

La disponibilidad de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) y molibdeno aumenta a pH alcalino, mientras que la de micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu y B) lo hace a pH ácido (Rodríguez, 2011).

El pH del suelo, que indica acidez, neutralidad o alcalinidad, se mide como el logaritmo negativo de la concentración de H⁺ en moles por litro, variando de 0 a 14: es ácido si predominan los cationes H⁺ sobre los aniones OH⁻, básico en el caso contrario, y neutro cuando están en equilibrio (Martínez, 2003). Según Sánchez (2007), el pH óptimo para la evolución de las plantas es de 6.5 a 7.5; fuera de este rango, pueden surgir problemas de toxicidad.

Tabla 5. Niveles de pH en el suelo

Interpretación	Rango
Extremadamente ácido	< 4.5
Fuertemente ácido	4.6 - 5.4
Moderadamente ácido	5.5 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Moderadamente alcalino	7.4 - 8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

Fuente: Laboratorio de análisis de suelos de la UNAS

Conductividad eléctrica. - La conductividad eléctrica (CE) de una suspensión de suelo y agua indica la cantidad de sales presentes en el suelo. Aunque todos los suelos cuentan con sales necesarias para el desarrollo de cultivos, un exceso de estas puede

inhibirlo al dañar el equilibrio suelo-agua. La CE define la actividad vegetal y microbiana, estima la salinización del suelo y el grado de erosión (Barrezueta et al., 2017). Los cationes asociados con la salinidad incluyen Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} y H^{+} , mientras que los aniones son NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- y OH^- . (Porta *et al*, 2003).

La propiedad de la CE mide exclusivamente la concentración total de sales en la solución del suelo, sin especificar los tipos de sales presentes (SAGARPA, 2012).

Tabla 6. Rangos interpretativos para la conductividad eléctrica

CE (dS/m^{-1}) a 25°C	Efectos sobre el suelo
CE < 1,0	Efectos despreciables de la salinidad
$1,0 \leq \text{CE} < 2,0$	Suelo muy ligeramente salino
$2,0 \leq \text{CE} < 4,0$	Suelo moderadamente salino
$4,0 \leq \text{CE} < 8,0$	Suelo salino
$8,0 \leq \text{CE} < 16$	Suelo fuertemente salino
CE ≥ 16	Suelo muy fuertemente salino

Fuente: SAGARPA, 2012.

Materia orgánica. – Está compuesta por compuestos biológicos en el suelo, es crucial para sus y parámetros fisicoquímicos y biológicos. Aumenta la CIC, nivela el pH, retiene la humedad y mejora la estabilidad del suelo al aglutinar partículas en agregados. (Leytón, 2003).

La MO es crucial para la fertilización del suelo, y se considera que un suelo tiene buena calidad cuando los niveles de materia orgánica están dentro de los rangos óptimos (SAGARPA, 2012).

Tabla 7. Rangos interpretativos para el contenido de materia orgánica

Interpretación de materia orgánica	Rangos (%)
Bajo	< 2
Medio	2 - 4
Alto	> 4

Fuente: Laboratorio de suelos UNAS.

Capacidad de intercambio catiónico. - La CIC es la suma total de cationes intercambiables que un suelo puede adsorber, medida en centimoles de carga positiva por kilogramo de suelo (cmol (+).kg^{-1}). Según Alemán-Montes et al. (2019), una mayor CIC indica una mayor fertilidad del suelo debido a su capacidad de almacenar más iones nutritivos. La FAO (2015) subraya la importancia agronómica de determinar la CIC, asumiendo que el suelo actúa como reserva y fuente de nutrientes, cuyo potencial se incrementa con una mayor

CIC.

La capacidad de retener y liberar cationes, conocida como CIC, es fundamental para la fertilidad del suelo. Los suelos con alta CIC y una proporción elevada de MO son más fértiles, ya que retienen más nutrientes (SAGARPA, 2012). Según la FAO (2022), la CIC es una de las propiedades químicas que más influyen en la fertilidad del suelo.

Tabla 8. Rangos interpretativos para la CIC

Clase	CIC (Cmol ⁽⁺⁾ /kg ⁻¹)
Muy alta	CIC ≥ 40
Alta	25 ≤ CIC < 40
Media	15 ≤ CIC < 25
Baja	5 ≤ CIC < 15
Muy baja	CIC < 5

Fuente: SAGARPA, 2012.

2.1.9.3. Nutrientes

Los nutrientes son sustancias esenciales para el metabolismo, evolución y crecimiento de los cultivos. La proporción de nutrientes en la tierra define su capacidad para sustentar organismos vivos. Los dieciséis nutrientes esenciales se dividen en macronutrientes y micronutrientes según sus requerimientos. Benton (2012) destaca los macronutrientes más relevantes para evaluar la fertilidad del suelo: N, P, K, Ca, Mg y S. En suelos con deficiencia de micronutrientes o sin registros de caracterización, es fundamental considerar estos elementos, como Fe, Zn, Mn, B, Cu, Mo y Cl, ya que su insuficiencia puede causar carencias y su exceso, toxicidad.

El fósforo (P) en el suelo, a diferencia del N y el S, es poco móvil en el suelo y es uno de los 17 nutrientes esenciales. Su adecuado suministro es crucial para la evolución y reproducción óptimos de las plantas. La concentración de P total en el suelo varía entre 0.2 y 1.5 g/kg. (Munera & Meza, 2012).

La cantidad de P disponible para las plantas es limitada, ya que solo entre 0.1 y 0.3 ppm se encuentra en solución.

Su disponibilidad depende del pH del suelo, la presencia de Fe, Al y Mn solubles, minerales de Ca y Mg, la proporción y desgaste de MO, y la actividad microbiana. En suelos ácidos, el P se fija a compuestos de Al, Fe y Mn, mientras que en suelos alcalinos se une al calcio, dañando así su biodisponibilidad. (Azabache, 2003).

En general, el fósforo es escaso en el suelo y gran parte no es

utilizable por las plantas, dependiendo su disponibilidad del tipo de suelo y su grado de solubilidad. (SAGARPA, 2012).

Tabla 9. Rangos interpretativos para el fósforo disponible

Interpretación de fosforo disponible	Rangos (ppm)
Bajo	< 7,0
Medio	7,0 – 14,0
Alto	> 14,0

Fuente: Laboratorio de suelos UNAS.

Potasio en el suelo. – La proporción promedio de K en la tierra es de aproximadamente 19 g/kg, con fuentes principales que incluyen la meteorización de minerales, el material parental, la pedogénesis, los minerales arcillosos (su fuente principal), la mineralización de residuos orgánicos y el uso de fertilizantes (Alvarado & Raigosa, 2007).

El K en la tierra se encuentra como ión K⁺ en solución, K⁺ adsorbido (intercambiable), K fijado (no intercambiable) y K estructural (no intercambiable) (Conti, 2004).

Junto al N y el P, el K es uno de los nutrientes minerales más esenciales para los cultivos y se absorbe como catión K⁺ desde la solución del suelo. La cantidad de K en solución depende de la liberación del K intercambiable, comúnmente presente en las arcillas. (SAGARPA, 2012).

Tabla 10. Rangos interpretativos para potasio

Interpretación de potasio disponible	Rango (kg K ₂ O/ha)	Rango (ppm)
Bajo	< 300	< 100
Medio	300 - 600	100 - 240
Alto	> 600	> 240

Fuente: Laboratorio de suelos UNAS.

Nitrógeno en el suelo. - La mayor parte del nitrógeno en los suelos minerales forma parte de la MO depositada tras la muerte de microorganismos y plantas, lo que lo hace no utilizable para las plantas. Su proporción en la tierra varía más que otros compuestos esenciales para el crecimiento vegetal. Las formas minerales de nitrógeno, como el amoniacal (NH₃) y el nítrico (NO₃⁻), provienen generalmente de la desgaste de residuos orgánicos, materiales frescos, abonos y humus, impulsadas por la acción de macro y microorganismos en el suelo. La definición del nitrógeno total se realiza por el método Kjeldhal clásico o su versión modificada. (Calderón, 1999)

Esencial para los cultivos y parte de las proteínas, ya que las raíces absorben el N en forma de nitrato (NO₃⁻) y amonio (NH₄⁺) (SAGARPA, 2012).

Tabla 11. Rangos interpretativos para el nitrógeno total

Interpretación de nitrógeno total	Rangos (%)
Bajo	< 0.1
Medio	0.1 - 0.2
Alto	> 0.2

Fuente: Laboratorio de suelos UNAS.

Calcio en el suelo. - El calcio intercambiable, según SAGARPA (2017), está vinculado a la desgaste de la tierra y es relativamente abundante en suelos semiáridos. Sin embargo, su presencia suele ser en formas químicas poco solubles, lo que restringe su disponibilidad en la solución del suelo. Aunque es el catión más cuantioso en el complejo de intercambio del suelo, su cantidad utilizable depende del grado de saturación.

Se sabe que el Ca²⁺ normalmente controla la permeabilidad a través de enlaces fosfolípidos, y las bajas concentraciones causan grandes aumentos en la permeabilidad y hacen que las raíces y las hojas sean más susceptibles a la exudación de compuestos orgánicos donde hay patógenos presentes. (INTAGRI, 2015b).

Tabla 12. Rangos interpretativos para calcio (Ca²⁺) intercambiable.

Clase	Ca (Cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)
Muy bajo	Ca < 2
Bajo	2 ≤ Ca < 5
Medio	5 ≤ Ca < 10
Alta	Ca ≥ 10

Fuente: SAGARPA (2017)

Magnesio en el suelo. – El magnesio es un nutriente esencial para los cultivos, interviniendo en la síntesis de xantofilas y carotenos, activando diversas enzimas relacionadas con el metabolismo de carbohidratos y proteínas, manteniendo la turgencia celular y participando en su formación (Cakmak & Yazici, 2010).

La deficiencia de magnesio se manifiesta en clorosis intervenal y manchas rojas en las hojas más viejas, y su aparición varía según la intensidad lumínica, ya que se considera que las plantas requieren más magnesio bajo altas luces (INTAGRI, 2015c).

El Mg, que representa el 2% de la tierra, se encuentra en minerales arcillosos y está asociado al intercambio de cationes en las arcillas (Mikkelsen, 2010).

Este elemento es especialmente relevante ya que forma parte de la clorofila, lo que lo vincula a la fotosíntesis y al color verde de las plantas. Las deficiencias de Mg son comunes en suelos arenosos con baja CIC, lo que limita la producción de cultivos (Cakmak & Yazici, 2010; SAGARPA, 2017).

Ross (2006) señala que las fracciones principales de Mg en los suelos son: Mg no intercambiable (fijado en minerales y rocas), Mg intercambiable (absorbido por superficies cargadas negativamente de minerales de arcilla y MO) y Mg en la solución del suelo.

Tabla 13. Rangos interpretativos para magnesio (Mg^{2+}) intercambiable.

Clase	Mg ($Cmol^{(+)} \cdot kg^{-1}$) Muy baja
Muy bajo	$Mg < 0.5$
Bajo	$0.5 \leq Mg < 1.3$
Medio	$1.3 \leq Mg < 3.0$
Alta	$Mg \geq 3.0$

Fuente: SAGARPA (2017)

Potasio intercambiable. - El potasio presente en el suelo representa solo una fracción del total de potasio existente (Fassbender y Bornemisza, 1987). A pesar de que el potasio se encuentra en cantidades significativas en la tierra, su concentración, expresada como K_2O , varía según la textura del suelo. Los suelos con mayor proporción de arcilla, como los arcillosos y limosos-arcillosos, tienden a tener una mayor concentración de potasio en comparación con los suelos limoso-arenosos y arenosos. (Brady y Weil, 2002).

Tabla 14. Rangos interpretativos para potasio (K^{+}) intercambiable

Clase	K ($Cmol^{(+)} \cdot kg^{-1}$)
Muy bajo	$K < 0,2$
Bajo	$0,2 \leq K < 0,3$
Medio	$0,3 \leq K < 0,6$
Alto	$K \geq 0,6$

Fuente: SAGARPA (2012).

Sodio intercambiable. - El Na, aunque no se considera un nutriente esencial, sustituye al potasio en ciertas situaciones. Muchos cultivos tienen mecanismos que limitan la absorción y el transporte de Na hacia las hojas, lo que evita síntomas de toxicidad, que se manifiestan en tallos, troncos y raíces. En las hojas, la toxicidad del sodio se presenta como manchas necróticas intervenales. Además, un exceso de Na causaría

deficiencias de otros cationes como K, Ca y Mg, (Sagarpa 2012).

Tabla 15. Rangos interpretativos para sodio intercambiable

Clase	Na (Cmol (+)/kg)
Muy Baja	$0,0 \leq \text{Na} < 0,3$
Baja	$0,3 \leq \text{Na} < 0,6$
Normal	$0,6 \leq \text{Na} < 1$
Alto	$1 \leq \text{Na} < 1,5$
Muy Alto	$\text{Na} \geq 1,5$

Microelementos. - La disponibilidad de micronutrientes para los cultivos depende primordialmente del pH de la tierra y de la presencia de MO. La MO, gracias a sus propiedades complejantes, forma compuestos estables con iones metálicos llamados quelatos. En estos complejos organometálicos, el metal se encuentra rodeado por una molécula orgánica que lo protege y facilita su absorción por las plantas. Un ejemplo importante de estos quelatos son los ácidos húmicos, compuestos orgánicos complejos que se originan como resultado de la actividad microbiana en el suelo. (Sposito, 2008).

2.2. Estado del arte

En su estudio, Vargas et al. (2015) estudiaron la variabilidad espacial de algunos parámetros físicos del suelo asociadas con cultivos de caña de azúcar, pasto y moringa en los "Utroleptos fluventicos" de la cuenca baja del río Las Ceibas. En un área de 6,5 hectáreas, el muestreo se realizó en 26 puntos utilizando una cuadrícula de 50 m x 50 m para análisis físico, 8 pruebas de penetración de muestreo aleatorio simple y 3 muestras compuestas para estudio químico. El estudio constó de 5 etapas: 1) Toma de muestras y estudios de los parámetros fisicoquímicos del suelo, 2) Análisis estadístico y descriptivo de variables utilizando el software Statgraphic Centurión XVIII y Excel 2010, 3) Análisis geoestadístico mediante interpolación kriging utilizando el software GS+10, 4) Análisis multivariado de compuestos principales utilizando InfoStat para generar gráficos bidimensionales (biplots), 5) Elaboración de mapas de variación espacial mediante el software ArcGis 10, vía Surfer 10 Software analiza las propiedades físicas del suelo para implementar planes de cultivos y mapas de uso del suelo. La infiltración del suelo fue extremadamente heterogénea con un coeficiente de variación del 74,5% y una dependencia moderada en un rango de 610,9 m. Se han delimitado tres sectores para los cultivos antes mencionados en base a evaluación de suelo en función del uso potencial del suelo.

En el estudio de Soto (2016) se realizó un análisis detallado de los parámetros fisicoquímicos de la tierra en la microcuenca "Las Pavas". El estudio incluyó la caracterización de los parámetros fisicoquímicos de los suelos en 11 unidades fisiográficas georreferenciadas. Los resultados mostraron que los suelos presentan texturas francas y francas arenosas, con niveles de pH ácidos a neutros y contenidos medios a altos de materia orgánica y nutriente. La representación cartográfica de los resultados ayudó identificar áreas homogéneas de texturas de suelos, contenidos de nutrientes y niveles de pH. Además, se encontraron relaciones significativas entre las variables evaluadas, como la relación inversa entre el contenido de arcillas y arena, y la relación directa entre el nitrógeno y la materia orgánica. Los resultados de este estudio proporcionan una valiosa fuente de información para el manejo óptimo de tierras en la microcuenca.

El estudio de Arciniegas y Gómez (2018) destaca que la variación espacial de los parámetros de tierra se debe a procesos generales y específicos de formación del suelo. En una granja universitaria, se investigó la variabilidad espacial de parámetros fisicoquímicos del suelo en lotes cultivados de cítricos, guanábana y semestrales. Se realizó un muestreo sistemático en 24 puntos georreferenciados, y se aplicaron análisis geoestadísticos. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los sistemas de cultivo, y variabilidad espacial en la DA y el pH del suelo.

El estudio de Alemán-Montes et al. (2019) destaca que el mapeo digital de suelos (MDS) es una herramienta valiosa para generar información precisa y actualizada sobre la variabilidad espacial de los suelos. Aunque el MDS tiene muchas ventajas, su aplicación ha sido limitada en regiones tropicales. Para analizar el potencial del MDS, se realizó un ejercicio de mapeo de 3 atributos de fertilidad del suelo (pH, acidez y CICE) en una zona agrícola de Costa Rica. Se utilizaron 384 análisis químicos de suelos, un modelo de elevación digital, imágenes satelitales y registros climáticos para generar 24 capas de covariables espaciales. Estas capas permitieron ajustar modelos lineales para inferir la variabilidad espacial de los atributos estudiados. Finalmente, se estudió la incertidumbre asociada a las predicciones y las limitaciones metodológicas para su posible implementación en otras regiones agrícolas.

El estudio de Vásquez (2022) indica que la productividad de los cultivos está relacionada con las propiedades fisicoquímicas del suelo. Por ello, es crucial conocer su composición nutricional y distribución espacial para aplicar fertilización eficiente. Se evaluó la distribución espacial de las características fisicoquímicas de la tierra en unidades fisiográficas, siguiendo el protocolo D.S.013-2010-AG. Los puntos de muestreo fueron identificados y

evaluados en el laboratorio de suelos de la UNAS, y los datos fueron interpolados mediante IDW y Kriging en ArcGis, generando capas raster de cada variable superpuestas a las unidades fisiográficas. Los resultados mostraron que las texturas de suelo predominantes son franco-arcilloso y franco, con un 61,90% y 27,00% respectivamente. El pH muestra un predominio de niveles fuertemente ácidos (71,64%); la materia orgánica es mayoritariamente media (90,33%); el nitrógeno es moderado en el 56,53% de la superficie; el fósforo y potasio son bajos (56,53% y 61,75%); la CIC es muy baja en el 79,47%; el calcio es moderado (66,98%); el magnesio es bajo (97,36%); y el CICE es medio (85,64%). En conclusión, el suelo de la parcela se caracteriza por las clases texturales franco-arcilloso y franco.

En su estudio Santiago-Mejía et al. (2018) estudió la variabilidad espacial de parámetros fisicoquímicos de la tierra en sistemas lama-bordo en Oaxaca, México: Esta investigación evaluó la variabilidad espacial de propiedades como textura, DA, capacidad de campo, pH, MO, N, P, K y carbono orgánico en un sistema lama-bordo. Se observó que la antigüedad de las terrazas y la pendiente del terreno influyen significativamente en la distribución de estas propiedades, afectando la fertilidad y la capacidad de retención de agua del suelo.

En su estudio Medina (2022) estudió la distribución espacial del pH en suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México: Este trabajo evaluó la distribución espacial del pH en suelos agrícolas utilizando un diseño sistemático de muestreo. Se identificaron áreas con pH ácido y alcalino, lo que tiene implicaciones para la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes para los cultivos. Así mismo determinó la variabilidad significativa que afecta la fertilidad y la capacidad de retención de nutrientes del suelo. Se destacó la necesidad de considerar esta variabilidad en la planificación de prácticas agrícolas sostenibles.

En su estudio, Enciso (2019) analizó la distribución espacial de parámetros físicos del suelo y su influencia en el rendimiento de maíz bajo manejo conservacionista en Paraguay. Se evaluaron características como resistencia a la penetración, DA, porosidad, humedad, velocidad de infiltración y rendimiento de maíz en parcelas conservacionistas. Los resultados indicaron que las áreas con mayor compactación del suelo mostraron un menor rendimiento de maíz, subrayando la importancia de gestionar la compactación para mejorar la productividad.

Verástegui (2023) en su investigación realizada el objetivo fue representar cartográficamente la distribución uniforme de los indicadores fisicoquímico que intervienen en la calidad del suelo de la Isla Ventenjebe. Sus datos fueron sometidos a un análisis de variancia

de una sola vía mediante pruebas no paramétricos. Las variables en estudio fueron: los indicadores físicos, químicos y calidad de suelos mediante el subíndice de uso sustentable del suelo (SUSS) y la representación cartográfica de la distribución de la calidad del suelo. Los resultados muestran que las calicatas en la Isla Ventenjebe presentan una textura franca, franca limosa y franca arcillo limosa, mayores valores de densidad aparente en la calicata C2, mayor temperatura del suelo en la calicata C4 y mayor resistencia a la penetración del suelo en la calicata C3. Los parámetros físicos presentan MO baja, pH moderadamente alcalino, nitrógeno bajo, fósforo disponible de medio a alto, potasio bajo, CIC de muy bajo a bajo, calcio de bajo a medio y el magnesio bajo respectivamente, La calidad del suelo en la Isla Ventenjebe según la metodología SUSS la C1 corresponde a un suelo de calidad aceptable, mientras que las C2, C3 y C4 corresponden a un suelo de calidad sensible, cartográficamente la Isla Ventenjebe se encontraron dos calidades de suelo; aceptable y sensible, con mayor representación la calidad Sensible y menor representación la calidad Aceptable.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

Se desarrolló en el Fundo Liviac, caserío Río Negro, distrito de Luyando que se ubica en la margen derecha del río Tulumayo, cuya principal actividad es la agricultura entre ellos cacao, plátano, maíz, frijoles, cítricos, plantas maderables, etc.

3.1.1. Ubicación política

La zona de estudio se encuentra ubicado:

Departamento : Huánuco
Provincia : Leoncio Prado
Distrito : Luyando
Caserío : Río Negro

3.1.2. Ubicación geográfica

Está ubicada: 9°17'21.38" de Latitud Sur con respecto a la línea Ecuatorial, 75°54'51.40" de Longitud Oeste con respecto al Meridiano de Greenwich y una altitud de 701 msnm. La ubicación en coordenadas UTM se visualizan (Tabla 16).

Tabla 16. Coordenadas UTM de los tres sistemas de uso fundo Liviac.

Sistemas de uso del suelo de la zona de estudio	Coordenadas UTM		
	Este	Norte	Altitud (msnm)
Cacao-Plátano SUS ₁	399567	8973037	701
Cacao SUS ₂	399577	8972953	703
Capirona SUS ₃	399553	8973035	702
Maíz SUS ₄	399533	8973050	705

3.1.3. Clima

El caserío río Negro presenta un clima tropical, semi - cálido y templado - húmedo, con una precipitación pluvial de 3 250 mm/año y una temperatura media anual de 25.5 °C y una humedad relativa de 75%.

3.1.4. Zona de vida

La región tiene un clima diverso, que va desde climas localmente subtropicales hasta climas templados secos y fríos, con temperaturas promedio de 18 °C, máximas de 28 °C y mínimas promedio de 7 °C.

3.1.5. Suelos

Los suelos, en su mayoría de origen coluvio-aluvial, son aptos para la agricultura y otras actividades. Presentan una textura franco a franco-arcillosa, ideal para cultivar *Theobroma cacao*, *Zea mays* y *Calycophyllum spruceanum*.

3.1.6. Fisiografía

La zona área de estudio varía desde terrazas planas hasta onduladas, cubiertas de densa vegetación de bosque secundario, con estrechas y profundas quebradas, por donde discurre el río del mismo nombre. Las pendientes varían desde una ligera pendiente con valores que van desde el 8% hasta más.

3.1.7. Hidrografía

El sistema hidrográfico del distrito está configurado por el vínculo hidrográfico del Rio Tulumayo, cuyo cauce vierten sus aguas todos los ríos que discurren por dicha red hidrográfica hasta la desembocadura del rio Huallaga.

3.1.8. Accesibilidad

La zona del lugar de investigación está a una distancia de 30 km de la ciudad de Tingo María, por la vía principal por la carretera Fernando Belaunde Terry de Tingo María - Supte San Jorge – Rio Negro hasta llegar a el área de estudio, el recorrido en moto lineal es aproximadamente una hora desde Tingo María hasta el Fundo Liviac.

3.2. Materiales y Equipos

3.2.1. Materiales

Los materiales utilizados fueron: materiales de protección personal, machete, pala recta y/o cuchara, pico, envases y bolsas de polietileno para recolección de muestras de suelo, etiquetas o micas, marcador o plumón indeleble, wincha de 3.0 m y/o 5.0 m., libreta de apuntes, mapa de ubicación, cilindros, etc.

3.2.2. Equipos

Los equipos utilizados fueron: Laptop Asus Intel(R) Core(TM) i5, GPS GARMIN Gpsmap 64s, Cámara digital Sony W800 con zoom óptico de 5x e Impresora Multifuncional EPSON EcoTank L5190 USB WiFi, termómetro de suelo, cronómetro, balanza digital, estufa pH metro, espectrofotómetro de absorción atómica, conductímetro, tubo de ensayo, pipetas, etc.

3.3. Generalidades de la investigación

3.3.1. Tipo de estudio

Es observacional por la ausencia de intervención, debido a que se evaluó la distribución espacial de los parámetros físicos del suelo por unidades fisiográficas en el Fundo

Liviac.

3.3.2. Nivel de estudio

Es de tipo descriptivo, porque se realizaron muestreos de suelos en tres sistemas por unidades fisiográficas y los resultados se analizaron mediante la estadística descriptiva.

3.3.3. Análisis de datos

A través de los programas Microsoft Excel y Word se estudiaron la información obtenida en campo y laboratorio. También, se realizó una prueba de correlación de Pearson para definir los indicadores físicos Y químicos y luego representarlo cartográficamente su distribución de los nutrientes.

3.3.4. Variables en estudio

Para el estudio se consideró las siguientes variables dependientes e independientes:

– Variable dependiente

Y = Mapas temáticos del fundo Liviac

Y1 Mapa de suelo a partir de las características físicas y químicas

– Variable independiente

X = Fisiografía y tipos de suelo del fundo Liviac

X1 Conductividad eléctrica = dSm^{-1} X2 pH = pH

X3 Densidad aparente = g/cm^3

X4 Resistencia a la penetración = kg/cm^2

X5 Materia orgánica del suelo (MO) = %

X6 Fósforo disponible = mg kg^{-1}

X7 Magnesio disponible = $\text{Cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$

X8 Calcio disponible = $\text{Cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$

X9 Potasio disponible = $\text{Cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$

X10 Capacidad de intercambio catiónico = $\text{Cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$

X11 Nitrógeno = %

3.4. Metodología

3.4.1. Caracterizar los parámetros físicos (textura, densidad aparente y resistencia a la penetración) y químicos (pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio y conductividad eléctrica) en tres sistemas de uso del suelo por unidades fisiográficas en el fundo Liviac caserío río Negro, distrito Luyando

3.4.1.1. Reconocimiento de la zona

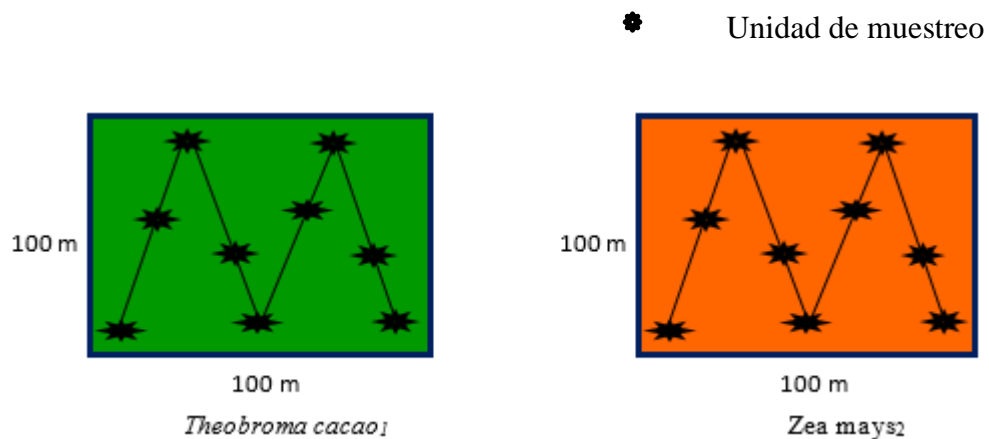
Se reconoció el área, identificando la topografía del terreno en el ámbito del área de investigación, luego se seleccionaron los tres sistemas de uso con cultivo de cacao, maíz y especie forestal capirona constituidos por 1 ha y se realizó las coordinaciones con el propietario del fundo Liviac.

3.4.1.2. Determinación de número de muestras

En el mapa base de la zona se identificó la zona de análisis por unidades fisiográficas y a partir de ello se calcularon el número de muestras en la zona de los tres sistemas de uso.

3.4.1.3. Muestreo de suelos en los sistemas de uso

Se realizó obteniendo submuestras por un recorrido por cada unidad fisiográfica, siguiendo las pautas de Moscatelli et al. (2005) del INTA. La determinación de propiedades fisicoquímicas se llevó a cabo conforme a los procedimientos del USDA (1999) y Bazán (1996). La recolección de datos se hizo a través de contacto directo con el terreno y un sistema de posicionamiento global (GPS), permitiendo generar y almacenar los resultados digitalmente. Posteriormente, se transfirió la información al gabinete de SIG y Cartografía de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para su análisis.



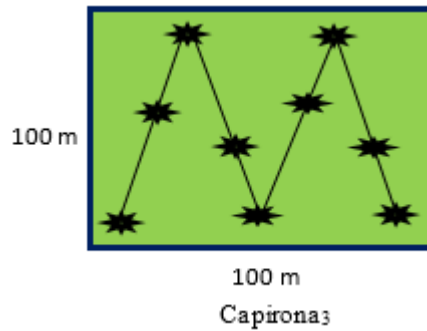


Figura 1. Diagrama de muestreo de suelos para análisis fisicoquímico de los tres sistemas de uso.

Cada sistema de cultivo ocupa una superficie de 1 ha. Se establecieron 12 puntos de muestreo en cada parcela y se obtuvieron un total de 36 muestras (de cuatro lugares de muestreo). La profundidad de muestreo fue de 30 cm y se distribuyeron en forma de zigzag sobre la mayor parte de la superficie de cada parcela de muestra (Figura 1). Cada muestra de suelo se recogió utilizando una pala recta y el volumen de suelo fue el mismo para cada muestra. Las muestras se mezclaron para formar muestras compuestas durante aprox. 1 kg por SUS. Antes de recolectar cada muestra, se eliminaron de la superficie todos los residuos de materia orgánica, como hojas y contaminantes que pudieran afectar el análisis fisicoquímico. Evite tomar muestras en áreas inundadas, pastizales o entradas de edificios y áreas donde se acumulan restos vegetales.

3.4.1.4. Parámetros fisicoquímicos del suelo a ser analizadas

Fueron determinados de acuerdo con los métodos establecidos en la tabla 17 y figura 2, en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, con los resultados se realizará la interpolación para representarlo cartográficamente.

Tabla 17. Indicadores físicos y químicos.

Indicadores físicos	Método de su determinación
Textura del suelo	Método del hidrómetro de Bouyoucos (USDA, 1996 y Moscatelli et al., 2005)
Densidad aparente	Por volumen, peso húmedo y seco (USDA, 1996 y Moscatelli et al., 2005)
Resistencia a la penetración	Método directo del penetrómetro (USDA, 1996 y Moscatelli et al., 2005)

Indicadores químicos

Materia orgánica (MO)	Método de Walkley y Blakc (Bazán, 1996)
Reacción del suelo (pH)	Método del potenciómetro (Bazán, 1996)
Nitrógeno (N) total	Método de Kjeldahl (Bazán, 1996)
Fósforo (P) disponible	Método de Olsen (Bazán, 1996)
Magnesio (Mg) intercambiable	Acetato de Amonio pH 7.0 Absorción atómica o Flamometría (Bazán, 1996)
Calcio (Ca) intercambiable	Acetato de Amonio pH 7.0 Absorción atómica o Flamometría (Bazán, 1996)
Conductividad eléctrica (CE)	Conductímetro (Bazán, 1996)
Potasio (K) disponible	Método del ácido sulfúrico (Bazán, 1996)
Capacidad de intercambio Catiónico (CIC)	Método del acetato de amonio (Bazán, 1996)

Fuente: Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuesto para monitorear los cambios que ocurren en el suelo (Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; Seybold et al., 1997).

Los análisis descritos en la Tabla 13, fueron realizados en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

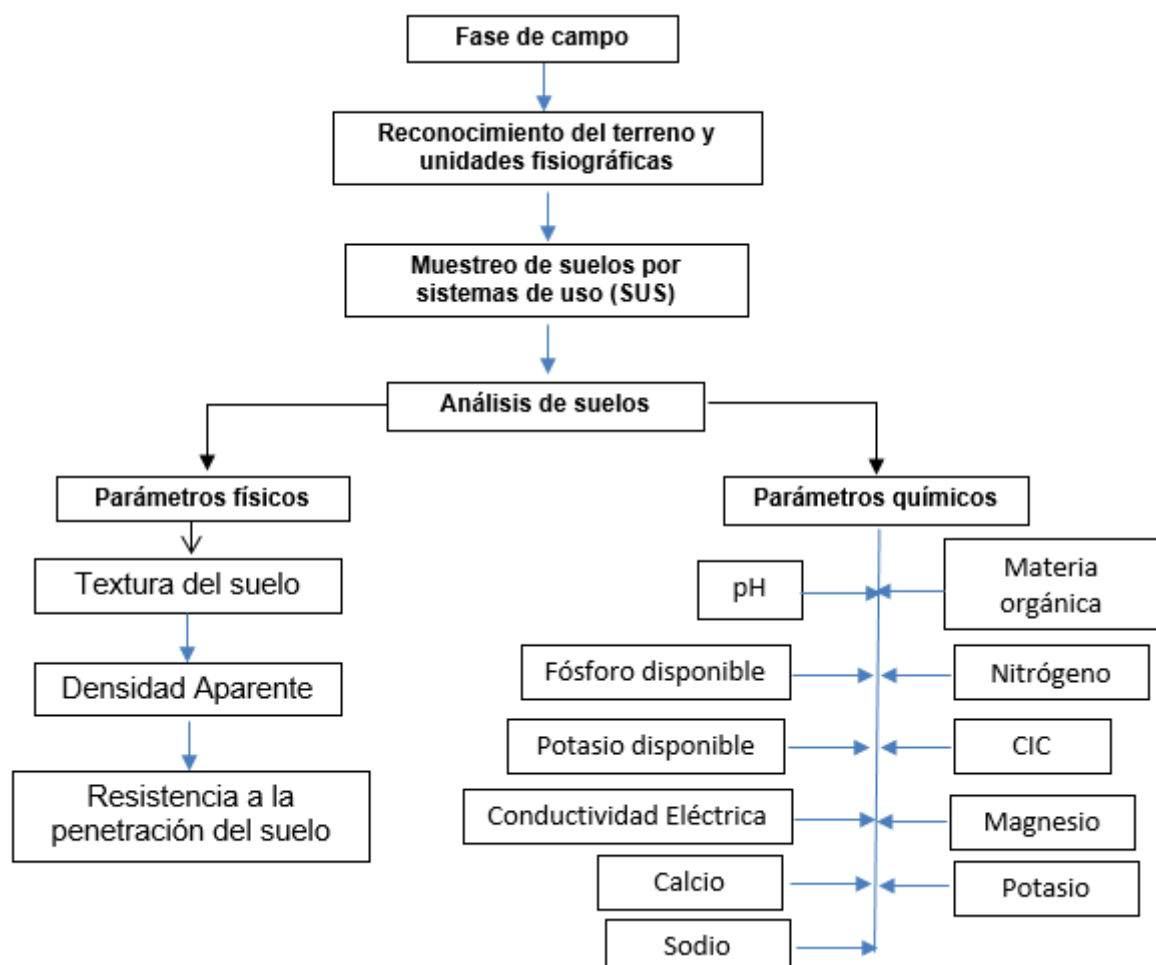


Figura 2. Diagrama metodológico del trabajo de campo utilizado en la elaboración de los mapas para la distribución espacial de las propiedades físicas y químicas de los tres sistemas de uso del suelo

3.4.1.5. Análisis estadístico para las propiedades físicas y químicas

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos los valores obtenidos no cumplen una distribución normal, por lo que se tuvo que analizar con la prueba H de Kruskal-Wallis, teniendo como tratamientos a los sistemas de usos de suelos con números de repeticiones variables. Las premisas fueron:

H0: las medianas de la población son iguales.

H1: las medianas de la población no son iguales

El estadístico esta dado por:

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

Donde:

n_j : 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

r_i : es la sumatoria de los r_{ij}/n_j

\bar{r} : es el promedio de r_{ij}

Finalmente, el p-value (valor p) es aproximado por $\Pr(\chi_{g-1}^2 \geq K)$, si algún n_i es pequeño (>5) la distribución de K puede ser distinta de la chi-cuadrado.

Tabla 18. Descripción de los tratamientos en estudio.

Descripción	Tratamiento
<i>Theobroma cacao-Musa sp.</i> ₁	T1
<i>Theobroma cacao</i> ₂	T2
Capirona ₃	T3
<i>Zea mays</i> ₄	T4

3.4.2. Representar cartográficamente la distribución espacial de los indicadores físicos y químicos de los suelos en tres sistemas de uso por unidades fisiográficas en el fundo Liviac, caserío río Negro, distrito Luyando

- **Elaboración del mapa de distribución espacial de los indicadores físicos químicos**

Los mapas se elaboraron mediante proyecciones al Sistema Universal Transversal Mercator (UTM) en el Datum WGS 84 zona 18L del hemisferio sur, utilizando ArcGIS. Se utilizó el interpolador Kriging para la manipulación de datos y la interpolación. A partir de datos de análisis de laboratorio y la interpolación con Kriging, se generaron mapas de distribución que permitieron evaluar los parametros de los suelos y mapear sus propiedades. La información de imágenes satelitales se integró en un SIG, y los mapas temáticos se produjeron con ArcGIS, garantizando la precisión en la evaluación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterizar los parámetros físicos (textura, densidad aparente y resistencia a la penetración) y químicos (pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico, calcio y magnesio) en tres sistemas de uso del suelo en el fundo Liviac, caserío río Negro, distrito Luyando

4.1.1. Parámetros físicos

El estudio de los parámetros físicos de la tierra es crucial para determinar su capacidad funcional. Una guía del USDA proporciona métodos para medir parámetros como textura, profundidad, espesor de horizonte superior, estructura, DA, resistencia a la penetración de la tierra, tasa de infiltración del agua en el suelo, capacidad de retención de agua información vital para el manejo sostenible del suelo (SAGARPA, 2012).

4.1.1.1. Textura del suelo

Los valores encontrados para la textura del suelo en los tres sistemas de uso (tabla 19 y figura 3) evaluadas estas presentan textura franca, son suelos aptos para el establecimiento de cualquier cultivo. Al realizar la suma y promedio de valores podemos encontrar que los suelos en los tres sistemas de uso por unidades fisiográficas del fundo Liviac presentan un suelo Franco, la FAO (2019), la textura del suelo, determinada por la proporción de arena, limo y arcilla, afecta su facilidad de laboreo, la retención de agua y aire, y la velocidad de infiltración.

Tabla 19. Textura de los suelos en los tres sistemas de uso.

Sistema de uso	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura
Cacao - plátano	33	32	35	
Cacao	32	35	33	
Capirona	39	27	34	Franco
Maíz	35	27	39	
Promedio	35	30	35	Franco
Maximos	39	35	39
Minimos	32	27	33
Desv. Estandar	3.84	4.75	3.47
Coef. variación	10.98	15.68	9.83

Según la USDA (2019), la textura de la tierra se define como la proporción de arena, limo y arcilla que lo componen. Para describir los niveles intermedios, se utilizan

combinaciones de estos nombres. La textura de la tierra puede estimarse por el método de "textura al tacto" en campo, pero en investigaciones y clasificaciones de suelos, se define por el triángulo textural (Hang, 2014). La FAO (2015) destaca que el tamaño de las partículas de suelo (arena, limo y arcilla) influye en la capacidad de retención de nutrientes. La arcilla, en particular, puede retener más nutrientes que la arena y liberarlos gradualmente para las plantas.

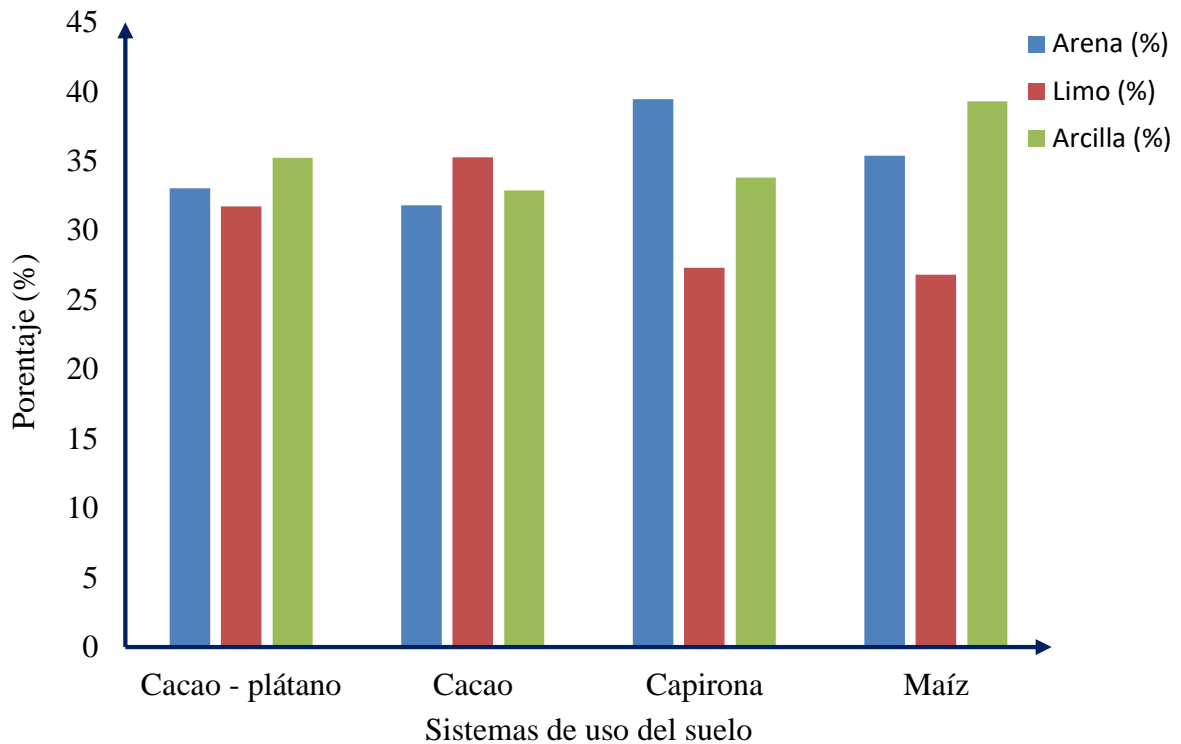


Figura 3. Valores en proporción de arena, arcilla y limo en los tres sistemas de uso del suelo.

4.1.1.2. Densidad aparente

Los valores encontrados para la DA de los tres sistemas de uso del suelo (tabla 20 y figura 4) del fundo Liviac muestran que los tres sistemas de uso muestran densidades aparentes que se encuentran entre los rangos de (1.45 a 1.48 g.cm⁻³), de acuerdo con SAGARPA (2012) la DA encontrada en la investigación se encuentra en un rango aceptable, con valores bajos obtenidos para el coeficiente de variación en cada sistema de uso, siendo el valor más alto de dispersión el sistema de uso cacao-plátano, Según FAO (2017), una alta DA sugiere un suelo compacto o con un alto contenido de partículas granulares como la arena, mientras que una baja DA no garantiza un entorno propicio para el crecimiento vegetal.

Tabla 20. Valores de la densidad aparente (g/cm³) de los sistemas de uso del suelo.

Muestreo	Cacao - plátano	Cacao	Capirona	Maíz
1	1.53	1.43	1.47	1.47
2	1.53	1.48	1.44	1.44

3	1.45	1.47	1.45	1.44
4	1.42	1.47	1.47	1.44
Promedio	1.48	1.46	1.46	1.45
Máximos	1.53	1.48	1.47	1.47
Mínimos	1.42	1.43	1.44	1.44
Desv. estándar	0.06	0.01	0.02	0.01
Coef. variación	4.05	0.40	1.13	0.81

Según Taboada y Álvarez (2008), la densidad aparente de los suelos varía significativamente debido a factores como la textura, el contenido de MO y el empleo del suelo. Esto dificulta la comparación directa de la DA entre suelos diferentes. Reinert et al. (2001) establecieron valores críticos de densidad de suelo, que varían según la textura del suelo: 1,45 g/m³ para suelos arcillosos, 1,55 g/m³ para suelos de textura media y 1,65-1,55 g/m³ para suelos arenosos. En general, según SAGARPA (2017), este tipo de sistema de uso se encuentra dentro de un rango aceptable.

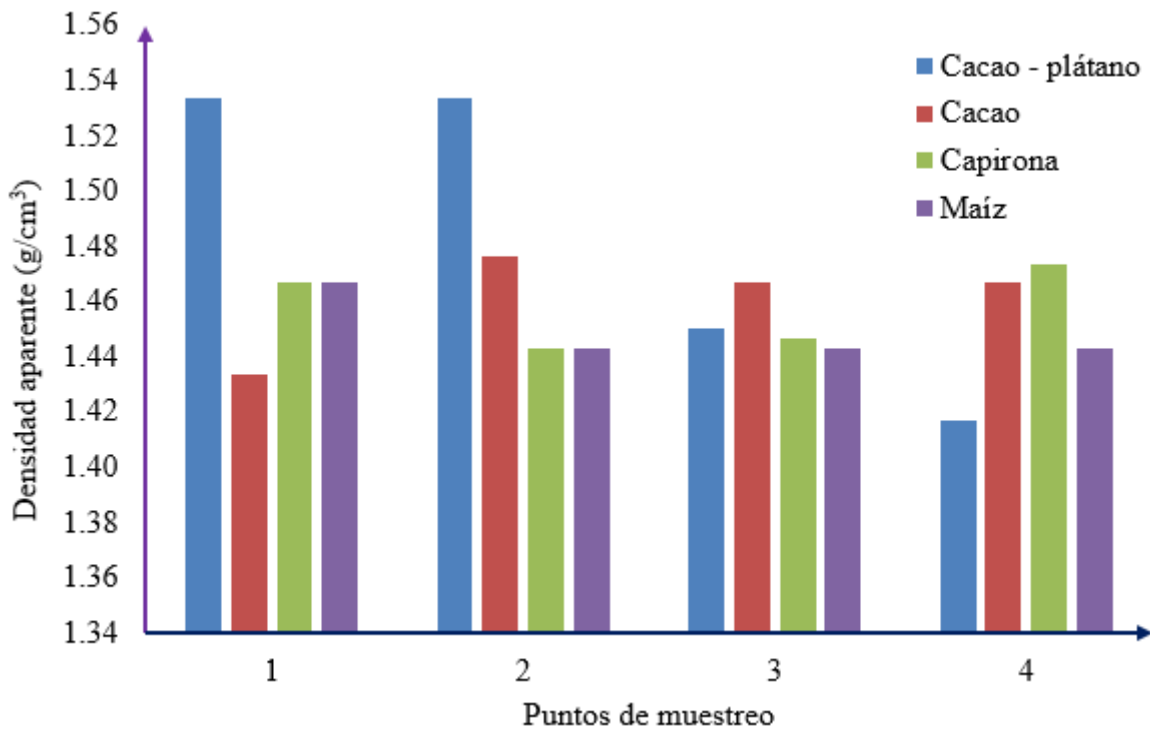


Figura 4. Valores de la densidad aparente en los tres sistemas de uso del suelo

Así mismo USDA (2017) recalcan que en aquellos suelos con textura fina la DA varía entre 1 y 1,2 g/cm³, en suelos franco-arcillosos varían entre 1.30 g/cm³ e 1.40 g/cm³, mientras que en los suelos arenosos es mayor y varían entre 1,2 y 1,6 g/cm³; y que estos valores de DA reportados en la investigación son favorables para el crecimiento de raíces.

4.1.1.3. Resistencia a la penetración

Los valores encontrados para la variable resistencia mecánica a

la penetración del suelo en los tres sistemas de uso del suelo (tabla 21 y figura 5) del fundo Liviac los valores más altos lo presenta el sistema con cacao con (1,70 a 1,72 kg/cm²) seguido del sistema con maíz con 1,65 kg/cm² y con el menor valor el sistema de uso con capirona con 1,63 kg/cm², con valores casi homogéneos debido a los valores se encuentran según Bazán (2017) en un nivel de resistencia de suelos suaves, para el coeficiente de variación en cada sistema de uso es bajo, siendo el valor más alto de dispersión el sistema con cacao con 3.77%.

Tabla 21. Valores para la resistencia mecánica a la penetración del suelo (kg/cm²) en los tres sistemas de uso del suelo.

Muestreo	Cacao - plátano	Cacao	Capirona	Maíz
1	1.67	1.67	1.64	1.66
2	1.68	1.69	1.59	1.64
3	1.72	1.71	1.67	1.62
4	1.80	1.71	1.63	1.67
Promedio	1.72	1.70	1.63	1.65
Máximos	1.80	1.71	1.67	1.67
Mínimos	1.67	1.67	1.59	1.62
Desv. estándar	0.06	0.01	0.04	0.02
Coef. variación	3.77	0.72	2.66	1.43

Según Rucks et al. (2004), la resistencia a la penetración es un indicador integral que refleja la compactación del suelo, su contenido de humedad, textura y tipo de arcilla. Para medir esta resistencia, se utiliza un penetrógrafo, que mide la fuerza necesaria para infiltrar la tierra con una sonda. Herrick & Jones (2002) sugieren que otra forma de medir la resistencia a la penetración es calculando la resistencia de la tierra al movimiento de un penetrómetro y dividirla por la profundidad de penetración. Los resultados de la investigación muestran que los tres sistemas de uso del suelo presentan una resistencia baja, característica de suelos suaves, siendo el sistema de uso con capirona el que presenta la resistencia más baja, con un valor de 1,63 kg/cm².

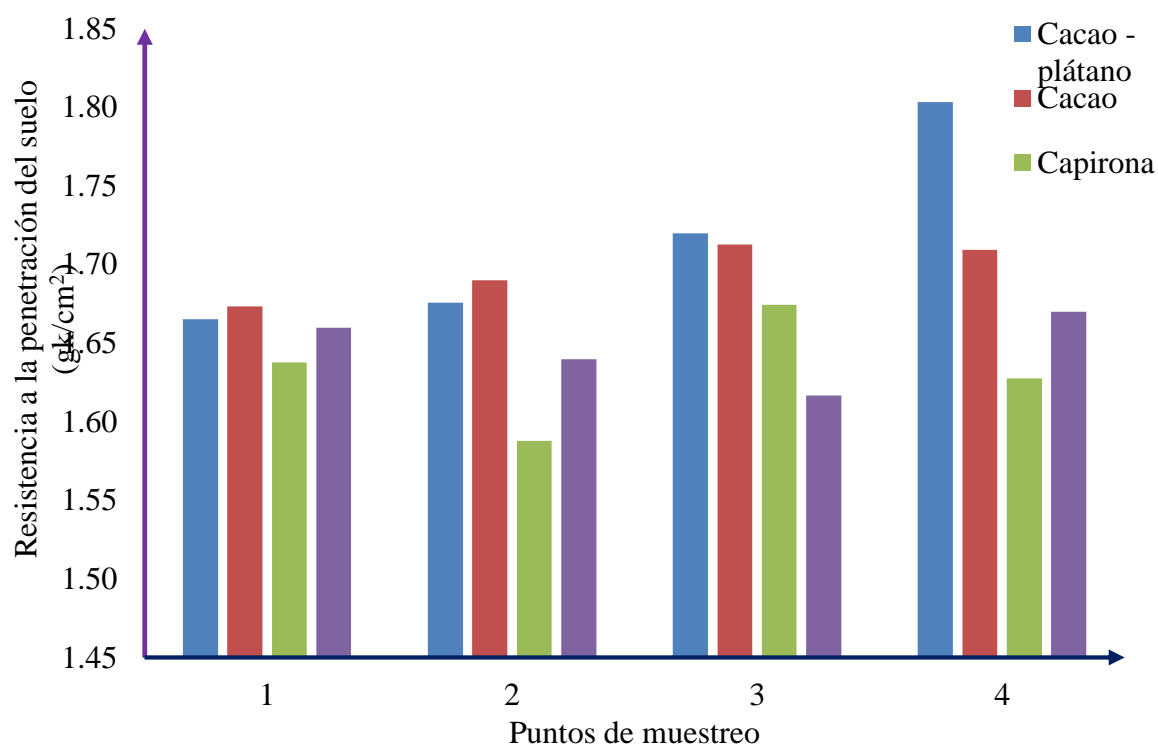


Figura 5. Valores para la resistencia mecánica a la penetración en los sistemas de uso

4.1.2. Parámetros químicos

4.1.2.1. pH

Los resultados que se muestran en la tabla 22 y figura 6 los valores para la variable pH del suelo de los tres sistemas de uso en el fundo Liviaca muestra que el mayor valor presenta el sistema de uso con maíz con 6,04 seguido del sistema con capirona con 6,06 y el sistema de uso del suelo con cacao con 5,75 con valores homogéneos obtenidos para el coeficiente de variación en cada sistema de uso están por debajo de 5,89%.

Tabla 222. Valores para la reacción o pH del suelo en los sistemas de uso.

Muestra	Cacao - plátano	Cacao	Capirona	Maíz
1	5.69	5.69	6.30	6.54
2	5.73	5.68	5.78	5.88
3	5.91	5.54	5.99	5.72
4	5.66	5.74	6.16	6.03
Promedio	5.75	5.66	6.06	6.04
Maximos	5.91	5.74	6.30	6.54
Mínimos	5.66	5.54	5.78	5.72
Desviación Estándar	0.11	0.09	0.22	0.36
Coficiente Variación	1.94	1.51	3.68	5.89

Estos resultados se encuentran en un rango de suelos moderadamente

ácidos que pueda deberse que cerca de la zona muestreo existe una formación de una montaña naja rocosa con presencia de CaCO_3 , refiere Martínez (2003), el pH del suelo es un indicador de su acidez, neutralidad o alcalinidad, y se mide mediante la concentración de iones hidrógeno (H^+) en el suelo. La escala de pH va desde 0 a 14, y en este estudio, los valores obtenidos oscilaron entre 5,5 y 6,5. Sánchez (2007) señala que para la evolución óptima de los cultivos, el pH ideal de la tierra debe estar entre 6,5 y 7,5. Dado que los valores obtenidos en este estudio son inferiores a este rango, se recomienda implementar un plan de fertilización efectivo para mejorar la calidad del suelo.

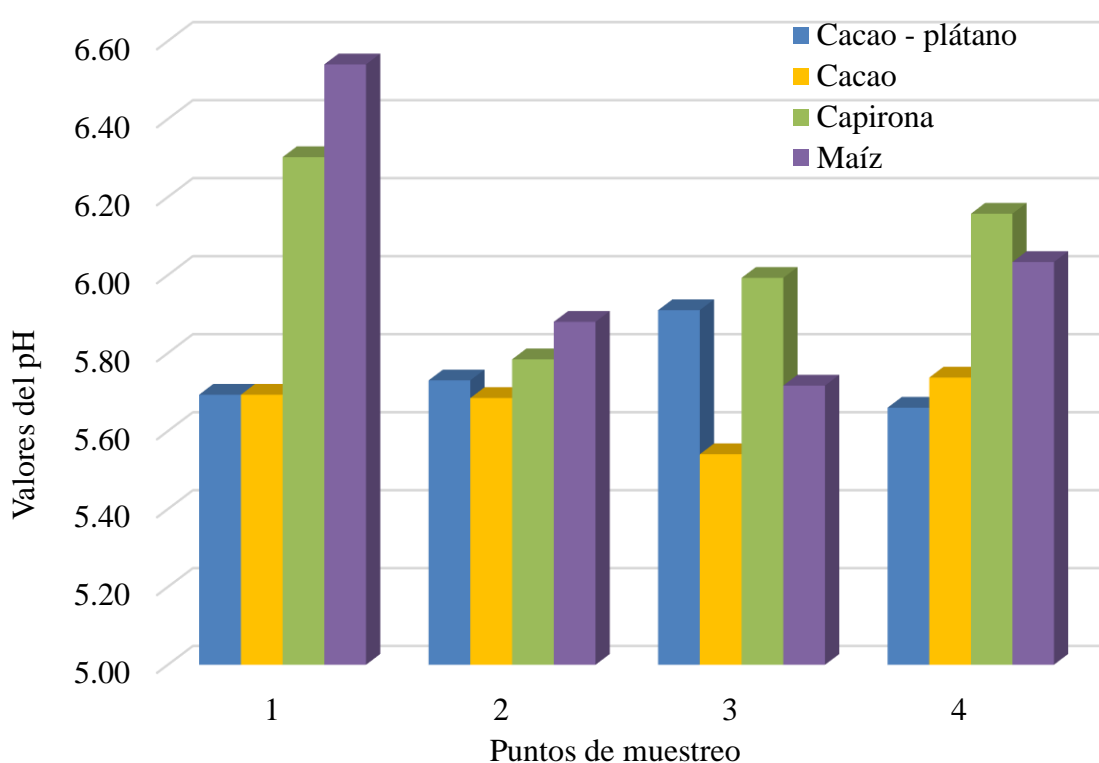


Figura 6. Valores para el pH en los tres sistemas de uso del suelo

El pH es un factor necesario por la disponibilidad de nutrientes porque se restringe la nitrificación y el desgaste de la MO de la tierra y si el pH es aún más bajo el efecto es más severo, en la investigación los valores encontrados indican que los suelos son moderadamente ácidos, Rodríguez (2011) señala que en un pH alcalino, la disponibilidad de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) y molibdeno es mayor, mientras que en un pH ácido, los micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu y B) son más accesibles, excepto el molibdeno.

4.1.2.2. Materia orgánica

Los resultados que observamos en la tabla 23 y figura 7, muestran los valores en la variable MO de los tres sistemas de uso del suelo en el fundo Liviac, numéricamente el mayor valor presenta el sistema de uso con maíz con 3,71%, y menores valores en orden decreciente el sistema con capirona con 2,72% y el sistema de uso del suelo con cacao con 2,47%, con valores poco homogéneos debido a los valores obtenidos para el coeficiente de variación en cada sistema de uso están por debajo de 5,39%.

Tabla 23. Valores para la materia orgánica (%) en los tres sistemas de uso del suelo.

Muestra	Cacao - plátano	Cacao	Capirona	Maíz
1	2.59	2.09	2.90	3.89
2	2.50	2.05	2.75	3.75
3	2.45	2.04	2.68	3.65
4	2.35	2.09	2.55	3.55
Promedio	2.47	2.07	2.72	3.71
Maximos	2.59	2.09	2.90	3.89
Mínimos	2.35	2.04	2.55	3.55
Desv. estándar	0.10	0.03	0.15	0.15
Coef. variación	4.06	1.26	5.39	3.95

Según Leyton (2003), la materia orgánica del suelo, compuesta por compuestos biológicos, es fundamental para los parámetros fisicoquímicos y biológicos del suelo. Incrementa la CIC, regula el pH, retiene humedad y mejora la estabilidad del suelo al aglutinarlas y formar agregados. Como lo menciona SAGARPA (2012), la MO es un elemento esencial del suelo que influye en su fertilidad y productividad. La MO es crucial para la fertilización del suelo, y se considera que un suelo es fértil cuando los niveles de materia orgánica están dentro de los rangos óptimos. De allí que los niveles de bajo, medio alto y muy alto deben ser juzgados a nivel regional y de acuerdo con las necesidades de un cultivo definido, por lo que estos resultados obtenidos en el fundo Liviac fue analizada desde este punto de vista, por lo que los valores obtenidos en el presente estudio reflejan las condiciones del lugar en este caso el fundo Liviac el valor más alto en MO lo presenta el sistema de uso con maíz 3.71% quiere decir que aunque el aporte del cultivo genera materia orgánica que representa este valor en el sistema de uso, resulta que los tres sistemas de uso se encuentran en un rango de nivel medio.

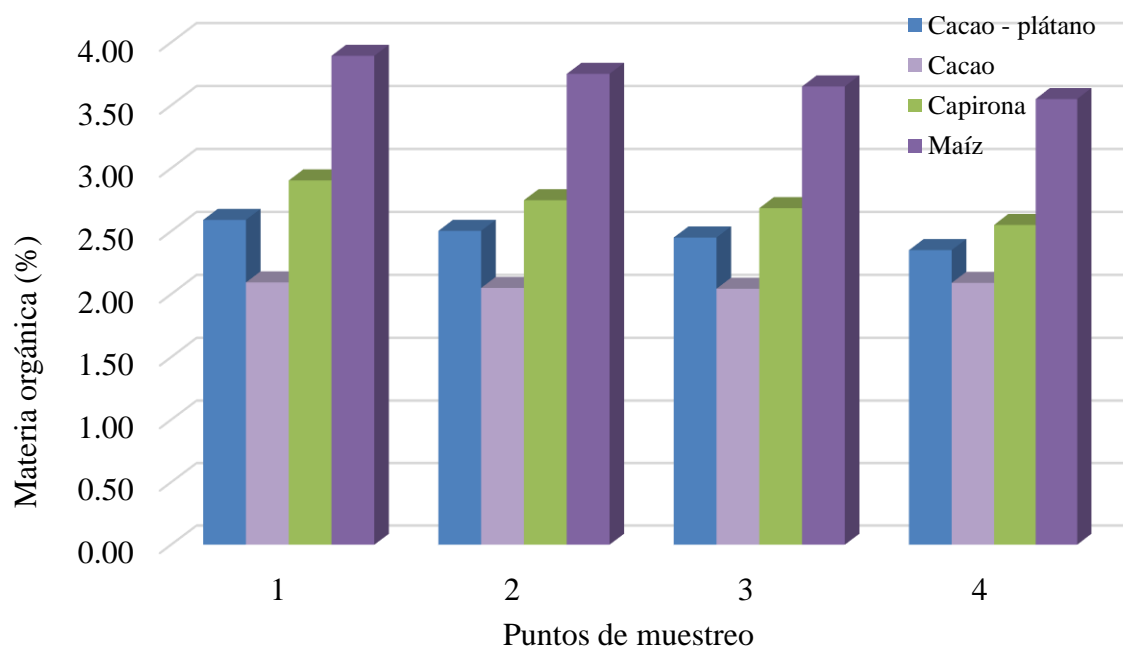


Figura 7. Valores para la materia orgánica en los sistemas de uso del suelo

4.1.2.3. Nitrógeno

Se observa en la tabla 24 y figura 8 los valores para la variable nitrógeno de los tres sistemas de uso del suelo en el fundo Liviac se muestra numéricamente que el mayor valor presenta el sistema de uso con maíz con 0,17%, y menores valores en orden decreciente el sistema de uso con cacao con 1,13% y el sistema de uso del suelo con capirona con 1,12%, con valores poco homogéneos debido a los valores obtenidos para el coeficiente de variación en cada sistema de uso están por debajo de 10,14% llegando hasta el 4,97%.

Tabla 24. Valores para nitrógeno (%) en los tres sistemas de uso del suelo.

Muestra	Cacao - plátano	Cacao	Capirona	Maíz
1	0.13	0.10	0.14	0.19
2	0.12	0.11	0.13	0.17
3	0.13	0.10	0.12	0.17
4	0.12	0.12	0.11	0.16
Promedio	0.13	0.11	0.12	0.17
Maximos	0.13	0.12	0.14	0.19
Mínimos	0.12	0.10	0.11	0.16
Desv. estándar	0.00	0.01	0.01	0.01
Coef. variación	1.64	7.94	10.14	4.97

Según Navarro (2003), el nitrógeno es un componente fundamental de la MO en los suelos, que se forma a partir de la descomposición de microorganismos y plantas. SAGARPA (2012) destaca que el N es esencial para la evolución de los cultivos, ya que es un constituyente clave de las proteínas. Las plantas absorben el N

principalmente en forma de nitrato y amonio a través de sus raíces. En este estudio, se encontró que los tres sistemas de uso del suelo presentan niveles medios de nitrógeno.

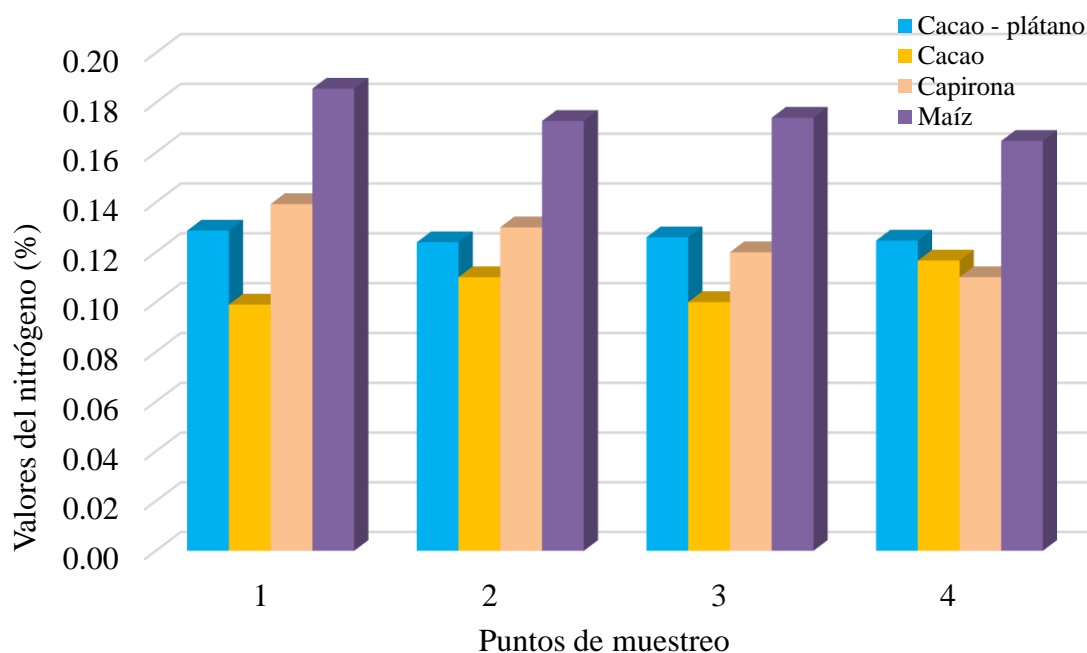


Figura 8. Valores para el nitrógeno en los tres sistemas de uso del suelo

4.1.2.4. Fósforo

Se observa los resultados en la tabla 25 y figura 9, los valores para la variable P disponible de los tres sistemas de uso del suelo en el fundo Liviac el mayor valor presenta el sistema de uso con maíz con 12,26 ppm seguido del sistema de uso con capirona con 12,20 ppm, y el menor valor lo presenta el sistema de uso con cacao, estos valores tienen cierta homogeneidad por los resultados obtenidos para el coeficiente de variación en los sistemas de uso están por debajo de 5,38% llegando hasta el valor de 2,70%.

Tabla 253. Valores para el fósforo total (ppm) en los tres sistemas de uso del suelo.

Muestra	Cacao con plátano	Cacao	Capirona	Maíz
1	11.71	12.95	12.46	12.14
2	11.87	11.99	11.72	11.64
3	11.09	11.44	12.32	12.63
4	11.63	11.76	12.29	12.62
Promedio	11.57	12.03	12.20	12.26
Maximos	11.87	12.95	12.46	12.63
Mínimos	11.09	11.44	11.72	11.64
Desv. estándar	0.34	0.65	0.33	0.47
Coef. variación	2.93	5.38	2.70	3.84

Según Munera y Meza (2012), el P es uno de los nutrientes esenciales para el desarrollo y reproducción de los cultivos, y su función no puede ser reemplazada por otro nutriente. La concentración de fósforo en el suelo varía entre 0,2 y 1,5 g/kg, y los resultados de esta investigación se encuentran dentro de este rango. Alvarado y Raigosa (2007) señalan que el fósforo puede ser fijado por compuestos de aluminio, hierro, manganeso y calcio, lo que afecta su disponibilidad para las plantas. En este estudio, los valores de fósforo encontrados en los sistemas de uso evaluados se encuentran en un nivel medio, lo que refleja las condiciones naturales del lugar y una producción sostenible.

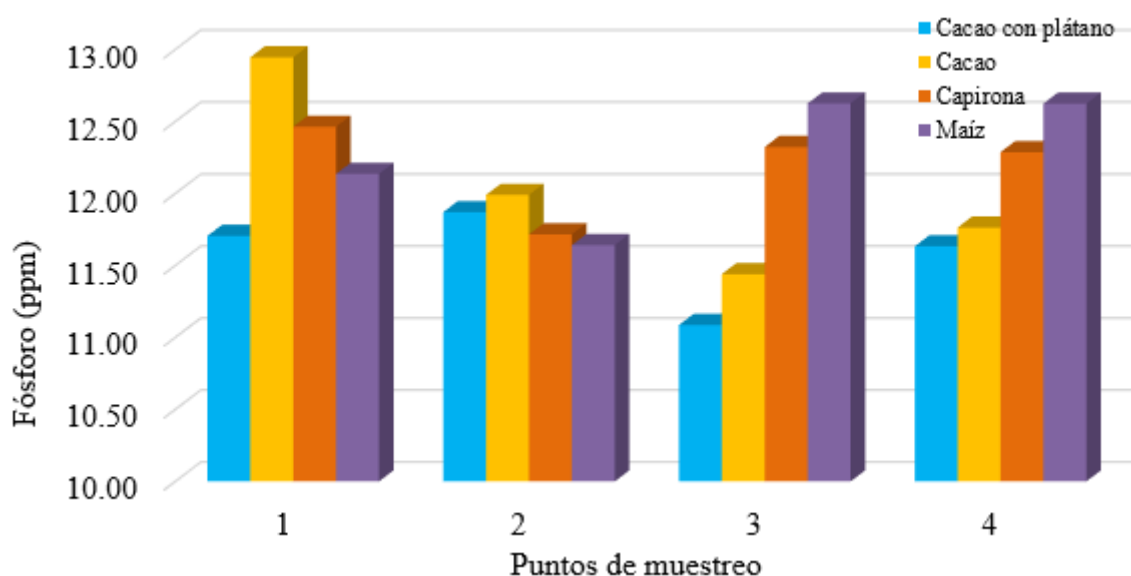


Figura 9. Valores para el fósforo total en los tres sistemas de uso del suelo

4.1.2.5. Potasio

Los resultados presentados en la tabla 26 y figura 10, muestran para la variable potasio disponible el mayor valor en el sistema de uso con cacao con 126,34 kg. K₂O/ha seguido del sistema de uso con maíz con 123,75 kg. K₂O/ha, y el menor valor el sistema de uso con capirona con 113,10 kg. K₂O/ha, estos valores tienen homogeneidad porque los resultados para el coeficiente de variación en los tres sistemas de uso están entre 5,20% llegando hasta el valor de 0,27%.

Tabla 26. Valores para el potasio total (kg/ha) en los tres sistemas de uso del suelo.

Muestra	Cacao - plátano	Cacao	Capirona	Maíz
1	127.72	85.31	112.77	122.40
2	126.78	83.77	113.24	120.35
3	125.17	94.06	112.94	123.46
4	125.70	86.97	113.44	128.79
Promedio	126.34	87.53	113.10	123.75

Maximos	127.72	94.06	113.44	128.79
Mínimos	125.17	83.77	112.77	120.35
Desv. estándar	1.14	4.55	0.30	3.60
Coef. variación	0.90	5.20	0.27	2.91

Alvarado y Raigosa (2007) indican que el contenido de K en la tierra es aproximadamente 19 g/kg. Las principales fuentes de K incluyen la meteorización de minerales, el contenido de minerales arcillosos, la mineralización de residuos orgánicos y el uso de fertilizantes. Conti (2004) menciona que el K en la tierra puede presentarse como K⁺ en solución, adsorbido, fijado o estructural. SAGARPA (2012) señala que la proporción de K disponible en la solución del suelo depende de la liberación del K intercambiable, comúnmente hallado en las arcillas. Este estudio revela que los tres sistemas de uso presentan niveles bajos de potasio.

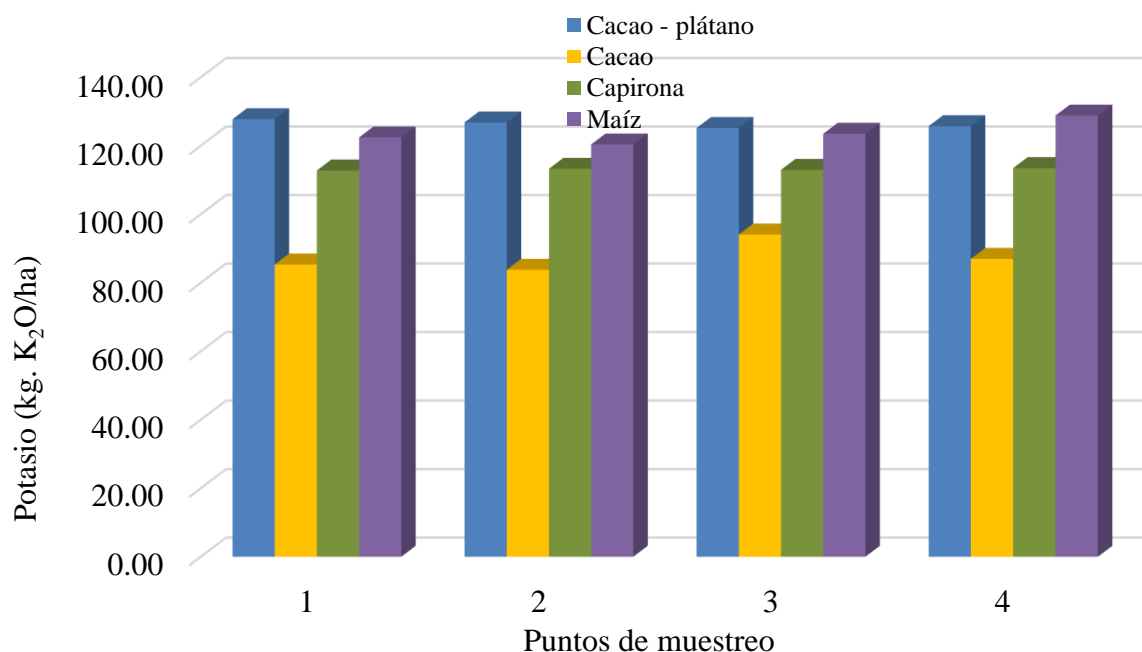


Figura 10. Valores para el potasio total en los tres sistemas de uso del suelo

4.1.2.6. Capacidad de intercambio catiónico

Se observa los resultados en la tabla 27 y figura 11, sobre la variable CIC el mayor valor en los tres sistemas de uso lo presenta el sistema de uso con maíz con 6,67 Cmol(+)/kg-1 seguido del sistema de uso con capirona con 6,51 Cmol(+)/kg-1, y el menor valor lo presenta el sistema de uso con cacao con 6,46 Cmol(+)/kg-1, estos valores tienen relativa homogeneidad, según el coeficiente de variación en los tres sistemas de uso los valores se encuentran entre 3,89% llegando hasta el valor más bajo de 0,96%.

Tabla 27. Valores para la capacidad de intercambio catiónico (Cmol(+)/kg-1) en los tres sistemas de uso del suelo.

Muestra	Cacao - plátano	Cacao	Capirona	Maíz
1	6.27	5.54	6.68	6.75
2	6.38	5.26	6.43	6.61
3	6.51	5.73	6.48	6.63
4	6.69	5.71	6.44	6.68
Promedio	6.46	5.56	6.51	6.67
Maximos	6.69	5.73	6.68	6.75
Mínimos	6.27	5.26	6.43	6.61
Desv. estándar	0.18	0.22	0.11	0.06
Coef. variación	2.79	3.89	1.76	0.96

Los resultados encontrados muestran valores mínimos por lo que se hace necesario mejorar condiciones del suelo, ya que según manifiesta FAO (2022) que la CIC es una de las propiedades químicas que afectan en mayor grado la fertilidad, en ese sentido SAGARPA (2012) explica que la CIC está relacionada con una mejora de la estructura de los suelos, y de acuerdo a los valores encontrados los tres sistemas de uso del fondo Liviac presenta un valor bajo.

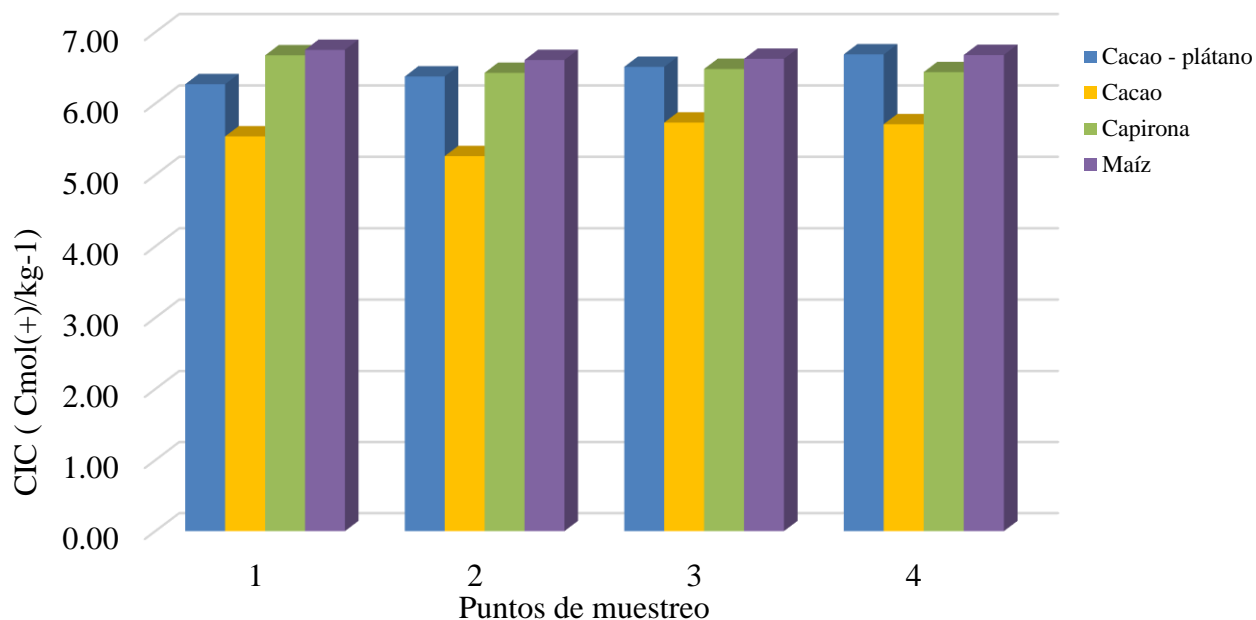


Figura 11. Valores para la Capacidad de Intercambio Catiónico en los tres sistemas de uso

Según Arévalo y Gauggel (2014), determinar la CIC es fundamental en agronomía, ya que el suelo actúa como reserva y fuente de nutrientes para las plantas. Una mayor CIC permite un mayor depósito de iones nutritivos, lo que a su vez favorece el desarrollo de los cultivos. La CIC facilita la absorción de nutrientes minerales por parte de las raíces de las plantas. En este estudio, se encontró que los tres sistemas de uso del fondo

Liviac presentan valores bajos de CIC, lo que puede estar relacionado con los niveles medios y bajos de materia orgánica en el suelo.

4.1.2.7. Calcio

Observando los valores encontrados en la variable calcio del suelo (tabla 28 y figura 12), el mayor valor en los tres sistemas de uso lo presenta el sistema de uso con maíz con 5,42 Cmol(+)/kg-1 seguido del sistema de uso con capirona con 5,35 Cmol(+)/kg-1, y el menor valor lo presenta el sistema de uso con cacao con 4,98 Cmol(+)/kg-1, estos valores tienen relativa homogeneidad, según el coeficiente de variación en los tres sistemas de uso los valores se encuentran entre 1,66% llegando hasta el valor más bajo de 0,90%, de acuerdo con SAGARPA (2012) este valor promedio obtenido para el contenido de Ca en el suelo es de nivel medio, es preocupante dado que el calcio es un microelemento que ayuda a estabilizar la acidez del suelo y hacer disponible los nutrientes existentes en el suelo.

Tabla 28. Valores para el calcio (meq/100g suelo) en los sistemas de uso del suelo.

Muestra	4.98	4.77	5.35	5.42
	Cacao - plátano	Cacao	Capirona	Maíz
1	4.92	4.79	5.40	5.40
2	4.98	4.82	5.27	5.49
3	5.01	4.69	5.27	5.39
4	4.99	4.79	5.44	5.38
Promedio	4.98	4.77	5.35	5.42
Maximos	5.01	4.82	5.44	5.49
Mínimos	4.92	4.69	5.27	5.38
Desv. estándar	0.04	0.06	0.09	0.05
Coef. variación	0.75	1.19	1.66	0.90

El calcio es un elemento importante en suelos complejos, ya que ayuda a nutrientes, que son compuestos químicos disueltos en la humedad del suelo, importantes para la evolución y desarrollo normal de cultivos. Según INTAGRI (2015) es un oligoelemento. El calcio tiene un rol importante e insustituible en las plantas tanto como nutriente estructural como enmienda del suelo, ya que el calcio tiene un aporte nutricional completo a la producción de cultivos. La falta de este nutriente en los vegetales provocará: retraso en el desarrollo en todos los aspectos de la planta, por lo que se puede observar que el contenido de cal en el suelo forestal es menor.

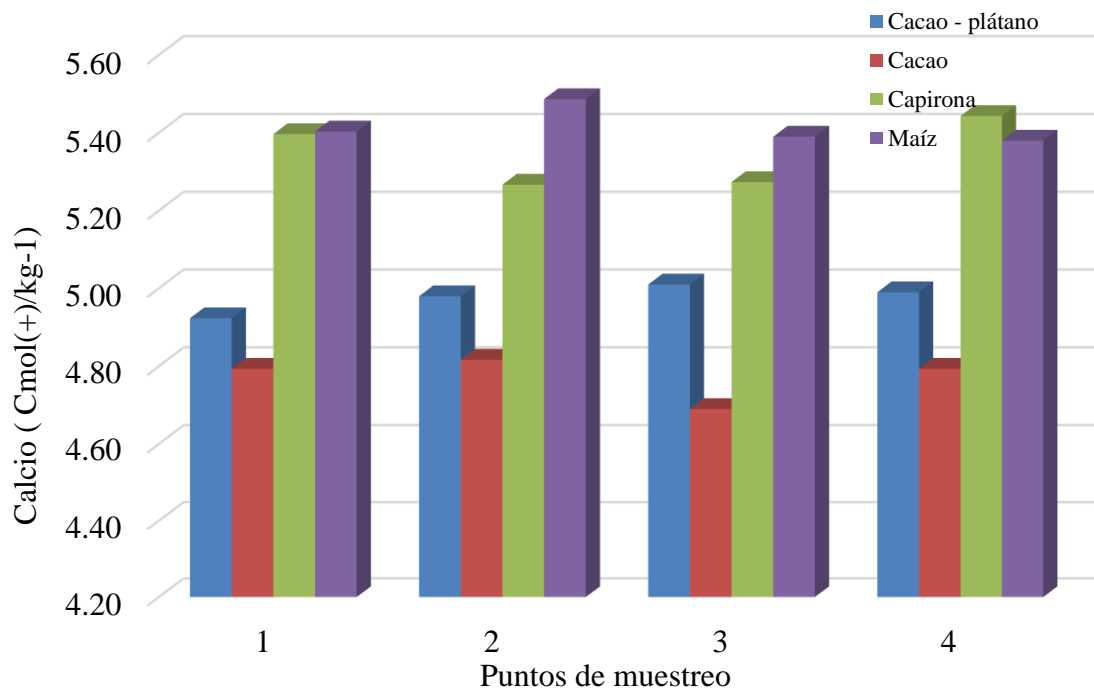


Figura 12. Valores para el calcio en los tres sistemas de uso del suelo

4.1.2.8. Magnesio

Los valores determinados en la variable de calcio del suelo (tabla 29 y figura 13), el mayor valor en los tres sistemas de uso lo presenta el sistema de uso con maíz con 0,851 Cmol(+)/kg-1 seguido del sistema de uso con capirona con 0,696 Cmol(+)/kg-1, y el menor valor lo presenta el sistema de uso con cacao con 0,607 Cmol(+)/kg-1, estos valores tienen relativa homogeneidad, según el coeficiente de variación en los tres sistemas de uso los valores se encuentran entre 2,286% llegando hasta el valor más bajo de 0,866%, al respecto SAGARPA (2012) reporta que el contenido de magnesio en suelos de los tres sistemas de uso presentan niveles bajo, visualizando que los sistemas de uso del fundo Liviac presentan poco contenido de magnesio.

Tabla 29. Valores para el magnesio (meq/100g suelo) en los tres sistemas de uso del suelo.

Muestra	0.607	0.569	0.696	0.851
	Cacao - plátano	Cacao	Capirona	Maíz
1	0.592	0.560	0.689	0.850
2	0.622	0.562	0.695	0.873
3	0.606	0.583	0.696	0.826
4	0.610	0.569	0.703	0.855
Promedio	0.607	0.569	0.696	0.851
Maximos	0.622	0.583	0.703	0.873
Mínimos	0.592	0.560	0.689	0.826

Desv. estándar	0.012	0.010	0.006	0.019
Coef. variación	1.990	1.828	0.866	2.286

El Magnesio es un compuesto poco considerado pero que participa en múltiples procesos fisiológicos tal como la afirma INTAGRI (2015), donde los síntomas de deficiencia se producen como manchas rojas en hojas viejas, aunque ayudado por el exceso de sombra como sucede en los tres sistemas evaluados, en el cual es más notorio cuando la luz es plena, como es el caso de los cultivos y en este caso requerirían mayores cantidades de este nutriente.

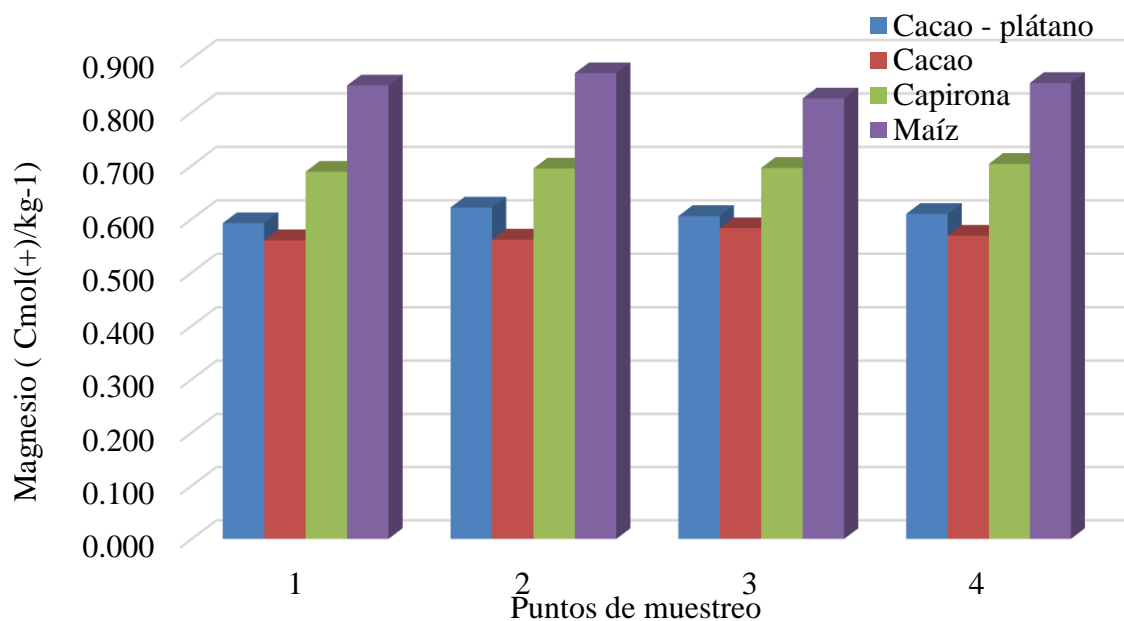


Figura 13. Valores para el magnesio en los tres sistemas de uso del suelo

4.2. Representar cartográficamente la distribución espacial de los indicadores químicos de los suelos en tres sistemas de uso por unidades fisiográficas en el fundo Liviac, caserío rio Negro, distrito Luyando

4.2.1. Macroelementos de los tres sistemas de uso del fundo Liviac

4.2.1.1. Distribución del pH en los tres sistemas de uso

Sánchez (2007) indica que el pH óptimo para el desarrollo de los cultivos se sitúa entre 6,5 y 7,5; valores fuera de este rango causarían toxicidad. Los datos en la Figura 14 muestran que el pH en los tres sistemas del Fundo Liviac se encuentra dentro de este rango óptimo, variando de moderadamente ácido a neutro, lo que implica que la calidad del suelo es adecuada para cualquier cultivo agrícola.

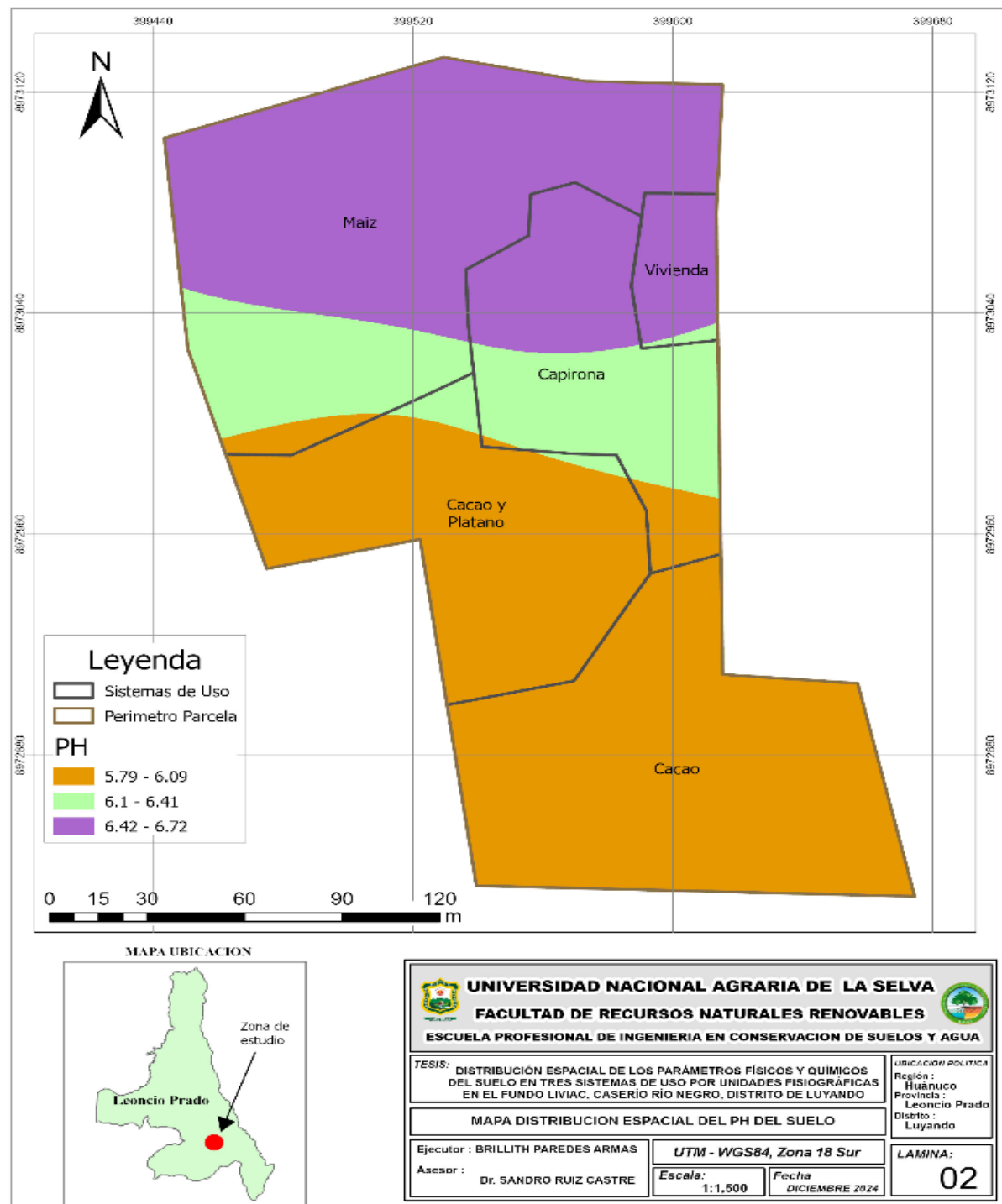


Figura 14. Mapa de pH del suelo de los tres sistemas de uso.

4.2.1.2. Distribución de la materia orgánica en los tres sistemas de uso

SAGARPA (2012) manifiesta que la MO es crucial para la fertilización del suelo, y se considera que un suelo tiene buena calidad cuando los niveles de MO están dentro de los rangos óptimos. En general los tres sistemas de uso del suelo en el fundo Liviac son suelos que presentan rangos medio de materia orgánica, esto es al aumento de la CIC, con una regulación del pH, reteniendo la humedad y contribuyendo con la estabilidad de

suelos debido a la aglutinación de las partículas para formar los agregados o también debido a la presencia de rocas calizas presentes en las partes altas.

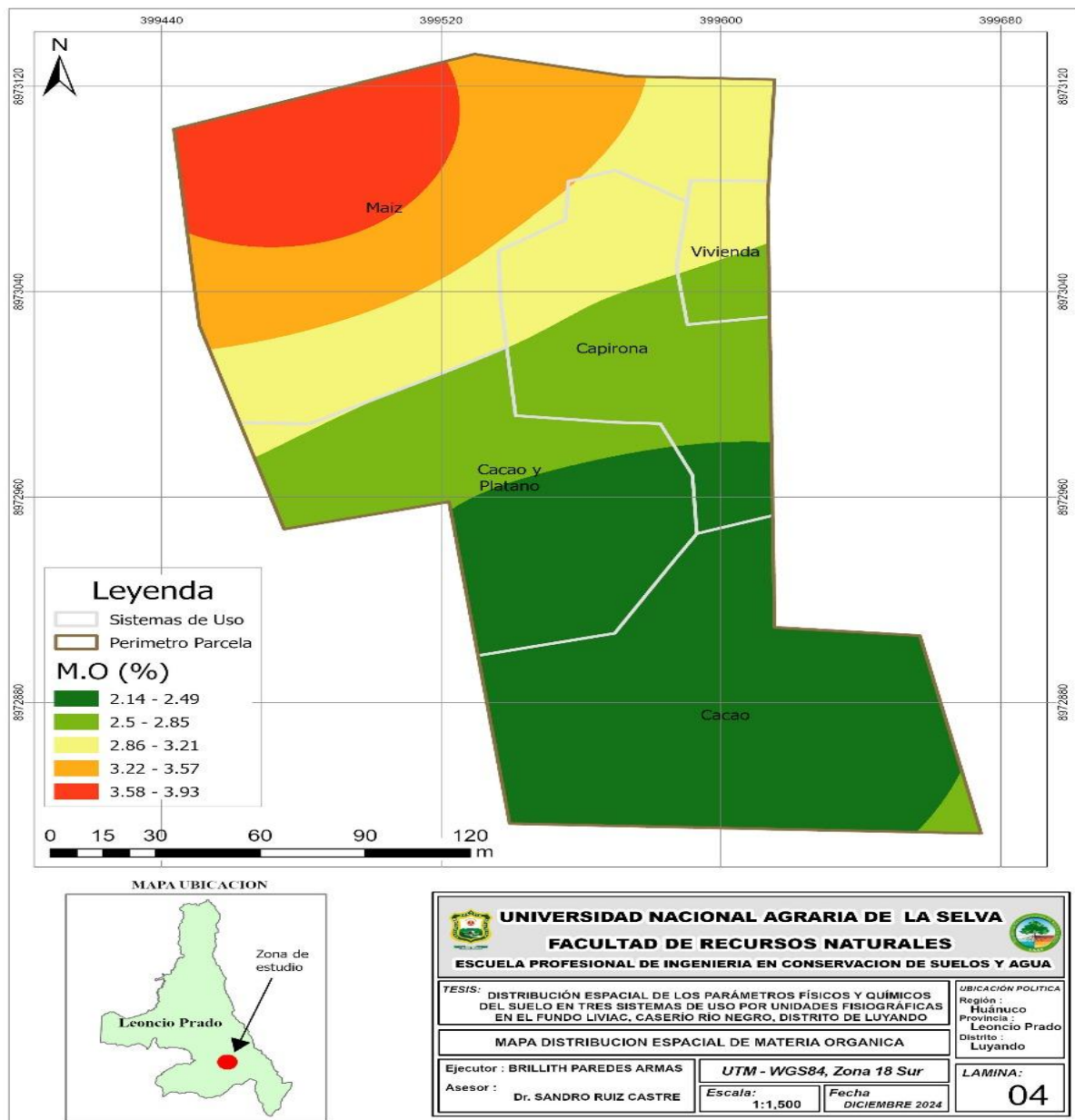


Figura 15. Mapa de Materia orgánica del suelo en los tres sistemas de uso.

4.2.1.3. Distribución del nitrógeno en los tres sistemas de uso

Navarro (2003) indica que el N cambia más en proporción en la tierra que otros componentes esenciales para la evolución vegetal, también absorbidos en la tierra, para el caso de la investigación presenta un nivel medio. Para SAGARPA (2012) el nitrógeno es absorbido por las raíces generalmente en forma de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+).

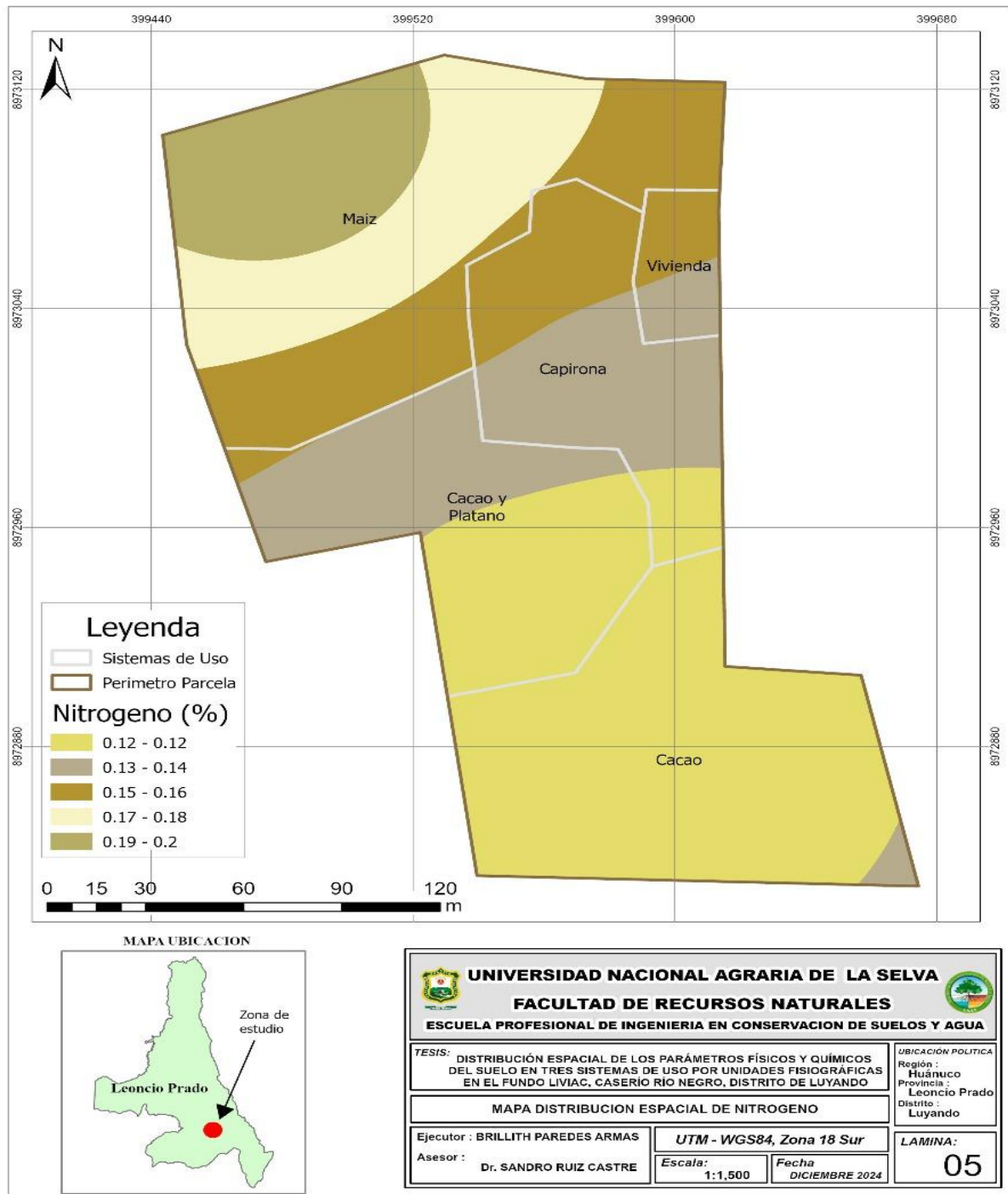


Figura 16. Mapa de Nitrógeno del suelo en los tres sistemas de uso.

4.2.1.4. Distribución del fósforo en los tres sistemas de uso

Munera & Meza (2012) destacan que el fósforo, siendo poco móvil, es uno de los 17 nutrientes esenciales para el progreso de cultivos. Sus funciones son insustituibles y, para un crecimiento y reproducción óptimos, las plantas necesitan un adecuado suministro de fósforo, cuyo contenido total en el suelo varía entre 0.2 y 1.5 g/kg. Los resultados

mostrados en la Figura 17, coinciden con el autor ya que la presencia de fósforo se encuentra dentro de un nivel de concentración medio.

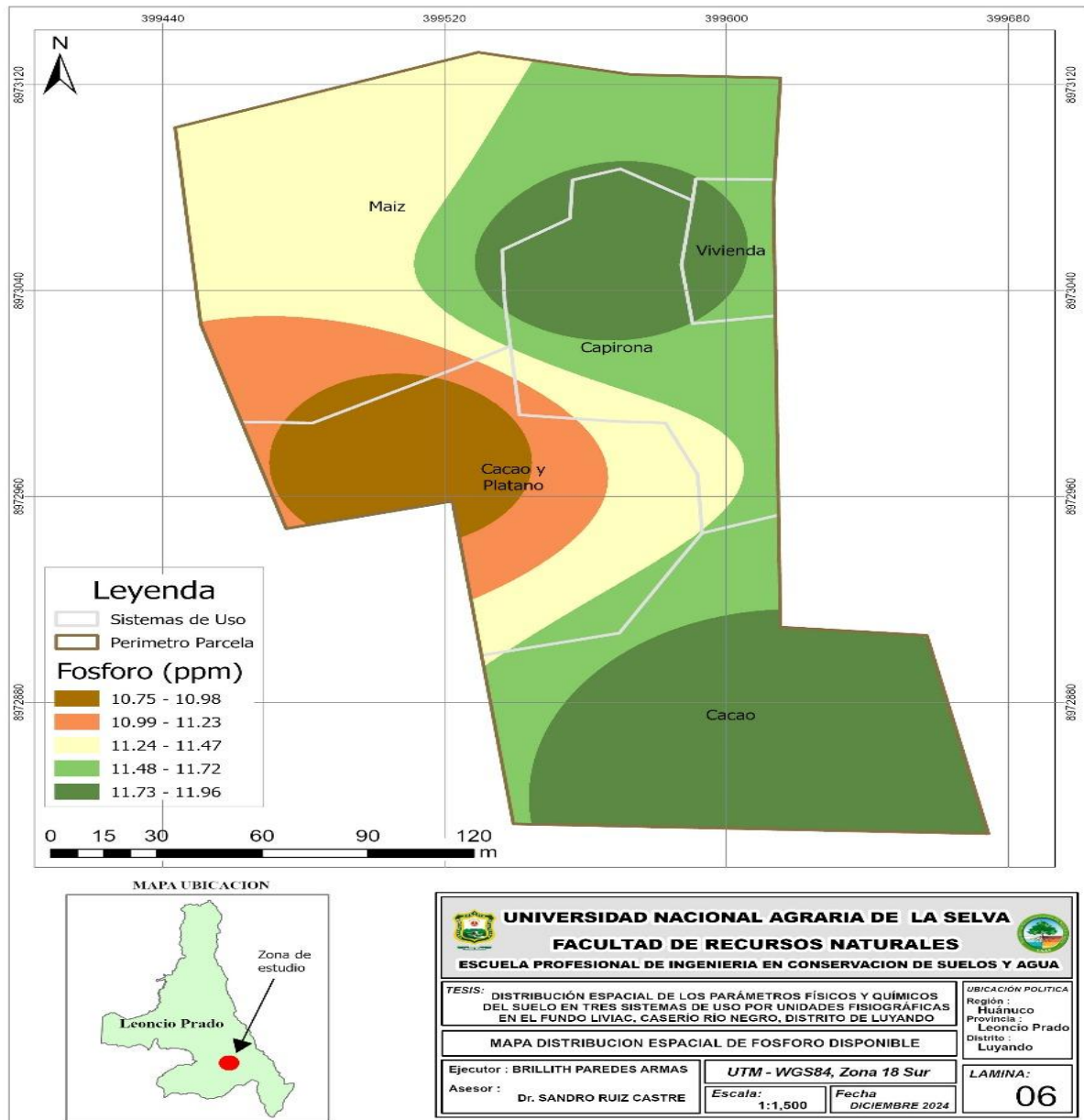


Figura 17. Mapa de Fósforo disponible del suelo en los tres sistemas de uso.

4.2.1.5. Distribución del Potasio en los tres sistemas de uso

SAGARPA (2012) menciona que el K es uno de los nutrientes minerales más requeridos por los cultivos. Este elemento es absorbido en forma de catión K^+ desde la solución del suelo. La proporción de K en la solución depende de la liberación del K intercambiable, generalmente presente en el entorno de las arcillas. Para el caso de la investigación presenta una textura franca y presenta un nivel bajo.

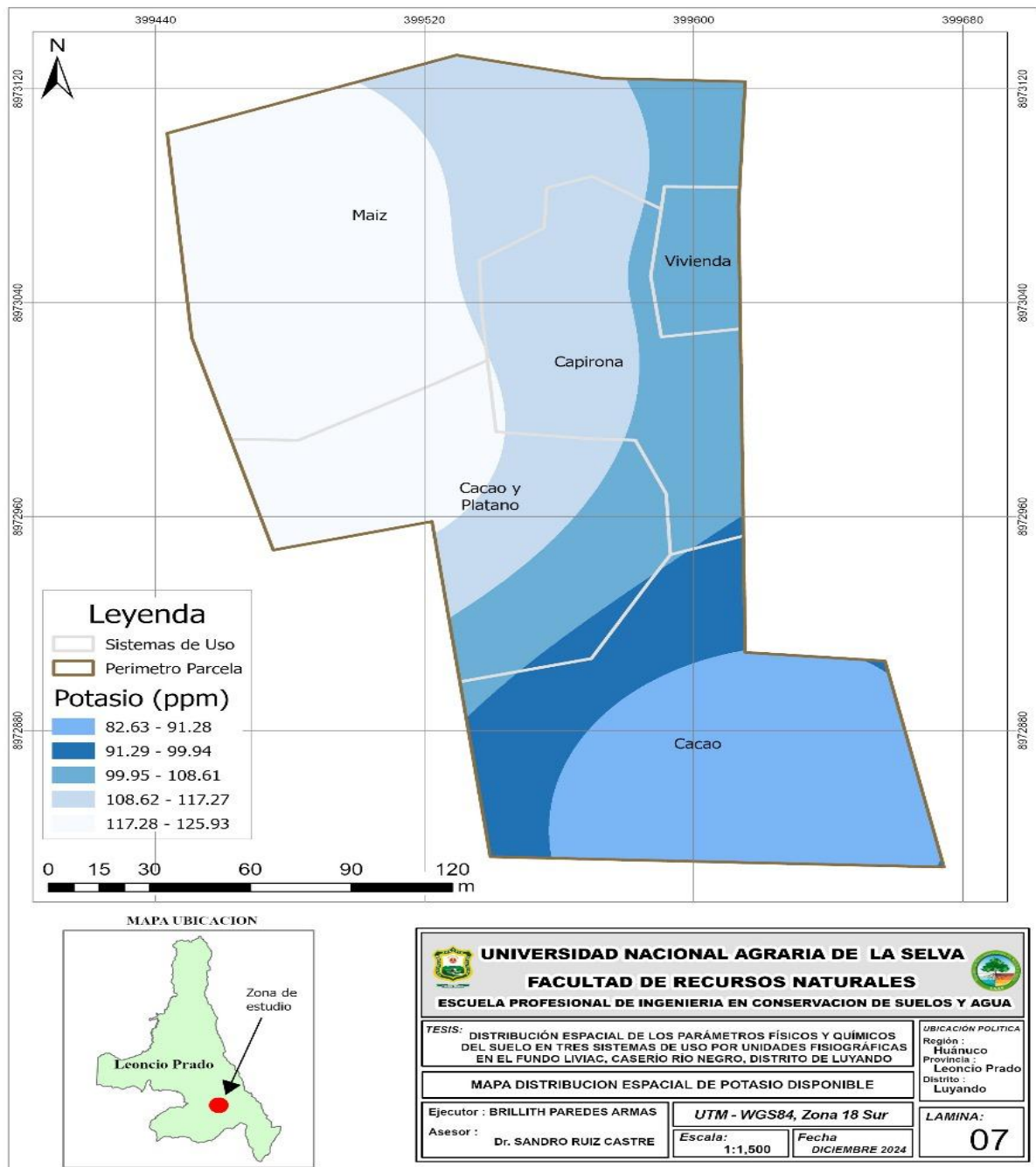


Figura 18. Mapa de Potasio disponible del suelo en los tres sistemas de uso.

4.2.1.6. Distribución de la capacidad de intercambio catiónico en los tres sistemas de uso

Alemán-Montes et al. (2019) indican que la fertilidad del suelo se incrementa con una mayor CIC, ya que una alta CIC permite un mayor almacenamiento de iones nutritivos. Según la Figura 19, los tres sistemas de uso presentan niveles bajos en este aspecto.

La FAO (2015) resalta la importancia agronómica de medir la CIC,

considerando que el suelo actúa como reserva de nutrientes, y que una mayor CIC favorece el depósito de iones nutritivos. Sin embargo, en esta investigación no se observa tal depósito.

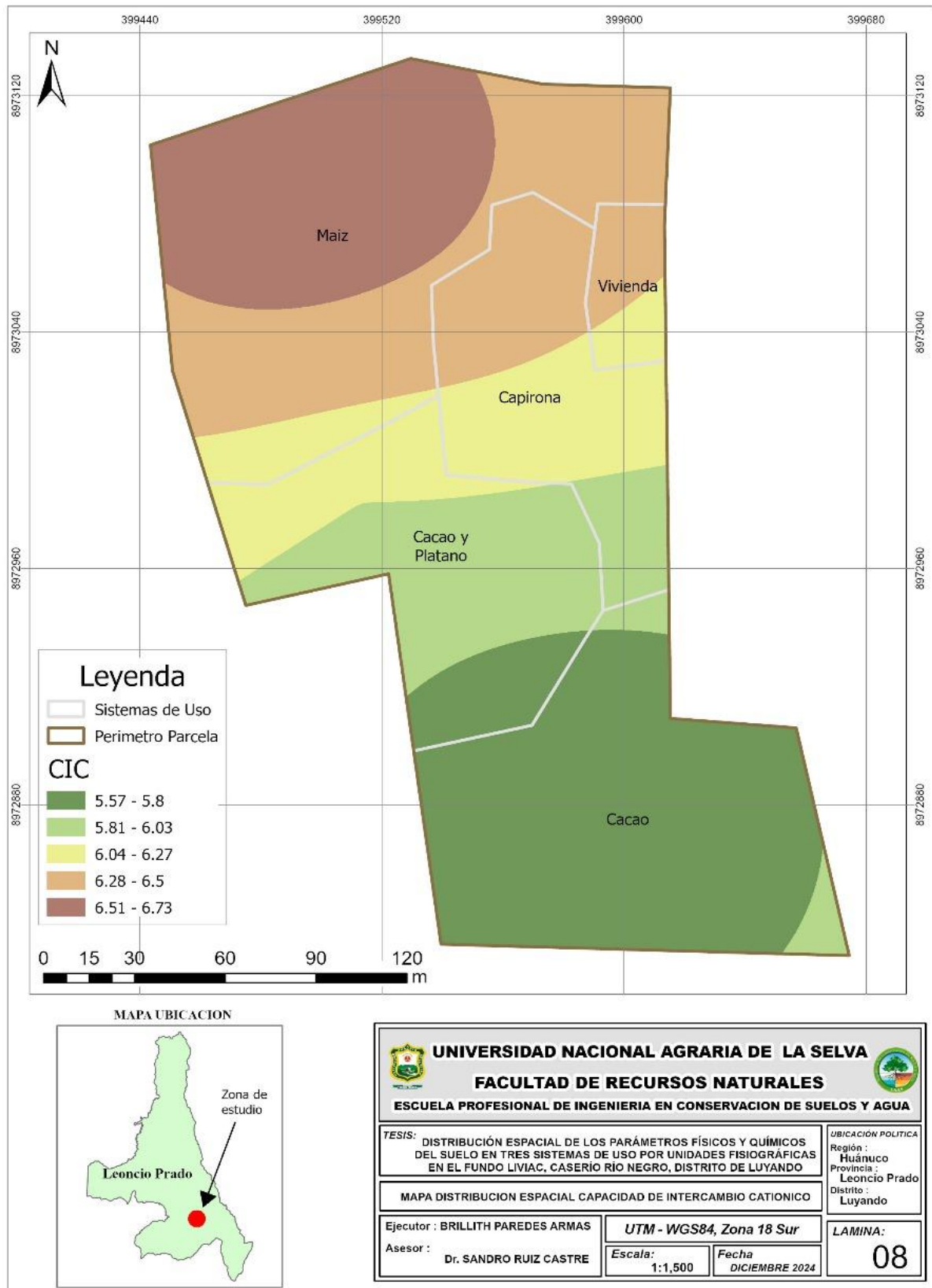


Figura 19. Mapa de Capacidad de Intercambio Catiónico del suelo en los tres sistemas de uso.

4.2.1.7. Distribución de la Conductividad Eléctrica en los tres sistemas de uso

Barrezueta et al. (2017) indican que todos los suelos contienen sales, esenciales para el crecimiento de cultivos. Por lo tanto las sales excesivas puede inhibir este desarrollo al alterar el equilibrio suelo-agua y afectar la actividad vegetal y microbiana, así como causar salinización y erosión del suelo. Según la Figura 20, la CE en los tres sistemas de suelo, con valores por debajo de 1.0, sugiere que el efecto de las sales es mínimo.

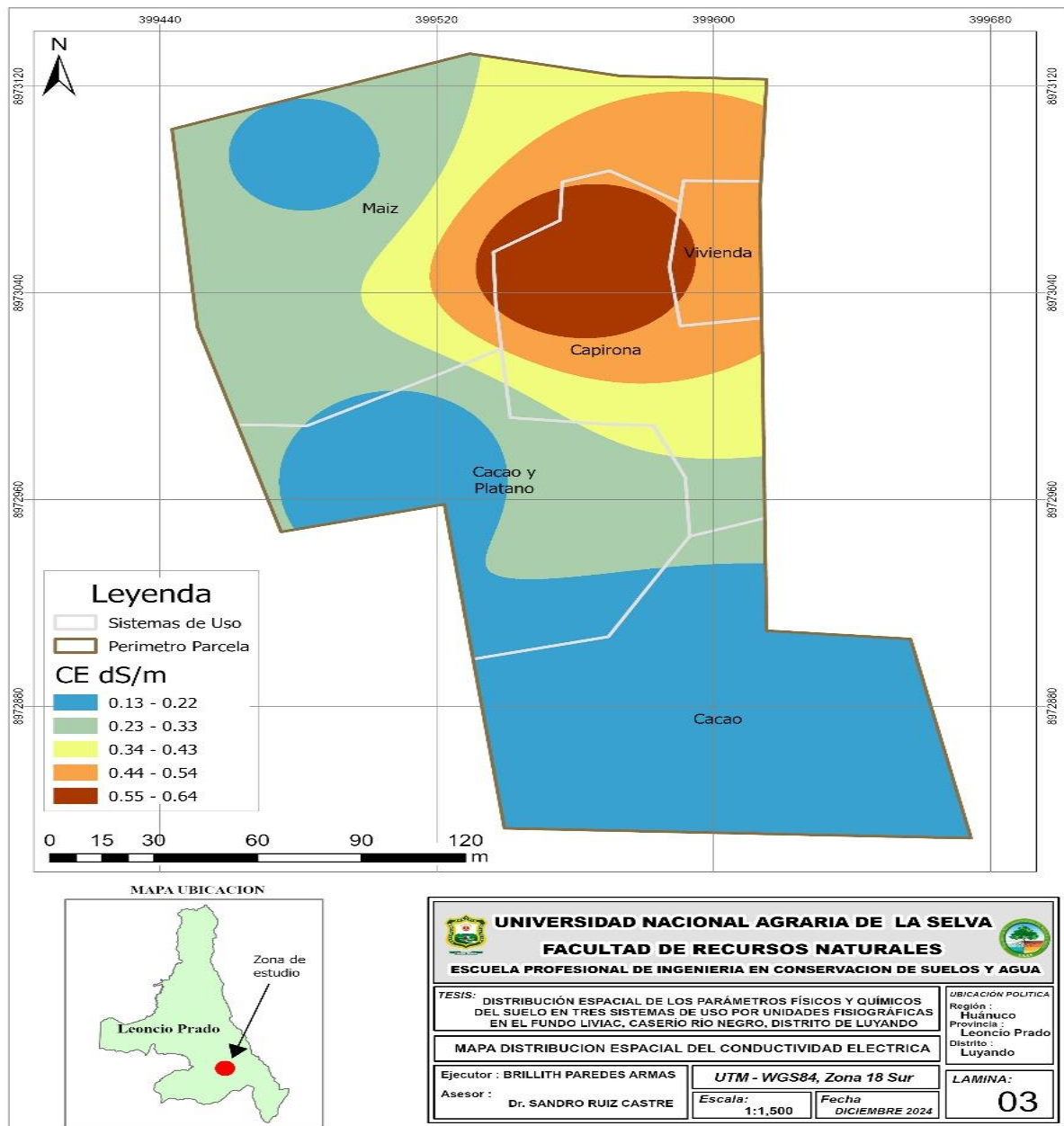


Figura 20. Mapa de Conductividad Eléctrica del suelo en los tres sistemas de uso.

4.2.2. Microelementos del suelo en los tres sistemas de uso del fondo Liviác

4.2.2.1. Distribución del Calcio en los tres sistemas de uso

El calcio intercambiable, según SAGARPA (2017), es un nutriente relativamente mayor en tierras de regiones semiáridas, aunque típicamente se muestra en formas químicas de baja solubilidad, limitando su disponibilidad en la solución del suelo. A pesar de ser el catión más cuantioso en el complejo de cambio, su proporción utilizable varía según el grado de saturación. Los resultados de la Figura 21 indican que el nivel de calcio oscila entre bajo y medio.

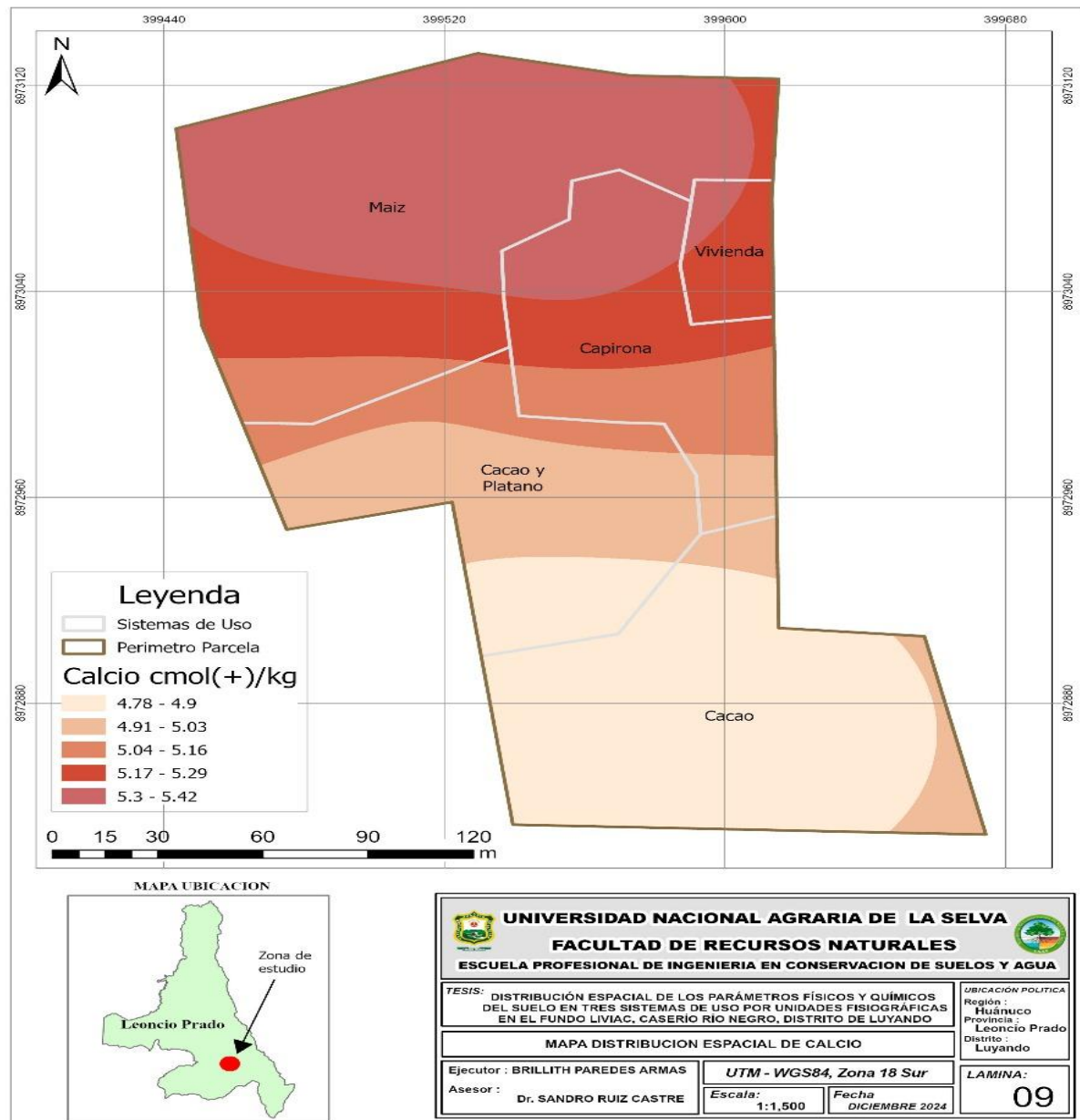


Figura 21. Mapa de Calcio en el suelo en los tres sistemas de uso.

4.2.2.2. Distribución del Magnesio en los tres sistemas de uso

Cakmak, & Yazici (2010) describen que el Mg es un compuesto esencial para los cultivos. Es fundamental para una amplia gama de funciones en los vegetales. Los resultados mostrados en la Figura 22, indican que se encuentran dentro de los niveles Bajo.

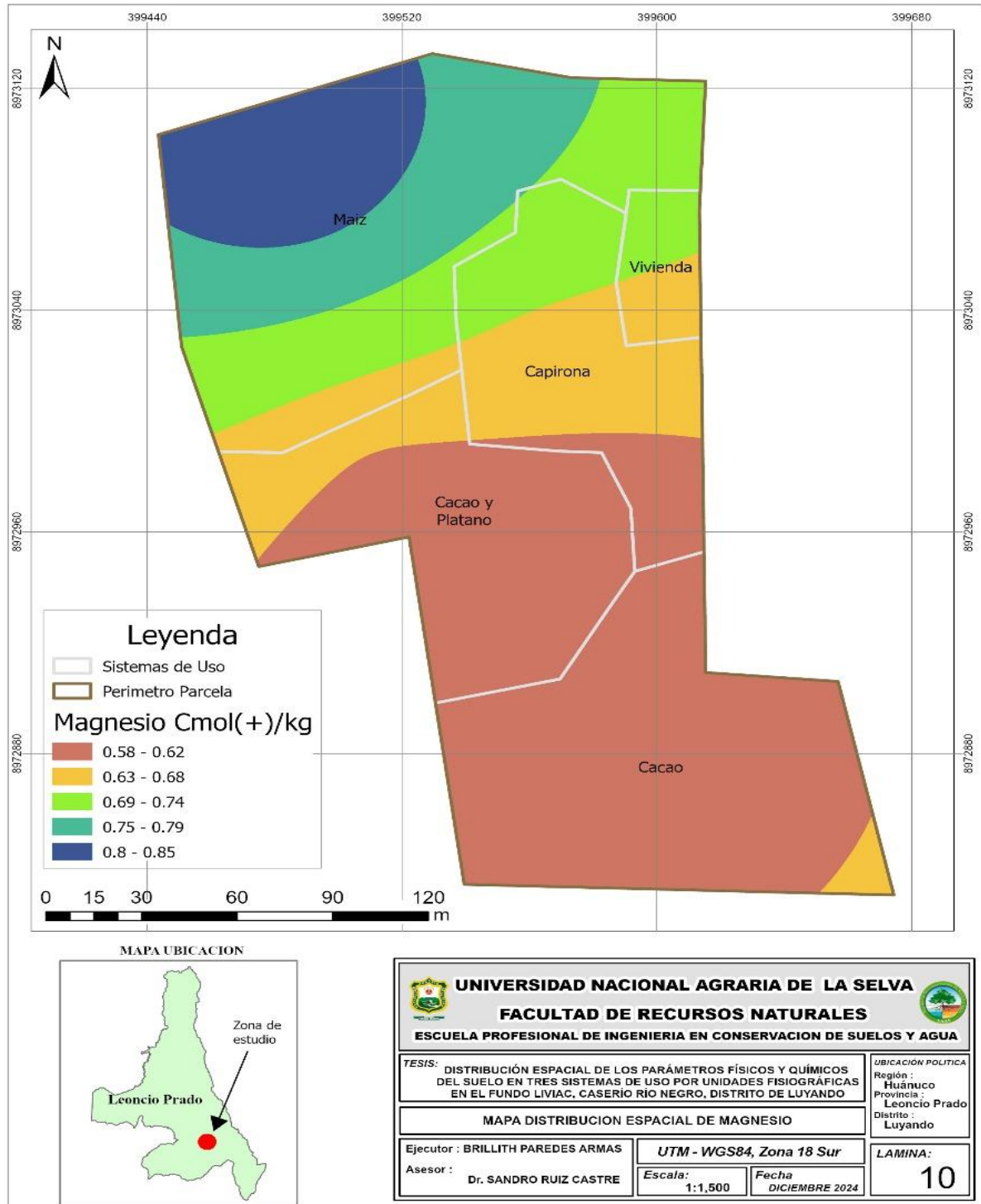


Figura 22. Mapa de Magnesio del suelo en los tres sistemas de uso.

4.2.2.3. Distribución del Potasio en los tres sistemas de uso

El K en el suelo se presenta como K⁺ en solución (intercambiable), K fijado (no intercambiable) y K estructural (no intercambiable) (Conti, 2004). Los resultados de la Figura 23 indican niveles muy bajos.

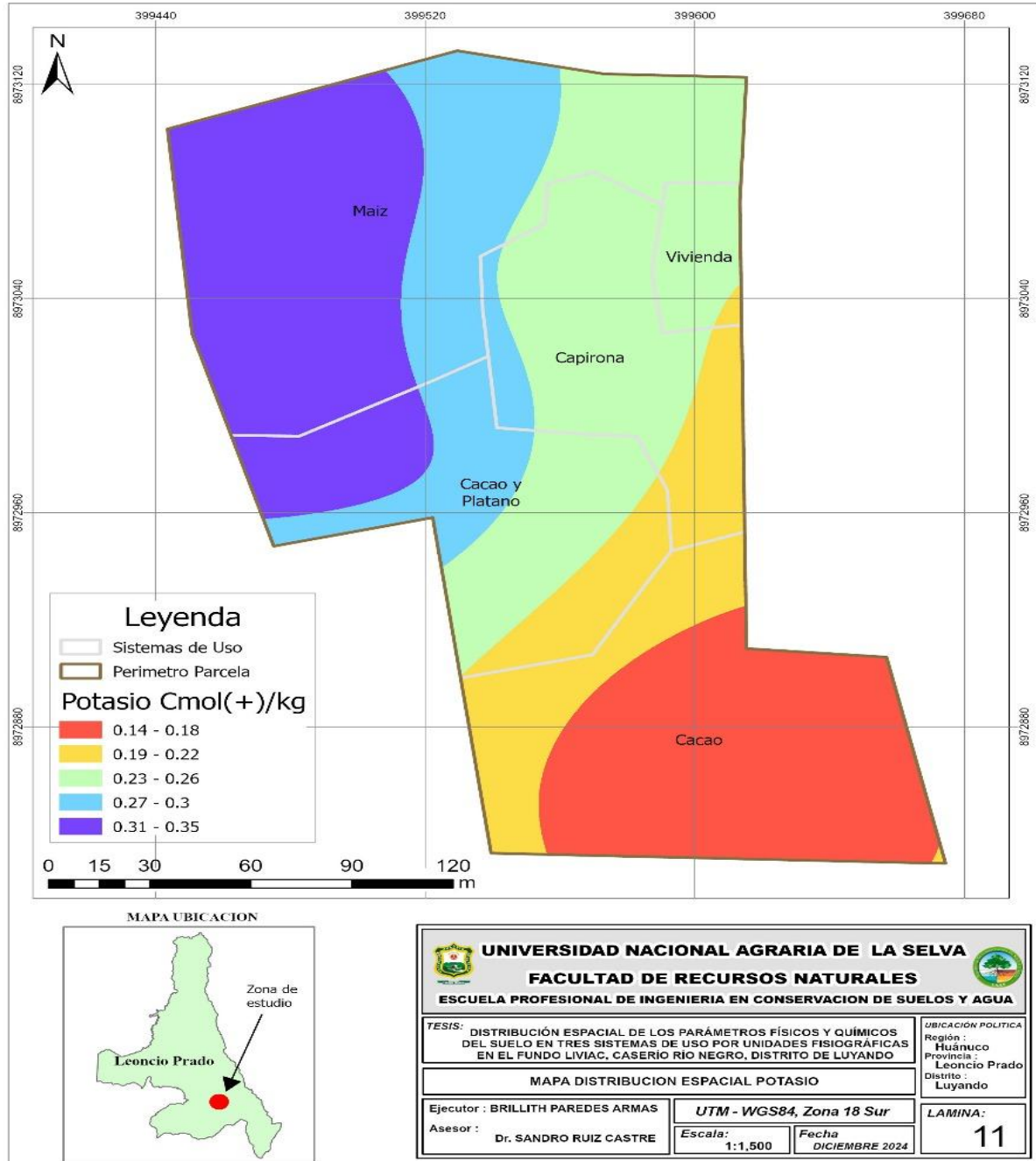


Figura 23. Mapa de Potasio en el suelo en los tres sistemas de uso.

4.2.2.4. Distribución del Sodio en los tres sistemas de uso

SAGARPA (2012) indica que, aunque el Na no es un nutriente esencial, puede sustituir al K en algunos casos. Muchos cultivos tienen mecanismos que limitan la absorción y translocación de sodio a las hojas, previniendo síntomas de toxicidad, al

acumularse en los tallos, troncos y raíces. Los síntomas en las hojas se manifiestan como manchas necróticas intervenales. Sin embargo, el exceso de Na provoca deficiencias de otros cationes como K, Ca y Mg (SAGARPA 2012). La investigación, ilustrada en la Figura 24, muestra niveles muy bajos de sodio en los tres sistemas, lo que indica la ausencia de síntomas de toxicidad.

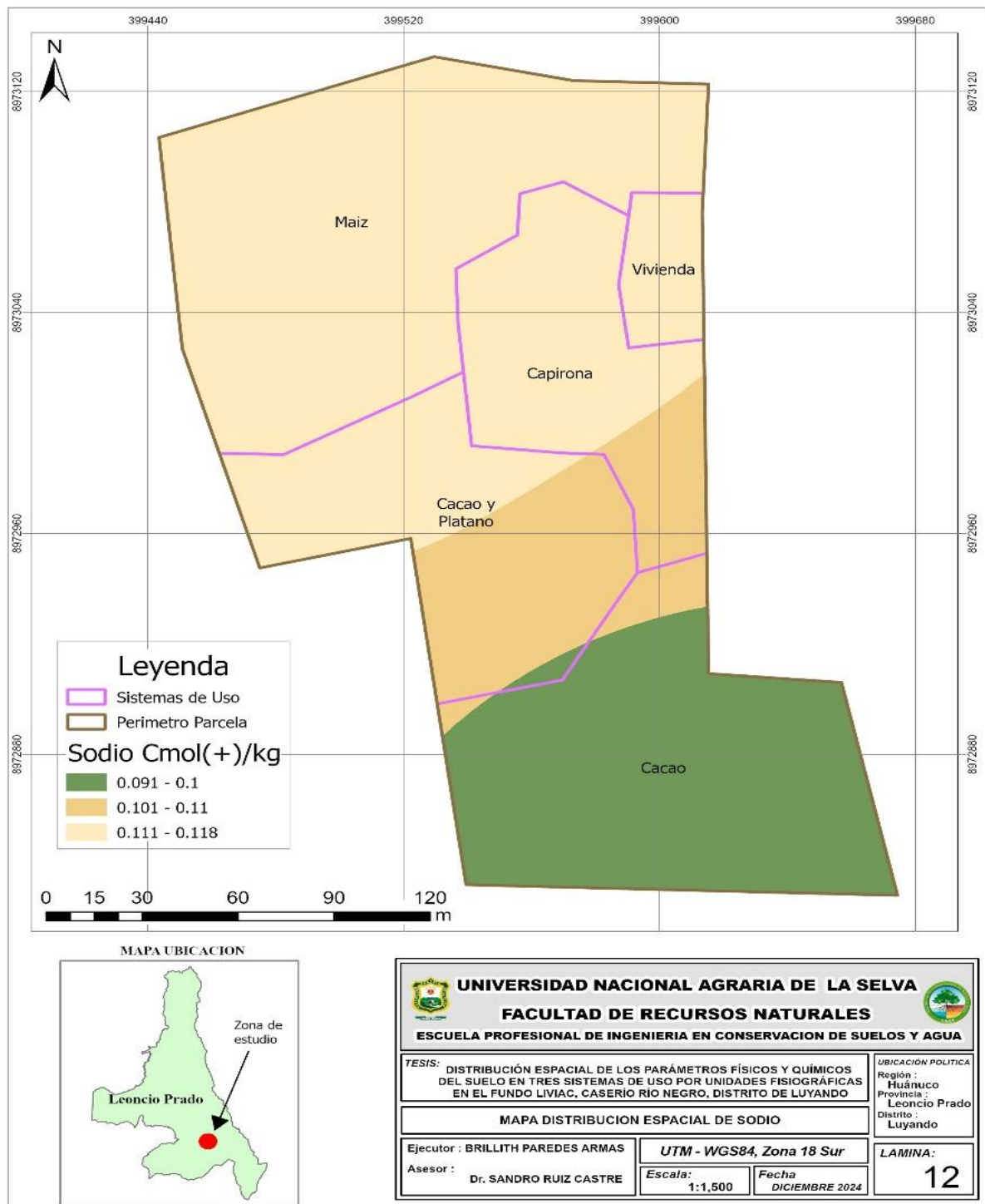


Figura 24. Mapa de Sodio en el suelo en los tres sistemas de uso.

V. CONCLUSIONES

1. Los suelos del fundo Liviac presentan textura franca, densidad aparente aceptable y resistencia mecánica baja, lo que favorece su manejo agrícola. Los niveles de materia orgánica, nitrógeno y fósforo son medios, mientras que potasio y capacidad de intercambio catiónico son bajos, lo que podría afectar la fertilidad del suelo.
2. La distribución espacial de los macroelementos muestra un pH adecuado para el desarrollo de cultivos, pero la baja disponibilidad de calcio, magnesio y potasio podría limitar la productividad. La conductividad eléctrica es despreciable, y no se presentan niveles de toxicidad por sodio en ninguno de los sistemas de uso.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Realizar otras investigaciones incluyendo más parámetros fisicoquímicos, así como también los microbiológicos del suelo que sean evaluados en temporada seca y lluviosa con la finalidad de determinar si existen variaciones.
2. Se recomienda realizar estudios complementarios en diferentes épocas del año e implementar estrategias de fertilización orgánica para mejorar la calidad del suelo.

VII. REFERENCIAS

- Acevedo, E., Carrasco, M., León, O.; Silva, P., Castillo, G., Ahumada, I., Borie, G., González, S. (2005). Informe de criterios de calidad de suelo agrícola. Servicio Agrícola y Ganadero, Chile. 205 pp. USDA, (<http://soils.usda.gov/sqi/>).
- Acevedo, J., Martínez, E. (2003). Sistema de labranza y productividad de los suelos. Serie ciencias agronómicas.
- Alemán-Montes, B., Búcaro-Gonzales, A., Henríquez-Henríquez, C., y Largaespada-Zelaya, K. (2019). Mapeo digital de suelos agrícolas en la región Occidental del Valle Central de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 10 p. file:///C:/Users/UNAS/Downloads/Dialnet-MapeoDigitalDeSuelosAgricolasEnLaRegionOccidentalD-6973067.pdf
- Altieri, M. (1997). *Agroecología; Bases científicas para una agricultura sustentable*. Ed. Centro de Investigación, Educación y Desarrollo. 2ed. Lima, Perú.
- Alvarado A., Raigosa, J. (2007) *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales*. Centro de Investigaciones Agronómicas Universidad de Costa Rica San José, Costa Rica pp 83.
- Aparicio-Tejos, P., C. Arrese-Igor y M. Becama. (2000). Fijación de nitrógeno. In: J. Azcon-Bietos y M. Talón (eds.). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Mc Graw Hill. Barcelona. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=604625&pid=S1316-3361200300020000400001&lng=es.
- Arciniegas, E. P., y Gómez, N., S. (2018). Variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos, con diferentes sistemas de manejo. [Tesis de grado. Universidad de los Llanos]. Villavicencio – Puerto López. Colombia. 45 p. <https://repositorio.unillanos.edu.co/server/api/core/bitstreams/6c44dbde-e76a-4f5e-aa9d-d84491836a27/content>
- ArcGIS, (2020). Análisis espacial. En ArcGIS Pro. Obtenido de: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/analysis/introduction/spatial-analysis-in-arcgis-pro.htm>
- ArcGISMap (2016). <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/extensions/geostatistical-analyst/deterministic-methods-for-spatial-interpolation.htm>
- Arévalo, G.E., Gauggel, C.A. (2014). Manual de laboratorio de manejo de ciencia de suelos y aguas. EAP el Zamorano, Honduras. p 79.
- Arévalo, G. E., M. Sánchez. (2014). *Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos de Zamorano*. Documento Interno de trabajo. Zamorano, Honduras. 10 p.
- Arun-Prasad, N., T. K. Kapoor, P. Khatin, J. Chouham y A. Bhowmick. 1990. Effect of salts on the soil reaction and growth and dry matter yield of *Leucaena leucocephala* and *Acacia*

- auriculiformis in pot cultures. *Indian Forests* 116 (3): 227-232.
- Azañero, A. L., Ñique, A. M. y Florida, R. N. (2020). Calidad del suelo en diferentes sistemas de uso en selva alta de Huánuco, Perú. Artículo original. *Revista Tayacaja* 3(1). ISSN: 2617 – 9156, 112 – 125. DOI: <https://doi.org/10.46908/rict.v3i1.75>.
- Azañero, A. L. (2016). Calidad del suelo en tres sistemas de uso en la localidad de río Espino - Monzón. [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María Perú.
- Barbaro, L., Karlanian, M., Mata, D. (s.d). Importancia del pH y la conductividad eléctrica en los sustratos para las plantas. INTA. 11p. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_importancia_del_ph_y_la_conductividad_elctrica.pdf.
- Barrezueta, S., PAZ, A., Chabla, C. (2017). Determinación de indicadores para calidad de suelos cultivados con cacao en provincia de El Oro-Ecuador. Ecuador. 3(1).
- Bautista, C., Etchevers, B., Del Castillo, R., Gutiérrez, C. (2004). La calidad de los suelos y sus indicadores. <http://www.aeet.org/ecosistema/>.
- Bautista-Cruz, A., y J. D. Etchevers B. (2014). Una Revisión sobre los Conceptos de la Calidad del Suelo: Sus Indicadores e Índices. Editorial Académica Española. <https://www.eae-publishing.com/catalogue/details/es/978-3-8473-6509-9/una-revisi%C3%B3n-sobre-los-conceptos-de-la-calidad-del-suelo>
- Bazán, R. (1996). Manual para el Análisis Químico de Suelos, Aguas, Plantas. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria la Molina, Fundación para el Desarrollo Agrario.
- Bazán, T. (2017). Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. Universidad Nacional Agraria la Molina, Instituto Nacional de Innovación Agraria. Lima Perú. 92 p. Recuperado de http://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/504/1/Bazan-Manual_de_procedimientos_de_los.pdf
- Bosch Mayol, M. (2012). Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo. *Ciencia del suelo*, 30(2). https://www.researchgate.net/profile/Virginia-Aparicio/publication/285773017_Relationship_between_spatial_variability_of_electrical_conductivity_and_soil_sodium_content/links/5b97ef60a6fdcc59bf85db21/Relationship-between-spatial-variability-of-electrical-conductivity-and-soil-sodium-content.pdf .
- Brady, N and Weil, R. (2002). Soil acidity: Calcium and Magnesium as plant nutrients Cap 9:11 pg. 404- 410.
- Búcaro, JA. (2017). Modelización y mapeo digital de suelos en la cuenca del lago de Atitlán, Guatemala. Tesis de maestría, San José, Costa Rica, UCR. 101 p. file:///C:/Users/UNAS/Downloads/Dialnet-

- MapeoDigitalDeSuelosAgricolasEnLaRegionOccidentalD-6973067%20(2).pdf
- Cakmak, I. and A.M. Yazici. (2010). Magnesium: Forgotten elements in Crop Production. *Better Crops* 94(2):23-25. <https://www.compo-expert.com/sites/default/files/2020-07/Journal%20Nutrici%C3%B3n%20Mineral.pdf>.
- Calderón, F. (1999). Metodologías para el análisis químico del suelo. Labs.
- Carbajal, Y., Escobar, J., Samboni, N. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímico como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación*. Bogotá, Colombia.
- Chen, Z. (2000). Relationship between heavy metal concentrations in soils of Taiwan and uptake by crops. FFTC. <http://www.fftc.agnet.org/>.
- Chica J. A. (2018). Interpolación Spline y aplicación a las curvas de nivel. [Grado de Matemático. Universidad de Barcelona]. 54 p. <https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/122512/2/memoria.pdf>
- Christensen, B.T. 1992. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Adv. Soil Sci.* 20:2-38. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=246210&pid=S0365-2807200200020001100005&lng=es.
- Cobeñas, A., & Guerrero, J. (2018). Caracterización de la pectina obtenida a partir de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante variación del ácido y temperatura [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Tumbes. En Repositorio UnTumbes. [http://repositorio.untumbes.edu.pe/bitstream/handle/UNITUMBES/1042/QUILICHE CABANILLAS%20IRMA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.untumbes.edu.pe/bitstream/handle/UNITUMBES/1042/QUILICHE%20CABANILLAS%20IRMA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Comision Nacional para el Desarrollo y Vida Sin Drogas [DEVIDA]. (2015). Estrategia de Desarrollo Alternativo Integral y Sostenible. <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Proyeccion-Institucional/Encuentros-Regionales/2015/huanuco/eer-huanuco-2015-isla.pdf>
- Corwin, D.L.; Loague, K.; Ellsworth, T.R. (1999). Introduction: Assessing non-point source pollution in the vadose zone with advanced information technologies. In: Corwin, D.L.; Loague, K.; Ellsworth, T.R. eds. *Assessment of Nonpoint Source Pollution in the Vadose Zone*. Geophysical Monograph Series. Vol. 108. AGU, Washington, D.C., USA, p.1- 20.
- Daza, J. (2018). Evaluación de indicadores de calidad del suelo y carbono orgánico en dos sistemas de uso de la tierra en el distrito Rupa Rupa – Tingo María. [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María Perú.
- Decreto N° 3516. (2003). Norma de Calidad Ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados. Quito, Ecuador.

- Delgado, R., España, M. (1999). Evaluación de la biomasa microbiana por los métodos fumigación-incubación y fumigación-extracción y su relación con la disponibilidad de nitrógeno en suelos de Venezuela. Instituto de Investigaciones en Recursos Agroecológicas. Apdo. 4846. Maracay 2101. Estado Aragua. Venezuela.
- Derrick, J. W. and D. C. Dumaresq. 1999. Soil properties under organic and conventional management in southern New South Wales. *Aust. J. Soil Res.* 37: 1047-1055. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&pid=S0187-5779201100030032500009&lng=en.
- Doran, J., Lincoln, N. (1999). Guía para la evaluación de la calidad del suelo. USDA, (<http://soils.usda.gov/sqi>).
- Doran, J.W. y Parkin, B.T. (1994). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Enciso, D. (2019). Distribución espacial de propiedades físicas del suelo y su influencia en el rendimiento de maíz bajo manejo conservacionista en Paraguay. [Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Asunción]. San Lorenzo. Paraguay. 74 p. chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/Tesis-Derlis%20Enciso.pdf?utm_source=chatgpt.com.
- Fassbender, O., Bornemisza, I. (1987). Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina. 2 ed. IICA. San José, Costa Rica.
- Freddi, O.S.; Carvalho, M.P.; Veronesi Jr.V.; Carvalho, G. (2006). J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. *Eng. Agríc. Jaboticabal*, v. 26, n. 1, p.113-121.
- Folegatti, M.V.; Brasil, R.P.C. Do; Blanco, F.F. (2001). Sampling equipment for soil bulk density determination tested in a Kandiualfic Eutradox and a Typic Hapludox. *Scientia Agricola* 58: 833-838.
- Forsythe, W. (2002). Parámetros ambientales que afectan la temperatura del suelo en Turrialba, Costa Rica y sus consecuencias para la producción de cultivos. *Agronomía Costarricense* 26(1): 43-62. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43626105>.
- García, L. (2014). Determinación de la influencia del abono orgánico (tropimax) en las propiedades del suelo y en el crecimiento del pino chuncho (*Schizolobium amazonicum*). [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María Perú.
- García, Y., Ramírez, W. y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. Estación Experimental de Pastos y Forrajes “Indio

- Hatuey". Central España Republicana, CP 44280, Matanzas, Cuba.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001
- Grimm, R; Behrens, T. (2010). Uncertainty analysis of sample locations within digital soil mapping approaches. *Geoderma* 155:154-163.
- Guzmán, G., Gonzales, M., Sevilla, E. (2000). Introducción a la agroecología como desarrollo rural sostenible. Ed. Aedos S.A. Ediciones Mundi prensa. Madrid, España.
- Hang, S. (2014). Curso Edafo. Consultado 19 nov. 2023. Disponible en: http://blog.ucc.edu.ar/edafologia/files/2014/08/Teorico-2_Propiedades-fisicas_ucc_14.pdf.
- Hernández, R. (2007). Modelación Hidrológica En La Subcuenca Lempa Alto En Cooperación Con La Comisión Trinacional Del Plan Trifino, Universidad De El Salvador, Honduras Guatemala.
- Hernández, R., Fernández, C., Baptista, M.P. (2014). Metodología de la investigación. 6 ed. México, McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Hernández, J., Casanova, O. Y Zamalvide, J. (1988). Capacidad e suministro de potasio en suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay. Boletín de Investigación N° 19.
- Herrick, J.E., Jones, T.L. (2002). A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1320–1324.
- Hosokay, M. O. (2012). Calidad de suelos en diferentes sistemas de uso en Supte San Jorge – Tingo María. [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María Perú.
- Huamán, O. (2016). Indicadores de la calidad de suelos en tres sistemas de uso de la tierra, sector Shitari, Huamalíes. Tesis Ing. en Recursos Naturales Renovables, mención Conservación de Suelos y Agua. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. 73 p.
- Imhoff, S.; Silva, A.P.; Dias Junior M.S. & Tormena, C.A. (2001). Quantificação de pressões para o crescimento das plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:11-18.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA]. (2016). Buenas prácticas en la elaboración de mapas de suelos. Resiliencia y gestión integral de riesgos en la agricultura. Universidad de Costa Rica. Centro de Investigaciones Agronómicas. San José Costa Rica. IICA. ISBN: 978-92-9248-617-4. 21 p.
<https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/2488/BVE17028578e.pdf?sequence=>

1&isAllowed=y

- Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura [INTAGRI]. (2015b). Funciones del calcio (ca) en la nutrición de los cultivos. Serie Suelos. Núm. 09. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 3 p. <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/funciones-del-calcio-en-la-nutricion-de-los-cultivos>
- Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura [INTAGRI]. (2015c). El magnesio en el suelo y su efecto en las raíces. Serie Suelos. Núm. 11. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 3 p. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/el-magnesio-en-el-suelo-y-su-efecto-en-las-raices>
- ISO 14055-1. (2017). Norma Internacional de sistema de Gestión Ambiental- Directrices para el establecimiento de buenas prácticas para combatir la degradación y la desertificación de los suelos. Ginebra, Suiza.
- Iqbal, j., Thomasson, J., Jenkins, J., Owens, P., Whisler, F. (2005). Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1338-1350 p. https://www.agry.purdue.edu/staffbio/Soil_Spatial_SSSAJ.pdf
- Janzen, H.H. y Pierce, F.J. (1997). Concepts of soil quality and their significance. En *Soil quality for crop production and ecosystem health* (eds. Gregorich, E.G. y Carter, M.). Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.
- Jaramillo, D. (2003). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.
- Jaurixje, M., Torres, D., Mendoza, B., Henríquez, M., Contreras, J. (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. <https://ve.scielo.org/pdf/ba/v25n1/art06.pdf>.
- Jenkinson D. (1992). *La Materia Orgánica del Suelo: Evolución*. En: Wild A. *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas*. Madrid. Mundi-Prensa.
- Jiménez, R. y González, V. (2006). *Edafología; La calidad de suelos como medida para su conservación*. Universidad Autónoma de Madrid. Dpto. de Geología y Geoquímica. Madrid, España, Vol. 13.
- Junco, w., Rengifo, J., Rengifo, A. (2017). Distribución espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo en la microcuenca río Bella – Distrito Mariano Dámaso Beraún – Las Palmas <file:///C:/Users/UNAS/Downloads/171-541-1-PB.pdf>
- Karlen, D., Mausbach, M., Doran, J, Cline, R., Harris, R. y Schuman, G. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science*

- Society of America Journal, 61(1), 4 - 10.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>
- Klein, VA. (2008). Física del suelo. Brasil, BR. Editorial UPF Universidad de passo Fundo. 212 p.
- Lagacherie, P. (2008). Digital Soil Mapping, A State of the Art. In Hartemink, A; McBratney, A; Mendonça-Santos (eds.). M. Digital Soil Mapping with Limited Data Berlin, Alemania, Springer. p. 3-14. <https://hal.science/hal-00997791/document>.
- Lampurlanés, J., Cantero-Martínez, C. (2003). Soil bulk density and penetra θ on resistance under different θ llage and crop management systems and their rela θ onship with barley root growth. Agron. J. 95, 526–536
- Larson, W.E., Pierce, F.J. (1991). Conservation and enhancement of soil quality. In: Evaluation for sustainable land management in the developing world, Vol. 2: Technical papers. Bangkok, Thailand: International Board for Research and Management, 1991. IBSRAM Proceedings N $^{\circ}$ 12(2).
- Ley N $^{\circ}$ 8. (2007). Ley de suelo. España.
- Leytón AA. (2003). Fertilidad de Suelos para una Agricultura Sostenible. Primera ed. Universidad Nacional Agraria la Molina, editor. Huancayo, Perú; 2003. 226 p. <https://es.scribd.com/document/587228403/General-i-Dad-Es>
- Ligier, H. (2014). La cartografía de suelos. Buenos Aires, Argentina, INTA. Consultado 1o oct. 2015. <https://es.slideshare.net/slideshow/cartografia-de-suelo-fca-2016/61621403>
- López, C. J. (2016). Distribución espacial de las propiedades químicas de los suelos en el distrito de Riego RUT. [Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia]. Palmira – Colombia. 96 p. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57874/Maestria2016-Carlos_Lopez-Biblioteca.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lozano, Z., R.M. Hernández, C. Bravo, C. Rivero, M. Toro y M. Delgado. 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. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=692411&pid=S1316-3361201600020000400020&lng=es.
- Luters, A. y Salazar, J.C. (2000). Soil quality test kit guide. Área de cartografía de suelos y evaluación de tierras. Instituto de suelos CRN-CNIA-INTA.
- Malone, B; Minasny. B; McBratney, A. (2017). Using R for Digital Soil Mapping. Switzerland, Springer. 262 p.

https://www.researchgate.net/publication/310650981_Using_R_for_Digital_Soil_Mapping

- Martínez, E. (2003). Reacción del suelo (pH). Rev. Batuco. Universidad de Chile. 1-34.
- Martínez, P. (2010). Forestal, informe temático. Proyecto Mesozonificación Ecológica y Económica para el Desarrollo Sostenible de la selva de Huánuco, convenio entre el IIAP, DEVIDA. Iquitos – Perú.
- Martínez, E., Rodríguez, A., y Soledad, M. (2015). Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. 43-47 p. <https://www.tierra-fertil.es/wp-content/uploads/2021/02/Dialnet-FertilidadDelSueloYParametrosQueLaDefinen-267902.pdf>
- Medina, R. (2022). Distribución y variabilidad espacial del pH y materia orgánica de los suelos de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. [Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Tlajomulco]. Jalisco. México. 57 p. file:///D:/ESCRITORIO%20JP_2022/TESIS%20PARA%20SUSTENTAR%20-%202022/TESIS%20PAREDES%20ARMAS%20BRILLITH%202023/TESIS%20PARA%20SUSTENTAR%20BRILLITH%20PAREDES%202024/TESIS%20MAE_Raul...pdf.
- Ministerio de Ambiente y Energía. [MINAE]. (2004). D.S. N°31849-MINAE-S-MOPT-MAG-MEIC. MINAE, (<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/cos77492.pdf>).
- Ministerio de Agricultura. [MINAG]. (2011). Cadena agropecuaria de papa. Manejo y fertilidad de suelos. Guía técnica de orientación al productor. Agroaldia, (http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manualesboletines/papa/manejo_yfertilidaddesuelos.pdf).
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). (2020). Producción nacional de cacao en grano creció en la última década a un promedio de 12.6% al año. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/institucion/midagri/noticias/305143-produccion-nacional-de-cacao-en-grano-crecio-en-la-ultima-decada-a-un-promedio-de-12-6-al-ano>
- Monge, E., Val, J., Sanz, M., Blanco, A., Montañés, L. (1994). El calcio nutriente para las plantas. Bitter pit en manzano. An.Estac. Exp. Aula Dei 21 (3): 189-201.
- Moscatelli, G., Sobral, R., Nakama, V. (2005). Nueva tendencia para conocer el estado de los suelos. INTA (<http://www.inta.gov.ar/>, Artículo).
- Munera, G. & Meza, D. (2012). El fosforo elemento indispensable para la vida vegetal. Universidad Tecnológica De Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/7377066a-bac4-4402-a306-eb45caa49d1c/content>.

- National Resource Conservation Soil [NRCS] (2004). What is soil quality. USDA, ([http://soils.usda.gov/sailsoil quality/what is/,pdf](http://soils.usda.gov/sailsoil%20quality/what%20is/.pdf)).
- Navarro, V. L., Florida, R. N. y Navarro, V. M. (2018). Sustancias húmicas y agregación en oxisol (Rhodic Eutrudox) con pasto brachiaria y otros sistemas de uso. *Livestock Research for Rural Development*, 30(8) artículo #137). Recuperado de <http://www.lrrd.org/lrrd30/8/nelino30137.html>.
- Navarro, G. (2003). *Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales en la vida vegetal*. 2 ed. Mundi Prensa, España.
- Nizama, K. M. (2015). Obtención y caracterización de pectina a partir de cáscara de cacao (*theobroma cacao L.*). Universidad Nacional De Piura, 1-110. <https://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/UNP/675/IND-NIZ-YAM-15.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Norris, D. (1958). Rhizobium needs magnesium not Calcium. Commonwealth Australia. Commonwealth and Industrial Research Organization. *Nature* 182: 734-736.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, [FAO]. (2019). Textura del suelo. <https://bit.ly/2MmvZe0>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, [FAO]. (2022). Levantamiento de suelos “Propiedades Químicas”. Portal de Suelos FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-desuelos/propiedades-del-suelo/propiedades-quimicas/es/>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, [FAO]. (1996). Indicadores de la calidad de la tierra y su uso para la agricultura sostenible y el desarrollo rural. Departamento de Desarrollo Sostenible de la FAO, Roma (Italia). Boletín de tierras y aguas de la FAO 5.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, [FAO]. (2015). Fertilidad del suelo. Conservación de los recursos naturales para una Agricultura sostenible. Consultado 21 nov. 2023. Disponible en: http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spganish/sf/soil_fertility.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, [FAO]. (2017). Propiedades Físicas del Suelo. Consultado 23 nov. 2023. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>.
- Parr, J.F.; Hornick, S.B.; Papendick, R.I. (1992). Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *Amer. J. Altern. Agric.* 7(1-2):5-11.

- Peralta, N., Costa, J., Balzarini, M., Angelini, H. (2013). Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the Southeastern Pampas. *Canadian Journal of Soil. Science*. En prensa
- Plan de Manejo Ambiental [PMA], (2013). Calidad del suelo. Proyecto “Instalación Central Térmica Quillabamba y Sistemas de Transmisión Asociado-Santa Ana, la Convención, Cuzco”. Informe Final. CESEL Ingenieros. <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGGAE/DGGAE/ARCHIVOS/PMA%20%20ELECTRICIDAD%20DEL%20PERU%20ELECTROPERU%20S.A/4.4.12.%20Calidad%20suelos.pdf>.
- Porta C.J., López-Acevedo R.M., Roquero D.C. (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. España. 3ª ed. 929 p. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=232838&pid=S0377-9424201100010001000011&lng=en.
- Portocarrero, J. (2013). Evaluación del efecto de tres sistemas de uso de la tierra sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en el caserío de Puerto Rico, distrito Nuevo Progreso. Tesis para optar título de Ing. Recursos Naturales Renovables – Mención Conservación de Suelos y Agua. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. 10 p.
- Reinert, D; Reichert, J; Silva. V. (2001). Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In: Carlesso, R.; Petry, M.T.; Rosa, G.M.; Ceretta, C.A. e ds. Irrigação poraspersão no Rio Grande do sul. Santa Maria, RS, p.165.
- Richardson, H; Hill, D; Denesiuk, D; Fraser, L. (2017). A comparison of geographic datasets and field measurements to model soil carbon using random forests and stepwise regressions (British Columbia, Canada). *GIScience & Remote Sensing* 24:1:19. https://www.researchgate.net/publication/315074702_A_comparison_of_geographic_datasets_and_field_measurements_to_model_soil_carbon_using_random_forests_and_stepwise_regressions_British_Columbia_Canada.
- Rivera, D. (2018). Efecto de diferentes sistemas de uso en las propiedades fisicoquímicas del suelo con el método SUSS; en el sector Papayal, Castillo Grande, Leoncio Prado – 2018. [Tesis Ing. conservación de suelos. Universidad Nacional Agraria de la Selva]. 102 p. https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1555/RCDA_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rodríguez H. (2011). Métodos de suelos y plantas Criterios de interpretación. Editorial. 31 p. https://www.researchgate.net/publication/270823604_Metodos_de_Analisis_de_Suelos

_y Plantas_Criterios_de Interpretacion

- Romig, D.E., Garlynd, M.J., Harris, R.F. y Mcsweeney, K. (1995). Howfarmers assess soil health and quality. *J. Soil Water Conservation* 50: 229- 236.
- Rosa, D. M., Pereira, N. L., Mauli, M. M., Piccolo, L. G. y Palczewski, P. F. (2017). Sustancias húmicas do solo cultivado con plantas de cobertura em rotação com milho e soja. *Revista Ciencia Agronómica*, 48(2): 221-230. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/rca/v48n2/1806-6690-rca-48-02-0221.pdf>.
- Ross, M. (2006). El magnesio en el cultivo del cereal. Disponible en www.kali-gmbh.com.
- Rucks, L; García, F; Kaplán, A; Ponce de León, J; Hill, M. (2004). Propiedades Físicas del Suelo. Montevideo, (UR). Facultad de Agronomía Universidad de la república dpto. Suelos y aguas. 16p. Consultado 16 oct.2023. Disponible en: <http://bibliofagro.pbwGorks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>.
- Salamanca J., A.; Sadeghian Kh., S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 56(4):381-397.
- Sánchez, J. (2007). Fertilidad de suelos y nutrición mineral de plantas. FERTITEC S.A. 19 p.
- Sandoval, E., M., J. Dörner F., O. Seguel S., J. Cuevas B., y D. Rivera S. (2012). Métodos de análisis físicos de suelos. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillán, Chile, número 5, 80 p.
- Sandoval, D; Mata, R. (2016). Mapa digital de suelos de Costa Rica. San José, Costa Rica, CIAUCR. Consultado 28 may. 2024. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/2488/BVE17028578e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Santiago-Mejía, B. E., Martínez-Méndez, M. R. Rubio-Granados, E., Vaquera-Huerta, H., Sánchez-Escudero, J. (2018). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en sistemas lama-bordo en Oaxaca, México Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en sistemas lama-bordo en Oaxaca, México. *Artículo Científico. Agricultura, sociedad y desarrollo*. Vol 15. Oaxaca. México. https://www.redalyc.org/journal/3605/360559620008/html/?utm_source=chatgpt.com.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. [SAGARPA]. (2012). Subíndice de Uso Sustentable del Suelo- Metodología de Cálculo. Recuperado de http://smye.info/rn/ind_fin/suelos/Documento_metodologico_suelos.pdf
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2017). Palma de aceite mexicana. Planeación agrícola nacional 2017-2030. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación

- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. [SAGARPA]. (2012). Subíndice de Uso Sustentable del Suelo- Metodología de Cálculo. Recuperado de http://smye.info/rn/ind_fin/suelos/Documento_metodologico_suelos.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [SEMARNAT]. (2010). Uso del suelo http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/informe_2000/02_Vegetacion/2.1_Vegetacion/index.shtml
- Singer, M.J. y Ewing, S. (2000). Soil Quality. En Handbook of Soil Science. Chapter 11 (ed. Sumner, M. E.), 271-298, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Schweizer, S. (2011). Muestreo y análisis del suelo para diagnóstico de su fertilidad. Biblioteca virtual, (<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/P33-9965.pdf>).
- Seybold, C.A., Mausbach, M.J., Karlen, D.L. y Rogers, H.H. (1997). Quantification of Soil Quality. En Soil Process and the Carbon Cycle (eds. Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F., Stewart, B.A.). Boca Raton, Florida, EE.UU., CRC Press.
- Sharma, S.B., R.Z. Sayyed, M.H. Trivedi y T.A. Gobi. (2013). Review. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. Springer Plus 2: 587. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=692424&pid=S1316-3361201600020000400033&lng=es.
- Singh, R. y Pathak, R. (2003). Response of wheat (*Triticum aestivum*) to integrated nutrition of K, Mg, Zn, S and biofertilization. Journal of the Indian Society of Soil Science. 51(1): 56-60.
- Soil Survey Staff. (1993). Soil survey manual. United States Department of Agriculture. Hnbk no. 18 U.S. Gov. Printing Office, Washington, DC.
- Soriano, M. Conductividad eléctrica del suelo. RiuNet. <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/105110/Soriano%20-%20Conductividad%20el%C3%A9ctrica%20del%20suelo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Soto, A. C. (2016). Distribución especial de las propiedades físicas y químicas de los suelos por unidades fisiográficas en la microcuenca las Pavas, distrito Mariano Dámaso Beraún – Las Palmas. [Tesis de grado. Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Tingo María, Perú. 100 p. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3388686>
- Souza, Z.M.; Silva, M.L.S.; Guimarães, G.L; Campos, D.T.S.; Carvalho, M.P.; Pereira, G.T. (2001). Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). R. Bras. Ci. Solo, Viçosa, v.25, n.3, p.699-707.

- Stevenson, F.J., and M.A. Cole. (1999). Cycles of soil. 427 p. 2nd ed.. John Wiley & Sons, New York, USA.
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=246264&pid=S0365-2807200200020001100031&lng=es.
- Taboada, MA; Alvares CR. (2008). Fertilidad Física de los suelos. 2ed. Buenos Aires, Argentina. Facultad de Agronomía. 227 p.
- Tarr, AB; KJ Moore; CL Burras; DG Bullock& PM Dixon. (2005). Improving Map Accuracy of Soil Variables Using Soil Electrical Conductivity as a Covariate. Precision Agriculture, 6: 255-270.
- Tisdale, S. y Nelson, W. (1993). Soil fertility and fertilizers. MacMillan Publishing Company. New York.
- Torres, D., N. Rodríguez, H. Yendis, A. Florentino y F. Zamora. (2006). Cambios en algunas propiedades químicas del suelo según el uso de la tierra en el sector El Cebollal, estado Falcón, Venezuela. Bioagro 18(2): 123-128.
- USDA (1999). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. 12 ed. Estados Unidos.
<https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Gu%C3%ADa%20para%20la%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20y%20Salud%20del%20Suelo.pdf>
- USDA. (1996). Soil Survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigation Report N° 42. Washington. DC.USA, USDA-NRCS.U.S. Gov. Printing Office.
- USDA. (2014). Claves para la Taxonomía de suelos. 12 ed. Estados unidos. 410 p.
<https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>.
- USDA. (2017). Soil Survey Manual. 18 ed. Estados Unidos. 639 p.
<https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/The-Soil-Survey-Manual.pdf>
- Vargas, R., Serrato, F., y Torrente, A. (2015). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas - Huila. from: https://www.researchgate.net/publication/320222737_Variabilidad_espacial_de_las_propiedades_fisicas_de_un_suelo_Fluventic_Ustropepts_en_la_cuenca_baja_del_rio_Las_Ceibas_-_Huila [accessed May 23 2024].
- Vásquez, J. (2022). Distribución espacial de las propiedades fisicoquímicas del suelo, en el sector 3 de octubre – distrito Hermilio Valdizan, provincia Leoncio Prado. [Tesis de grado. Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Tingo María, Perú. 108 p.
<https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/14a9160f-3490-4b27-b3d8->

5aa514d30ad5/content

- Villatoro, M., Henríquez, C., Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDM y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105.
- Vistoso E., Martínez-Lagos, J. (2020). Magnesio disponible y fertilización en suelos de la Región de Los Ríos. Instituto De Investigaciones Agropecuarias - Informativo N° 261 - <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/67254/NR42460.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Webster, R., & Oliver, M. (2007). *Geostatistics for environmental scientists* (2 ed.). England: John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470517277>
- Yaros, M., 2016. Uso sustentable del suelo en diferentes sistemas de cultivo en el distrito de Padre Felipe Luyando –Naranjillo. [Tesis Ing. conservación de suelos. Universidad Nacional Agraria de la Selva]. 79p. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1067>.
- Zavaleta, G. (1992). *Edafología. El suelo en relación con la producción*. Consejo Nacional de Concentración y Tecnología. Lima, Perú.
- Zhou, J., Y. Wu, J. Prietzel, H. Bing, D. Yu, S. Sun, J. Luo y H. Sun. (2013). Changes of soil phosphorus stocks and speciation along a 120-yr soil chronosequence in the Hailuoguo Glacier retreat area (Gongga Mountain, SW China). *Geoderma* 195-196: 251-259. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=692432&pid=S1316-3361201600020000400041&lng=es.

ANEXO

Anexo 1. Panel fotográfico



Figura 27. Toma de coordenadas con GPS en los sistemas de uso fondo Liviac



Figura 28. Muestreo del suelo en el sistema de uso con maíz



Figura 29. Muestra de suelo del sistema de uso con capirona



Figura 30. Medición de la resistencia mecánica a la penetración sistema de uso cacao fundo
Liviac



Figura 31. Muestra de suelo del sistema de uso cacao fundo Liviac



Figura 32. Muestreo de suelo en el sistema de uso con capirona fundo Liviac



Figura 33. Muestreo de suelo en el sistema de uso con cacao fundo Liviac



Figura 34. Muestras de suelos para ser secados y analizados en el laboratorio



Figura 35. Pesado del cilindro con muestra de suelo



Figura 36. Cilindros de aluminio enrasado con muestras de suelos para su secado en la estufa

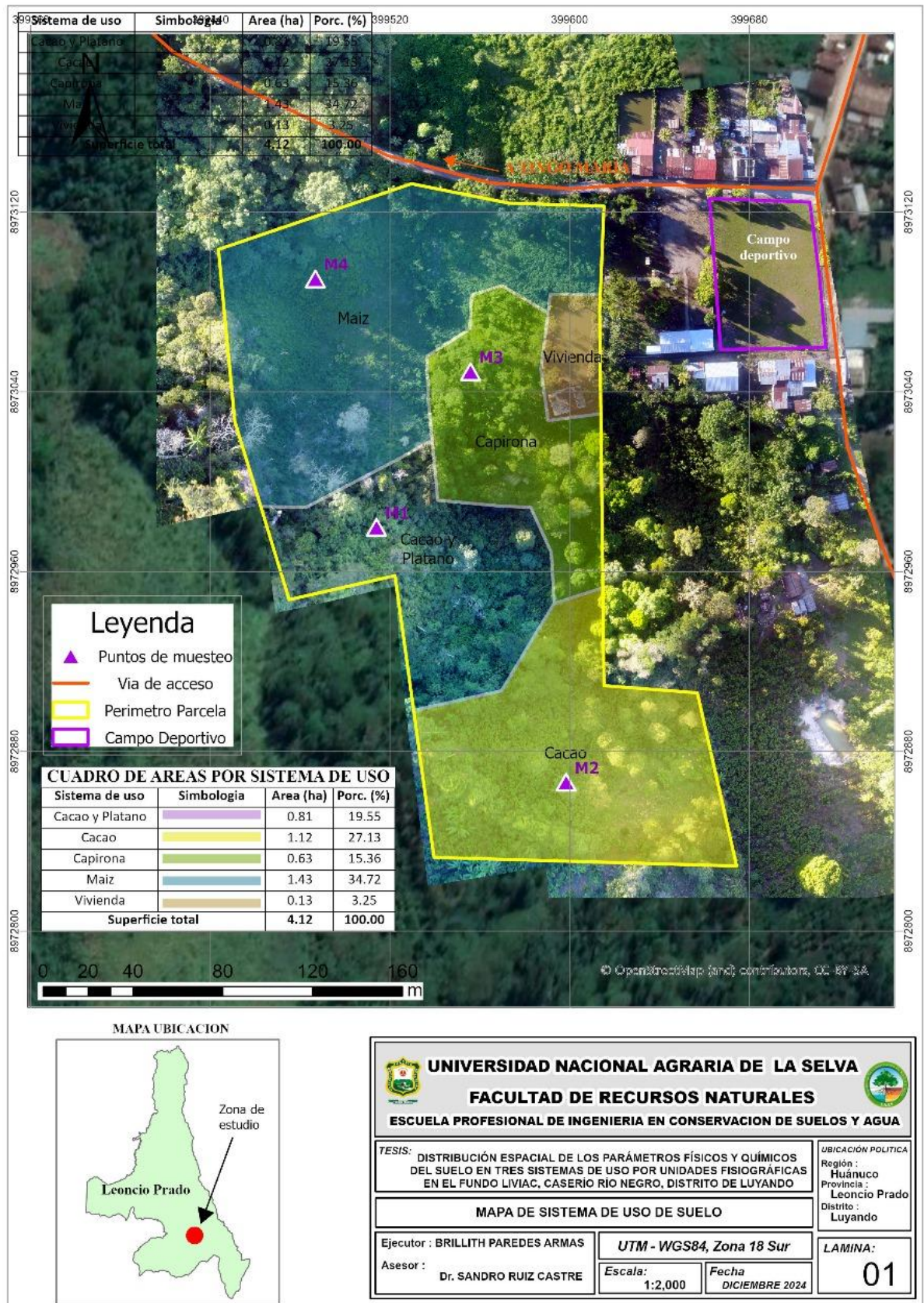


Figura 37. Mapa de los tres sistemas de uso de suelo



ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE: BRILLITH PAREDES ARMAS
 PROCEDENCIA: RIO NEGRO - LUYANDO - LEONCIO PRADO - HUANUCO

FECHA DE REPORTE: 2/02/2024
 RECIBO N° 34596

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO				ANÁLISIS FÍSICO			ANÁLISIS QUÍMICO										ANÁLISIS QUÍMICO					
			Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	Densidad Aparente	pH	CE	Materia Orgánica	N	C	P	K ₂ O	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio
			Ao	Arc	Lo		Da	0-14	dS/m	M.O.	total	Orgánico	disponible	Calcio		Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrógeno	%		%	%	
			CODIGO DEL LAB.	CODIGO DEL SOLICITANTE	%	%	%	g/cm ³	1:1	1:1	%	%	%	ppm	ppm	CAMBIABLES						Cmol(+) / kg			
1	S107-2024	M1	29.66	24.42	45.91	Franco	0.84	5.85	0.18	2.62	0.131	1.519	10.737	125.936	6.018	4.980	0.607	0.317	0.115	0.000	0.000	--	100.000	0.000	0.000
2	S108-2024	M2	31.66	22.42	45.91	Franco	1.10	5.78	0.12	2.13	0.107	1.238	11.897	82.599	5.561	4.770	0.569	0.132	0.090	0.000	0.000	--	100.000	0.000	0.000
3	S109-2024	M3	49.66	18.42	31.91	Franco	--	6.63	0.64	2.96	0.148	1.716	11.960	110.583	6.398	5.350	0.696	0.235	0.117	0.000	0.000	--	100.000	0.000	0.000
4	S110-2024	M4	51.66	14.42	33.91	Franco	--	6.72	0.20	3.93	0.196	2.279	11.228	123.381	6.735	5.420	0.851	0.347	0.117	0.000	0.000	--	100.000	0.000	0.000

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita de LASAE. Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANCUJI
 Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Tingo María

Ing° GILMER MILTON NEIRA TRUJILLO
 Profesional del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

Figura 38. Análisis de suelos de los sistemas de uso del fundo Liviac