

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE RECURSOS NATURALES

RENOVABLES



**CALIDAD DE SUELOS DEGRADADOS EX COCALES REHABILITADOS CON
Inga edulis “GUABA” EN DIFERENTES ETAPAS DE ESTABLECIMIENTO EN EL
DISTRITO DE RUPA RUPA, HUÁNUCO – PERÚ**

Tesis

Para optar el título profesional de

INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES MENCIÓN FORESTAL

PRESENTADO POR:

DANIEL ALEXANDER HIDALGO GUEVARA

Tingo María – Perú

2026



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 025-2026-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 13 de enero de 2026, a horas 10:00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva para calificar la tesis titulada:

“CALIDAD DE SUELOS DEGRADADOS EX COCALES REHABILITADOS CON *Inga edulis* “GUABA” EN DIFERENTES ETAPAS DE ESTABLECIMIENTO EN EL DISTRITO DE RUPA RUPA, HUÁNUCO - PERÚ”

Presentado por el Bachiller: **HIDALGO GUEVARA, DANIEL ALEXANDER** 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 RECURSOS NATURALES RENOVABLES MENCIÓN FORESTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 19 de febrero de 2026

Dr. CASIANO AGUIRRE ESCALANTE
PRESIDENTE

Dr. JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO
MIEMBRO

Ph. D. LUIS ALBERTO VALDIVIA ESPINOZA
MIEMBRO

Ing. MSc. EDILBERTO DIAZ QUINTANA
ASESOR

Ing. MSc. MOISES MARIO YAROS PÁRDO
ASESOR



"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 120 -2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico 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% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Mención: Forestal

Tipo de documento:

Tesis	<input checked="" type="checkbox"/>	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	-------------------------------------	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
CALIDAD DE SUELOS DEGRADADOS EX COCALES REHABILITADOS CON Inga edulis "GUABA" EN DIFERENTES ETAPAS DE ESTABLECIMIENTO EN EL DISTRITO DE RUPA RUPA, HUÁNUCO – PERÚ	DANIEL ALEXANDER HIDALGO GUEVARA	23 % Veintitrés	Menor a 20 %

Tingo María, 17 de abril de 2026.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

 ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
 JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE RECURSOS NATURALES

RENOVABLES



CALIDAD DE SUELOS DEGRADADOS EX COCALES REHABILITADOS CON *Inga edulis* “GUABA” EN DIFERENTES ETAPAS DE ESTABLECIMIENTO EN EL DISTRITO DE RUPA RUPA, HUÁNUCO – PERÚ

Programa de investigación	: valoración de la biodiversidad y recursos naturales
Línea de investigación	: Manejo, conservación y aprovechamiento sostenible de la biodiversidad, recursos naturales, bienes y servicios ecosistémicos
Eje temático	: Restauración de ecosistemas
Autor	: Daniel Alexander Hidalgo Guevara
Asesor (es)	: MSc. Edilberto Diaz Quintana MSc. Moisés Mario Yaros Pardo
Lugar de ejecución	: Rupa Rupa, Huánuco
Duración del trabajo	: 6 meses
Financiamiento	: 2 104, 9
FEDU	: No
Propio	: Si
Otros	: No

Tingo María – Perú,

DEDICATORIA

A Dios por concederme la salud y haberme guiado por el buen camino, proveer fuerzas para superar obstáculos a lo largo de nuestras vidas y por haberme permitido cumplir uno de mis objetivos, culminar esta tesis de investigación.

Con mucho cariño y amor a mis queridos padres Alejandro, HIDALGO GARCÍA y Lucy Carol, GUEVARA SANDOVAL, por brindarme su apoyo incondicional, acompañándome y apoyándome en cada momento de mi vida personal.

A mis queridos hijos Adriano HIDALGO CÉSPEDES y Stefano HIDALGO CÉSPEDES, ya que ellos son el motor y motivo de inspiración para poder ser mejor en el tema personal, profesional y espiritual.

AGRADECIMIENTO

- A Dios Padre Todopoderoso, por haber sido mi guía constante y fuente inagotable de fortaleza física, mental y espiritual. Agradezco profundamente su protección en cada etapa de mi vida, por iluminar mi camino y sostenerme en los momentos de dificultad, brindándome la sabiduría y la perseverancia necesarias para alcanzar esta meta.
- A mi alma máter, la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), por haberme brindado la valiosa oportunidad de formarme como profesional. Mi gratitud por ser el espacio donde adquirí no solo conocimientos académicos, sino también valores, disciplina y un profundo compromiso con el desarrollo de nuestra sociedad.
- A mis asesores, MSc. Edilberto DÍAZ QUINTANA y MSc. Moisés Mario YAROS PARDO, por su invaluable orientación, dedicación y constante apoyo brindado a lo largo del desarrollo de la presente investigación. Su experiencia, compromiso y sabias sugerencias han sido fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo.
- Expreso mi más profundo agradecimiento a los distinguidos miembros del jurado: Dr. Ytavclerh VARGAS CLEMENTE, Dr. José Dolores LÉVANO CRISÓSTOMO, Ph. D. Luis Alberto VALDIVIA ESPINOZA y Dr. Casiano AGUIRRE ESCALANTE, por el valioso tiempo que dedicaron a la revisión, análisis y evaluación de esta tesis.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Marco teorico	3
2.1.1. El suelo	3
2.1.2. Degradación de los suelos	3
2.1.3. El cultivo de coca	5
2.1.4. Muestreo del suelo.....	5
2.1.5. Análisis de suelos	6
2.1.6. Calidad del suelo	6
2.1.7. Indicadores de calidad del suelo.....	6
2.1.8. Sistema de uso de suelo.....	14
2.1.9. La guaba y su importancia.....	15
2.1.10. Subíndice de uso sustentable de suelo.....	17
2.2. Estado del arte.....	17
III. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1. Lugar de ejecución.....	22
3.1.1. Ubicación geográfica.....	22
3.1.2. Zona de vida	22
3.1.3. Clima	23
3.1.4. Vías de acceso	23
3.1.5. Áreas de intervención para los muestreos de suelo	23
3.2. Material y métodos	24
3.2.1. Materiales y equipos.....	24
3.2.2. Metodología.....	25
3.2.3. Componentes en estudio.....	29
3.2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de información y procesamiento de datos	30
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1. Determinación de los parámetros físicos y químicos del suelo en establecimientos con 2, 4 y 6 años rehabilitados con <i>Inga edulis</i> (guaba).....	33
4.1.1. Textura del suelo	33

4.1.2. Temperatura, resistencia a la penetración y densidad aparente del suelo	34
4.1.3. Potencial de hidrogeno y fosforo disponible	35
4.1.4. Materia orgánica y nitrógeno total	37
4.1.5. Potasio disponible, calcio y magnesio cambiabile	38
4.1.6. Capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica	41
4.2. Determinación de la calidad del suelo en establecimientos con 2, 4, 6 años rehabilitados con Inga edulis, aplicando el Subíndice de Uso Sustentable (SUSS).....	42
V. CONCLUSIONES.....	45
VI. PROPUESTAS A FUTURO	46
VII. REFERENCIAS	47
ANEXO	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Clasificación de los diámetros de las partículas del suelo.....	7
2. Densidad aparente y su relación al crecimiento radicular en base a la textura del suelo	8
3. Niveles interpretativos para el pH (relación 2:1).....	9
4. Rangos interpretativos para el contenido de materia orgánica (%).....	9
5. Rangos interpretativos para el nitrógeno total en el suelo.....	10
6. Rangos interpretativos para el fósforo total en el suelo	10
7. Rangos interpretativos para potasio (K ⁺) intercambiable	11
8. Rangos interpretativos para calcio (Ca ²⁺) intercambiable	12
9. Rangos interpretativos para Magnesio (Mg ²⁺) intercambiable	12
10. Rangos interpretativos para la CIC.....	13
11. Rangos interpretativos para la Conductividad eléctrica	14
12. Parámetros físicos y químicos del suelo.....	26
13. Parámetros edáficos, unidades de medida, valores máximos y mínimos definidos para evaluar el estado actual del suelo	28
14. Rangos interpretativos del SUSS.....	29
15. Operacionalización de variables	30
16. Textura del suelo en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis.....	33
17. Datos de los indicadores físicos del suelo	51
18. Datos de los indicadores químicos del suelo	52
19. Normalización de indicadores fisicoquímicos para el cálculo del SUSS en parcelas en 2, 4 y 6 años.....	52
20. Datos de la normalización de indicadores fisicoquímicos para el cálculo del SUSS en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis	54
21. Datos del Subíndice de uso sustentable del suelo y su clasificación de la calidad en las parcelas rehabilitadas.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Árbol de guaba en floración	16
2. Ubicación política de la zona de estudio	22
3. Diagrama de muestreo de suelos para el análisis físico y químico	26
4. Temperatura del suelo en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis.....	34
5. Resistencia a la penetración en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis.....	35
6. Densidad aparente en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis.....	35
7. pH del suelo en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis	36
8. Fosforo disponible en el suelo en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis	36
9. Materia orgánica en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis	38
10. Nitrógeno total en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis	38
11. Potasio intercambiable en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis.....	39
12. Calcio intercambiable en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis	39
13. Magnesio intercambiable en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis.....	40
14. Capacidad intercambio catiónico en parcelas rehabilitadas con I. edulis.....	41
15. Conductividad eléctrica en tres parcelas rehabilitadas con I. edulis	42
16. Subíndice de uso sustentable del suelo en tres parcelas rehabilitadas.....	43
17. Entrada principal al sector de Nuevo Unión – Supte Chico Alto.....	56
18. Entrada principal al área de intervención del proyecto	56
19. Instalación de letrero de identificación relativo a la investigación	57
20. Identificación y georreferenciación de la parcela con 4 años de rehabilitación.....	57
21. Registro y georreferenciación de la parcela rehabilitada (6 años).....	58
22. Alineamiento en la parcela rehabilitada de 4 años con I. edulis.....	58
23. Determinación de la resistencia del suelo en la parcela rehabilitada (6 años)	59
24. Muestreo edáfico en la parcela rehabilitada (2 años) con I. edulis.....	59
25. Toma de muestras de suelo en parcelas con 2, 4 y 6 años de rehabilitación.....	60
26. Muestreo para la determinación de densidad aparente del suelo	60
27. Molido de la muestra de suelo previo a su análisis	61
28. Traslado y rotulado de las muestras de suelos de 2,4 y 6 años al laboratorio	61

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar la calidad de suelos degradados ex cacaes rehabilitados con *I. edulis* “guaba” en diferentes etapas de establecimiento en el distrito de Rupa Rupa, Huánuco – Perú. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, con un nivel descriptivo y un diseño no experimental, transversal y comparativo. Los análisis de los parámetros físicos y químicos evidenciaron que la rehabilitación con *I. edulis* mejoró progresivamente la calidad del suelo. En 2 años, los suelos aún presentaban limitaciones importantes, en el caso de 4 años mostraban avances moderados en materia orgánica y nutrientes. A los 6 años se alcanzaron las mejores condiciones, caracterizadas por mayor estabilidad estructural, mejor retención de nutrientes y valores más equilibrados de pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes intercambiables. Estos resultados permitieron confirmar que *I. edulis* se constituyó como una especie efectiva para la recuperación físico-química de suelos degradados en la zona de estudio. Asimismo, el SUSS demostró una mejora continua en la calidad del suelo, pasando de marginal a los 2 años (0,64), a sensible en 4 años (0,67) y a aceptable–sensible en 6 años (0,81). Este comportamiento validó la utilidad del índice para evaluar la sustentabilidad del suelo en condiciones locales y evidenció que la rehabilitación impulsando la recuperación ecológica y concluyendo que el *I. edulis* mejoró significativamente la calidad del suelo en Rupa Rupa y representó una estrategia efectiva para la restauración de suelos degradados.

Palabras clave: Rehabilitación de suelos, calidad del suelo, SUSS.

ABSTRACT

The research aimed to evaluate the quality of degraded soils from former coca plantations rehabilitated with *I. edulis* “guaba” at different stages of establishment in the Rupa Rupa district, Huánuco, Peru. The study was conducted using a quantitative, applied approach, with a descriptive level and a non-experimental, cross-sectional, and comparative design. Analysis of physical and chemical parameters showed that rehabilitation with *I. edulis* progressively improved soil quality. After two years, the soils still presented significant limitations; after four years, they showed moderate improvements in organic matter and nutrients. At six years, the best conditions were achieved, characterized by greater structural stability, better nutrient retention, and more balanced values of pH, cation exchange capacity (CEC), and exchangeable cations. These results confirmed that *I. edulis* was an effective species for the physicochemical recovery of degraded soils in the study area. Furthermore, the SUSS demonstrated a continuous improvement in soil quality, progressing from marginal at 2 years (0,64), to sensitive at 4 years (0,67), and to acceptable-sensitive at 6 years (0,81). This behavior validated the index's usefulness for evaluating soil sustainability under local conditions and demonstrated that rehabilitation promotes ecological recovery. The study concluded that *Inga edulis* significantly improved soil quality in Rupa Rupa and represented an effective strategy for restoring degraded soils.

Keywords: Soil rehabilitation, soil quality, SUSS.

I. INTRODUCCIÓN

En el caso del Perú, la situación es especialmente preocupante en la región amazónica. La deforestación en la Amazonía peruana avanza a una tasa estimada de 261 mil hectáreas por año, y esta cifra podría ser aún mayor debido al uso creciente de maquinaria pesada y nuevas tecnologías, lo que sugiere que actualmente la tasa real podría superar las 300 mil hectáreas anuales (Ministerio del Ambiente [MINAM], Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR], 2022). En el distrito de Rupa Rupa, en la región Huánuco – Perú, muchas áreas han sido degradadas por el cultivo intensivo e ilegal de hoja de coca, una actividad que durante años alteró significativamente la estructura y fertilidad de los suelos. La eliminación de cobertura vegetal, el uso de agroquímicos y la deforestación asociada a esta práctica han provocado una pérdida severa de materia orgánica, compactación del suelo y erosión (Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida sin Drogas [DEVIDA], 2016).

Frente a este contexto, se han impulsado programas de rehabilitación de suelos mediante el uso de especies forestales nativas y de rápido crecimiento como *I. edulis*, que tiene la capacidad de fijar nitrógeno, mejorar la estructura del suelo y aportar materia orgánica a través de la hojarasca. Sin embargo, existen pocos estudios científicos locales que analicen el estado actual de los suelos rehabilitados con esta especie y su evolución en diferentes etapas de establecimiento. Esto limita la toma de decisiones técnicas para la recuperación efectiva de áreas degradadas en zonas ex cocalas (DEVIDA, 2016). Por tanto, surge la necesidad de investigar ¿Cómo influye el establecimiento de *Inga e.* (guaba) en diferentes etapas de desarrollo sobre la calidad de suelos degradados ex cocalas en el distrito de Rupa Rupa, Huánuco – Perú? lo que permitiría validar o mejorar estrategias de restauración ecológica y productiva.

El presente estudio se justifica por la necesidad de generar información técnica que permita evaluar la efectividad de la rehabilitación de suelos degradados en zonas ex cocalas mediante el uso de *I. edulis*. A través de la comparación de diferentes etapas de establecimiento en el distrito de Rupa Rupa, Huánuco, y del análisis de variables físico-químicas del suelo como pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, nitrógeno total y textura, se podrá determinar el grado de recuperación del suelo en función del tiempo transcurrido desde la siembra. Los resultados contribuirán a reducir el vacío de conocimiento existente y servirán como base técnica para la formulación de estrategias de recuperación ambiental, desarrollo alternativo sostenible y replicación de experiencias exitosas en otras zonas ex cocalas de la Amazonía peruana (Rodríguez et al., 2017; Gonzales et al., 2020).

Los resultados del estudio contribuirán a fortalecer el conocimiento técnico sobre el uso de especies nativas en la rehabilitación de suelos degradados, brindando sustento científico para la toma de decisiones en proyectos de desarrollo alternativo, restauración ecológica y uso sostenible del territorio. Asimismo, servirán como base para futuras investigaciones en zonas similares de la Amazonía peruana y para el trabajo de instituciones públicas, técnicos y organizaciones vinculadas a la recuperación ambiental y la reconversión productiva de áreas degradadas (DEVIDA, 2016). Por ello, se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general

Evaluar la calidad de los suelos degradados ex cacaes rehabilitados con *Inga edulis* “guaba” en diferentes etapas de establecimiento en el distrito de Rupa Rupa, Huánuco – Perú.

Objetivos específicos

- Determinar los parámetros físicos y químicos del suelo (densidad aparente, textura, resistencia a la penetración, temperatura, pH, materia orgánica, nitrógeno total, fósforo, capacidad de intercambio catiónico y potasio, calcio, magnesio intercambiable) en establecimientos con 2, 4 y 6 años rehabilitados con *Inga edulis* en el distrito de Rupa Rupa, Huánuco – Perú.
- Determinar la calidad del suelo en establecimientos con 2, 4, 6 años rehabilitados con *Inga edulis*, aplicando el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) en el distrito de Rupa Rupa, Huánuco – Perú.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teorico

2.1.1. El suelo

Henríquez (1999) el suelo se comporta como un sistema activo en el que interactúan simultáneamente procesos de tipo físico, químico y biológico. Estas interacciones generan transformaciones que dan lugar a un sustrato capaz de proporcionar soporte, agua y nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas y otros organismos.

2.1.2. Degradación de los suelos

Según MINAM y SERFOR (2022), la degradación del suelo es un proceso que implica la pérdida de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, afectando negativamente su capacidad productiva y ecológica. En el contexto del cultivo intensivo de coca, esta degradación se ve intensificada por la deforestación, el uso continuo del terreno sin rotación ni reposo, la compactación del suelo y la pérdida de cobertura vegetal, lo cual incrementa la erosión y reduce la fertilidad (Meza et al., 2006). En la Amazonía peruana, estas prácticas han causado severos impactos en los ecosistemas, generando la urgente necesidad de alternativas sostenibles para su rehabilitación.

2.1.2.1. Degradación física

La degradación física del suelo se refiere a los procesos que afectan directamente su estructura y propiedades mecánicas, reduciendo su capacidad para sostener el crecimiento vegetal y regular el ciclo del agua. Este tipo de degradación se manifiesta principalmente en el aumento de la compactación, la erosión, la pérdida de estructura, disminución de porosidad, y reducción de la velocidad de infiltración del agua (Meza et al., 2006)

Una de las causas principales de la degradación física del suelo es el uso intensivo de prácticas agrícolas inadecuadas, como el cultivo continuo sin rotación, la deforestación, el sobrepastoreo y el uso excesivo de maquinaria pesada. En zonas como la Amazonía peruana, la siembra extensiva de cultivos ilícitos como la coca ha dejado suelos compactados, con baja capacidad de retención de agua y escasa materia orgánica. La evaluación de la degradación física del suelo se realiza mediante indicadores que permiten conocer su estado estructural y funcional; por ejemplo, una elevada densidad aparente indica compactación, lo que limita la aireación y el desarrollo de raíces, mientras que una alta resistencia a la penetración representa una barrera para el crecimiento radicular y disminuye la

infiltración de agua. Además, la textura del suelo influye en la retención de humedad y nutrientes, y una baja velocidad de infiltración es característica de suelos degradados, favoreciendo la escorrentía y aumentando el riesgo de erosión superficial (Hosokay, 2012).

La rehabilitación de estos suelos requiere intervenciones que favorezcan la recuperación de su estructura física, como el uso de especies leguminosas, prácticas agroforestales y la incorporación de materia orgánica, siendo *I. edulis* una especie destacada en este proceso (Monro et al., 2016).

2.1.2.2. Degradación química

La degradación química del suelo se refiere a la disminución de la calidad y fertilidad del suelo debido a alteraciones en sus propiedades químicas, las cuales son fundamentales para la disponibilidad de nutrientes y la salud de los ecosistemas agrícolas. Este tipo de degradación puede estar asociado a la pérdida de materia orgánica, cambios en el pH, acumulación de sales, toxicidad por metales pesados o contaminantes y la disminución de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Brady & Weil, 2013). Algunos de los principales indicadores para evaluar la degradación química incluyen:

El pH del suelo fuera del rango óptimo para los cultivos (generalmente entre 5,5 y 7,5) puede limitar la disponibilidad de nutrientes esenciales y aumentar la toxicidad de ciertos elementos (Brady & Weil, 2013).

La materia orgánica es vital para mantener la fertilidad del suelo, ya que mejora la estructura, la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes. Su disminución es un signo claro de degradación química (Sánchez et al., 2018).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), es la capacidad del suelo para retener y suministrar nutrientes básicos como calcio, magnesio, potasio y sodio. Una CIC baja implica una menor fertilidad y una mayor vulnerabilidad a la lixiviación (Jones, 2002).

Concentración de nutriente, la disminución o desequilibrio de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio limita el crecimiento vegetal y reduce la productividad (Brady & Weil, 2013).

La acumulación de sales y metales tóxicos, donde la salinización y contaminación química, provocadas por el uso excesivo de fertilizantes y agroquímicos, generan toxicidad y deterioro de las propiedades químicas del suelo (FAO, 2015).

2.1.3. El cultivo de coca

Según Delgado y Rojas (2017), el cultivo *Erythroxylum coca* (coca) es una actividad agrícola tradicional en diversas regiones de América del Sur, especialmente en países como Perú, Colombia y Bolivia. Esta planta tiene un significado cultural importante para comunidades indígenas, utilizándose en rituales y como estimulante natural. Sin embargo, el cultivo intensivo de coca, especialmente cuando es ilegal, suele realizarse en sistemas agrícolas que contribuyen a la degradación ambiental. La deforestación para expansión de cultivos, el uso inadecuado de agroquímicos, y la falta de prácticas sostenibles provocan la pérdida de la calidad del suelo, afectando su estructura, fertilidad y biodiversidad.

Para mitigar estos impactos, se han propuesto técnicas de rehabilitación y sistemas agroforestales que incorporan especies como *I. edulis*, las cuales contribuyen a mejorar la calidad del suelo a través de la fijación de nitrógeno, incremento de la materia orgánica y restauración de la estructura del suelo (Delgado & Rojas, 2017).

2.1.4. Muestreo del suelo

El muestreo de suelos es el proceso mediante el cual se extraen porciones representativas del suelo de una determinada área con el objetivo de analizarlas física, química o biológicamente. Este procedimiento permite evaluar las características y condiciones del suelo para distintos fines como la agricultura, estudios ambientales, restauración de ecosistemas, entre otros. Para que el análisis del suelo sea confiable, las muestras deben ser representativas, tomadas con herramientas adecuadas, y bajo un diseño de muestreo apropiado (aleatorio, sistemático, estratificado, dirigido), evitando zonas anómalas o contaminadas. Además, se deben seguir protocolos para el manejo, etiquetado y transporte de las muestras hasta el laboratorio (Brady & Weil, 2017).

2.1.4.1. Importancia del Muestreo de Suelos

El muestreo de suelos es un paso fundamental para evaluar adecuadamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, permitiendo así tomar decisiones informadas en agricultura, manejo ambiental, estudios de contaminación y restauración ecológica. Una muestra representativa garantiza que los análisis reflejen fielmente las condiciones reales del terreno, evitando errores en la interpretación de resultados y en las prácticas de manejo recomendadas. Según Brady y Weil (2017), un muestreo mal realizado puede conducir a decisiones agronómicas incorrectas, como la aplicación excesiva o insuficiente de fertilizantes, lo que afecta tanto la productividad como el medio ambiente.

2.1.5. Análisis de suelos

El análisis de suelos es una herramienta fundamental para conocer las características físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que permite un manejo racional y sostenible de los recursos edáficos. Este análisis proporciona información clave sobre la fertilidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas, la presencia de contaminantes, la textura, la estructura y otros factores que influyen directamente en la producción agrícola y en la salud ambiental. El propósito principal del análisis de suelos es determinar la capacidad del suelo para sostener el crecimiento vegetal y establecer recomendaciones técnicas para el uso eficiente de fertilizantes, enmiendas o correctivos. Asimismo, es clave en estudios ambientales, ya que permite detectar metales pesados, salinidad, acidez o alcalinidad excesivas, y otros indicadores de degradación (Brady & Weil, 2017).

Una correcta interpretación del análisis de suelos depende también de una adecuada toma de muestras, representativas del terreno estudiado. Según Gómez et al. (2011), tanto la planificación del muestreo como el almacenamiento y transporte de las muestras son pasos críticos para obtener resultados fiables en laboratorio.

2.1.6. Calidad del suelo

Según Jiménez y González (2006), argumentan que la calidad del suelo es una herramienta clave para evaluar el estado de degradación del suelo en un momento determinado, determinar medidas correctivas necesarias para mejorar su funcionamiento, proporcionar información detallada sobre las características físicas, químicas y biológicas del suelo, utilizar índices de calidad como indicadores tempranos y eficientes de cambios provocados por el sistema de producción agrícola.

2.1.7. Indicadores de calidad del suelo

Según Jiménez y González (2006), la calidad del suelo se presenta como un instrumento eficaz para conocer el estado de degradación en que se encuentra un suelo en un momento determinado, así como para definir las medidas necesarias que aseguren su mejor funcionamiento. Estos autores destacan que los índices de calidad actúan como indicadores tempranos y eficientes de los cambios en la calidad del suelo, muchos de ellos derivados del sistema de producción agrícola o del uso del suelo. Los indicadores pueden clasificarse en tres grandes grupos:

Los indicadores físicos, como la estructura del suelo, la densidad aparente, la porosidad y la capacidad de retención de agua. Los indicadores químicos, que

incluyen el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el contenido de materia orgánica, la salinidad y los niveles de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio. Los indicadores biológicos, entre los que se encuentran la actividad microbiana, la biomasa del suelo, la presencia de macrofauna (lombrices, por ejemplo) y la diversidad microbiana.

2.1.7.1. Textura

La textura del suelo es una propiedad física fundamental que describe la proporción relativa de las partículas minerales que lo componen, clasificadas en tres fracciones principales según su tamaño: arena (partículas grandes), limo (partículas intermedias) y arcilla (partículas muy finas). Esta proporción determina el comportamiento del suelo en términos de retención de agua, drenaje, aireación, capacidad de intercambio catiónico, facilidad de laboreo y desarrollo radicular. De acuerdo con Brady y Weil (2017), la textura es una propiedad intrínseca del suelo que no se modifica fácilmente con el manejo agrícola, y que influye de forma determinante en procesos edáficos como la infiltración, la erosión, la fertilidad y la actividad microbiana. Por su parte, Gómez et al. (2011) destacan que conocer la textura del suelo permite clasificarlo en grupos como arenoso, franco, franco-arcilloso, o arcilloso, lo cual es clave para orientar decisiones de uso, manejo y conservación.

Tabla 1. Clasificación de los diámetros de las partículas del suelo

Fracción del suelo	Diámetros (mm)
Arena gruesa	2,00 a 0,20
Arena fina	0,25 a 0,05
Limo	0,05 a 0,002
Arcilla	< 0,002

Fuente: Henríquez (1999).

2.1.7.2. Densidad aparente

La densidad aparente es una propiedad física fundamental del suelo que expresa la masa de suelo seco por unidad de volumen, incluyendo el volumen ocupado por los poros. Se expresa comúnmente en g/cm^3 . Este parámetro refleja el grado de compactación del suelo y su estructura, siendo clave para evaluar la aireación, la retención de agua, la resistencia al crecimiento radicular y la actividad biológica. La densidad aparente varía según el tipo de suelo, su textura, contenido de materia orgánica, y grado de compactación. Suelos arenosos, por ejemplo, tienden a tener densidades aparentes más altas que los suelos arcillosos con mayor cantidad de poros finos. Valores típicos oscilan entre $1,1 \text{ g/cm}^3$ en suelos sueltos y orgánicos, hasta $1,6 \text{ g/cm}^3$ o más en suelos compactados (Brady & Weil, 2017).

Según Villanueva y González (2012), la densidad aparente puede medirse en campo mediante el método del cilindro o del clod (trozo de suelo intacto), y es un indicador directo del estado físico del suelo, especialmente relevante en prácticas de labranza, construcción, restauración ecológica y evaluación de degradación.

Tabla 2. Densidad aparente y su relación al crecimiento radicular en base a la textura del

Textura	Ideal (g cm ⁻³)	Aceptable (g cm ⁻³)	Puede afectar el crecimiento radicular (g cm ⁻³)
Arena, areno-franco	Dap < 1,6	1,6 ≤ Dap <1,69	1,69 ≤ Dap <1,80
Franco-arenosa, franco	Dap < 1,4	1,4 ≤ Dap <1,63	1,63 ≤ Dap <1,80
Franco-arcilla-arenosa, franco-arcillosa	Dap < 1,4	1,4 ≤ Dap <1,60	1,60 ≤ Dap <1,75
Limosa	Dap < 1,3	1,3 ≤ Dap <1,60	1,60 ≤ Dap <1,75
Franco-limosa, franco-arcillo-limosa	Dap < 1,4	1,4 ≤ Dap <1,55	1,55 ≤ Dap <1,65
Arcillo-arenosa, arcillo-limosa	Dap < 1,1	1,1 ≤ Dap <1,39	1,39 ≤ Dap <1,58
Arcillosa (>45% arcilla)	Dap < 1,1	1,1 ≤ Dap <1,39	1,39 ≤ Dap <1,47

suelo

Fuente: SAGARPA (2012).

2.1.7.3. Temperatura del suelo

La energía solar que llega al suelo o sea de la luz incidente que recibe una planta, un tercio es reflejado hacia la atmosfera. La energía que no es reflejada depende de la variedad del suelo y de la vegetación (cobertura, pendiente, color del suelo, etc.) el 5 % es usado en la fotosíntesis, mientras que el 80 % es usado para evaporar agua y una pequeña cantidad es usada para calentar el suelo. El grado de calentamiento que sufre un suelo por unidad de energía se identifica como capacidad calórica específica (CCE) de un suelo (Sagardoy & Mandolesi, 2005).

2.1.7.4. Potencial de hidrogeno (pH)

El pH es el logaritmo negativo de la actividad de H⁺, que afecta directamente la solubilidad, disponibilidad y absorción de los nutrientes necesarios para el crecimiento, desarrollo vegetal, procesos biológicos y actividad microbiana. Entre los elementos que más afecta el pH se encuentran el P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺, Zn²⁺ y Cu²⁺, el porcentaje de saturación de bases y la capacidad de intercambio catiónico (Sánchez,

2007). Según Brady y Weil (2017), el pH del suelo es un indicador clave de la reacción del suelo, afecta la solubilidad de los nutrientes, la toxicidad de algunos elementos, y el desarrollo de organismos beneficiosos para las plantas.

Tabla 3. Niveles interpretativos para el pH (relación 2:1)

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	$\text{pH} < 5,0$
Moderadamente ácido	$5,0 \leq \text{pH} < 6,5$
Neutro	$6,5 \leq \text{pH} < 7,3$
Medianamente alcalino	$7,3 \leq \text{pH} < 8,5$
Fuertemente alcalino	$\text{pH} \geq 8,5$

Fuente: SAGARPA (2012).

2.1.7.5. Materia orgánica

La materia orgánica es un componente complejo del suelo, compuesto por restos de origen vegetal y animal en diferentes estados de descomposición. Aunque suele encontrarse en cantidades mucho menores en comparación con la fracción mineral del suelo, su importancia es igual o incluso mayor en lo que respecta a la evolución, estructura y funcionamiento del suelo (Sagarpa, 2012).

Tabla 4. Rangos interpretativos para el contenido de materia orgánica (%)

Clasificación	% MO
Muy bajo	$\text{MO} < 0,5$
Bajo	$0,5 \leq \text{MO} < 1,5$
Medio	$1,5 \leq \text{MO} < 3,5$
Alto	$3,5 \leq \text{MO} < 6,0$

Fuente: SAGARPA (2012).

2.1.7.6. Nitrógeno total en el suelo

Según Sánchez (2007), La atmósfera es la fuente principal de nitrógeno (N), ya que contiene este elemento en forma de gas (N_2), el cual representa la mayor parte del aire. Sin embargo, este nitrógeno atmosférico no es directamente aprovechable por las plantas, por lo que debe ser transformado mediante el proceso de fijación biológica, llevado a cabo por ciertos microorganismos especializados. Dentro del suelo, la mayor parte del nitrógeno se encuentra en forma de compuestos orgánicos. Para que este nitrógeno esté disponible para

las plantas, debe transformarse mediante el proceso de mineralización, el cual libera formas inorgánicas utilizables. Las reservas de nitrógeno del suelo están compuestas por: materia orgánica de descomposición rápida, que libera nitrógeno en poco tiempo, compuestos húmicos, que se mineralizan más lentamente, una pequeña fracción de nitrógeno inorgánico, presente en formas directamente asimilables por las plantas como amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-).

Tabla 5. Rangos interpretativos para el nitrógeno total en el suelo

Clasificación	% N total
Muy bajo	$N < 0,05$
Bajo	$0,05 \leq N < 0,10$
Medio	$0,10 \leq N < 0,15$
Alto	$0,15 \leq N < 0,25$
Muy alto	$N \geq 0,25$

Fuente: SAGARPA (2012).

2.1.7.7. Fósforo total en el suelo

El fósforo total en el suelo representa la cantidad total de fósforo presente, incluyendo tanto las formas disponibles (que pueden ser absorbidas por las plantas) como las no disponibles (ligadas a minerales o materia orgánica). La mayor parte del fósforo total no está inmediatamente disponible para las plantas, ya que se encuentra en formas insolubles o retenidas por partículas del suelo. Según Villanueva y González (2012), “el fósforo total incluye las formas orgánicas e inorgánicas del elemento; sin embargo, solo una fracción pequeña es utilizable por los cultivos, lo que hace necesario analizar también el fósforo disponible”. La determinación del fósforo total es importante para evaluar el potencial a largo plazo de fertilidad del suelo y el riesgo ambiental de contaminación por escorrentía.

Tabla 6. Rangos interpretativos para el fósforo total en el suelo

Clase	P (mg·kg ⁻¹)
Bajo	$P < 5,5$
Medio	$5,5 \leq P < 11$
Alto	$P \geq 11$

Fuente: SAGARPA (2012).

2.1.7.8. Potasio intercambiable

El potasio intercambiable es la fracción del potasio (K^+) que se encuentra adsorbida en la superficie de las partículas del suelo, especialmente en los coloides de arcilla y materia orgánica, y que puede ser liberada a la solución del suelo para ser absorbida por las raíces de las plantas. Es una de las formas más importantes del potasio en términos de disponibilidad para los cultivos. Según Villanueva y González (2012), el potasio intercambiable es una forma accesible para las plantas, ya que se encuentra débilmente retenido en los sitios de intercambio catiónico del suelo, por lo que su concentración es un buen indicador de la fertilidad potásica. Este nutriente es esencial para procesos como la fotosíntesis, la síntesis de proteínas y la regulación hídrica en las plantas.

Tabla 7. 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).

2.1.7.9. Calcio intercambiable

Según Sagarpa (2012), entre los cationes intercambiables que están directamente relacionados con los procesos de degradación del suelo por salinización se encuentra el calcio (Ca^{2+}). Este elemento es relativamente abundante, especialmente en suelos de regiones semiáridas. No obstante, suele encontrarse en formas químicas de baja solubilidad, como el carbonato de calcio ($CaCO_3$) o el yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), lo que limita su disponibilidad en la solución del suelo. Por ello, a pesar de su presencia en el perfil edáfico, el calcio disponible para las plantas puede ser escaso.

El calcio intercambiable constituye la mayor parte del calcio disponible para los cultivos y participa activamente en el equilibrio de cationes del complejo de intercambio del suelo". Es además fundamental para el desarrollo de las paredes celulares de las plantas y para el crecimiento radicular (Villanueva & González, 2012).

Tabla 8. 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 (2012).

2.1.7.10. Magnesio intercambiable

Según Sagarpa (2012), indica que el magnesio es un elemento central en la molécula de clorofila, por lo que está directamente relacionado con la fotosíntesis, el proceso mediante el cual las plantas convierten la luz solar en energía química. Además de su rol en la clorofila, el magnesio también actúa como cofactor en muchas enzimas involucradas en la síntesis de ácidos nucleicos y proteínas.

Tabla 9. Rangos interpretativos para Magnesio (Mg²⁺) intercambiable

Clase	Mg (Cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹) Muy baja
Muy bajo	Mg < 0,5
Bajo	0,5 ≤ Mg < 1,3
Medio	1,3 ≤ Mg < 3,0
Alta	Mg ≥ 3,0

Fuente: SAGARPA (2012).

2.1.7.11. Capacidad de intercambio catiónico

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es un indicador fundamental de la calidad del suelo, ya que está directamente relacionada con su estructura y funcionalidad. Una CIC elevada contribuye a una mejor estructura del suelo, lo que a su vez favorece la aireación, la retención de agua, el desarrollo del microbiota benéfico y, en general, la fertilidad. Este parámetro refleja la capacidad del suelo para retener y suministrar nutrientes esenciales a las plantas a través del intercambio de cationes (Sagarpa, 2012).

Según Brady y Weil (2017), la C.I.C. es un indicador fundamental de la fertilidad del suelo, ya que determina su capacidad para retener nutrientes esenciales y evitar su lixiviación. Suelos con alta C.I.C. pueden almacenar más nutrientes y liberarlos progresivamente, lo que favorece el crecimiento vegetal.

Tabla 10. Rangos interpretativos para la CIC.

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

Fuente: SAGARPA (2012)

2.1.7.12. Conductividad eléctrica

La Conductividad Eléctrica (CE) de una suspensión suelo-agua representa un indicador del contenido total de sales solubles en el suelo. Aunque todos los suelos contienen cierta cantidad de sales, las cuales son necesarias para el crecimiento vegetal, una acumulación excesiva puede resultar perjudicial, ya que interfiere con el equilibrio hídrico de las plantas, limitando su capacidad de absorción de agua. Además de afectar el desarrollo vegetal, la salinidad influye en la actividad microbiana y permite estimar procesos de salinización y erosión del suelo (Doran & Parkin, 1994).

Según Brady y Weil (2017), la C.I.C. es un indicador fundamental de la fertilidad del suelo, ya que determina su capacidad para retener nutrientes esenciales y evitar su lixiviación. Suelos con alta C.I.C. pueden almacenar más nutrientes y liberarlos progresivamente, lo que favorece el crecimiento vegetal.

Según Doran y Parkin (1994), los principales cationes asociados a la salinidad son: calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), potasio (K⁺), sodio (Na⁺) y hidrógeno (H⁺). Por su parte, los aniones más comunes incluyen: nitrato (NO₃⁻), sulfato (SO₄²⁻), cloruro (Cl⁻), bicarbonato (HCO₃⁻) e hidroxilo (OH⁻).

Tabla 11. 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 ≤ CE < 2,0	Suelo muy ligeramente salino
2,0 ≤ CE < 4,0	Suelo moderadamente salino
4,0 ≤ CE < 8,0	Suelo salino
8,0 ≤ CE < 16	Suelo fuertemente salino
CE ≥ 16	Suelo muy fuertemente salino

Fuente: SAGARPA (2012).

2.1.8. Sistema de uso de suelo

2.1.8.1. Ex cocal

El término “ex cocal” se refiere a aquellas áreas que anteriormente fueron utilizadas para el cultivo de coca, pero que han sido abandonadas, erradicadas o reconvertidas a otros usos productivos o de conservación. Estas zonas suelen formar parte de programas de desarrollo alternativo, restauración ecológica o reconversión agrícola impulsados por políticas públicas, en su mayoría vinculadas a estrategias de control del narcotráfico y manejo sostenible del territorio.

Desde un punto de vista edafológico y ecológico, los suelos de zonas ex cicales pueden presentar signos de degradación física, química y biológica debido al uso intensivo de agroquímicos, prácticas de monocultivo, y, en muchos casos, a la tala y quema del bosque previo al establecimiento del cultivo. Como consecuencia, los ex cicales requieren evaluaciones detalladas de su calidad del suelo, fertilidad, capacidad de regeneración y aptitud para cultivos alternativos (UNODC, 2020).

En el aspecto socioeconómico, los ex cicales representan territorios clave en las políticas de desarrollo rural sostenible, ya que su reconversión productiva implica la inserción de comunidades en circuitos económicos lícitos, bajo condiciones de seguridad alimentaria, apoyo técnico y acceso a mercados (DEVIDA, 2016).

El origen y situación actual, los suelos ex cicales han sido abandonados, pero actualmente se están destinando a nuevos usos agrícolas.

La degradación del suelo, se ha perdido el material superficial (epipedón), hay pérdida de nutrientes y de la estructura original del suelo. La causa de la degradación, actividad humana intensiva, tipo de suelo predominante (inceptisoles), características físicas que dificultan la infiltración del agua. Las características del suelo afectado, epipedón con estructura granular o migajosa, endopedón con estructura subangular que resiste la infiltración del agua.

El efecto de la estructura del suelo, la baja infiltración acelera la pérdida de partículas y agregados del epipedón.

La consecuencia final, destrucción y desplazamiento de los agregados del suelo, proceso continuo de degradación.

2.1.9. La guaba y su importancia

La guaba es un árbol de copa densa, aparasolada y ancha con ramificaciones, que alcanza hasta de 30 m de altura, con diámetros de 30 a 60 cm de tronco. Posee una corteza recta, cilíndrica y de color marrón claro. Sus hojas son compuestas paripinnadas, con una longitud de 15 a 25 cm. Posee un raquis con glándulas en forma de cráter, en el cual se encuentran de 4 a 6 pares de folíolos opuestos. Presenta folíolos con base obtusa, aguda u oblonga de color verde oscuro. Las inflorescencias son racimos terminales que pueden medir entre 7 y 12 cm de diámetro polar. Las flores son hermafroditas, con ovario supero, de color blanco; llegan a medir entre 3,5 a 4 cm de diámetro polar. Posee un cáliz y corona tubular con 5 a 4 lóbulos, en los cuales existen numerosos estambres con filamentos filiformes que presentan un diámetro polar entre 3 a 4 cm (Falcao & Clement, 2000). Es originaria de Centroamérica, el Caribe y la Amazonía, así como de los bosques andinos. Esta planta se desarrolla en temperaturas que van desde los 15 a los 22 °C (Silva et al., 2013). La guaba o guabo se desarrolla mejor en suelos alcalinos y ácidos, sin embargo, el pH óptimo para el cultivo es superior a 4. Igualmente, esta planta puede soportar cierto grado de salinidad. Se adapta a precipitaciones entre 1000 mm a 1300 mm (Sobanski & Marques, 2014). La guaba ayuda a controlar la fragmentación del suelo evitando la erosión, ya que toleran los suelos ácidos (Silva et al., 2013). Anualmente al caer las hojas forman un matillo que ayuda a mantener la humedad en el suelo y suprime el crecimiento de arvenses (Sobanski & Marques, 2014). El manejo del cultivo de guaba se realiza con densidades de siembra de 70 a 150 árboles por hectárea, debido a la cantidad de follaje; estos son sembrados en distancias de 12 x 12 m. Sin embargo, en algunos casos los productores después de 3 o 4 años deben remover algunos árboles para evitar competencia (Sobanski & Marques, 2014).

Para el desarrollo ideal de la guaba, los plantones deben ser instalados en un lugar que cumpla con las condiciones agroclimáticas de esta especie. Durante el primer año se debe eliminar las arvenses que crecen alrededor del cultivo con el fin de evitar competencias por luz, agua y nutrientes. Este procedimiento se debe realizar hasta que el follaje pueda producir sombra suficiente para de esta manera limitar el desarrollo de arvenses. El árbol no se poda completamente, solo las ramas secas puesto que, si se cortan por completo las ramas, el árbol muere. Los raleos se realizan en épocas lluviosas para aprovechar la luz y de esta manera influir positivamente en la productividad de nudos en las ramas (Monro et al., 2016).

Las plantas de guaba se han ido adaptando a las distintas condiciones de clima y suelo. Por lo tanto, la floración irá de la mano con las condiciones ambientales, a las que se encuentren expuestas, como luz, temperatura y nutrientes (García, 2008). El principal objetivo de la floración es la reproducción de una planta, por lo cual, cada planta se caracteriza por experimentar transformaciones o cambios muy notables en un tiempo determinado. Todos estos cambios tienen orígenes en procesos bioquímicos internos de la planta, que tienen relación con las condiciones ambientales. Estos procesos emiten señales que reciben los meristemos para que inicie la fase de reproducción. En el caso de los árboles se puede observar la brotación de yemas, las cuales pueden ser florales y foliares (García, 2008). El desarrollo y crecimiento de la gran mayoría de las plantas dependen de la temperatura, ya que esta interviene en los cambios de cada estado fenológico. Durante el desarrollo y crecimiento suceden cambios en las plantas desde la germinación hasta la madurez, entre los cuales se encuentran la brotación, floración y desarrollo de frutos (Parra et al., 2014).



Figura 1. Árbol de guaba en floración

2.1.10. Subíndice de uso sustentable de suelo

La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2012) desarrolló el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) como una herramienta técnica para evaluar la calidad del suelo agrícola a partir de una serie de indicadores fisicoquímicos. Esta iniciativa formó parte de la línea de base del Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales, cuyo propósito principal fue recolectar información cuantitativa y cualitativa que sirviera como referencia para implementar, monitorear y evaluar los impactos de dicho programa en sectores clave como el agrícola, pecuario, forestal y marino.

La medición del estado del suelo mediante el SUSS se basó en el muestreo sistemático de aproximadamente 4,000 parcelas agrícolas distribuidas en distintas regiones de México. Las muestras recolectadas fueron sometidas a análisis fisicoquímicos, los cuales permitieron construir un índice compuesto que refleja el nivel de sustentabilidad del uso del suelo en términos de fertilidad, conservación y equilibrio químico. El SUSS considera parámetros como pH, contenido de materia orgánica, salinidad, densidad aparente y capacidad de intercambio catiónico, entre otros.

No obstante, el propio documento reconoce que los valores de referencia o de corte utilizados en la construcción del subíndice pueden no ser adecuados para todas las condiciones edafoclimáticas del país. En particular, se destaca la necesidad de reformular los umbrales del SUSS en regiones con características diferentes, como aquellas de alta pluviometría, a fin de asegurar su aplicabilidad y relevancia local.

2.2. Estado del arte

Según Hosokay (2012), en su tesis “Calidad de suelo en diferentes sistemas de uso en Supte San Jorge – Tingo María”, realizó una investigación en un fundo agrícola en la parte baja de la microcuenca del río Supte para evaluar cómo distintos sistemas de uso del suelo afectan su calidad, considerando parámetros físicos, químicos y biológicos. En total, analizó siete sistemas de uso. Los resultados mostraron que los terrenos con cultivo de coca presentaban condiciones desfavorables: textura arcillosa, alta resistencia a la penetración (4,22 kg/cm²) e inestabilidad estructural importante (61,59 %). Asimismo, los suelos degradados mostraron aún mayor inestabilidad estructural (66,36 %). En cuanto a los indicadores químicos, los suelos con coca evidenciaron bajos niveles de fósforo disponible (6,17 ppm) y un contenido reducido de materia orgánica (1,76 %), lo que refleja un deterioro notable de la calidad edáfica.

Según Azañero (2016), en su tesis “Calidad del suelo en tres sistemas de uso en la localidad de Río Espino – Monzón (Universidad Nacional Agraria de la Selva), evaluó la calidad del suelo usando el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) en tres sistemas de uso ubicados en Río Espino, valle del Monzón. Encontró que el sistema de cultivo de coca presentaba una textura franco-arcilloso-arenosa y la mayor densidad aparente ($1,49 \text{ g/cm}^3$), lo que indica una compactación significativa. En contraste, el bosque secundario mostró la menor resistencia a la penetración ($1,60 \text{ kg/cm}^2$), reflejando mejores condiciones físicas. Respecto al contenido de materia orgánica, el valor más bajo se registró en los suelos con coca (2,29 %), mientras que el bosque secundario tuvo el mayor nivel de nitrógeno total (0,22 %). Además, el sistema agroforestal (SAF) presentó los valores más altos de potasio, calcio y magnesio intercambiables (0,09, 3,76 y $0,45 \text{ Cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente). Basándose en estos indicadores, el SUSS clasificó al SAF como de calidad “aceptable”, al bosque secundario como “sensible” y al ex-cocal como de calidad “marginal”.

Según Yaros (2017), en su tesis “Calidad de suelo del cultivo a través del subíndice de uso sustentable (SUSS) en diferentes sistemas de uso en el distrito de Padre Felipe Luyando, provincia de Leoncio Prado”, realizó una evaluación de la calidad del suelo utilizando el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) en diversos sistemas de uso del suelo en dicho distrito. Sus resultados mostraron que, desde el bosque secundario hasta los terrenos de cultivo de coca y ex-cocales, se evidencia una tendencia creciente en la densidad aparente (de $1,05$ a $1,35 \text{ g/cm}^3$), la temperatura del suelo (de $24,1$ a $26,2 \text{ }^\circ\text{C}$) y la resistencia a la penetración (de $2,10$ a $2,95 \text{ kg/cm}^2$), mientras que la velocidad de infiltración disminuye significativamente (de $29,3$ a $16,7 \text{ cm/h}$), lo que refleja una degradación progresiva de las condiciones físicas del suelo. En cuanto a los parámetros químicos, se observó una disminución en el pH (de $7,0$ a $4,75$), en el contenido de materia orgánica (de $3,5 \%$ a $1,1 \%$) y en la capacidad de intercambio catiónico – CIC (de $9,13$ a $6,84 \text{ Cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$). Al aplicar el índice SUSS, se clasificó el sistema de cacao como de calidad sensible (0,65), mientras que los sistemas de plátano, bosque secundario y cítrico fueron catalogados como de calidad marginal (0,59, 0,56 y 0,50, respectivamente). Los terrenos ex cocales y cocales obtuvieron los valores más bajos, siendo clasificados como de calidad pobre (0,41 y 0,38). Estos resultados evidencian que el sistema de cultivo de coca tiene el impacto más negativo sobre la calidad del suelo en todos los indicadores evaluados.

Según Solsol (2018), en su tesis “La recuperación de suelos degradados ex cocales por procesos naturales en periodos de abandono en 5, 10, 15, 20 años en el distrito de Mariano Dámaso Beraún”, evaluó los indicadores físicos del suelo y reportó que muestran una marcada

tendencia al aumento en la velocidad de infiltración, mientras que la densidad aparente, la temperatura del suelo y la resistencia a la penetración tienden a disminuir. En cuanto a los indicadores químicos, no se observó una tendencia clara en los niveles de pH, aunque todos los suelos evaluados presentaron un pH fuertemente ácido. Los contenidos de fósforo fueron bajos, al igual que los niveles de materia orgánica, nitrógeno y capacidad de intercambio catiónico (CIC), que oscilaron entre valores medios a muy bajos a lo largo de los períodos de 5, 10, 15 y 20 años de regeneración. Además, la calidad del suelo evaluada mediante el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) mostró un incremento progresivo conforme aumentaba el tiempo de regeneración natural, aunque se mantuvo dentro del mismo rango de calidad. Se concluye que la calidad del suelo mejora con el tiempo de recuperación, destacándose el sistema ex cocal con 20 años de abandono como el que presentó los mejores resultados.

Según Irigoín (2022), en su tesis “Evaluación de indicadores de calidad de suelos mediante análisis multivariado de 223 muestras de suelos del distrito de Huarango – San Ignacio (Universidad Nacional de Cajamarca)”, realizó un estudio para evaluar indicadores químicos de calidad del suelo en el distrito de Huarango, San Ignacio, abarcando un área de 6 315,93 hectáreas. A través de análisis multivariado y análisis de componentes principales, simplificó un gran volumen de datos convirtiendo las 16 propiedades químicas analizadas en un conjunto reducido de variables representativas, lo que facilita la toma de decisiones sobre la calidad del suelo. Analizó 223 muestras recolectadas en 2011 como parte del Proyecto San Antonio de Huarango. El ANOVA mostró que no existían diferencias significativas entre las propiedades químicas de suelos vírgenes y cultivados. El análisis de correlación (con InfoStat) reveló altas correlaciones entre las propiedades, y mediante análisis de componentes principales identificó los indicadores químicos clave: pH, saturación de bases, fósforo disponible, nitrógeno total, potasio disponible y capacidad de intercambio catiónico. Finalmente, concluyó que bajos valores de materia orgánica, nitrógeno total y magnesio se asocian a suelos de baja calidad, mientras que altos valores de pH, fósforo, saturación de bases y capacidad de intercambio catiónico indican suelos con alta calidad.

Según Irigoín (2022), en su tesis “Evaluación de indicadores de calidad de suelos mediante análisis multivariado de 223 muestras de suelos del distrito de Huarango – San Ignacio Universidad Nacional de Cajamarca”, realizó un estudio para evaluar indicadores químicos de calidad del suelo en el distrito de Huarango, San Ignacio, abarcando un área de 6 315,93 hectáreas. A través de análisis multivariado y análisis de componentes principales, simplificó un gran volumen de datos convirtiendo las 16 propiedades químicas analizadas en un conjunto

reducido de variables representativas, lo que facilita la toma de decisiones sobre la calidad del suelo. Analizó 223 muestras recolectadas en 2011 como parte del Proyecto San Antonio de Huarango. El ANOVA mostró que no existían diferencias significativas entre las propiedades químicas de suelos vírgenes y cultivados. El análisis de correlación (con InfoStat) reveló altas correlaciones entre las propiedades, y mediante análisis de componentes principales identificó los indicadores químicos clave: pH, saturación de bases, fósforo disponible, nitrógeno total, potasio disponible y capacidad de intercambio catiónico. Finalmente, concluyó que bajos valores de materia orgánica, nitrógeno total y magnesio se asocian a suelos de baja calidad, mientras que altos valores de pH, fósforo, saturación de bases y capacidad de intercambio catiónico indican suelos con alta calidad.

Según Licapa (2019), en su tesis “Evaluación de la calidad de suelo de un centro agrícola reconvertido a partir de un terreno baldío (Universidad Nacional Federico Villarreal)”, llevó a cabo un estudio en un centro agrícola ubicado en el distrito de Villa El Salvador, Lima Metropolitana. Su evaluación consideró cuatro criterios principales: viabilidad económica, social, ambiental y técnica (basados en impacto económico, percepción social, estudio de impacto ambiental y justificación técnica, respectivamente). Se recolectaron datos mediante encuestas semiestructuradas a usuarios del seguro social local, visitantes del centro y entrevistas con los gestores del proyecto, que surgió por un convenio entre la Autoridad Autónoma del Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao (AATE) y la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur (UNTELS). Los resultados mostraron que la gestión agroecológica del centro tiene viabilidad social, ambiental y técnica, con alta aceptación de la comunidad local, mejoras en la calidad del suelo sin dañar el medio ambiente y correcta implementación técnica. Sin embargo, no demostró viabilidad económica a corto plazo, pues los retornos financieros no cubren la inversión inicial. A pesar de ello, los beneficios ambientales y su aporte a la seguridad alimentaria nacional, especialmente en un contexto de inseguridad alimentaria y cambio climático, respaldan la promoción de este modelo en otras municipalidades de Lima y del país.

Según Blas (2021), evaluó la “calidad del suelo en San Alejandro Irazola, Ucayali”, una zona caracterizada por un bosque húmedo tropical (Bh_t), utilizando indicadores relacionados con el tipo de uso del suelo. El estudio fue de tipo aplicado, con un enfoque descriptivo-comparativo y diseño no experimental. La población consideró todos los tipos de uso del suelo presentes en la zona. Se analizaron propiedades físicas (como textura, densidad aparente, velocidad de infiltración, capacidad de retención de agua, profundidad efectiva,

temperatura y humedad), químicas (materia orgánica, pH, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, nitrógeno total, fósforo total, potasio, calcio, magnesio y sodio intercambiables) y biológicas (biomasa microbiana, respiración microbiana y número de lombrices). Para medir la calidad del suelo se aplicó el subíndice de uso sustentable del suelo (SUSS). La recolección de datos se llevó a cabo mediante técnicas de observación directa, registros de campo y análisis documental. Los resultados indicaron que los sistemas de siembra directa y pastizal obtuvieron valores de SUSS de 0,59 y 0,63, clasificándose como de calidad "marginal", mientras que las áreas de purma baja y bosque fueron clasificadas como de calidad "sensible". Se recomendó la incorporación de enmiendas orgánicas como humus, compost vegetal, estiércol, vermicompost y bocashi, así como la implementación de sistemas silvopastoriles con leguminosas, para mejorar la fertilidad del suelo y favorecer la presencia de microorganismos beneficiosos, como lombrices, que contribuyen a la salud del ecosistema.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El trabajo de investigación se realizó en el sector de Nueva Unión, ubicado en el centro poblado Supte San Jorge, distrito Rupa Rupa, provincial Leoncio Prado, región Huánuco.

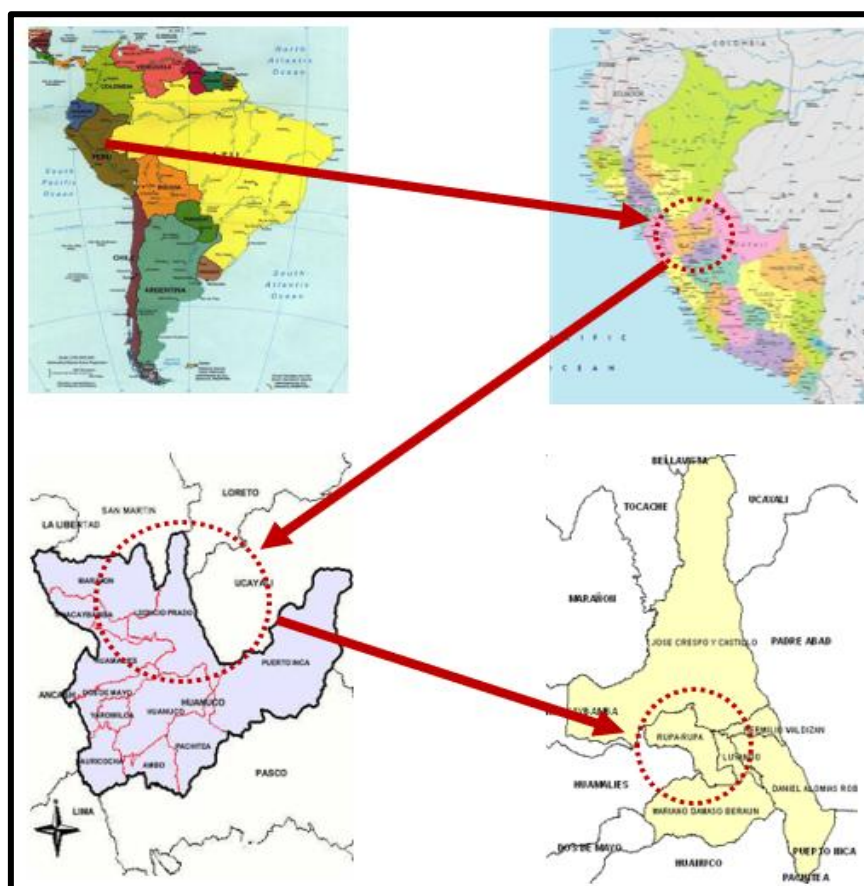


Figura 2. Ubicación política de la zona de estudio

3.1.1. Ubicación geográfica

El fundo del Sr. Manfredo Pedro Ponce Zúñiga, se ubica en la zona 18 L cuyas coordenadas UTM son:

Este : 393236.57
Norte : 8970945.94
Altitud : 690 metros sobre el nivel del mar (ms.n.m)

3.1.2. Zona de vida

Según Holdridge (1986), en su diagrama de zonas de vida, el distrito de Rupa Rupa y el centro poblado de Supte San Jorge se ubican dentro de las formaciones ecológicas correspondientes al bosque muy húmedo tropical (bh-T). Esta clasificación se basa en criterios

bioclimáticos que consideran la temperatura media anual, la precipitación total y la evapotranspiración potencial, lo que permite delimitar zonas de vida con condiciones ecológicas relativamente homogéneas.

3.1.3. Clima

El distrito de Rupa Rupa presenta un clima tropical cálido, con una temperatura media anual que varía entre 18 °C y 35 °C, una humedad relativa promedio del 77,5 % y una precipitación anual aproximada de 3,000 mm. Se caracterizan además fenómenos locales de microclimas, donde las lluvias pueden variar significativamente en distancias de tan solo 200 a 500 metros (SENAMHI, 2020).

3.1.4. Vías de acceso

La vía principal para llegar al sector de Nueva Unión, desde la ciudad de Tingo María es a través de una carretera asfaltada y carrozable, con un distanciamiento aproximadamente de 3,5 km con un tiempo referencial de 20 a 25 minutos.

3.1.5. Áreas de intervención para los muestreos de suelo

3.1.5.1. Suelos ex cocal con 2 años de recuperación con especies de guaba

El área de investigación corresponde a una parcela de recuperación con dos años de instalación, en la que se ha establecido la especie de guaba sobre una superficie de 1 hectárea. Esta se localiza a una altitud de 648 metros sobre el nivel del mar (ms.n.m.) y presenta una humedad relativa promedio de 82,6 %. El relieve del terreno es de pendiente moderadamente inclinada, lo que influye en el escurrimiento superficial y la infiltración. El método de plantación utilizado es de tres bolillos, con un espaciamiento de 3 × 3 metros, favoreciendo la cobertura progresiva del dosel arbóreo y la conservación del suelo. De forma natural, se ha observado la colonización de especies herbáceas, entre las que destaca *Pueraria montana* (kudzu), una leguminosa rastrera con capacidad de fijación de nitrógeno, que contribuye a la cobertura vegetal y reducción de la erosión.

3.1.5.2. Suelos ex cocal con 4 años de recuperación con especies de guaba

El área de investigación corresponde a una parcela de recuperación con dos años de instalación, en la que se ha establecido especie de guaba sobre una superficie de 1 hectárea. Esta se localiza a una altitud de 648 metros sobre el nivel del mar (ms.n.m.) y presenta una humedad relativa promedio de 82,6 %. El relieve del terreno es de pendiente moderadamente inclinada, lo que influye en el escurrimiento superficial y la infiltración. El método de plantación utilizado es de tres bolillos, con un espaciamiento de 3 × 3 metros,

favoreciendo la cobertura progresiva del dosel arbóreo y la conservación del suelo. De forma natural, se ha observado la colonización de especies herbáceas, entre las que destaca *P. montana*, una leguminosa rastrera con capacidad de fijación de nitrógeno, que contribuye a la cobertura vegetal y reducción de la erosión.

3.1.5.3. Suelos ex cocal con 6 años de recuperación con especies de guaba

El área de investigación corresponde a una parcela en proceso de recuperación ecológica con seis años de establecimiento, en la que se ha introducido especie de guaba como componente principal del sistema agroforestal. Esta área presenta una extensión de 0.8 hectáreas, ubicada a una altitud de 649 metros sobre el nivel del mar (ms.n.m.) y con una humedad relativa promedio de 82,6 %. El relieve es moderadamente inclinado, lo cual influye directamente en la dinámica hídrica y en los procesos de erosión superficial, haciendo especialmente relevante la cobertura vegetal y el manejo del suelo.

La parcela ha sido diseñada bajo un sistema de plantación en tres bolillos, con una distribución de 3 × 3 metros entre individuos, estrategia que favorece la interceptación de lluvia, la acumulación de hojarasca y la mejora en la estructura del suelo. En diversas secciones de la parcela se observa la presencia de especies herbáceas espontáneas, destacando *P. montana*, una leguminosa rastrera de rápido crecimiento que contribuye a la fijación de nitrógeno, mejora la cobertura del suelo y reduce los procesos de escorrentía y compactación.

3.2. Material y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

3.2.1.1. Materiales de campo

Para la presente investigación se utilizó los siguientes materiales: un mapa de ubicación, una wincha, rafia, un balde de plástico de 5 litros, bolsas plásticas, etiquetas de papel, papel aluminio, envases de vidrio de 100 ml, botellas plásticas de 3 litros, un machete y un tubo de muestreo.

3.2.1.2. Materiales de laboratorio

Tamiz de 5,2 y 0,25 mm de diámetro, rodillo y maquina moladora.

3.2.1.3. Equipos

Los equipos que se utilizó en campo serán, termómetro de suelo, clinómetro, penetrómetro, cámara fotográfica, GPS marca GARMIN MAP 60 CSx.

3.2.2. Metodología

3.2.2.1. Determinación de los parámetros físicos y químicos del suelo en establecimiento con 2,4 y 6 años rehabilitados con *Inga edulis*

- Ubicación e alineado de las parcelas en estudio

Durante esta etapa se llevó a cabo la recopilación de toda la información relevante del área en estudio. Se verificó la información edafológica y se realizó un reconocimiento general del terreno, con el fin de identificar características fisiográficas, accesibilidad y condiciones de manejo, así como establecer con precisión los puntos de muestreo para su posterior evaluación.

- Delimitación y georreferenciación de las parcelas

Se delimitaron las parcelas o transectos de forma aleatoria; para ello, se establecieron en cada sistema de uso parcelas de 25 m x 25 m (en las diferentes áreas ex cicales de 2, 4 y 6 años), debidamente georreferenciadas.

- Método de muestreo de suelos

Para la recolección de muestras de suelo, se delimitaron las tres parcelas correspondientes a los sistemas de uso en estudio. En cada una de las parcelas se tomaron 10 submuestras distribuidas mediante un trazo en zigzag, cubriendo de manera representativa toda el área (largo y ancho) de cada unidad experimental. Posteriormente, las submuestras se mezclaron para conformar una muestra compuesta por parcela. Adicionalmente, para cada sistema de uso del suelo, se excavó un hoyo de 30 cm de profundidad, considerado como unidad muestral estándar. De cada hoyo se extrajo aproximadamente 1 kilogramo de suelo homogéneo, que fue almacenado adecuadamente para su posterior análisis en el laboratorio. Para el muestreo y evaluación de las distintas parcelas correspondientes a suelos ex cicales, se adoptó la metodología de evaluación de la calidad del suelo recomendada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2012). Esta metodología se basó en la aplicación del Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS), herramienta que permitió evaluar el estado del suelo en función de su uso actual y su capacidad de sostenibilidad. La evaluación de las propiedades físicas y químicas del suelo se realizó siguiendo los protocolos establecidos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1999), así como los lineamientos metodológicos propuestos por Bazán (1996).

Según Moscatelli et al. (2005), para el muestreo de suelo se adoptó la metodología desarrollada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

(INTA) de Argentina. Esta metodología estableció lineamientos técnicos orientados a lograr una toma de muestras representativa, eficiente y reproducible, lo cual resultó esencial para la evaluación precisa de la calidad del suelo en diferentes usos o condiciones de manejo. Entre sus recomendaciones destacaron el número de submuestras, la profundidad de muestreo, el tipo de herramienta utilizada y las condiciones ideales del suelo al momento del muestreo.

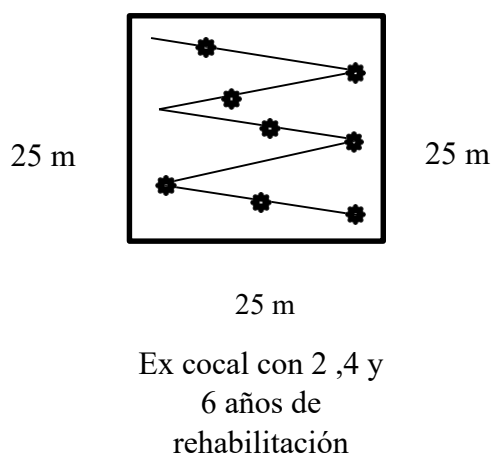


Figura 3. Diagrama de muestreo de suelos para el análisis físico y químico

- Determinación de los parámetros físicos y químicos del suelo

El análisis de las muestras de suelo recolectadas se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS). En este laboratorio se evaluaron diversas variables fisicoquímicas relacionadas con la calidad del suelo, tales como pH, materia orgánica, textura, capacidad de intercambio catiónico (CIC), fósforo disponible, nitrógeno total, entre otras. Estas variables se detallaron en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Parámetros físicos y químicos del suelo

Parámetros físicos	Método de su determinación
Textura del suelo	Método del hidrómetro de Bouyoucos
Densidad aparente	Por volumen, peso húmedo y seco
Temperatura del suelo	Método directo (geotermómetro)
Resistencia del suelo	Método directo (penetrómetro)
Parámetros Químicos	Método de su determinación
Materia orgánica	Método de Walkley y Black
Reacción del suelo	Método del potenciómetro
Nitrógeno total	Método de Kjeldahl
Fósforo disponible	Método de Olsen
Potasio disponible	Método del ácido sulfúrico
Bases intercambiables	Acetato de amonio
CIC	Saturación con acetato de amonio

Fuente: Doran y Lincoln (1999), Moscatelli et al. (2000) y Acevedo et al. (2000).

3.2.2.2. Determinación de la calidad del suelo en establecimientos con 2, 4, 6 años rehabilitados con *Inga edulis*, aplicando el Subíndice de Uso Sustentable (SUSS)

- Método para la determinación de la calidad del suelo

Para determinar la calidad del suelo, se empleó el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS), en el cual se consideraron los parámetros edáficos que inciden directamente en su calidad. Se seleccionó un conjunto mínimo de propiedades analizadas, consideradas como las más relevantes para el uso agropecuario a nivel global, tanto en condiciones de riego como en condiciones de temporal (secano). Para cada propiedad edáfica considerada, se establecieron rangos máximos y mínimos, a partir de los cuales se procedió a la normalización de los indicadores de calidad del suelo.

Esta normalización permitió convertir los valores a una escala de 0 a 1, donde 1 representó la mejor condición de calidad del suelo y 0 la peor. Con los datos ya normalizados, se calculó un promedio simple, denominado subíndice de uso sustentable del suelo. Este subíndice se clasificó conforme a rangos previamente definidos de calidad del suelo. El índice resultante se estimó tanto a nivel nacional como por entidad federativa, diferenciando entre las condiciones de agricultura de riego y agricultura de temporal (secano). Para ello, se utilizó la siguiente fórmula.

$$SUSS = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

Dónde:

P: es el promedio del valor de los parámetros normalizados

i: es cada indicador o parámetro analizado,

n: es el número total de parámetros analizados.

$$P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$$

Dónde:

Rn: es el valor resultante del parámetro normalizado

m: es el número de muestras de suelo analizadas

j: es cada muestra de suelo.

La ecuación de cálculo de la normalización de los indicadores es la siguiente:

Dónde:

Rn: es el resultado normalizado

Vr: es el valor del parámetro fisicoquímico (indicador)

d: es el valor deseable en el indicador

c: es el valor de corte en el indicador

j: es cada muestra de suelo

Los rangos de valores deseables para cada parámetro considerado en la estimación del SUSS se presentan en la siguiente **Tabla 13**.

Tabla 13. Parámetros edáficos, unidades de medida, valores máximos y mínimos definidos para evaluar el estado actual del suelo

Indicador	Unidad de medida	Rango o valor deseable (d)	Valor de corte ©
Materia orgánica (MO)	%	MO > 5	0,5
Densidad aparente (Dap)	g/cm ³	Dap < 1,1	1,47
Conductividad eléctrica (CE)	dSm ⁻¹	CE < 1	4,1
pH	pH	6 < pH < 7	5 < pH > 8,5
Fósforo (P)	mg kg ⁻¹	P > 5,5	0
Magnesio (Mg)	Cmol(+) kg ⁻¹	Mg > 0,3	0
Calcio (Ca)	Cmol(+) kg ⁻¹	ca > 5	0
RAS	RAS	< 2,5	4
CIC	Cmol(+) kg ⁻¹	CIC > 15	5
Nitrógeno total	%	N > 0,2	0,05

Fuente: SAGARPA (2012)

La interpretación del índice se realizó conforme a la clasificación de la **Tabla 14**.

Tabla 14. Rangos interpretativos del SUSS

Calidad del suelo	Descripción
Bueno ($0,95 < \text{SUSS}$)	Las condiciones de la calidad del suelo son las deseables para llevar a cabo la actividad agrícola
Aceptable ($0,80 < \text{SUSS} < 0,95$)	La calidad del suelo está cercana a las condiciones deseables. Las variables analizadas poco se alejan de los valores adecuados
Sensible ($0,65 < \text{SUSS} < 0,78$)	Los parámetros medios ocasionalmente se alejan de los valores óptimos
Marginal ($0,45 < \text{SUSS} < 0,65$)	Los indicadores de la calidad son distantes de los valores deseables
Pobre ($0 < \text{SUSS} < 0,45$)	La calidad de suelos para fines agrícolas se encuentra amenazada o afectada. Los indicadores se alejan completamente de los niveles deseables.

Fuente: SAGARPA (2012)

3.2.3. Componentes en estudio

3.2.3.1. Enfoque

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, porque el estudio se basa en la recolección y análisis de datos medibles sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo (pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, etc.) en diferentes etapas de rehabilitación con guaba. Este enfoque permite establecer comparaciones y relaciones objetivas (Hernández et al., 2014).

3.2.3.2. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, por que busca generar conocimientos que sirvan para resolver un problema concreto: la calidad de suelos ex cacaes rehabilitados con especie de guaba en diferentes etapas de establecimiento (Tamayo, 2004).

3.2.3.3. Nivel de investigación

El nivel es descriptivo por que identifica y caracteriza indicadores edáficos (pH, materia orgánica, textura, densidad aparente) y explicativo por que analiza como

las diferentes etapas de establecimiento de guaba influyen en su calidad (Hernández et al., 2014).

3.2.3.4. Diseño de investigación

Se adopta un diseño no experimental y un corte transversal, ya que no se manipulan las variables de forma deliberada, sino que se observan las condiciones naturales del suelo en parcelas con diferentes años de establecimiento de guaba. Se comparan los resultados entre diferentes etapas para evaluar la calidad del suelo degradados ex cicales rehabilitados con *I. edulis* “guaba” (Sampieri et al., 2014).

3.2.3.6. Población, muestra, tipo de muestreo

Población: todos los suelos rehabilitados en m² con especie de guaba en parcelas ex cicales ubicados en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco. Muestra: tres parcelas en m² con suelos ex cicales, cada una con diferente edad de establecimiento de guaba (2, 4 y 6 años) en el distrito de Rupa Rupa, provincia Leoncio Prado. Tipo de muestreo: se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia y criterio. Esto se debe a que las parcelas seleccionadas no se eligen al azar, sino que se seleccionan intencionalmente según su disponibilidad, acceso y adecuación a los criterios de investigación (tiempo de establecimiento, condiciones similares de degradación, pendiente, etc.).

3.2.3.7. Variable e indicadores

Tabla 15. Operacionalización de variables

3.2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de información y procesamiento de datos

3.2.4.1. Técnicas de recolección de información y procesamiento de datos

Variables	Dimensiones	Indicadores
Etapas de establecimiento de guaba	Tiempo de establecimiento	Edad de la plantación (2, 4 y 6 años)
Calidad del suelo	Propiedades físicas	Textura del suelo
		Densidad aparente
	Propiedades químicas	pH del suelo
		Materia orgánica (%)
		Nitrógeno total (N)
		Fósforo disponible (P)
		Potasio intercambiable (K)

Para la evaluación de la calidad de los suelos ex cicales rehabilitados con *I. edulis* en el distrito de Rupa Rupa, se empleó técnicas bibliográficas, técnicas de campo y técnica estadística. Estas metodologías permitieron obtener datos representativos, reproducibles y técnicamente válidos, asegurando una adecuada caracterización de las propiedades edáficas y ecológicas del área de estudio (Baena, 2017).

- Técnicas bibliográficas

Se consultaron a fuentes primarias, artículos científicos indexados, documentos técnicos institucionales, tesis universitarias y normativas oficiales.

- Técnicas de campo

Se aplicó técnicas de campo basadas en protocolos estandarizados de muestreo de suelos. Se realizó un muestreo de suelo no probabilístico por conveniencia y criterio a una profundidad de 0–20 cm.

- Técnica estadística

Se empleó la estadística descriptiva para organizar, resumir y presentar los datos obtenidos de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Se calcularon medidas de tendencia central (media, mediana) y medidas de dispersión (desviación estándar, coeficiente de variación), las cuales permitieron caracterizar la calidad del suelo en cada etapa de establecimiento de *I. edulis* (2, 4 y 6 años) (Hernández et al., 2014).

3.2.4.2. Instrumentos de recolección de información y procesamiento de datos

En la investigación se emplearon instrumentos metodológicos bibliográficos, de campo y estadísticos que facilitaron la recolección, organización y análisis de la información (Palomino et al., 2015).

- Instrumentos bibliográficos

Se utilizaron fuentes académicas confiables, como libros, artículos científicos, informes técnicos y documentos institucionales, para sustentar el marco teórico y metodológico de la investigación. Estas fuentes permitieron identificar criterios e indicadores clave para la evaluación de la calidad del suelo, así como antecedentes relevantes sobre la rehabilitación de suelos degradados con especies de guaba.

- Instrumentos de campo

Los instrumentos de campo permitieron la obtención de información primaria mediante el muestreo de suelos, observaciones directas, mediciones in situ y el registro sistemático de datos en fichas de campo (Moscatelli et al., 2005).

- Instrumentos estadísticos

los instrumentos estadísticos se emplearon para el procesamiento, análisis e interpretación de los datos obtenidos, mediante el uso de técnicas de estadística descriptiva e inferencial, lo que permitió comparar la calidad del suelo en las diferentes etapas de establecimiento de la guaba.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación de los parámetros físicos y químicos del suelo en establecimientos con 2, 4 y 6 años rehabilitados con *Inga edulis* (guaba)

4.1.1. Textura del suelo

El suelo de las parcelas de *I. edulis* correspondientes a 2, 4 y 6 años presentó una textura franco limosa en todos los casos. En la parcela de 2 años, el suelo había mostrado un 29 % de arena, 15 % de arcilla y 56 % de limo, reflejando un claro predominio del limo. En la parcela de 4 años, los porcentajes habían variado a 21 % de arena, 25 % de arcilla y 54 % de limo, lo que indicó una textura ligeramente más fina por el aumento de arcilla. Finalmente, en la parcela de 6 años, el suelo registró 23 % de arena, 19 % de arcilla y 58 % de limo, manteniendo el predominio limo-arcilla característico. En conjunto, los suelos habían conservado propiedades físicas similares, con una textura fina y buena capacidad de retención de humedad.

Tabla 16. Textura del suelo en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

Parcelas rehabilitadas con <i>I. edulis</i>	Análisis mecánico			
	Arena %	Arcilla %	Limo %	Textura
Parcela <i>I. edulis</i> 6 años	23	19	58	Franco Limoso
Parcela <i>I. edulis</i> 4 años	21	25	54	Franco Limoso
Parcela <i>I. edulis</i> 2 años	29	15	56	Franco Limoso

Los resultados muestran que las parcelas de *I. edulis* de 2, 4 y 6 años mantienen una textura franco limosa, con predominio del limo en todos los casos. Esta estabilidad en los porcentajes de arena, limo y arcilla concuerda con lo señalado por Brady & Weil (2017), quienes afirman que la textura es una propiedad intrínseca y poco modificable por el manejo agrícola, influyendo además en procesos como la infiltración, la fertilidad y la actividad microbiana. De igual forma, la clasificación como suelos franco limosos coincide con lo descrito por Gómez et al. (2011), para quienes conocer la textura permite ubicar el suelo dentro de grupos texturales que orientan decisiones de uso y manejo. En este caso, la textura fina observada sugiere una buena capacidad de retención de humedad, característica coherente con la presencia dominante del limo y útil para el desarrollo de *I. edulis*. En conjunto, los resultados confirman que, pese a las diferentes edades de las parcelas, la textura del suelo se mantiene

similar, lo que refuerza su naturaleza estable y su importancia para la planificación del manejo edáfico.

4.1.2. Temperatura, resistencia a la penetración y densidad aparente del suelo

Las parcelas de *Inga edulis* mostraron variaciones moderadas en temperatura y propiedades físicas del suelo. La parcela de 2 años registró la temperatura más alta (26,2 °C), mayor resistencia a la penetración (3,25 kg/cm²) y densidad aparente más elevada (1,32 g/cm³), indicando menor estructura y compactación inicial. Las parcelas de 4 y 6 años mostraron temperaturas, resistencia y densidad menores, reflejando una mejora progresiva de la estructura y porosidad del suelo con la edad del cultivo. Los resultados en las parcelas de *I. edulis* muestran variaciones moderadas en temperatura y propiedades físicas del suelo, relacionadas con la edad del cultivo y la cobertura vegetal. La parcela de 2 años presentó la temperatura más alta (26,2 °C), coincidiendo con Sagardoy y Mandolesi (2005), quienes indican que la temperatura del suelo depende de su capacidad calórica específica, humedad y cobertura vegetal. La resistencia a la penetración fue mayor en la parcela más joven (3,25 kg/cm²), reflejando menor desarrollo estructural y acumulación de materia orgánica, mientras que las parcelas más maduras mostraron menor compactación. La densidad aparente (1,27–1,32 g/cm³) se mantiene dentro de los rangos descritos por Brady y Weil (2017), mostrando una ligera disminución con la edad del cultivo, lo que indica mejora de la porosidad y estructura del suelo. En conjunto, estos resultados concuerdan con la literatura y evidencian que *I. edulis* contribuye a la recuperación física y térmica de suelos degradados.

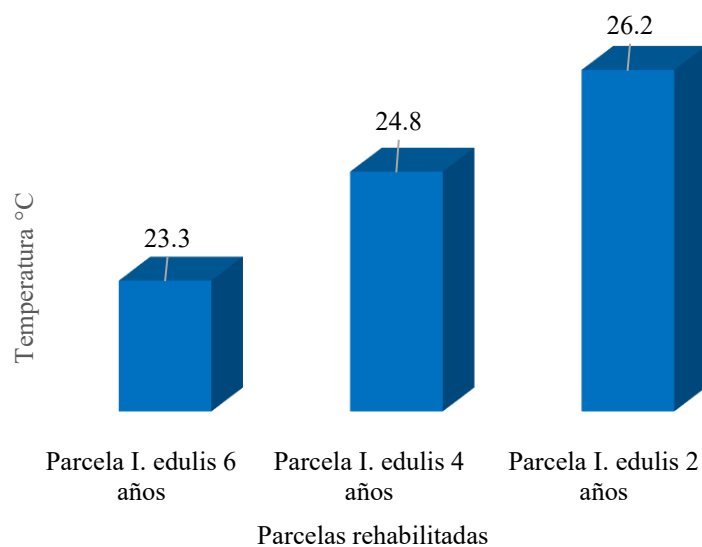


Figura 4. Temperatura del suelo en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

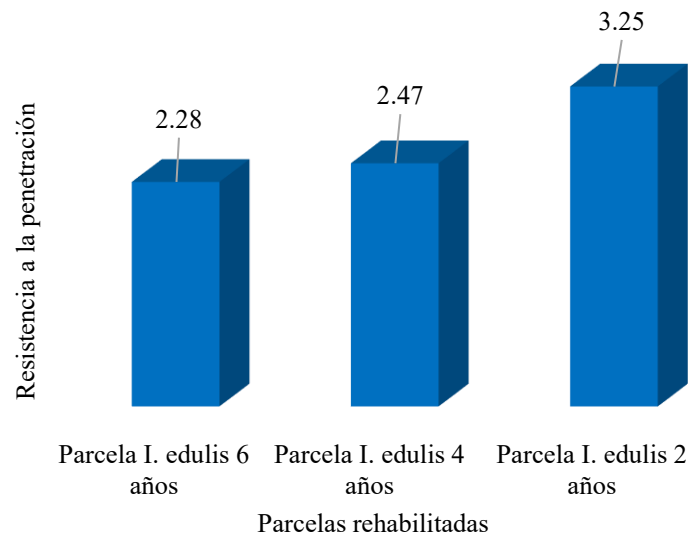


Figura 5. Resistencia a la penetración en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

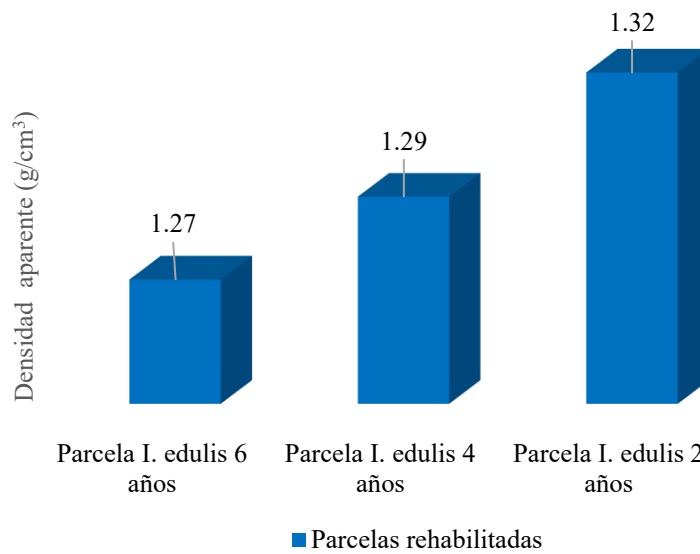


Figura 6. Densidad aparente en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

4.1.3. Potencial de hidrogeno y fosforo disponible

El análisis del suelo en las parcelas con *I. edulis* de distintas edades muestra una clara tendencia de mejora en sus características químicas. El pH en la parcela de 2 años es de 4,38, indicando un suelo fuertemente ácido; en la parcela de 4 años aumenta ligeramente a 4,77, manteniéndose aún ácido, pero evidenciando un proceso de recuperación; mientras que en la parcela de 6 años alcanza 6,08, un valor ligeramente ácido y mucho más favorable para la disponibilidad de nutrientes. Esta evolución sugiere que el desarrollo del sistema radicular y el

aporte de materia orgánica de *I. edulis* contribuyen progresivamente a reducir la acidez del suelo.

En cuanto al fósforo disponible, las parcelas de 2 y 4 años presentan valores bajos y muy similares (6,42 % y 6,51 %), lo que se asocia a la fuerte acidez que limita su disponibilidad. Sin embargo, en la parcela de 6 años se observa un incremento notable hasta 27,34 %, coherente con el aumento del pH hacia niveles que favorecen la solubilidad del fósforo. En conjunto, los resultados indican que con el incremento de la edad de *I. edulis* el suelo mejora tanto en acidez como en disponibilidad de fósforo, reflejando un proceso de recuperación edáfica impulsado por la presencia de esta especie.

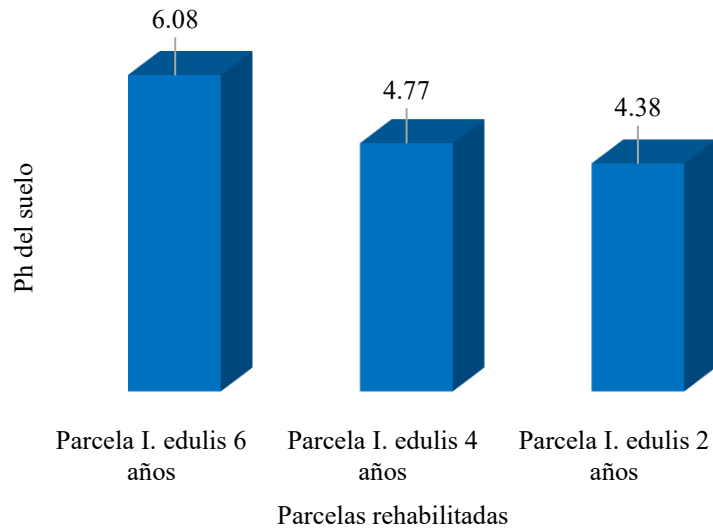


Figura 7. pH del suelo en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

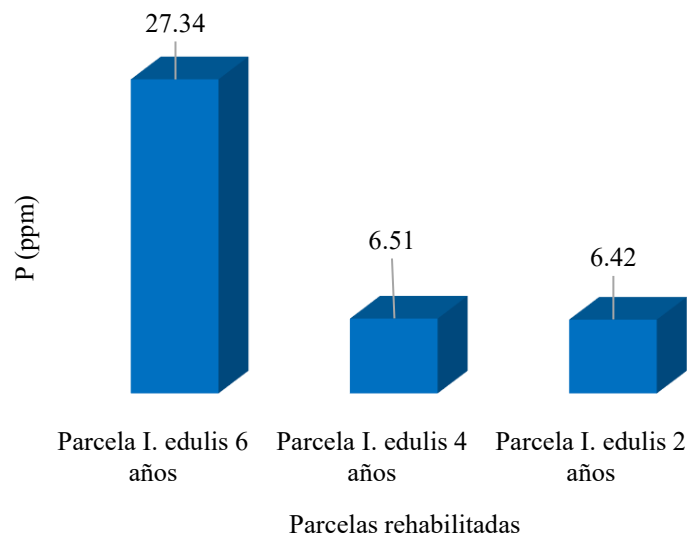


Figura 8. Fosforo disponible en el suelo en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

La tendencia observada en el pH y el fósforo disponible de las parcelas con *I. edulis* coincide con los planteamientos de Brady & Weil (2017), quienes señalan que el pH es un factor determinante para la solubilidad y disponibilidad de nutrientes, así como para la actividad microbiana que favorece la fertilidad del suelo.

En este estudio, el incremento del pH desde suelos fuertemente ácidos en las parcelas jóvenes hacia valores ligeramente ácidos en la parcela de 6 años explica la mejora en la disponibilidad de nutrientes, especialmente del fósforo. Asimismo, los resultados se relacionan con lo expuesto por Villanueva y González (2012), quienes afirman que solo una fracción del fósforo total es realmente aprovechable por los cultivos, por lo que su disponibilidad depende en gran medida de las condiciones químicas del suelo.

El aumento significativo del fósforo disponible en la parcela de 6 años indica que, conforme el pH se estabiliza en rangos más favorables, se reduce la fijación del fósforo y se incrementa su solubilidad.

En conjunto, estos resultados evidencian que la presencia y madurez de *I. edulis* contribuyen a mejorar la calidad del suelo tanto a corto como a largo plazo, favoreciendo procesos de recuperación edáfica y optimizando la disponibilidad de nutrientes esenciales.

4.1.4. Materia orgánica y nitrógeno total

El análisis de la materia orgánica y el nitrógeno total en las parcelas con *Inga edulis* muestra variaciones asociadas al desarrollo del sistema. La parcela de 2 años registra el mayor contenido de materia orgánica (2,52 %) y de nitrógeno (0,126 %), reflejando un aporte inicial elevado de residuos vegetales y menor grado de descomposición.

En la parcela de 4 años ambos valores disminuyen de forma marcada (1,04 % de MO y 0,052 % de N), lo que sugiere una mayor mineralización de la materia orgánica, posible lixiviación y un menor aporte de nuevos residuos en esta etapa intermedia.

Finalmente, en la parcela de 6 años se observa un ligero aumento de la materia orgánica (1,28 %) y del nitrógeno (0,064 %), indicando que, con la madurez del sistema *I. edulis*, se restablece parcialmente el equilibrio entre aportes y descomposición, favoreciendo una recuperación gradual de la fertilidad del suelo.

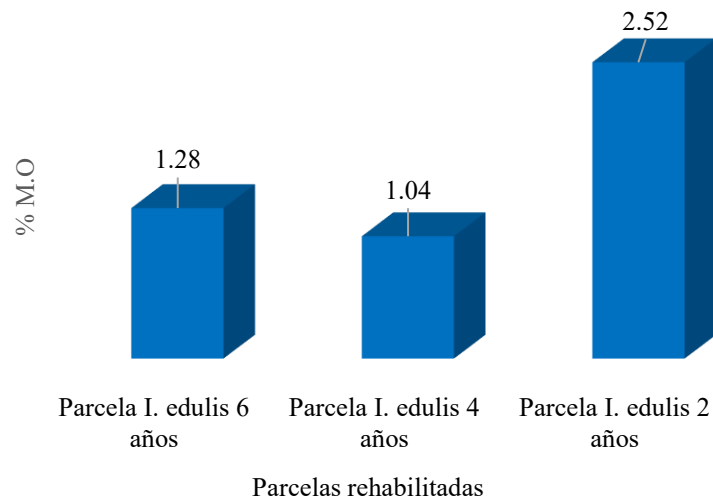


Figura 9. Materia orgánica en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

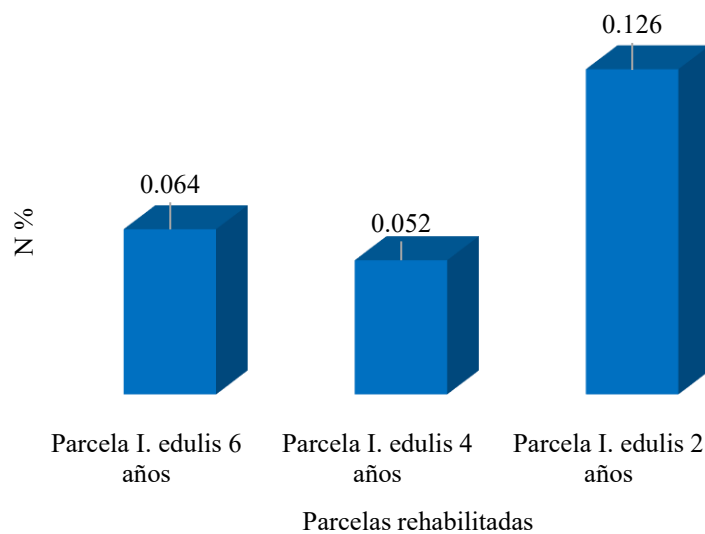


Figura 10. Nitrógeno total en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

4.1.5. Potasio disponible, calcio y magnesio cambiante

Los cationes intercambiables (K, Ca y Mg) aumentaron progresivamente con la edad de las parcelas de *Inga edulis*, reflejando una mejora en la fertilidad del suelo asociada al desarrollo radicular y la acumulación de materia orgánica. El potasio intercambiable pasó de 0,049 % en la parcela de 2 años a 0,333 % en la de 6 años, coincidiendo con Villanueva y González (2012), quienes destacan su importancia en la fotosíntesis, síntesis de proteínas y regulación hídrica. El calcio y magnesio también mostraron incrementos, respaldando su papel en la estabilidad del suelo y la fotosíntesis (SAGARPA, 2012). Estos resultados evidencian que

la rehabilitación con *I. edulis* mejora la fertilidad química y la capacidad del suelo para sustentar el crecimiento vegetal.

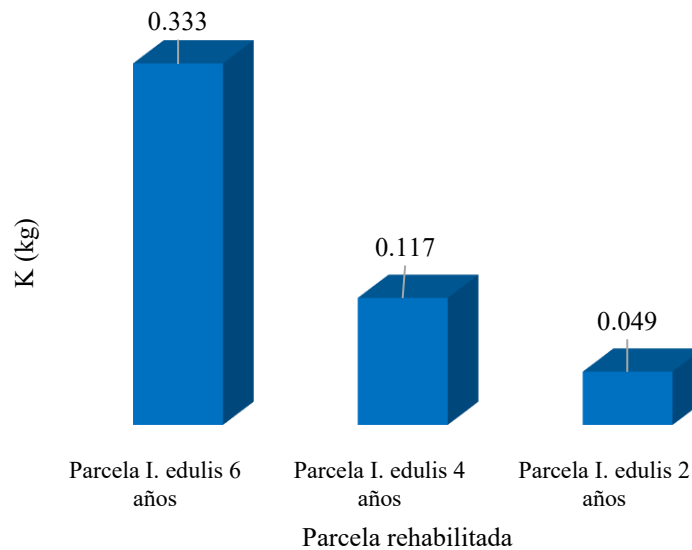


Figura 11. Potasio intercambiable en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

De manera similar, el calcio intercambiable muestra un comportamiento ascendente, pasando de 3,874 % a los 2 años a 3,34 % en la parcela de 4 años —con una ligera disminución—, pero aumentando de forma notable a 4,57 % en la de 6 años, lo que sugiere una mayor capacidad de intercambio catiónico y una estabilización de las condiciones químicas del suelo en etapas más avanzadas del sistema.

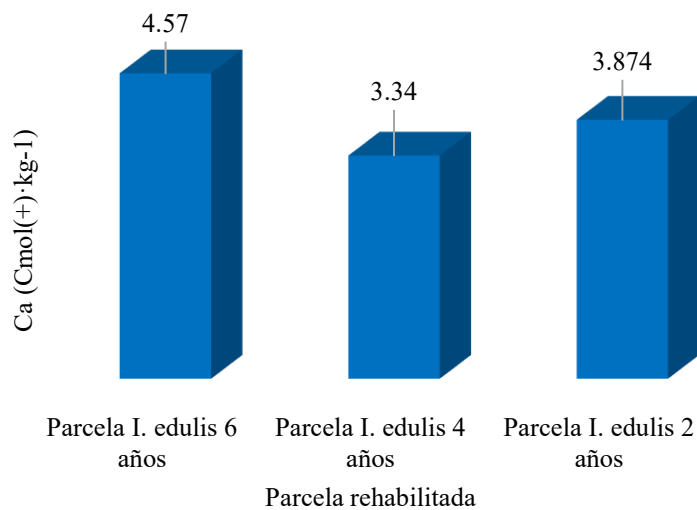


Figura 12. Calcio intercambiable en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

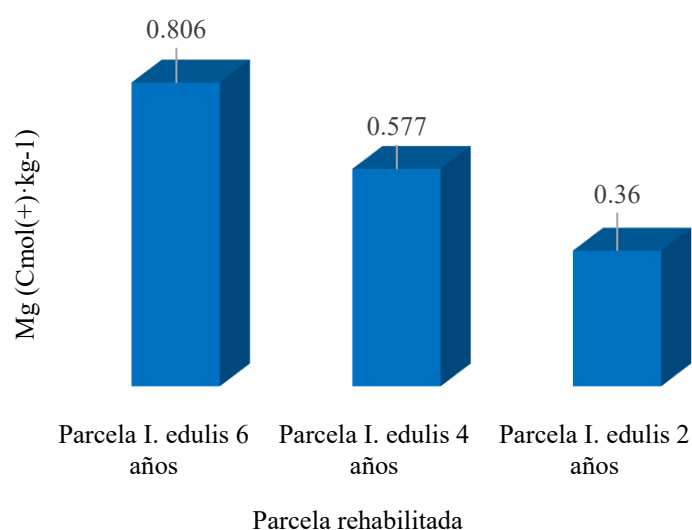


Figura 13. Magnesio intercambiable en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

Por su parte, el magnesio intercambiable también presenta aumentos consistentes, desde 0,36 % en la parcela joven, hasta 0,577 % a los 4 años y 0,806 % a los 6 años, indicando una mejora en la fertilidad básica del suelo y en la disponibilidad de nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal. En conjunto, los incrementos observados en los tres cationes sugieren que *Inga edulis*, a medida que madura, contribuye a enriquecer el suelo, favoreciendo mejores condiciones químicas para el desarrollo de la vegetación.

Los resultados muestran que el potasio, el calcio y el magnesio intercambiables aumentan conforme la parcela de *I. edulis* envejece, lo que coincide con la literatura sobre el papel de estos cationes en la fertilidad del suelo y la fisiología vegetal. El potasio incrementa de 0,049 % a 0,333 %, lo que indica una mayor disponibilidad de este nutriente, considerado por Villanueva y González (2012) como la fracción más accesible para las plantas, esencial para procesos como la fotosíntesis y la regulación hídrica. El calcio intercambiable también aumenta con la edad de las parcelas, alcanzando 4,57 % a los 6 años; según SAGARPA (2012), este elemento es fundamental en la dinámica edáfica y se relaciona con la estabilidad química del suelo. Del mismo modo, el magnesio incrementa de 0,36 % a 0,806 %, lo cual resulta relevante porque, de acuerdo con SAGARPA (2012), es el elemento central de la clorofila y clave para la fotosíntesis. En conjunto, estos incrementos sugieren que *I. edulis* contribuye progresivamente a mejorar la fertilidad y las condiciones químicas del suelo mediante procesos asociados a la acumulación de materia orgánica y el fortalecimiento del ciclo de nutrientes.

4.1.6. Capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica

Los resultados de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) y de la conductividad eléctrica (CE) en las parcelas con *I. edulis* muestran variaciones asociadas a la edad del sistema. La CICE presenta valores relativamente similares entre parcelas, aunque con ligeras fluctuaciones: 5,994 % en la parcela de 2 años, 5,27 % en la de 4 años y 5,858 % en la de 6 años. Estos resultados indican que, aunque existe una pequeña disminución a los 4 años, la capacidad del suelo para retener y suministrar cationes esenciales se mantiene estable y tiende a recuperarse con el tiempo, lo cual sugiere un proceso de mejora gradual en la estructura y la fertilidad del suelo conforme avanza el desarrollo del sistema vegetativo. En cuanto a la conductividad eléctrica, se observa una tendencia claramente ascendente: 0,19 % en la parcela de 2 años, 0,64 % en la de 4 años y 2,86 % en la de 6 años. Este incremento refleja una mayor presencia de sales solubles en el suelo a medida que la parcela envejece, lo cual puede estar relacionado con la acumulación de nutrientes provenientes de la descomposición de hojarasca, la actividad radicular y el enriquecimiento general del sistema edáfico. En conjunto, los resultados evidencian que *I. edulis* contribuye con el tiempo a modificar las propiedades químicas del suelo, manteniendo una CICE estable y aumentando la disponibilidad de sales, lo que influye directamente en la dinámica nutricional y en el potencial productivo del ecosistema.

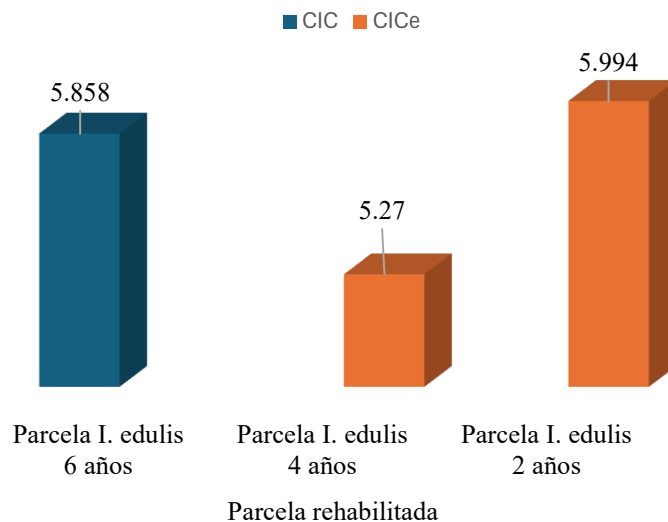


Figura 14. Capacidad intercambio catiónico en parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

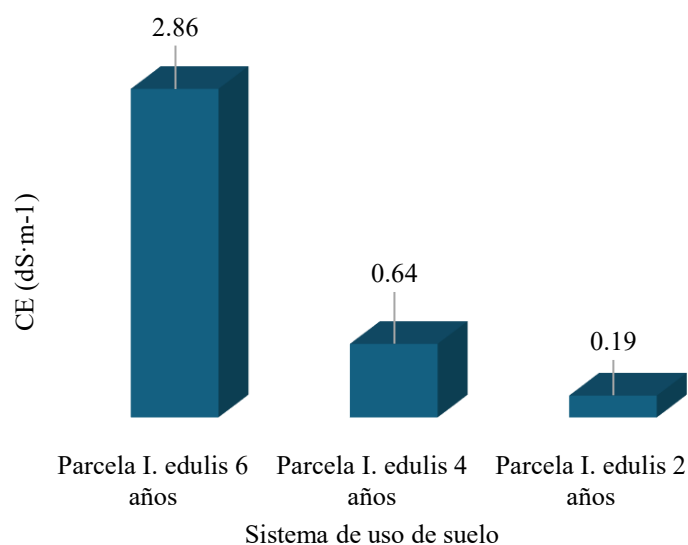


Figura 15. Conductividad eléctrica en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

Los resultados evidencian que la CICE se mantiene estable en las parcelas de *I. edulis*, con variaciones mínimas entre los 2, 4 y 6 años, lo que coincide con lo señalado por SAGARPA (2012) y por Brady y Weil (2017) respecto a su papel como indicador fundamental de fertilidad, retención de nutrientes y buen funcionamiento del suelo. Asimismo, la CE muestra un aumento notable con la edad de las parcelas, pasando de 0,19 % a 2,86 %, un comportamiento asociado según Doran y Parkin (1994) a la acumulación de cationes y aniones que incrementan la salinidad del suelo. En conjunto, los hallazgos indican que *Inga edulis* mantiene una CICE adecuada y favorece una mayor concentración de sales solubles con el tiempo, contribuyendo al enriquecimiento y mejor desempeño del sistema edáfico.

4.2. Determinación de la calidad del suelo en establecimientos con 2, 4, 6 años rehabilitados con *Inga edulis*, aplicando el Subíndice de Uso Sustentable (SUSS)

La evaluación de la calidad del suelo en establecimientos rehabilitados con *I. edulis* mostró una tendencia de mejora progresiva conforme aumentó el tiempo de rehabilitación. En la parcela con 2 años, la calidad del suelo se clasificó como marginal, registrándose un valor de 0,64, lo cual indicó que el proceso inicial de recuperación aún presentaba limitaciones en sus características físico-químicas y biológicas. En la parcela con 4 años de rehabilitación, la calidad del suelo se elevó a 0,67, clasificándose como sensible. Este resultado reflejó un avance moderado en la restauración y evidenció que *I. edulis* contribuyó a la mejora gradual de las propiedades del suelo. Finalmente, en la parcela con 6 años, se obtuvo el valor más alto, 0,81, correspondiente a una calidad aceptable - sensible, lo que demostró una recuperación más

consolidada, asociada a mejoras en la estructura, disponibilidad de nutrientes y estabilidad ecológica del suelo. En conjunto, los resultados mostraron que la rehabilitación mediante *I. edulis* favoreció significativamente la calidad del suelo, registrándose incrementos consistentes a medida que aumentó el tiempo de establecimiento.

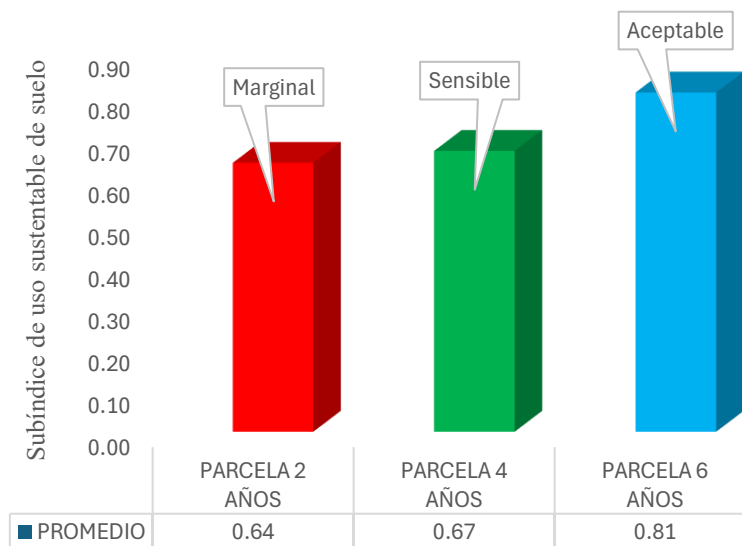


Figura 16. Subíndice de uso sustentable del suelo en tres parcelas rehabilitadas

Los resultados obtenidos en la evaluación de la calidad del suelo en parcelas rehabilitadas con *I. edulis* muestran una mejora progresiva conforme aumenta el tiempo de rehabilitación, evidenciada por el incremento del índice de calidad del suelo de 0,64 (calidad marginal) a 0,81 (calidad aceptable–sensible) entre los 2 y 6 años. Esta tendencia indica que *I. edulis* contribuye de manera positiva a la recuperación de las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo, particularmente en la mejora de la estructura, la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad ecológica.

Estos resultados concuerdan con los planteamientos de SAGARPA (2012), quien desarrolló el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS) como una herramienta basada en indicadores fisicoquímicos cuantificables como pH, materia orgánica, salinidad, densidad aparente y capacidad de intercambio catiónico para evaluar el estado de conservación y fertilidad del suelo. Al igual que el enfoque del SUSS, la presente investigación demuestra que la calidad del suelo puede ser evaluada de manera objetiva mediante indicadores medibles que reflejan los cambios inducidos por prácticas de manejo y rehabilitación.

Asimismo, la mejora sostenida observada en las parcelas rehabilitadas coincide con el enfoque temporal del SUSS, el cual enfatiza la evaluación de la sustentabilidad del suelo a lo largo del tiempo, especialmente cuando se aplican prácticas orientadas a la recuperación del recurso. En este sentido, el aumento progresivo del índice de calidad del suelo refuerza la validez del uso de *I. edulis* como especie rehabilitadora en suelos degradados ex cicales.

V. CONCLUSIONES

- La rehabilitación con *Inga edulis* mejora progresivamente la calidad del suelo en Rupa Rupa. A los 2 años aún se observaban limitaciones, a los 4 años hubo avances moderados en materia orgánica y nutrientes, y a los 6 años se alcanzaron las mejores condiciones, con mayor estabilidad, retención de nutrientes y valores equilibrados de pH, CIC y cationes intercambiables. Así, *I. edulis* se confirma como especie efectiva para recuperar suelos degradados.
- La aplicación del SUSS evidenció una mejora continua en la calidad del suelo, avanzando de marginal a los 2 años (0,64), a sensible a los 4 años (0,67) y a aceptable–sensible a los 6 años (0,81). Estos resultados confirman que la rehabilitación con *I. edulis* impulsa de forma sostenida la recuperación ecológica del suelo y validan la utilidad del SUSS para evaluar su sustentabilidad considerando las condiciones locales. En conjunto, se concluye que *I. edulis* mejora significativamente la calidad del suelo en Rupa Rupa y representa una estrategia eficaz para la restauración de suelos degradados.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

- Ampliar el tiempo de evaluación de la rehabilitación con *I. edulis* continuando el monitoreo más allá de los 6 años donde permitirá identificar si la tendencia de mejora del suelo se estabiliza, se incrementa o presenta variaciones en el largo plazo.
- Comparar el *I. edulis* con otras especies rehabilitadoras, realizando estudios comparativos con otras especies nativas o de uso común en restauración permitiría identificar alternativas complementarias o más eficientes según las características del suelo.
- Profundizar en la dinámica de materia orgánica y nutrientes, analizando fracciones de carbono, mineralización del nitrógeno y disponibilidad real de nutrientes ayudaría a comprender mejor los mecanismos de mejora generados por *I. edulis*.

VII. REFERENCIAS

- Azañero, O. (2016). *Calidad del suelo en tres sistemas de uso del suelo en la localidad de Río Espino, distrito de Monzón, Huamalíes, Huánuco* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS.
- Baena, M. (2017). *Metodología de la investigación científica*. Editorial Académica Española.
- Blas, F. (2021). *Evaluación de la calidad del suelo según el tipo de uso en San Alejandro Irazola, Ucayali* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2013). *The nature and properties of soils* (14th ed.). Pearson.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
- Calixto Iglesias, M., & Calixto Vargas, S. E. (2018). *Aporte del Inga edulis a la fertilidad del suelo degradado por el cultivo de Erythroxylum coca en el caserío de Buenos Aires, distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, Huánuco* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco].
- Delgado, J., & Rojas, F. (2017). Impacto ambiental del cultivo de coca en la Amazonía peruana. *Revista de Estudios Ambientales*, 23(2), 45–58.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. En J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek & B. A. Stewart (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment* (pp. 3–21). Soil Science Society of America.
- Falcão, M., & Clement, C. (2000). Phenology and productivity of *Inga edulis* in Central Amazonia. *Acta Amazonica*, 30(3), 387–398. <https://doi.org/10.1590/1809-43922000303398>
- FAO. (2015). *Propiedades físicas del suelo*. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/es/>
- FAO & PNUMA. (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020: Los bosques, la biodiversidad y las personas*. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- García, J. (2008). La observación fenológica primaveral de los frutales. *Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)*.
- GIZ & DEVIDA. (2016). *Lineamientos para la reconversión productiva en zonas ex cacaos*.
- Gómez, J. A., Giráldez, J. V., & Pastor, M. (2011). *Manual de muestreo y análisis de suelos y aguas*. IRNAS-CSIC.
- Gonzales, A., Huamán, R., & Paredes, J. (2020). *Evaluación de la calidad de suelos en sistemas agroforestales amazónicos*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Henríquez, H., & Cabalceta, G. (1999). *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola* (1.ª ed.). Asociación Costarricense del Café.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.

- Hernández, T., Cuevas, M., & López, M. (2006). *El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo*. Universidad Autónoma de Nayarit.
- Holdridge, L. R. (1987). *Ecología basada en zonas de vida* (3.ª ed.). IICA.
- Hosokay, J. (2012). *Calidad del suelo en diferentes sistemas de uso del suelo en la microcuenca del río Supte, Tingo María* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2011). *Siembra directa*. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-siembra_directa_2011.pdf
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2018). *Suelos: La falta de humedad afecta la absorción de nutrientes*. <https://intainforma.inta.gob.ar/?p=42640>
- Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. (2018). *Guía técnica para la restauración ecológica en áreas degradadas de la Amazonía peruana*. <https://repositorio.iiap.gob.pe/handle/20.500.12921/482>
- Irigoin, J. (2022). *Evaluación de indicadores químicos de calidad de suelos en el distrito de Huarango, San Ignacio* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Ignacio]. Repositorio institucional.
- Jiménez, R., & González, V. (2006). La calidad de suelos como medida para su conservación. *Edafología*, 13, 125–138.
- Jones, C. A. (2002). *Soil quality assessment: A guide to the science and practice*. CRC Press.
- Licapa, J. (2019). *Evaluación de la calidad del suelo en un centro agrícola reconvertido en Villa El Salvador, Lima Metropolitana* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur]. Repositorio institucional.
- Meza, A., Sabogal, C., & de Jong, W. (2006). *Rehabilitación de áreas degradadas en la Amazonía peruana: Revisión de experiencias y lecciones aprendidas*. CIFOR.
- Meza, J., Pérez, L., & Ramírez, A. (2006). *Restauración ecológica de suelos tropicales degradados*. INIA.
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Guía para el muestreo de suelos*.
- Ministerio del Ambiente & Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2022). *Informe sobre deforestación y cobertura boscosa en la Amazonía peruana*. <https://www.gob.pe/serfor>
- Monro, A., Velarde, R., Flores, R., Soruco, V., Reyes, J., & Milliken, W. (2016). *Manual agroforestería Inga*. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Moscattelli, G., Sobral, R., & Nakawa, V. (2005). *Nueva tendencia para conocer el estado de los suelos*. INTA.
- Parra, A., Fischer, G., & Chaves, B. (2014). Thermal time for reproductive phenological stages of *Acca sellowiana*. *Acta Biológica Colombiana*, 20(1), 163–173. <https://doi.org/10.15446/abc.v20n1.43390>

- Rodríguez, M., Chávez, M., & Gutiérrez, J. (2017). *Especies nativas en la rehabilitación de suelos degradados en la Amazonía peruana*. IIAP.
- SAGARPA. (2012). *Subíndice de uso sustentable del suelo – metodología de cálculo*. https://www.faoevaluacion.org.mx/rn/ind_fin/suelos/Documento_metodologico_suelo_s.pdf
- Sagardoy, M., & Mandolesi, M. (2005). *Biología del suelo: Guía de estudio*. Ediciones UNS.
- Sánchez, J. (2007). *Fertilidad de suelos y nutrición mineral de plantas*. FERTITEC.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2020). *Boletín climatológico anual de la región Huánuco*. <https://www.senamhi.gob.pe>
- Silva, E. M., Rogez, H., Da Silva, I. Q., & Larondelle, Y. (2013). Improving the desorption of *Inga edulis* flavonoids. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 558–564. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.11.005>
- Sobanski, N., & Marques, M. (2014). Effects of soil characteristics on forest restoration. *Journal for Nature Conservation*, 22(3), 217–222. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2014.01.001>
- Solsol, R. (2019). *Evaluación de la calidad de suelos en sistemas de uso con diferentes años de regeneración natural en el distrito de Rupa Rupa, Huánuco* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS.
- Tamayo y Tamayo, M. (2004). *El proceso de la investigación científica*. Limusa.
- UNODC. (2020). *Monitoreo de cultivos de coca y evaluación de suelos en zonas ex cacaes*. Naciones Unidas.
- USDA. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
- Villanueva, R., & González, J. (2012). *Técnicas de muestreo y análisis de suelos*. Trillas.
- Yaros, P. (2017). *Evaluación de la calidad del suelo mediante el subíndice de uso sustentable en diferentes sistemas de uso del suelo en el distrito de Padre Felipe Luyando, provincia de Leoncio Prado, Huánuco* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS.

ANEXO

Anexo 1. Cuadro de datos de los indicadores fisicoquímicos del suelo

Tabla 17. Datos de los indicadores físicos del suelo

Parcelas rehabilitadas	Densidad aparente g/cm ³	Resistencia a la penetración Kg/m ²	Temperatura del suelo C°	Textura
		2.3	24.2	
		2.1	24.8	
Parcela <i>I. edulis</i> 6 años	1.27	2.4	24.6	Franco limoso
		2.2	24.1	
		2.6	25.5	
		2.5	23.9	
		2.3	23.5	
Parcela <i>I. edulis</i> 4 años	1.29	2.7	23.2	Franco limoso
		2.3	22.9	
		2.6	23.1	
		3.8	26.8	
		3.7	25.9	
Parcela <i>I. edulis</i> 2 años	1.32	3.5	27.8	Franco limoso
		3.9	26.7	
		4.0	24.8	

Tabla 18. Datos de los indicadores químicos del suelo

Area de estudio	Años	Potasio disponible	Potencial de hidrógeno	Fósforo disponible	Materia orgánica	Nitrógeno total	Calcio intercambiable	Magnesio intercambiable	Capacidad de intercambio catiónico
		K ₂ O(ppm)	Ph	P (ppm)	MO (%)	N(%)	Ca (Cmol(+)/kg)	Mg (Cmol(+)/kg)	CIC (Cmol(+)/kg)
SUPTE SAN JORGE - SUPTE CHICO ALTO	6 años	247.835	6.08	27.34	1.28	0.064	4.570	0.806	5.858
	4 años	82.25	4.77	6.51	1.04	0.052	3.340	0.577	5.27
	2 años	52.724	4.28	6.42	2.52	0.126	3.874	0.36	5.994

Tabla 19. Normalización de indicadores fisicoquímicos para el cálculo del SUSS en parcelas en 2, 4 y 6 años

Area de estudio	Años	Densidad Aparente	Fósforo disponible	Materia orgánica	Nitrógeno total	Calcio intercambiable	Magnesio intercambiable	Capacidad de intercambio catiónico
		DA (g/cm ³)	P (mg/kg)	MO (%)	N (%)	Ca (Cmol(+)/kg)	Mg (Cmol(+)/kg)	CIC (Cmol(+)/kg)
SUPTE SAN JORGE - SUPTE CHICO ALTO	6 años	1.27	27.34	1.28	0.064	4.570	0.806	5.858
	4 años	1.29	6.51	1.04	0.052	3.340	0.577	5.27
	2 años	1.29	6.42	2.52	0.126	3.874	0.36	5.994

Anexo 2. Cálculo del Sub índice sustentable del suelo (SUSS)

Para determinar los valores SUSS, primero es necesario calcular el Rn de cada indicador (j) para cada muestra.

En el caso de la materia orgánica en la parcela de 6 años de rehabilitación con *I. edulis* es (1,28), se establece un valor de corte de 0,5 y un valor deseable de 5,1, según lo indicado en la Tabla 13. Parámetros edáficos, unidades de medida y valores máximos y mínimos definidos para evaluar el estado actual del suelo. Con esta información, el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$Rn_j = 1 - \left(\frac{V_{r_j} - d_j}{C_j - d_j} \right)$$

$$Rn_j = 1 - \left(\frac{1.28 - 5.1}{0.5 - 5.1} \right) \quad Rn_j = 0.14$$

A continuación, se calcula el Rn_j de todos los indicadores evaluados en cada parcela rehabilitada (2 años y 4 años). Una vez obtenidos estos valores, se aplica directamente la fórmula del SUSS para determinar el estado del suelo en cada parcela rehabilitada. Siempre que se esté trabajando con una muestra compuesta en este caso el $Rn = P$.

$$P = \frac{\sum_{j=1}^m Rn_j}{m}$$

$$P = 0.14$$

Pero si se tiene más de una muestra analizada por sistema, se calcula Rn de cada indicador de cada muestra y se obtiene el promedio de los Rn de cada indicador de cada muestra y luego este promedio es P y este último se aplica en la fórmula final del SUSS.

$$SUSS = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

$$SUSS = 0.81$$

Para determinar el SUSS se realiza la sumatoria de todos los parámetros de cada parcela rehabilitada (Mo, Da, Ce, Ph, P, Mg, Ca, CIC y N) obteniendo un promedio de 0.81.

Anexo 3. Cuadro de datos para el cálculo del Sub índice sustentable del suelo (SUSS)

Tabla 20. Datos de la normalización de indicadores fisicoquímicos para el cálculo del SUSS en tres parcelas rehabilitadas con *I. edulis*

R_{nj}	Parcela rehabilitada con 2 años	Parcela rehabilitada con 4 años	Parcela rehabilitada con 6 años
Materia Orgánica	0.37	0.10	0.14
Densidad Aparente	0.15	0.19	0.21
CE	1.00	0.89	0.32
PH	1.89	2.33	1.17
Fosforo	0.40	0.65	2.73
Magnesio	0.60	1.15	1.61
Calcio	0.76	0.65	0.90
CIC	0.10	0.03	0.08
Nitrógeno	0.48	0.01	0.09
Promedio	0.64	0.67	0.81

Tabla 21. Datos del Subíndice de uso sustentable del suelo y su clasificación de la calidad en las parcelas rehabilitadas

Parcelas rehabilitadas	SUSS	Calidad
Parcela I. edulis 6 años	0.81	Aceptable
Parcela I. edulis 4 años	0.67	Sensible
Parcela I. edulis 2 años	0.64	Marginal

Anexo 4. Análisis fisicoquímico de suelo expuesto por el laboratorio de suelos, agua y ecotoxicología

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUA Y ECOTOXICOLOGÍA



ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	HIDALGO GUEVARA DANIEL ALEXANDER	FECHA DE REPORTE:	15/09/2025
PROCEDENCIA:	TINGO MARIA	RECIBO N°	70811000
REFERENCIA:	MUESTRA DE SUELO	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS FÍSICO										ANÁLISIS QUÍMICO												
			Arena	Arellilla	Limo	Clase Textural	CE	pH	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		ds/m		M.O.	total	Organico	disponible	Calcio		Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrogeno	%		%	%		
			CODIGO DEL LABORATORIO	REFERENCIA	%	%	%	1:1	1:1	%	%	%	ppm	ppm	CAMBIABLES			Cmol(+)/kg			%	%	%		
1	S25-1009	Pr 6	23	19	58	Franco Limoso	2.86	6.08	1.28	0.064	0.743	27.343	247.835	5.858	4.570	0.806	0.333	0.149	0.000	0.000	--	100.000	0.000	0.000	
2	S25-1010	Pr 4	21	25	54	Franco Limoso	0.64	4.77	1.04	0.052	0.606	6.512	82.250	----	3.340	0.577	0.117	0.036	1.110	0.090	5.270	77.232	22.768	21.061	
3	S25-1011	Pr 2	29	15	56	Franco Limoso	0.19	4.28	2.52	0.126	1.459	6.421	52.724	----	3.874	0.360	0.049	0.036	1.450	0.225	5.994	72.057	27.943	24.189	

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del 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 YUPANQUI
Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



Anexo 4. Panel fotográfico

Figura 17. Entrada principal al sector de Nuevo Unión – Supte Chico Alto



Figura 18. Entrada principal al área de intervención del proyecto



Figura 19. Instalación de letrero de identificación relativo a la investigación



Figura 20. Identificación y georreferenciación de la parcela con 4 años de rehabilitación



Figura 21. Registro y georreferenciación de la parcela rehabilitada (6 años)



Figura 22. Alineamiento en la parcela rehabilitada de 4 años con *I. edulis*



Figura 23. Determinación de la resistencia del suelo en la parcela rehabilitada (6 años)



Figura 24. Muestreo edáfico en la parcela rehabilitada (2 años) con *I. edulis*



Figura 25. Toma de muestras de suelo en parcelas con 2, 4 y 6 años de rehabilitación



Figura 26. Muestreo para la determinación de densidad aparente del suelo



Figura 27. Molido de la muestra de suelo previo a su análisis



Figura 28. Traslado y rotulado de las muestras de suelos de 2,4 y 6 años al laboratorio



Figura 29. Medición de diámetro y altura para la determinación de densidad aparente



Figura 30. Medición del peso en seco para la determinación de la densidad aparente