



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
CENTRO DE POSTGRADOS
MAESTRÍA EN AGRONOMÍA, MENCIÓN SISTEMAS
AGROPECUARIOS
TRABAJO DE TITULACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MAGISTER EN AGRONOMÍA, MENCIÓN EN
SISTEMAS AGROPECUARIOS

PROYECTO DE INNOVACIÓN

DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES Y SECUESTRO DE
CARBONO EN SISTEMAS GANADEROS EN LA
PROVINCIA DE PASTAZA, AMAZONÍA
ECUATORIANA

AUTOR: MED. VET. MIGUEL GUERRA RUIZ
DIRECTOR DEL PROYECTO: DR. C. CARLOS ALFREDO
BRAVO MEDINA

Puyo – Ecuador

2020

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.

Yo, Miguel Guerra Ruiz con cédula de identidad 1756434211, declaro antes las autoridades educativas de la Universidad Estatal Amazónica, que el contenido del proyecto de innovación titulado: “Disponibilidad de nutrientes y secuestro de carbono en sistemas ganaderos en la provincia de Pastaza, Amazonía Ecuatoriana, es absolutamente original, auténtico y personal.

En tal virtud y según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente, certifico libremente que los criterios y opiniones que constan en el proyecto de investigación y desarrollo son de exclusiva responsabilidad del autor; y que los resultados obtenidos pertenecen a la Universidad Estatal Amazónica.

Puyo 7 de agosto del 2020



Miguel Guerra Ruiz

C.I: 1756434211



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

Centro de Postgrados

AVAL

Quien suscribe CARLOS ALFREDO BRAVO MEDINA, Director del Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Innovación titulado: DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES Y SECUESTRO DE CARBONO EN SISTEMAS GANADEROS EN LA PROVINCIA DE PASTAZA, AMAZONIA ECUATORIANA a cargo de MIGUEL GUERRA RUIZ, egresado(a) de la segunda cohorte de la Maestría en Agronomía mención Sistemas Agropecuarios de la Universidad Estatal Amazónica.

Certifico haber acompañado el proceso de elaboración del Proyecto de Innovación y considero cumple los lineamientos y orientaciones establecidas en la normativa vigente de la institución por lo que se encuentra listo para ser sustentado.

Por lo antes expuesto se avala el Proyecto de Innovación para que sea presentado ante la Dirección de Postgrados como forma de titulación como Magíster en Agronomía mención Sistemas Agropecuarios y que dicha instancia considere el mismo a fin de que tramite lo que corresponda.

Para que así conste, firmo la presente a los 26 días del mes de junio de 2020

Atentamente,

Carlos Alfredo Bravo Medina

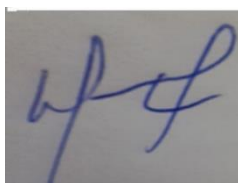
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Este Proyecto de Innovación fue revisado y aprobado por el siguiente tribunal de sustentación de la Universidad Estatal Amazónica:



Dr.C Reinaldo Demesio Alemán Pérez, PhD.
PPRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Dra. C. María Isabel Viamonte Garcés, PhD
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Dr.C. Luis Ramon Bravo Sánchez, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



**UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
CENTRO DE POSTGRADOS
SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND**

OFICIO N° 005-CABM-UEA-2020

Puyo, 13 de agosto del 2020

Por medio del presente **CERTIFICO** que, el trabajo de titulación “**DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES Y SECUESTRO DE CARBONO EN SISTEMAS GANADEROS EN LA PROVINCIA DE PASTAZA, AMAZONÍA ECUATORIANA**”, correspondiente al Med. Vet. **MIGUEL GUERRA RUIZ**, con cédula 1756434211, de la maestría en Agronomía Mención Sistemas Agropecuarios cuyo director del proyecto es el Dr. Carlos Alfredo Bravo Medina, PhD. Proyecto que ha sido revisado mediante el sistema antiplagio Urkund, reportando una similitud del 9%, informe generado el día 13 de agosto del 2020 por parte del director del proyecto.

Particular que comunico para los fines pertinentes

**Dr. Carlos Alfredo Bravo Medina PhD.
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN**



Document Information

Analyzed document TRABAJO FINAL_MiguelRuiz_Urkund.docx (D77744180)

Submitted 8/13/2020 3:43:00 PM

Submitted by

Submitter email cbravo@uea.edu.ec

Similarity 9%

Analysis address cbravo.uea@analysis.orkund.com

Sources included in the report

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo se realizó gracias a la colaboración de muchas personas:

Al Dr. Carlos Alfredo Bravo Medina, por el asesoramiento y orientación en la realización del trabajo.

A mis amigos: Ernesto Marinos Ibarra Téllez y Annia Bárbara Rojas Céspedes por todo el apoyo que me brindaron.

Al Dr. Reinaldo Alemán Pérez por estar siempre presto a las consultas y aclaración de dudas.

De forma general a todos los profesores que fueron parte de la maestría.

DEDICATORIA.

A mis padres, a mi esposa y a mis hijas, porque son el núcleo familiar que me sostiene con sus consejos, orientación y amor.

RESUMEN EJECUTIVO

La deforestación en la región amazónica ecuatoriana para ampliar la frontera agropecuaria, afecta la biodiversidad, el suelo y el agua de la zona. Esto se agrava por la implementación de sistemas agropecuarios basados en prácticas de producción inadecuadas y ambientalmente insostenibles. El objetivo del trabajo fue determinar la disponibilidad de macronutrientes del suelo: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y su potencial en el secuestro de carbono en los sistemas de pastoreo representativos de la provincia de Pastaza en comparación, con el uso con bosque secundario (BS). Estos sistemas incluyen pastos con árboles dispersos (PCA) y pastos sin árboles (PSA). En cada finca se realizó un muestreo de suelo a dos profundidades para determinar las propiedades físicas y químicas. El secuestro de carbono se midió en el suelo y en la biomasa aérea mediante el uso de una ecuación alométrica para bosques tropicales. Se realizó un análisis de varianza bifactorial para evaluar las diferencias entre los usos de suelos en función de las dos profundidades y la comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). El grado de asociación de la materia orgánica con los macronutrientes se estableció usando el coeficiente de correlación Pearson. La interacción del uso de suelo versus profundidad no produjo efectos significativos ($p \leq 0.05$) para la mayoría de las variables evaluadas, sin embargo, si se presentaron diferencias por separado. La disponibilidad de N y K mostraron diferencias significativas por efecto del cambio de uso del suelo, con mayores concentraciones en los PCA. Los valores de nitrógeno total (Nt) y el NH_4^+ fueron medios, mientras que los de P y K^+ , se consideraron de baja disponibilidad. La correlación entre la MOS y los macronutrientes (Nt-P-K) mostró alta relación con el Nt con un $r=0,99$ y una baja relación con P y K^+ . El secuestro de carbono total varió significativamente en función del uso del suelo con mayores valores en el BS, que estuvo determinado por el carbono de la biomasa aérea (CBA) que representó el 92 % del total. El carbono del suelo presentó diferencias significativas entre los usos evaluados y representó un 8 % en BS y de 63-70 % en los sistemas de pastoreo, lo cual resalta la función reguladora del suelo y su importancia en la mitigación de emisiones de CO_2 . Este estudio igualmente pone en evidencia la importancia del bosque en la minimización del cambio climático y el efecto degradativo que ejercer el proceso de deforestación.

Palabras clave: Ganadería, Amazonía, suelo, sostenibilidad, uso de la tierra.

ABSTRACT

The progressive deforestation that takes place in the Ecuadorian Amazon region, as a consequence of the expansion of the agricultural and livestock frontier, affects the biodiversity, soil and water of the area. This is compounded by the implementation of agricultural systems based on inappropriate and environmentally unsustainable production practices. The objective of this work was to determine the availability of soil macronutrients: nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K) and their potential in carbon sequestration in the representative livestock systems of the Pastaza province in comparison, with use with forest. These systems include grasses with scattered trees (PCA) and grasses without trees (PSA). In each land use, a soil sampling was carried out at two depths to determine physical and chemical properties. Carbon sequestration was measured in two compartments in the soil and in aboveground biomass using an allometric equation for tropical forests. A two-factor analysis of variance was carried out to evaluate the differences between the uses of soils as a function of the two depths and the comparison of means using the Tukey test ($p \leq 0.05$) and the degree of association of organic matter with macronutrients, established using the Pearson correlation coefficient. The interaction of land use versus depth did not produce significant effects ($p \leq 0.05$) for most of the variables evaluated, however, if differences were presented separately. The availability of macronutrients (N-P-K) showed significant differences due to the change in land use with higher concentrations in the SSP. NT and NH_4^+ resulted in mean values, while P and K^+ at both depths are considered low availability values. The correlation between MOS and macronutrients (Nt-P-K) showed the best relationship with Nt with a with $r = 0.99$ and a low relationship with P and K^+ . Total carbon sequestration varied significantly according to land use with higher values in the BS, which was determined by the carbon stored in the above-ground biomass, which represented 92% of the total. The carbon stored in the soil present significant differences between the evaluated uses and represented 8% in BS and 63-70% in livestock systems, which highlights the regulatory function of the soil resource and its importance in the mitigation of emissions CO_2 . The results of this study also highlight the importance of the forest in minimizing climate change and the degradative effect that the deforestation process can have.

Key words: Livestock, Amazon, soil, sustainability, land use.

TABLA DE CONTENIDOS:

RESUMEN EJECUTIVO	IX
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3. HIPÓTESIS	3
OBJETIVOS.....	3
GENERAL:	3
ESPECÍFICOS:.....	3
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	4
2.1. LA REGIÓN AMAZÓNICA ECUATORIANA Y LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN GANADEROS.	4
2.2. LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES VERSUS DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES.....	4
2.3. SISTEMAS GANADEROS CON PASTOREO Y FERTILIDAD DEL SUELO.	7
2.4. CAMBIO CLIMÁTICO Y SECUESTRO DE CARBONO.....	10
2.5. SECUESTRO DE CARBONO Y EMISIONES DE CO₂.	10
2.6. INDICADORES DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS.	14
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS:	16
3.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	16
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.	17
3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	17
3.4. USOS DE SUELO, MUESTREO DE SUELO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO.	17
3.5. ANÁLISIS FÍSICOS.....	19
3.6. ANÁLISIS QUÍMICOS.....	19
3.7. EVALUACIÓN DEL SECUESTRO DE CARBONO.....	19

3.7.1. CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO.....	19
3.7.2. CARBONO DE LA BIOMASA AÉREA.....	20
3.7.3. TRATAMIENTO DE DATOS:	21
ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	21
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
4.1. CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO	22
4.2. DISPONIBILIDAD DE MATERIA ORGANICA Y MACRONUTRIENTES (N-P-K) BAJO DISTINTOS USOS DEL SUELO.	27
4.2.1. DISPONIBILIDAD DE NITRÓGENO EN EL SUELO	29
4.2.2. CONTENIDO P DISPONIBLE.....	31
4.2.3. CONTENIDO DE POTASIO INTERCAMBIABLE (K ⁺).....	32
4.3. SECUESTRO DE CARBONO EN DISTINTO COMPARTIMENTOS BAJO DIFERENTES USOS DEL SUELO.....	34
4.4. RELACIÓN ENTRE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO Y MACRONUTRIENTES.	39
5. CONCLUSIONES:	45
6. RECOMENDACIONES:	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	47
ANEXOS 1.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ciclo del carbono	11
Figura 2.	Localización geográfica del área de estudio en la Provincia de Pastaza.	16
Figura 3.	Diagrama esquemático para la evaluación de parámetros de suelo en cada uso seleccionado.....	18
Figura 4.	Relación carbono total almacenado (CTA) y biomasa aérea (BA).....	38
Figura 5.	Relación entre materia orgánica (MOS) y el nitrógeno total (Nt) en las dos profundidades.....	42
Figura 6.	Relación entre la MOS y el fósforo disponible (P) para las profundidades estudiadas.....	43
Figura 7.	Relación entre la MOS y el potasio intercambiable (P ⁺) en las profundidades consideradas.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Indicadores físicos, químicos y biológicos de la calidad del suelo	15
Tabla 2	Usos de suelos seleccionados en el área bajo estudio, provincia de Pastaza, Amazonía ecuatoriana, Ecuador.....	18
Tabla 3.	Características físico- química del área del área de estudio.....	22
Tabla 4.	pH y disponibilidad de macronutrientes en suelos bajo diferentes sistemas de pastoreo, en el horizonte superficial (0-10cm)	28
Tabla 5.	pH y disponibilidad de macronutrientes en suelos bajo diferentes sistemas de pastoreo, en el horizonte subsuperficial (10- 30cm)	29
Tabla 6.	Secuestro de carbono en el suelo bajo diferentes sistemas de pastoreo y bosque secundarios	35
Tabla 7.	Secuestro de carbono, bajo diferentes sistemas de manejo silvopastoril y bosque secundario, en distintos compartimentos.....	37
Tabla 8.	Relación entre la MOS y la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K) en el horizonte superficial (0-10 cm).....	40
Tabla 9.	Relación entre la MOS y la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K) en el horizonte subsuperficial (10-30 cm).....	41

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

La región Amazónica ecuatoriana representa cerca del 45% del territorio nacional. Constituye una de las zonas con mayor biodiversidad (8% de las especies del mundo). Tiene gran riqueza de recursos naturales y forma parte del llamado pulmón de la tierra, donde se cumple gran parte del ciclo del carbono, que es crucial para la ecología y el clima del planeta (Bravo et al., 2017a). Sin embargo, esta región ha experimentado altas tasas de deforestación producto de los cambios de uso del suelo, con la consiguiente destrucción de sus bosques, la biodiversidad, el agua y el suelo, lo que representa el mayor impacto socio ambiental en la Amazonía ecuatoriana (Bravo et al., 2015).

Este avance de la frontera agrícola ha conllevado al establecimiento de sistemas de pastoreo tradicionales caracterizados por la presencia de árboles dispersos en el potrero con diversas pasturas como Gramalote (*Axonopus scoparius*), Brachiarias (*Brachiariasp*) y la cría de ganado vacuno para la producción de carne o leche. Algunos autores han señalado que la reducción de la cobertura boscosa por sí misma, ha sido un factor desencadenante del deterioro ambiental (Vargas et al., 2015). El cual se agrava por la implementación de actividad ganadera sin prácticas adecuadas de manejo y pasturas de bajo valor nutritivo.

Los sistemas ganaderos en la Amazonía ecuatoriana tienen gran importancia, entre otras razones, por la superficie que ocupan, los problemas ambientales que puede generar, así como por ser una actividad principal proveedora de ingresos económicos a gran cantidad de familias de la región (Vargas et al., 2015).

La degradación de los recursos naturales, base de los sistemas de producción agropecuaria y forestal, se ha convertido en una problemática para la Amazonía ecuatoriana por el efecto negativo que tiene sobre los servicios ecosistémicos que cumplen los bosques y sus distintos componentes. Dentro de los sistemas agrícolas, agroforestales y pecuarios, el suelo constituye un componente fundamental por las funciones que cumple, por tanto, se requieren estudios detallados que permitan conocer la disponibilidad de nutrientes y el secuestro de carbono en estos sistemas. Bajo esta perspectiva, en este proyecto de

investigación se planteó evaluar la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K) y el potencial de secuestro de carbono de sistemas de pastoreo localizados en la provincia de Pastaza, Amazonía ecuatoriana.

Dado que los sistemas silvopastoriles son pocos estudiados en la Amazonía ecuatoriana, el conocimiento de la influencia sobre la disponibilidad de nutrientes y el potencial de secuestro de carbono en distintos compartimientos, resulta de gran relevancia. Esto permitirá mejorar la productividad de los sistemas ganaderos, minimizando los impactos ambientales y a su vez podrá ser usado como estrategia para mejorar la sostenibilidad y productividad del sector pecuario.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el Ecuador y especialmente en la región Amazónica, la tasa de deforestación se ha ido incrementando resultando como los principales conductores el cambio en el uso del suelo, el incremento de la ganadería y la expansión de la colonización. Todo ello, ha conllevado a la degradación de los recursos naturales con reducción en la riqueza florística y a que se activen procesos de erosión intensos que afectan la calidad del suelo. Esto provoca a largo plazo la disminución de la productividad de los sistemas de producción. Además, la aparición de surcos en sistemas de pastoreo asociados a malas prácticas (sobrepastoreo, deforestación), son evidencias del proceso de erosión, que junto a la topografía con pendientes fuertes e irregulares y la presencia de lluvias abundantes e intensas, demuestran la fragilidad de estos suelos (Bravo *et al.*, 2017a).

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo los sistemas de pastoreo afectan la disponibilidad de macronutrientes y el potencial de almacenamiento de carbono en la Amazonía ecuatoriana?

1.3. HIPÓTESIS

El cambio de uso del suelo, producto de la deforestación y el avance de la frontera agrícola en la provincia de Pastaza a diversos sistemas de pastoreo, podría afectar la disponibilidad de macronutrientes y el potencial de almacenamiento de carbono, minimizando los servicios ambientales de los sistemas naturales.

OBJETIVOS

GENERAL:

Evaluar la disponibilidad de macronutrientes y el potencial de secuestro de carbono en los sistemas de pastoreo representativos de la provincia de Pastaza, Amazonía ecuatoriana, mediante propiedades químicas del suelo y la biomasa aérea.

ESPECÍFICOS:

- Determinar la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo de los sistemas de pastoreo con y sin árboles y en el bosque.
- Cuantificar el potencial de secuestro de carbono en el suelo y la biomasa aérea en los diferentes usos del suelo.
- Establecer las relaciones entre el contenido de materia orgánica del suelo y la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K) en los diferentes usos del suelo.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. LA REGIÓN AMAZÓNICA ECUATORIANA Y LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN GANADEROS.

La cuenca Amazónica, considerada el pulmón del planeta, tiene una superficie aproximada de 7.8 millones de Km² distribuidas en nueve países, entre ellos el Ecuador. La región Amazónica ecuatoriana representa el 45 % del territorio nacional con abundantes recursos naturales y donde se encuentra el 8% de las especies del mundo que deben ser conservados y manejados de manera sustentable. Se ha señalado que la expansión de la frontera agrícola, con la consiguiente destrucción de sus bosques, representa el mayor impacto socio ambiental a la Amazonía ecuatoriana (Torres et al., 2019; Bravo et al., 2015,). En esta región, para los sistemas ganaderos, se ha destinado el 31 % de la superficie agrícola a la producción de pasto y el 70 % de dicha área es cultivada como monocultivo, con efectos negativos sobre la biodiversidad y conservación de los recursos naturales (Bravo, 2014).

2.2. LOS SISTEMAS SILVOPASTORILES VERSUS DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES.

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son la combinación de recursos y técnicas de producción animal en forma interactiva con árboles, arbustos y otras especies de plantas, que tienen el objetivo de optimizar la producción sostenible y surgen de la integración del medio ambiente y el manejo productivo (De Moraes et al., 2013; Ibrahim et al., 2006). Estos sistemas incluyen varios componentes (suelo, leñosas, herbáceas y herbívoros) entre los que se establecen relaciones en todos los sentidos y magnitudes (Bugarín, 2012). Las diferentes técnicas de manejo y la gran variabilidad resultante, dificulta que se haga una clasificación exacta de los SSP. Dichos sistemas permiten ordenar y mejorar las prácticas usadas tradicionalmente por los colonos e indígenas, pero que resultan raras para agricultores que provienen de lugares donde las características biofísicas, socioeconómicas y tecnológicas

son muy diferentes, causa principal que conlleva a la deforestación con efectos desastrosos a largo plazo (Nair et al., 2009).

En este contexto los sistemas silvopastoriles (SSP), que combinan de forma simultánea árboles o arbustos con plantas herbáceas o volubles y animales domésticos herbívoros (Montagnini, 2015; Shibu and Dollinger, 2019), desempeñan un papel crucial en la reducción de los impactos negativos de la agricultura y en la conservación de la biodiversidad (Schroth et al., 2004). Retienen también una parte sustancial de las especies presentes en los remanentes de vegetación original dentro del paisaje dominado por la actividad humana (López-Vigoa et al., 2017; Bhagwat et al., 2008).

Los SSP como parte de los sistemas agroforestales pecuarios (SAFP), son un tipo de uso del suelo que se caracteriza por aplicar simultáneamente varios principios agroecológicos. Entre estos están: la conversión de energía solar en biomasa a través de una vegetación estratificada, la elevada fijación de nitrógeno atmosférico al suelo, la protección y el uso sustentable del agua, la rehabilitación de suelos degradados, el reciclaje de nutrientes, la provisión de hábitat para organismos controladores biológicos, la conservación y el uso de la biodiversidad (Murgueitio et al., 2015). Además aportan, con la disminución en el uso de insumos externos, a la reducción de la contaminación ambiental y el manejo integrado de la salud animal (López-Vigoa et al., 2017; Dumont et al., 2013).

Por consiguiente, la conversión de los sistemas de pastoreo convencionales en SSP permite recuperar la diversidad biológica y mantener la integridad de varios procesos ecológicos que son esenciales para el funcionamiento de las áreas que se usan para la ganadería. Todo ello trae consigo no solo beneficios ambientales, sino también el incremento de la productividad y los retornos financieros para los granjeros (López-Vigoa et al., 2017). Otro de los beneficios de los SSP es la sombra generada por los árboles que disminuye el estrés calórico en los animales. Bajo la copa de los árboles se reduce entre 2 y 9°C la temperatura con relación a las áreas de potrero abierto, generando mayor productividad y bienestar animal (Navas Panadero, 2010 ; Pérez, et al., 2008).

El maximizar las interacciones positivas (facilitación) y minimizar las interacciones negativas (competencia) entre los estratos de vegetación debe ser el objetivo de los arreglos silvopastoriles (Serrano et al., 2017). Sin embargo, en muchas zonas ganaderas son muy limitados los estudios para determinar la importancia relativa de las interacciones facilitadoras y competitivas entre árboles y pastos y su consecuencia en la productividad de ambos componentes (Marcos et al., 2007).

La explotación ganadera, basada en la maximización de la producción y las ganancias, ha provocado la degradación de los recursos naturales de los que depende la agricultura y la ganadería (suelo, agua, diversidad genética), creando un impacto socio ambiental en la Amazonía. Por esta situación se necesita otro tipo de desarrollo basado en el respeto, conocimiento y valoración del territorio. Teniendo en cuenta la situación anterior los sistemas ganaderos se deben desarrollar con un enfoque agroecológico, sistémico y territorial que puedan aportar las bases ecológicas, de estructura, funcionamiento y de vocación para avanzar hacia un proceso de conversión de sistemas ganaderos sostenibles (Alemán et al.,2020; Bravo et al., 2008; Gliessman, 2007).

La incorporación de árboles y arbustos en los sistemas de producción ganadera a través de SSP representa una alternativa sostenible que responde a las necesidades actuales relacionadas con la demanda alimenticia, la preservación del medio ambiente y las realidades socioeconómicas de países tropicales (Alemán et al.,2020; Molina et al., 2008). Dichos sistemas se caracterizan por ser altamente diversificados y autosuficientes, lo cual, asociado con un manejo agropecuario adecuado y acorde con las características del agroecosistema, favorece procesos naturales e interacciones biológicas, mejora la calidad edáfica, disminuye la dependencia de insumos químicos externos e incrementa la productividad agropecuaria (Vallejo et al., 2012).

Con base a lo anterior, el conocimiento de estos sistemas debería conducir a investigaciones que evalúen la incidencia en elementos fundamentales de los agroecosistemas como el flujo de energía y el reciclaje de nutrientes. Estas deben permitir generar elementos de sustitución de insumos (herbicidas, insecticidas, fertilizantes, entre

otros), evaluar el impacto sobre las propiedades y procesos del suelo y optimizar el uso de biomasa (Alemán et al., 2020; Gliessman, 2007).

2.3. SISTEMAS GANADEROS CON PASTOREO Y FERTILIDAD DEL SUELO.

Desde la visión sistémica, el recurso suelo constituye un componente de los agroecosistemas o ecosistemas naturales que mantiene relaciones funcionales con el resto de los componentes (Gliessman, 2007). Es un sistema natural vivo donde conviven una serie de micro y macroorganismos y constituye el medio natural donde se desarrolla la vida vegetal (Casanova, 2005). Las características y propiedades de los suelos se desarrollan por la acción de los agentes climáticos y bióticos, actuando sobre los materiales geológicos, acondicionados por el relieve y el drenaje, durante un periodo de tiempo (Loaiza, 2010). En resumen, el suelo es un cuerpo natural, un ser vivo que está sujeto a la acción de los factores formadores (clima, organismos, material parental, tiempo y relieve). Como todo ser vivo nace, crece, se reproduce y muere, en escalas temporales mayores a la humana, por lo tanto, es un recurso no renovable.

En base a ello, la calidad del suelo es uno de los principales factores para ir construyendo a largo plazo los sistemas de producción sustentables (Gliessman, 2007) y está muy relacionada con las funciones o los servicios que el suelo puede prestar (Bravo et al., 2017a; McBratney et al., 2013; Labrador, 2008), entre ellas: **a)** Sustener la actividad biológica, diversidad y productividad del sistema, es decir hábitat biológico y reserva de muchas plantas y organismos en peligro de extinción, **b)** Regular y participar en los flujos de agua y solutos, **c)** Filtrar, amortiguar, degradar e inmovilizar materiales contaminantes **d)** Almacenar y ciclar nutrientes y otros elementos, **e)** Proveer soporte para las estructuras socioeconómicas y protección de tesoros arqueológicos asociados con los humanos.

Diferentes autores manifiestan que el cambio de usos de suelo hacia sistemas agropecuarios puede influenciar principalmente algunos elementos relacionados con su fertilidad como el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K) donde tienden a presentar

pérdidas de dichos nutrientes productos del cambio (Smith et al., 2016; Wang et al., 2015 y Huerta et al., 2008).

Teniendo en cuenta que las propiedades físico químicas confieren al suelo la capacidad necesaria para albergar la vida y mantener la capacidad productiva, se deben implementar sistemas agropecuarios que protejan este recurso (Fernández et al., 2016). Los sistemas silvopastoriles constituyen una solución a la degradación edáfica porque incrementan la producción de leche y carne de manera sostenible y mejoran la fertilidad de los suelos (Alemán et al., 2020; Butriago- Guillen et al., 2018; Cairo- Cairo, 2018; Ruiz et al., 2014; Lok et al., 2013).

Los SSP cumplen un papel multifuncional, al combinarse en ellos todos los elementos que normalmente interactúan en la naturaleza (pastos, arbustos, árboles y animales), generan cambios favorables simultáneos en varios componentes y procesos agroecológicos (Bravo et al., 2015). Por ejemplo, la cobertura que ofrece la hojarasca y las especies arbóreas, que forman parte de estos sistemas, actúan simultáneamente sobre procesos y componentes claves de los sistemas de producción. Pueden incrementar la entomofauna benéfica, activar la biología del suelo, mejorar el nivel de materia orgánica y con eso la fertilidad y la optimización de los regímenes de temperatura y humedad del suelo (Vallejo, 2013). Además, puede reducir los procesos de degradación física como la erosión hídrica, compactación, sellado y encostrado superficial, entre otros (Bravo, 2014).

Bajo esta perspectiva, en áreas tropicales, la conversión extensiva de bosques a pasturas y la intensificación agrícola, son típicamente identificadas como los impulsores más importantes de cambio en el uso del suelo, con consecuente pérdida de su fertilidad, calidad y biodiversidad (Valera et al., 2016; Guillaume et al., 2016). Por ejemplo, en la región Amazónica ecuatoriana se encontró que el piso climático, la profundidad, indicadores físicos y químicos como la densidad aparente, porosidad total, porosidad de retención, pH, carbono orgánico total (COT); N, P, K⁺¹, S, Ca⁺², B, Zn, fueron los factores de mayor contribución con un 70,54 % a la variación de la fertilidad de los suelos (Bravo et al., 2017a). Estos estudios indican que, debido a la baja fertilidad química y alta acidez de los suelos en

condiciones amazónicas, un cambio de uso de la tierra de bosque a sistemas agrícolas y/o pecuarios, implica la aplicación de nutrientes y enmiendas para satisfacer la demanda de los cultivos (Bravo et al., 2017). Por lo cual, si se quiere fomentar un cambio en la matriz productiva, el enfoque de sistemas agroforestales o silvopasturas es una vía hacia la sostenibilidad.

El desmejoramiento de la calidad y fertilidad del suelo, cuando se produce la sustitución del bosque por pasturas o cultivos, ha sido reportado por diferentes autores. El estudio de la fertilidad de un bosque, medianamente intervenido, y un potrero en la región Amazónica de Colombia, reporta mayores niveles de materia orgánica (MO) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el bosque, lo cual es promovido por el reciclaje de nutrientes, mientras en el uso con pasto se evidenció una menor disponibilidad de fósforo (P) y bases cambiables (Cuenca, 2014). La sustitución del bosque nativo por pasturas y cultivos en zonas del cerrado de Brasil, ha generado conflictos de uso y desmejoramiento de algunas propiedades del suelo de manera significativa, tales como el contenido de MO y la concentración de potasio intercambiable (Valera et al., 2016). Para suelos de la región central Amazónica de Brasil sometidos a distintos estados de restauración, la densidad aparente, el nitrógeno total, K y P fueron los parámetros más sensibles para diferenciar zonas restauradas y degradadas con respecto al suelo de referencia (Bosque), lo cual se reflejó en un alto valor de correlación (>de 0.70) entre dichas variables (Viana et al., 2014).

Todos estos cambios pueden desencadenar en otros daños ambientales específicamente el aumento de la erosión del suelo y la degradación de la calidad del agua con impactos negativos sobre la biodiversidad acuática y las otras funciones estructurales de la MO (Bravo et al., 2017a). Al respecto, se ha señalado que la conversión de bosques tropicales en tierras agrícolas conduce a una fuerte disminución de la materia orgánica del suelo (MOS), afectando sus funciones como almacenador de carbono y suministro de fertilidad (Guillaume et al., 2016).

2.4. CAMBIO CLIMÁTICO Y SECUESTRO DE CARBONO.

Los sistemas ganaderos de pastoreo en el mundo en su mayor extensión son totalmente dependientes de la disponibilidad de los recursos naturales y son afectados por el cambio climático (CC). Al respecto se ha señalado, que el cambio climático se refiere a una variación en el estado del clima que puede ser identificado mediante el uso de pruebas estadísticas de cambios en la media y / o la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un período prolongado, generalmente décadas o más (IPCC, 2014).

El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o forzamientos externos, como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo. Por otra parte, la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su Artículo 1, define el cambio climático como un cambio climático que se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (IPCC, 2014). La CMNUCC, por lo tanto, hace una distinción entre el cambio climático atribuible a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales.

También, el cambio climático global se refiere a las modificaciones en cualquier aspecto del clima del planeta, tales como la temperatura, precipitación e intensidad y las rutas de las tormentas (Miller, 2007). Los factores que afectan los cambios de temperatura media de la tierra y el cambio climático son los cambios en el nivel del mar, los efectos de las nubes, la emisión de aerosoles a la atmósfera, aumento en las emisiones de dióxido de carbono, gas metano e hidratos de metano.

2.5. SECUESTRO DE CARBONO Y EMISIONES DE CO₂.

Existe en la atmósfera alrededor de 720 Pg de C, mayoritariamente en forma de anhídrido carbónico (CO₂). Como vegetación terrestre se encuentra en su composición

(secuestrado), con permanencia más o menos temporal, poco más de 830 Pg de C (Gallardo, 2004). En la parte superior de los suelos terrestres se engloban, predominantemente en forma de sustancias húmicas (de color oscuro y bioestables), cerca de 1.5 Eg (1 Eg equivale a 1018 Pg) de C, aunque algún autor lo cuantifica en algo menos (Figura 1). En los ecosistemas el C puede encontrarse oculto en la biomasa vegetal, o en el suelo (C orgánico edáfico, mayormente como sustancias húmicas).

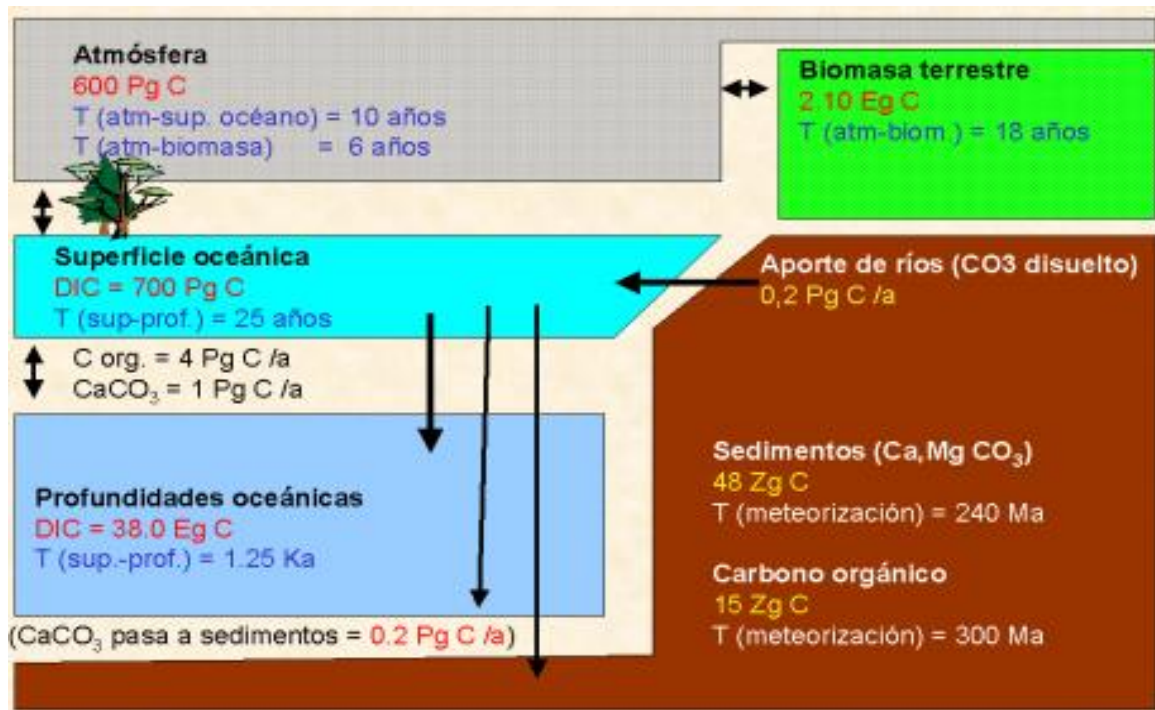


Figura 1. Ciclo del Carbono. Fuente: Tomado de Gallardo, 2004.

Sin embargo, el deterioro de los recursos naturales y el calentamiento global producto de la concentración de gases de efecto invernadero están poniendo en riesgo la vida en el planeta. Se ha señalado, que la ganadería constituye una de las actividades humanas más contaminantes y ocupa una gran superficie de tierra (Steinfeld et al., 2006). El área total dedicada a la producción ganadera es el 70% del área agrícola del planeta y el 30% de toda la superficie terrestre. Esta actividad provee aproximadamente el 30% de la proteína para consumo humano en el mundo y contribuye al bienestar de mil trescientos millones de

personas. Al mismo tiempo, impacta negativamente en todas las esferas del medioambiente: aire, suelo, agua y biodiversidad, influyendo en el cambio climático.

También, se indica que la ganadería es una actividad contaminante por la producción de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) que produce esta especie por la fermentación entérica (Steinfeld et al., 2006). Además, por verter materias orgánicas como estiércol, patógenos y residuos farmacológicos a las fuentes de agua y al expandir la producción a zonas no aptas para esta actividad. Se genera así deforestación, degradación, compactación y erosión de los suelos (Buitrago- Guillen et al., 2018.; Patiño et al., 2017; Steinfeld et al., 2006).

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera son la mayor preocupación ambiental global y se estima que el CO₂ es el responsable del 71,5 % del efecto invernadero (Rodríguez, Jiménez, Aguirre y Treviño, 2006). Bajo esta perspectiva, se ha señalado que después de la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso del suelo es la segunda causa mundial de emisiones de CO₂, y algunos de estos cambios corresponden con la deforestación y conversión de ecosistemas naturales a sistemas agrícolas extensivos (IPCC 2014). Al respecto, en muchas regiones tropicales, la conversión extensiva de bosques en pasturas y la intensificación agrícola se identifican típicamente como los factores más importantes del cambio en el uso de la tierra, con el consiguiente impacto en la fertilidad (Martín y Pérez 2009; Bravo et al., 2017b), calidad y biodiversidad (Oliveira et al.2015) y en especial en el secuestro de carbono bajo del suelo y de la biomasa aérea (Guillaume et al.2016; Valera et al.2016; Bravo-Medina et al.2015; Torres et al.2019).

El cambio de uso de suelos hacia sistemas agropecuarios y la extracción de madera son las principales causas de la alteración de los sistemas naturales de la Amazonía ecuatoriana, las cuales sitúan a esta región entre las de mayor tasa de deforestación de América del Sur (Jiménez, Mezquida y Capa, 2007). Entre estas alteraciones se encuentran los cambios en el contenido de carbono (Vallejo et al., 2005) pudiendo provocar la pérdida de hasta el 50 % del carbono (C) orgánico, cuando se modifican las características físico químicas del suelo (Scholermann et al., 2014).

En base a lo anterior, se deben minimizar los impactos ambientales causados por la ganadería y una posible solución es implementar sistemas de pastoreo que combinen pasturas con árboles porque tienen un mayor potencial de secuestro de carbono debido a que las raíces secundarias de los árboles, acumulan lentamente grandes cantidades de carbono orgánico en el suelo (COS), incluso en el subsuelo (Seddaiu et al., 2013).

Los sistemas agroforestales que integran la producción de árboles con cultivos y el componente animal tienen un mayor potencial para secuestrar C que pastos o cultivos agrícolas. Esta afirmación se basa en la noción de que la incorporación de árboles en los sistemas ganaderos proporciona una mayor parte aérea neta, así como mayor captura de carbono en el suelo (Nair et al., 2009). Algunos estudios realizados en la Amazonía ecuatoriana reportan valores de carbono almacenado en la biomasa aérea que oscilaron entre 34 y 60 Mg C ha⁻¹ en los sistemas silvopastoriles con respecto al bosque (312 Mg C ha⁻¹), mientras que el compartimento suelo varió de 28 a 34 Mg ha⁻¹ (Bravo et al., 2015). Los resultados obtenidos concuerdan con lo señalado por varios autores que demuestran el potencial de carbono almacenado en los sistemas silvopastoriles (12 a 228 Mg ha⁻¹, Dixon, 1995) y para los distintos componentes de carbono como la biomasa aérea (70 Mg ha⁻¹) y el suelo (25 Mg ha⁻¹) (Mutuo et al., 2005).

Bajo la intensificación de la ganadería se puede promover estrategias productivas, ecológicas y económicamente sustentables para el manejo de los sistemas agropecuarios (Alemán et al., 2020; Grijalba et al., 2013). Una alternativa para reducir la degradación de los recursos naturales por cambios de uso de suelo, es la implementación de Sistemas Silvopastoriles (SSP) con el propósito fundamental de diversificar y optimizar la producción para un manejo sostenible además de generar bienes y servicios ecosistémicos, como el aumento de las reservas de carbono en la biomasa aérea y en el suelo (Shibu and Dollinger, 2019; Nair, 2009).

2.6. INDICADORES DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS.

La producción de alimentos, depende en un alto porcentaje, del uso que se les dé a los suelos (Martin y Adad, 2006), lo cual lo convierte en uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta. Su explotación se debe realizar de manera responsable para mantener una calidad que le permita, además de producir alimentos, realizar los servicios ecosistémicos propios de este recurso, renovándose a sí mismo (Soto, 2006).

Las definiciones más contemporáneas de calidad del suelo se basan en varias de sus funciones y no solo en un uso específico (Singer y Ewing, 2000). El Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America sintetizó esta definición como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat.

El suelo es un ecosistema donde interactúan múltiples factores por tanto no es posible que un solo indicador provea una información completa. Los indicadores de la calidad del suelo son variables que permiten evaluar su condición y se convierten en una herramienta de medición que debe ofrecer información sobre las propiedades, los procesos y las características del suelo. Se miden para dar seguimiento a los efectos del manejo del suelo sobre su funcionamiento en un período dado (Astier et al., 2002). Varían de acuerdo con las características predominantes del lugar y el manejo. En la Tabla 1 se muestran los indicadores que más se utilizan a nivel mundial.

Los indicadores de calidad del suelo pueden ser factores productivos, sociales, propiedades físicas, químicas, biológicas o los procesos que ocurren en él (Ramírez, 2004; SQI, 1996). Deben permitir conocer la situación actual del suelo, identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible, analizar los posibles impactos antes de una intervención, monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas y ayudar a determinar si el uso de este recurso es sostenible (Hünne Meyer et al., 1997).

Tabla 1. Indicadores físicos, químicos y biológicos de la calidad del suelo

Indicador	Relación con las funciones y condiciones del suelo
Físicos	
Textura del suelo	Retención y transporte de agua y minerales, erosión del suelo.
Profundidad del suelo	Estimación del potencial productivo y de erosión.
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lixiviación, productividad y erosión.
Capacidad de retención de agua	Relacionado con el contenido de humedad, transporte y erosión.
Estabilidad de agregados	Erosión potencial de un suelo, infiltración de agua.
Químicos	
Materia orgánica (C y N orgánico).	Fertilidad del suelo, estabilidad y grado de erosión del suelo.
pH	Actividad química y biológica, límites para el crecimiento de las plantas y actividad microbiana.
Conductividad eléctrica	Actividad microbiológica y de las plantas, límites para el crecimiento de las plantas y la actividad microbiológica.
N, P y K extraíble	Disponibilidad de nutrientes para las plantas y pérdida potencial de N, indicadores de productividad y calidad ambiental.
Capacidad de intercambio catiónico	Fertilidad de suelo, potencial productivo.
Metales pesados disponibles	Niveles de toxicidad para el crecimiento de la planta y la calidad del cultivo.
Biológicos	
Biomasa microbiana (C y N)	Potencial catalizador microbiano y reposición de C y N.
N potencial mineralizable	Productividad del suelo y aporte potencial de N.
Respiración edáfica, contenido de agua, temperatura del suelo	Medición de la actividad microbiana.
Número de lombrices	Relacionado con la actividad microbiana.
Rendimiento del cultivo	Producción potencial del cultivo, disponibilidad de nutrientes.

Fuente: De Chen (2000) modificado por Acevedo et al. (2005).

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS:

3.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

El área de estudio comprendió distintas localidades pertenecientes a la provincia de Pastaza: 10 de agosto, Fátima, Santa Clara, Simón Bolívar, Triunfo, Arajuno, Capricho y San Jorge (Figura 2).

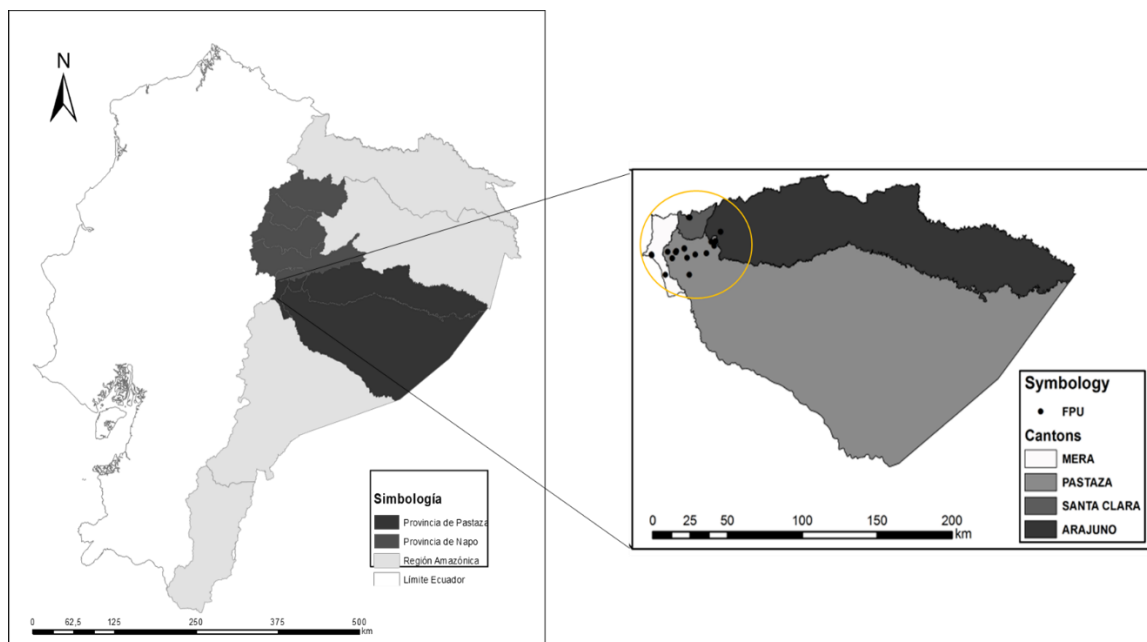


Figura 2. Localización geográfica del área de estudio en la Provincia de Pastaza

Fuente: Elaboración propia

El clima es característico del bosque húmedo tropical siempre verde en ecosistema de Selva Alta, con un régimen pluviométrico de 1981-6134 mm anuales, evapotranspiración entre 50 mm a 100 mm al año, temperatura promedio de 21,1-22,9°C y una humedad relativa de 86-92% (Nieto y Caicedo, 2012). Los suelos pertenecen a los órdenes Andisoles e Inceptisoles, de reciente formación, sin todos los horizontes definidos, ácidos, de baja fertilidad y altos contenidos de hierro (Fe) (Bravo et al., 2017a; Nieto y Caicedo, 2012).

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.

La investigación fue de tipo experimental porque se evaluó en distintos usos del suelo (pasto sin árboles, pasto con árboles y bosque), la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K) a dos profundidades y el potencial de secuestro de carbono en la biomasa aérea y el suelo.

3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.

Se usó el método de medición mediante un diseño bifactorial y un muestreo sistemático en cada sistema de pastoreo y el bosque, que permitió el levantamiento de la información relacionada con los parámetros de suelo y de vegetación (inventario florístico), tal como se describen a continuación.

3.4. USOS DE SUELO, MUESTREO DE SUELO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO.

Para este estudio se seleccionaron 25 unidades experimentales, las cuales fueron agrupadas en cinco (5) usos de suelo típicamente encontrados en la región Amazónica cuya descripción se muestran en la tabla 1. En cada uso se realizó un muestreo sistemático teniendo en cuenta la siguiente secuencia (Bravo et al., 2017a):

- a) Se estableció un transecto que cubrió toda la variabilidad topográfica, de vegetación y suelos en cada uso seleccionado.
- b) Sobre cada transecto se ubicaron tres puntos equidistantes de muestreo en función del tamaño de la parcela (Figura 2).
- c) Se estableció una subparcela de 10 m por 10 m en cada punto de muestreo (P1, P2, P3), en la cual se recolectaron cinco submuestras de suelo a dos profundidades (0-10 cm y 10-30 cm) (Figura 2). Dichas submuestras conformaron la muestra compuesta por punto y se usaron para evaluar los parámetros de fertilidad del suelo.

- d) En la parte central de la subparcela se tomaron muestras no alteradas de suelo a dos profundidades (0-10 cm y 10-30 cm) y se evaluaron la densidad aparente (D_a), conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) y la porosidad del suelo.

Tabla 2. Usos de suelos seleccionados en el área bajo estudio (Provincia de Pastaza, Amazonía Ecuatoriana, Ecuador).

Tipo de Uso de suelo	Descripción
1) SSPG	Sistema Silvopastoril con Pasto Gramalote (<i>Axonopus Scoparius</i>) con árboles dispersos en el potrero
2) PGSA	Pasto Gramalote (<i>Axonopus Scoparius</i>) Sin Árboles
3) SSPB	Sistema Silvopastoril con Pastos Brachiaria (<i>Brachiaria decumbens</i>) con árboles dispersos en el potrero
4) PBSA	Pastos Brachiaria (<i>Brachiaria decumbens</i>) Sin árboles,
5) BS	Bosque secundario Alta biodiversidad y predominio principalmente de especies de las familias de las Fabaceae (<i>Inga vismifolia</i>), Sapotaceae (<i>Pouteriartorta</i>) y Arecaceae (<i>Iriartea deltoidea</i>)

Fuente: Elaboración propia.

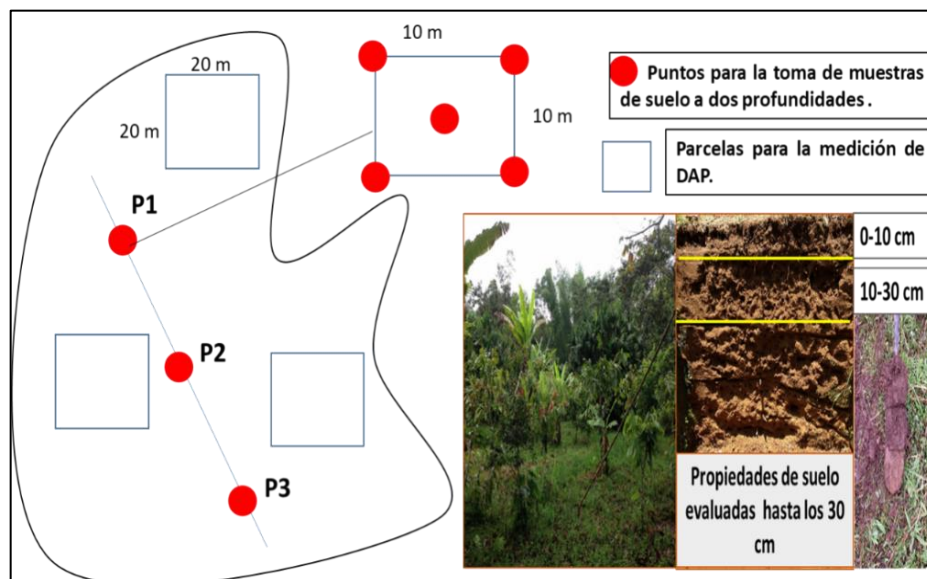


Figura 3. Diagrama esquemático para la evaluación de parámetros de suelo en cada uso seleccionado. Fuente: Elaboración propia.

3.5. ANÁLISIS FÍSICOS.

Para la determinación de atributos físicos del suelo se tomaron muestras no alteradas con cilindros de 5 cm de altura x 5 cm de diámetro, en los cuales se midieron las siguientes variables: a) densidad aparente (D_a) usando el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986), b) conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) mediante el método de carga variable (Pla, 2010), distribución de tamaño de poros: c) porosidad total (P_t), d) porosidad de aireación (P_a) poros de radio $>15 \mu m$, e) porosidad de retención (P_r) usando la mesa de tensión a saturación y a un potencial métrico de -10 kPa (Klute, 1986)

3.6. ANÁLISIS QUÍMICOS.

El carbono orgánico total (COT) se determinó mediante el método de digestión húmeda Walkley y Black (Nelson y Sommer, 1982), para lo cual se realizó una oxidación con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1 N con adición de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y posteriormente el carbono orgánico oxidado por el cromo (Cr) se midió por titulación usando una solución de sal de Morh 0,5 N ($H_2SO_4 + FeSO_4 \cdot 7H_2O$). El nitrógeno total se midió por el método de Kjeldahl. El pH fue medido por potenciometría (relación suelo-agua 1:2,5), el potasio intercambiable (K^+) y contenido de fósforo fueron medidos por la metodología de Olsen modificado (Bertsh, 1995).

3.7. EVALUACIÓN DEL SECUESTRO DE CARBONO.

3.7.1. CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO.

Como primer paso se determinó la densidad aparente (D_a) usando el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986). Para ello, se usaron cilindros de 5 cm de altura x 5 cm de diámetro recolectados con toma muestra tipo Uhland, y posteriormente se colocaron en estufa a $105^\circ C$ por 24 horas para obtener el peso seco (Pla, 2010). El carbono orgánico total (COT) se determinó mediante el método de digestión húmeda Walkley y Black (Nelson y

Sommer, 1982) ya descrito en la sección anterior. Con el valor de la densidad aparente (Mg m^{-3}), el valor del carbono y la profundidad de cada intervalo de muestreo (0-10 cm, 10-30 cm) se cuantificó la cantidad total de carbono almacenado en el compartimiento suelo mediante la siguiente ecuación (López-Santiago et al., 2019; Pradhan et al., 2012):

$$COS = Da \times COT(\%) \times P(m) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

COS: Carbono almacenado en el componente suelo (Mg C ha^{-1})

Da. Densidad aparente (Mg m^{-3})

P: Profundidad (m)

3.7.2. CARBONO DE LA BIOMASA AÉREA.

El método de muestreo utilizado fue el de área mínima, la característica principal es que permite conocer en forma rápida la diversidad vegetal y la composición florística del lugar en consideración (Smith, 2001). Una vez delimitada el área se procedió a realizar el inventario florístico en cada uso del suelo. En los mismos se establecieron tres parcelas temporales de $20 \times 20 \text{ m}^2$ que estaban dentro del transecto mencionado anteriormente. Dentro de cada parcela se registraron todo individuo $\geq 10 \text{ cm}$ de DAP (diámetro a la altura del pecho, medido a 1.3 m de la altura sobre el suelo). Los individuos se identificaron a nivel de especie utilizando nombres comunes y científicos con la ayuda de especialistas en especies vegetales.

Posteriormente para estimar el stock de carbono de la biomasa aérea se utilizó una ecuación alométrica (Chave et al., 2005), aplicada a las mediciones de los árboles y generada para las condiciones de bosque húmedo tropical:

$$BSS_{\text{árbol}} = (p * \exp(-1,499 + (2,148 * \ln(D)) + (0,207 * \ln(D)^2) - (0,0281 * \ln(D)^3)) * 0,001 \quad (2)$$

Donde:

BSS árbol= Biomasa aérea sobre el suelo

P: Densidad de Madera (g/cm³).

D: Diámetro a la altura del pecho (cm).

3.7.3. TRATAMIENTO DE DATOS:

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.

Se estableció una comparación entre los tipos de usos de suelo: SSPG, PGSA, SSPB, PBSA y BS como sistema de referencia, mediante un diseño factorial: Usos de suelo x 2 profundidades (0-10 y de 10-30 cm). Para el análisis estadístico se procedió como primer paso a evaluar la normalidad de los datos mediante la prueba de Will-Shapiro. Paralelamente se determinó los estadísticos descriptivos, incluida la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación y el rango para cada conjunto de datos de los parámetros evaluados. Se realizó un análisis de varianza para evaluar las diferencias entre los usos de suelos en función de las dos profundidades y la comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Igualmente se estableció el grado de asociación entre el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de macronutrientes en cada uso de suelo usando el coeficiente de correlación de Pearson. Todos los procedimientos estadísticos se realizaron utilizando programa IBM SPSS Statistics, versión 21 con un nivel de significación del 95% ($p \leq 0,05$).

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

La caracterización del área de estudio contempló una serie de parámetros relacionados con la fertilidad física y química, cuyos resultados, tanto del horizonte superficial (0- 10 cm) como del subsuperficial (10-30 cm) se presentan en la tabla 3. La caracterización de la fertilidad física del área de estudio incluyó: la densidad aparente (D_a), la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}), la porosidad total (P_t), porosidad de aireación (P_a) y porosidad de retención (P_r). En general, la zona presenta una adecuada condición física sobre todo en el horizonte superficial, la cual se va ligeramente deteriorando con la profundidad. Sin embargo, a pesar de esta situación se aprecian adecuados niveles de D_a , K_{sat} y de distribución de tamaño de poros (P_a , P_r) al compararlos con las clases texturales en ambos horizontes.

Tabla 3. Característica físico-químicas del área de estudio

Profundidad	Profundidad (cm)	
	0-10 cm	10-30 cm
Variables Edáficas	Promedio-DS	Promedio-DS
D_a , ($Mg\ m^{-3}$)	$0,46 \pm 0,21$	$0,58 \pm 0,30$
K_{sat} , ($cm\ h^{-1}$)	$26,16 \pm 4,97$	$9,28 \pm 4,26$
P_t , (%)	$85,50 \pm 9,10$	$80,27 \pm 11,71$
P_a , (%)	$18,55 \pm 4,71$	$12,05 \pm 3,65$
P_r , (%)	$66,96 \pm 8,39$	$68,17 \pm 12,34$
pH	$5,05 \pm 0,31$ (MA)	$5,25 \pm 0,37$ (MA)
COT, (%)	$14,34 \pm 7,13$ (A)	$7,71 \pm 4,73$ (A)
MO, (%)	$26,15 \pm 13,28$ (A)	$14,19 \pm 8,82$ (A)
Nt, (%)	$0,42 \pm 0,12$ (M)	$0,23 \pm 0,14$ (M)
NH_4^+ , ($mg\ kg^{-1}$)	$36,63 \pm 14,07$ (M)	$24,95 \pm 11,38$ (B)
P-disponible, ($mg\ kg^{-1}$)	$5,73 \pm 1,06$ (B)	$2,33 \pm 0,86$ (B)
K^+ intercambiable, ($meq\ 100\ g\ s^{-1}$)	$0,11 \pm 0,010$ (B)	$0,03 \pm 0,01$ (B)
S disponible, ($mg\ kg^{-1}$)	$7,82 \pm 3,44$ (B)	$5,94 \pm 3,58$ (B)

Da: Densidad aparente; **K_{sat}**: Conductividad hidráulica saturada; **P_t**: Porosidad total; **P_a**: Porosidad de aireación; **P_r**: Porosidad de retención; **COT**: Carbono Orgánico total; **Nt**: Nitrógeno total; **NH₄⁺**: Amonio disponible; **P**: P disponible; **K⁺**: Potasio Intercambiable; **S**: Azufre disponible; **MA**: Muy ácido; **A**: Alto; **M**: Medio; **B**: Bajo.

La Da está determinada por la cantidad de macro y microporos del suelo e influye fuertemente en el crecimiento de las raíces y el movimiento del agua, el aire, los nutrientes y su disponibilidad (Vera et al., 2012; Álvarez y Taboada, 2008; Martínez et al., 2008).

Esta variable presentó un rango de $0,46 \text{ Mg m}^{-3}$ en la capa superficial a $0,58 \text{ Mg m}^{-3}$ en el horizonte subsuperficial (tabla 3). Se observó un ligero incremento con la profundidad, asociado a la disminución del contenido de materia orgánica, que como ha sido señalado tiene un efecto negativo sobre la estructura edáfica, disminuyendo la porosidad del suelo y aumentando la Da (Sales et al., 2018). También la Da en la segunda profundidad disminuye por la presión que ejercen las capas superiores del suelo sobre las inferiores y por el depósito del material fino procedente del horizonte superficial que reduce los espacios porosos (Martinkoski et al., 2017). Si se considera que en suelos de textura fina el valor máximo para esta variable es de $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$ (Bravo et al., 2017c; Pla, 2010), se puede decir que los suelos en la zona estudiada no presentan problemas de compactación que limiten el desarrollo de las raíces de las plantas. Valores similares, han sido reportados en suelos de la Amazonía ecuatoriana, quienes indican que los bajos valores de esta variable están fuertemente relacionados con la alta concentración de MOS principalmente en el uso con bosque (Bravo et al., 2017b).

La conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) es una variable de gran importancia para el manejo, conservación, preservación del suelo y del ambiente (Pereira Filho, 2016). La misma ha sido definida como la velocidad con que el agua pasa a través del suelo y su valor limitante crítico es de $< 0,5 \text{ cm h}^{-1}$ (Pla, 2010).

Como se puede apreciar en la tabla 3, los valores oscilaron de $48,50 \text{ cm h}^{-1}$ en la primera profundidad (0-10 cm) a $9,28 \text{ cm h}^{-1}$ en la capa subsuperficial ambos categorizados como altos y valores superiores al límite crítico. Maldonado, Samaniego y Barrero (2016) realizaron un estudio, en la provincia de Pastaza, donde se observó un comportamiento similar en los valores de la K_{sat} en el primer horizonte (0-10cm) en el cambio de uso del suelo de un bosque primario ($32,58 \text{ cm h}^{-1}$) a sistema ganadero ($15,86 \text{ cm h}^{-1}$). Los altos valores

de K_{sat} favorecen el paso del agua minimizando la erosión hídrica, lo que adquiere especial importancia en la región amazónica por la frecuencia y abundancia de las precipitaciones.

La distribución de tamaño de poros representada es una medida de la calidad estructural del suelo y está determinada por la cantidad y tamaño de los poros (macro y microporos) que la forman (Pla, 2010). Es una variable que indica la capacidad que tiene el suelo de transmitir y retener agua, aire y calor (Blanco-Canqui y Ruis, 2018), sus valores están relacionados con la D_a y muestran una alta correlación (Shaver et al., 2002).

Como se puede observar en la tabla 3 el área estudiada en ambos horizontes muestra altos valores de porosidad total (Pt), con rangos que variaron de 80 a 85% y los mayores valores se obtuvieron en la primera capa (0-10 cm). Esto se asocia a los cambios de la densidad aparente del suelo y a la clase textural. Para que un suelo mantenga una adecuada relación agua- aire que garantice las mejores condiciones de desarrollo vegetal, el valor de la Pt debe ser mayor al 60% (Bravo et al., 2017b). Teniendo en cuenta este valor mínimo se puede señalar que los suelos estudiados no presentan valores críticos para esta variable.

Como ha sido indicado por algunos investigadores, más importante que la Pt de un suelo es la distribución en macro y microporos, por los efectos que tienen en el movimiento del agua y el aire dentro del mismo. (Bravo et al., 2017b; Pla 2010). En este sentido, al observar los valores de la porosidad de aireación (Pa) (tabla 3) se aprecian rangos de entre 12 y 18,55 % con mayor macroporosidad en el horizonte superficial. Los macroporos determinan la relación aire-agua y se considera que los valores por debajo de 10% pueden limitar el flujo de agua, el aire, la actividad biológica, la penetración, crecimiento y respiración de las raíces (Bravo et al., 2017d; López et al., 2016). Teniendo en cuenta lo antes planteado los usos de suelos investigados no presentan valores críticos para esta variable en ninguna de las profundidades estudiadas.

Estudios realizados en la Amazonía brasileña, dieron mayores valores de Pa en los sistemas silvopastoriles que en los suelos del bosque (Martinkoski et al., 2017; Oliveira, 2014). Estos resultados, se atribuyeron al efecto estructurador de las raíces de las gramíneas

forrajeras. En la Amazonía ecuatoriana existen trabajos que reportan mayores valores de Pa en el uso con bosque que en los suelos bajo sistemas ganaderos (Bravo et al., 2017d y Caiza, 2015).

Según Sales et al., (2018), el efecto positivo de la materia orgánica (MO) sobre la estructura del suelo es mayor en la primera superficie donde es más abundante. En términos prácticos significa que la presencia de valores de Pa, en los suelos estudiados, por encima del valor crítico (10 %) permiten que las tasas de infiltración sean altas, característica particularmente importante en suelos de textura fina y zonas de alta pluviosidad como la región Amazónica ecuatoriana (RAE).

Como se observa en la tabla 3, de la porosidad total, los microporos o poros de retención (<15 μm) representan la mayor proporción oscilando de 67 a 68 %, lo cual está asociado a las clases texturales finas con mayor proporción de arcillas (Sales et al., 2018). Los microporos son los que permiten, por el principio de capilaridad, la retención de agua en el suelo. Un incremento en su valor indica mayor capacidad del suelo de retener agua (Rocha Junior, 2012). Al respecto, varios autores indican que esta variable (Pr) esta mayormente influenciada por los procesos de formación del suelo y el material de origen, de modo que el uso del suelo como factor tiene baja influencia sobre la Pr (Sales et al., 2018; Mascarenhas et al., 2017; Nogueira et al., 2004).

Para mantener el equilibrio entre macroporos (Pa) y microporos (Pr) del suelo, se ha señalado que la proporción de microporos debe estar entre 70 y 90 % (Pire y Pereira, 2011). Si bien, los suelos del área estudiada presentan un valor ligeramente inferior a dicho límite, el alto contenido de materia orgánica en estos suelos aumenta la capacidad de retención de humedad (Blanco-Canqui y Ruis, 2018; Bravo et al., 2017a).

El análisis integral de la fertilidad física indica que los suelos del área estudiada presentan bajos valores de Da, alta velocidad de infiltración y captación de agua, determinada por los altos valores de la K_{sat} y la Pr y una excelente capacidad de aireación,

reflejada en su porosidad total y de aireación. Existiendo un ambiente en el suelo adecuado para el desarrollo de las plantas y la macro y microfauna edáfica (Bravo et al., 2017b).

La fertilidad química de los suelos es determinada por 17 elementos que se consideran esenciales para el desarrollo y crecimiento de las plantas. Estos se dividen en macro y microelementos, clasificación que se realiza en base a la abundancia de los mismos en el tejido vegetal (McGrath et al., 2014). Los macronutrientes son fundamentales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La disponibilidad de estos elementos depende de los niveles en el suelo, las características físicas del suelo y su pH. El ambiente edáfico asociado a la fertilidad química del suelo en el área estudiada en dos profundidades se muestra en la Tabla 3.

En relación al pH del suelo se obtuvieron valores de alrededor de 5 en ambas profundidades, los cuales son categorizados como muy ácidos (INIAP, 2012), característicos de los suelos amazónicos (Bravo et al., 2017a). Se ha señalado que el pH puede afectar de manera directa la fertilidad integral de los suelos, incidiendo sobre la disponibilidad de los nutrientes, la actividad microbiana y condicionando la capacidad de las plantas para su asimilación (Casanova 2005; McGrath et al., 2014). Adicionalmente, debido a valores extremos de pH pueden precipitar elementos esenciales y liberar elementos tóxicos como el Aluminio (Al), Hierro (Fe) y el Manganeseo (Mn) (Santos y López, 2015).

El proceso de acidificación de los suelos amazónicos está fuertemente influenciado por los procesos formadores del suelo, principalmente el material parental y el clima (Custode y Sourdat, 1986). En este sentido, se destaca que las altas precipitaciones propias de la RAE provocan lixiviación de los cationes básicos fundamentales (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) que son sustituidos por cationes ácidos (Al^{3+} , H^+) (Espinosa et al., 2018; Jordão, 2018; Aquino et al., 2014).

El contenido de materia orgánica muestra valores entre 26 % en el horizonte superficial y 14 % en la capa subsuperficial que en ambos casos son considerados como altos (Tabla 3) (INIAP, 2012). Estos valores coinciden con los reportados por Bravo et al.,

(2017d), y están relacionados con los antecedentes del uso potencial de la zona principalmente con bosques que aportan de manera permanente una gran cantidad de biomasa.

La reserva de nitrógeno en el suelo mostró rangos de nitrógeno total (Nt) de 0,42 a 0,23 % para el horizonte superficial y subsuperficial respectivamente (Tabla 3), categorizados como mediano. En estos suelos un alto contenido de materia orgánica contribuye de forma positiva en los ciclos biogeoquímicos aumentando la mineralización y mejorando el contenido de algunos nutrientes en especial de Nitrógeno (Díaz et al., 2016; Hernández et al., 2008). El resto de los nutrientes como el fósforo (P) y azufre (S) disponible, así como las bases intercambiables mostraron reservas categorizadas como bajas, coincidiendo con lo reportado en otros estudios para la Amazonía ecuatoriana (Bravo et al., 2017b).

En resumen, la condición química del área estudiada muestra valores de pH muy ácidos, alto contenido de materia orgánica, moderada disponibilidad de nitrógenos y bajas cantidades de P, S y K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} coincidiendo con los valores señalados para esta zona (Bravo et al., 2017b).

4.2. DISPONIBILIDAD DE MATERIA ORGANICA Y MACRONUTRIENTES (N-P-K) BAJO DISTINTOS USOS DEL SUELO.

La prueba de Tukey fue usada para establecer las diferencias de los distintos usos de suelo. En las tablas 4 y 5 se muestran los valores de pH y la disponibilidad de carbono orgánico, materia orgánica y macronutrientes (N-P-K) bajo diferentes usos del suelo y dos profundidades de muestreo. En general, para ambas profundidades presentaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$), que a continuación, se detallarán los resultados y la discusión de cada una de ellas.

Tabla: 4. pH y Disponibilidad de macronutrientes bajo diferentes sistemas de pastoreo en el horizonte superficial (0-10 cm)

Variable	SSPG	PGSA	SSPB	PBSA	BS
pH	5,05±0,23 a	5,20±0,20 a	5,02± 0,33 a	5,02± 0,21 a	4,64±0,39 b
COT (%)	20,43±5,34 a	16,39±6,76 a	10,97± 5,83 b	13,40±5,05 b	7,15±1,97 c
MOS (%)	37,10±10,40 a	29,62±12,80 a	20,49± 10,90 b	24,17±10,10 b	13,38±3,69 c
Nt (%)	0,61±0,17 a	0,48±0,21 a	0,33± 0,18 b	0,39±0,21 b	0,22±0,06 c
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	35,82±1,99 a	35,00±12,05 a	34,91±8,36 a	34,62±13,03 a	48,50±13,49 a
P,(mg kg ⁻¹)	5,76± 1,99 a	6,12±1,52 a	5,91±1,41 a	5,27± 1,91 a	5,33± 3,93 a
K,(meq 100 g s ⁻¹)	0,18± 0,15 a	0,11± 0,07b	0,19±0,16 a	0,06±0,05 b	0,11± 0,07 b

COT: Carbono Orgánico total (%); **Nt:** Nitrógeno total (%); **NH₄⁺:** Amonio disponible (mg kg⁻¹); **P:** P disponible (mg kg⁻¹); **K⁺:** Potasio Intercambiable (meq 100 g s⁻¹); **S:** Azufre disponible (mg kg⁻¹). **SSPG:** Sistema Silvopastoril con Gramalote; **PGSA:** Pastura Gramalote Sin Arboles; **SSPB:** Sistema Silvopastoril con Brachiaria; **PBSA:** Pastura Gramalote Sin Arboles; **BS:** Bosque Secundario. Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre los sistemas de pastoreo a un nivel de significancia **P≤0,05**

Los niveles de materia orgánica mostraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los usos de suelo evaluados en ambas profundidades, presentando una mayor concentración en la capa superficial (Tablas 4 y 5). La tendencia observada fue la siguiente SSPG, PGSA > SSPB, PBSA > BS, no obstante, independientemente de los usos de suelo los niveles de MOS encontrados son calificados como altos (INIAP, 2012). Esta variable está muy relacionada con los cambios en la concentración de nitrógeno total, lo cual se confirmó con la fuerte correlación registrada entre ambas variables para las dos profundidades que osciló de $r=0.98$ (0-10cm) a $r=0,93$ (10-30cm).

La mayor concentración de materia orgánica en el sistema silvopastoril con pasto gramalote (*Axonopus scoparius*), en condiciones amazónicas, se debe al gran aporte de biomasa del pasto gramalote (Vargas et al., 2015). También influye el tiempo de establecido que tiene este pasto en la RAE, en ocasiones por más de 30 años (Alemán et al., 2020; Bravo et al., 2015; Vargas et al., 2013) y por la presencia de especies de leguminosas arbóreas. Estas últimas juegan un papel importante en el suministro de materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno al suelo, debido a su capacidad inherente de fijar el nitrógeno atmosférico y la asociación con bacterias simbióticas y hongos micorrícicos que conducen a

la acumulación orgánica de carbono y nitrógeno en la biomasa de los árboles (Kassa et al., 2017).

4.2.1. DISPONIBILIDAD DE NITRÓGENO EN EL SUELO

En relación al nitrógeno total para el primer horizonte (tabla 4) los valores presentaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) por efecto de los usos de suelo y se formaron tres grupos, cuyo orden fue el siguiente: SSPG, PGSA > SSPB, PBSA > BS, siendo la mayor concentración en el SSPG (0,61%) y la menor en el BS (0,22%). En todos los casos los niveles de nitrógeno total son categorizados como medios (Bravo et al., 2017b). En el segundo horizonte (tabla 5) la tendencia fue similar con diferencias significativas ($P \leq 0,05$), se formaron dos grupos cuyo orden fue el siguiente: SSPG, PGSA > SSPB, PBSA, BS. En este horizonte el mayor valor fue para el SSPG (0,36 %) y el menor para el BS (0,13 %) e independientemente del uso se observó una disminución con la profundidad, lo cual está asociado a una disminución del contenido de materia orgánica (Tabla 4 y 5).

Tabla: 5. pH y Disponibilidad de macronutrientes bajo diferentes sistemas de pastoreo en el horizonte superficial (10-30 cm),

Variable	SSPG	PGSA	SSPB	PBSA	BS
pH	5,27±0,20 b	5,56±0,25 a	5,14± 0,11 b	5,09±0,32 b	4,73±0,23 c
COT (%)	12,02± 2,48 a	8,66±3,51 a	6,95±2,44 b	6,08±2,61 b	4,35±1,90 b
MOS (%)	22,31± 4,85 a	15,82±6,53 a	12,86±5,88 b	11,17±5,12 b	8,13±3,80 b
Nt (%)	0,36± 0,08 a	0,26±0,11 a	0,21±0,03 b	0,18±0,04 b	0,13±0,06 b
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	16,67± 5,03 a	7,26±1,33 a	10,04±3,03 a	10,16±2,22 a	7,21±2,28 a
P,(mg kg ⁻¹)	0,94±0,28 a	0,87±0,16 a	0,58±0,17 a	0,79±0,17 a	1,13± 0,36 a
K ⁺ , (meq 100 g s ⁻¹)	0,02± 0,001 b	0,03±0,001 a	0,04±0,001 a	0,01± 0,00 b	0,06±0,01 a

COT: Carbono Orgánico total (%); **Nt:** Nitrógeno total (%); **NH₄⁺:** Amonio disponible (mg kg⁻¹); **P:** P disponible (mg kg⁻¹); **K⁺:** Potasio Intercambiable (meq 100 g s⁻¹); **S:** Azufre disponible; **SSPG:** Sistema Silvopastoril con Gramalote; **PGSA:** Pastura Gramalote Sin Arboles; **SSPB:** Sistema Silvopastoril con Brachiaria; **PBSA:** Pastura Gramalote Sin Arboles; **BS:** Bosque Secundario, Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre los sistemas de pastoreo a un nivel de significancia $P \leq 0,05$

El nitrógeno en forma amoniacal (NH_4^+), en las profundidades estudiadas, no presentó diferencias significativas entre los usos de suelos (tablas 4 y 5), obteniéndose el mayor valor con el BS ($48,50 \text{ mg kg}^{-1}$) y el menor el PBSA ($34,62 \text{ mg kg}^{-1}$). En todos los casos, los valores obtenidos fueron categorizados de nivel medio (INIAP, 2012), lo cual sugiere que un 50 % de las necesidades de las plantas de este nutriente pueden ser proporcionadas por la reserva en el suelo (Bravo et al., 2017a; McGrath et al., 2014; Casanova, 2005).

Algunos investigadores señalan que la concentración de nitrógeno en el suelo está determinada en gran medida por la cantidad de MO de estos, la cual contribuye de forma positiva en los ciclos biogeoquímicos mejorando el contenido de algunos nutrientes en especial al N (Bravo et al., 2015; Viana et al., 2014; Hernández et al., 2008).

Cabe destacar que los bosques evaluados en este estudio han sido fuertemente intervenidos, con la finalidad de usar la madera para la venta y para la elaboración de cercas en la división de potreros de los sistemas ganaderos. Este proceso, afecta progresivamente la producción de biomasa y hojarasca como fuentes de enriquecimiento de la materia orgánica. Tal situación explicaría las tendencias obtenidas en cuanto al contenido de materia orgánica y de nitrógeno en estos suelos.

El desarrollo de pastizales, es actualmente uno de los principales contribuyentes a la deforestación en la Amazonía ecuatoriana y representa el mayor uso de los bosques tropicales convertidos (Torres et al., 2019; Bravo et al., 2018), con fuertes consecuencias sobre la fertilidad y el contenido de materia orgánica del suelo. Por ello, la determinación de las pérdidas de MOS de origen forestal y de la tasa de su sustitución por MOS aportada por los sistemas con pastos son importantes para comprender los ciclos de carbono y nitrógeno del suelo, así como los patrones que controlan la fertilidad del mismo. Esta situación es especialmente importante en condiciones amazónicas, en cuyos suelos predominan arcillas de baja capacidad de intercambio y de poca retención de nutrientes como la caolinita (Espinosa et al., 2018). La contribución más importante para la retención de nutrientes en estos suelos probablemente lo representa el nivel de materia orgánica.

4.2.2. CONTENIDO P DISPONIBLE.

En distintas zonas tropicales, entre ellas la Amazonía, se considera la deficiencia de fósforo como uno de los mayores obstáculos para la producción de alimentos debido a la baja cantidad de P nativo y a la alta fijación de óxidos de hierro y aluminio (Bravo et al., 2017b; Simpson et al., 2015).

Bajo esta perspectiva, el P disponible no presentó diferencias significativas ($P \leq 0,05$) por efecto del uso de suelo en las profundidades estudiadas (tablas 4 y 5). El valor más alto en la profundidad de 0-10cm lo expresó el PGSA ($6,12 \text{ mg kg}^{-1}$) y el menor el PBSA ($5,27 \text{ mg kg}^{-1}$). Para el segundo horizonte (10-30 cm) el mayor valor lo obtuvo el BS ($1,13 \text{ mg kg}^{-1}$) y el menor el SSPB ($0,58 \text{ mg kg}^{-1}$). Todos los valores de P obtenidos están por debajo de 10 mg kg^{-1} , catalogados como bajos (INIAP, 2012).

La mayor concentración de P en el horizonte superficial, está relacionada con la poca movilidad y solubilidad de este nutriente, principalmente en suelos ricos en óxidos de Fe y Al^{3+} (Paula et al., 2014), con los que forma compuestos insolubles, como fosfatos de Al y de Fe, no aprovechables por las plantas y que agravan la disponibilidad del P en la región Amazónica (Bravo et al., 2017b). Se ha señalado que una mayor disponibilidad de P en la capa superficial se asocia a la fertilización orgánica de los cultivos y al depósito de cenizas, resultado de la quema anterior de cobertura vegetal (Primavesi, 2006). Los bajos valores de P en suelos de bosques y agroforestales se relacionan con que este nutriente se encuentra en mayor medida en la biomasa (Freitas et al., 2013).

Los resultados reflejan en gran medida la situación de los suelos de la Amazonía ecuatoriana y coinciden con otros estudios realizados en la zona donde reportan valores de fósforo disponible por debajo del nivel crítico (10 mg kg^{-1}), lo cual revela que los suelos del área de estudio son críticamente deficientes en este elemento y constituye un factor limitante

para la productividad de los sistemas ganaderos y el bosque (Lao, 2017; Bravo et al, 2017b; Paul et al., 2010).

4.2.3. CONTENIDO DE POTASIO INTERCAMBIABLE (K⁺)

La variación del potasio intercambiable (K⁺) en función de los distintos usos de suelo se muestran en las tablas 4 y 5. En los dos horizontes estudiados presentó diferencias significativas ($P \leq 0,05$) por efecto de los usos de suelos. En el primer horizonte los resultados mostraron la formación de dos grupos con la siguiente tendencia: SSPG, SSPB > BS, PGSA, PBSA con el mayor valor en el SSPG (0,18 meq 100 g s⁻¹) y el menor valor en el PBSA (0,06 meq 100 g s⁻¹). Para el horizonte subsuperficial, el mayor valor lo expresó el BS (0,06 meq 100 g s⁻¹) y el menor el PBSA (0,01 meq 100 g s⁻¹) exhibiendo la siguiente tendencia: BS, SSPG > PGSA, SSPB, PBSA. Los valores más altos en el horizonte superficial que representan una ligera mejoría se obtuvieron en los sistemas silvopastoriles (SSPG y SSPB) y pueden ser consecuencias de la fertilización en los suelos ganaderos producto de la acumulación y descomposición de las excretas de los animales (Silveira Junior et al., 2014; Freitas et al., 2013).

Todos los valores de K⁺ obtenidos en el presente estudio, incluso los valores más altos en los SSP, están por debajo del umbral crítico (INIAP, 2012 < 0,2 meq 100 g s⁻¹), lo que expresa que este nutriente represente un factor limitante para la productividad de los sistemas ganaderos y el bosque.

Los resultados obtenidos se asemejan a los reportados por Freitas et al., (2013), en un trabajo realizado en el estado de Piauí en la Amazonía brasileña, donde los mayores niveles de K⁺ se mostraron en los sistemas ganaderos. Para la Amazonía ecuatoriana se reportan resultados similares, con valores de K⁺ intercambiable en el primer horizonte (0-10 cm) mayores en los sistemas ganaderos, comparados con otros usos de suelo (bosque, cacao agroforestal y cacao monocultivo) (Bravo et al., (2017b).

Los bajos valores de K^+ en los suelos de regiones tropicales húmedas se deben a que las abundantes precipitaciones, provocan lixiviación de las bases (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+1} , K^+) y favorecen el predominio de minerales poco alterables como caolinita, óxidos de hierro y aluminio. Lo que trae consigo el descenso de los parámetros asociados a la fertilidad, principalmente el pH (Gardi et al., 2014; Custode y Sourdat, 1986). Cuando el $pH < 6$ afecta de manera negativa la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y aumenta la competencia por los sitios de intercambio con los iones Al^{3+} e H^{1+} (McGrath et al., 2014).

A lo anterior hay añadir que el K^+ se puede lixiviar fácilmente por su débil fuerza de absorción en comparación con los demás cationes intercambiables en suelos tropicales, donde la fuerza de absorción es: $Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ (McGrath et al., 2014; Casanova, 2005). Además, se libera fácilmente de la biomasa aérea en los trópicos (Viana et al., 2014) y es el nutriente más móvil en la hojarasca forestal (Laskowski et al., 1995). Debido a que solo una pequeña fracción del K^+ de las plantas está unido a compuestos orgánicos, la mayor parte está disuelto en los líquidos de las paredes celulares, el citosol y los orgánulos (Mengel, 2006).

Los procesos, anteriormente explicados, están fuertemente potenciados por la intensa lluvia que ocurre en la región Amazónica por encima de 3500 mm al año (Nieto y Caicedo, 2012). En base a esta premisa se ha reportado que una lluvia de 84 mm liberó del 76 - 98% de K^+ de las hojas secas colocadas en la superficie del suelo (Moraes et al., 2007).

A pesar de que el K^+ se puede lixiviar fácilmente a los horizontes subterráneos del suelo, las raíces profundas de los árboles pueden reciclarlo. Por lo tanto, aumentar la densidad de los árboles en los sistemas silvopastoriles y sus respectivos aportes de biomasa, también puede contribuir con el aporte de K^+ en el suelo.

Independientemente de que algunos cationes importantes, como el K^+ , se derivan de la meteorización del material original (Vitousek y Sanford, 1986), los suelos tropicales altamente lixiviados, como el área de estudio, son naturalmente muy pobres en K^+ y $N-NO_3$,

por lo tanto, el ciclo de nutrientes juega un papel importante y clave en la dinámica del N y K^+ y su disponibilidad. Su dinámica es muy intensa en el ecosistema amazónico principalmente debido a la alta precipitación anual (3550 mm) y las temperaturas (23-28-°C) en esta región.

El potasio es probablemente el nutriente más reciclado por los cultivos. Se recupera desde las capas más profundas hasta la capa superficial, aumentando su concentración con el K^+ agregado por la caída de la hojarasca (Raij, 2011). Todo ello muestra claramente la tendencia a una mayor dinámica de K^+ y N como NO_3 en el sistema suelo-planta. La importancia de la biomasa aérea (caída de hojarasca, retranslocación, MOS, raíces y micorrizas) ha sido recalado en el ciclo de nutrientes en los bosques tropicales (Vitousek y Sanford, 1986).

4.3. SECUESTRO DE CARBONO EN DISTINTO COMPARTIMENTOS BAJO DIFERENTES USOS DEL SUELO.

La tabla 6 presenta el secuestro de carbono en el suelo bajo diferentes sistemas de pastoreo y el bosque secundario, donde se observa que la reserva de carbono en el componente suelo mostró diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en función de los usos o sistemas estudiados y para todas las profundidades consideradas. En el horizonte superficial se obtuvieron dos grupos y el orden registrado fue SSPG, SSPB>PGSA, PBSA, BS, con mayor carbono almacenado en SSPG ($67,54 \text{Mg C ha}^{-1}$) y menor en BS ($47,84 \text{Mg C ha}^{-1}$). El segundo horizonte mostró un orden similar con mayor reserva de carbono en SSPG ($67,54 \text{Mg C ha}^{-1}$) y menor en PBSA ($35,35 \text{Mg C ha}^{-1}$). Cuando se realizó la ponderación de reserva de carbono para la profundidad de 0-30 cm la secuencia obtenida fue SSPG >SSPB, PGSA, PBSA, BS, con mayor valor el SSPG ($54,52 \text{ Mg C ha}^{-1}$) y el menor el BS ($40,23 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Los resultados obtenidos ponen en evidencia la importancia del suelo como reservorio de carbono.

Tabla 6. Secuestro de carbono en el suelo bajo diferentes sistemas de pastoreo y bosque secundario

Uso del Suelo	SC Mg Ha-1 0-10 cm	SC Mg Ha-1 10-30 cm	SC Mg Ha-1 0-30 cm
SSPG	67,54±12,86 a	47,49±7,28 a	54,52±9,14 a
PGSA	55,56±14,66 b	35,58±13,42 b	42,24±13,83 b
SSPB	61,07±10,28 a	40,30±17,02 a	45,99±14,77 b
PBSA	55,33±12,21 b	35,35±16,63 b	42,01±16,16 b
BS	47,84±10,62 b	35,44±15,51 b	40,23±13,89 b

SSPG: Sistema Silvopastoril con Gramalote; **PGSA:** Pastura Gramalote Sin Arboles; **SSPB:** Sistema Silvopastoril con Brachiaria; **PBSA:** Pastura Brachiaria Sin Arboles; **BS:** Bosque Secundario, Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre los sistemas de pastoreo a un nivel de significancia $P \leq 0,05$

Los mayores valores de carbono almacenado en el suelo se obtuvieron en los sistemas silvopastoriles con pasto gramalote, los cuales están relacionados con el tiempo de establecido de dicho pasto que en ocasiones supera los 30 años (Alemán et al., 2020; Bravo et al., 2015; Vargas et al., 2013). Además, es un pasto perenne capaz de producir gran cantidad de biomasa, hasta 28000kg/ha/año de materia seca, parte de la cual se descompone en el suelo como material senescente incrementando la materia orgánica (Vargas et al., 2015). También posee un sistema radical abundante y tallos leñosos, que les permiten cubrir todo el suelo evitando la erosión hídrica (Bravo et al., 2015) y acumular materia orgánica al aumentar el carbono orgánico del suelo y la biomasa microbiana (Crespo, 2011). El carbono procedente de las raíces se retiene y forma agregados más estables en el suelo con respecto al que procede de la biomasa aérea (Frageria y Moreira, 2011; Trujillo et al., 2006). A todo lo anterior hay que añadir que la frecuencia de pastoreo para el gramalote es muy baja, entre los 7 y 8 meses, con una carga animal también baja (0,8 cabezas por hectáreas) (Benítez et al., 2016; Vargas., 2015). Las condiciones anteriormente descritas favorecen la producción y acumulación de materia orgánica y de carbono.

Estudios previos han señalado que la producción primaria neta subterránea (raíces) es una fuente importante de carbono orgánico en suelos cultivados con pastos, con aportes de carbono entre el 40 y el 85% de la producción primaria neta total (Moraes et al., 1996; Veldkamp, 1994). Esto es aproximadamente el doble para las especies mejoradas de *Brachiaria* en comparación con las especies nativas *Axonopus* (Veldkamp, 1994).

Se ha señalado que el secuestro de carbono orgánico del suelo (COS) se ha considerado como una posible solución para mitigar el cambio climático, tomando CO₂ atmosférico y convirtiéndolo en carbono del suelo de larga duración (Minasny et al., 2017). Debido a que el suelo almacena de dos a tres veces más carbono que la atmósfera, un aumento en las reservas podría desempeñar un papel significativo en la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Algunos autores han reportado en sistemas con pasturas mejoradas, sin degradación o deterioro, valores de captura del carbono entre 81.3 y 132.5Mg ha⁻¹ (Ibrahim et al., 2007).

Los resultados citados anteriormente indican que las pasturas mejoradas, siempre que no se encuentren deterioradas, pueden almacenar altos contenidos de carbono. Esto se relaciona con su alta producción de biomasa, sus posibilidades para mayores deposiciones de materia orgánica y con las características de sus sistemas radiculares, lo que contribuye directamente a sus posibilidades para almacenar carbono en el suelo. El sistema radicular, además de suministrar agua, nutrientes, hormonas y servir de soporte mecánico a las plantas, contribuyen al incremento de la MOS, al aumentar el carbono orgánico, el N y la biomasa microbiana (Crespo, 2011). Se ha indicado que el carbono procedente de las raíces se retiene y forma agregados más estables en el suelo con respecto al que procede de la biomasa aérea (Frageria y Moreira, 2011; Trujillo et al., 2006)

La biomasa aérea (BA) presentó diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre los usos de suelos evaluados (tabla 7), el mayor valor lo tiene el BS (909.39Mg ha⁻¹) y el menor el SSPB (39,84Mg ha⁻¹). Tal situación, influyó principalmente en el secuestro de CBA, que también presentó diferencias significativas ($P \leq 0,05$) por efecto del uso de suelo. En esta variable el mayor valor lo presentó el BS (454,70Mg C ha⁻¹) y el menor el SSPB (19,92 Mg C ha⁻¹).

El carbono total almacenado (CTA) y el CO₂ retenido mostraron un patrón similar en los usos de suelo evaluados, exhibiendo diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con la siguiente tendencia $BS > SSPG > SSPB$. El CTA osciló de 65 a 494,63 Mg C ha⁻¹), mientras que el potencial de CO₂ que se deja de emitir a la atmosfera varió de 241 a 1815,30 Mg CO₂ha⁻¹. En general, como se observa en la tabla 7, las diferencias que existen entre los usos de suelos en cuanto al CTA y el CO₂ retenido, lo determina la biomasa aérea debido a que las diferencias que presentó el CAS fueron mínimas.

Tabla: 7. Secuestro de Carbono bajo diferentes sistemas de manejo silvopastoril y bosque secundario en distintos compartimentos.

Parámetro	Uso de Suelo		
	SSPG	SSPB	BS
Biomasa aérea (BA) Mg ha ⁻¹	62.14±28.54 b	39.84±26.51 b	909.39±56.74 a
Carbono en la biomasa aérea (CBA) Mg C ha ⁻¹	31.07±14.27 b	19.92±13.26 b	454.70±28.37 a
Carbono Almacenado en Suelo (CAS) Mg C ha ⁻¹	54.52±7.40 a	45.99±14.77 b	40.23±13.89 b
Carbono Total Almacenado (CTA) Mg C ha ⁻¹	85.59±15.82 b	65.91±20.19 b	494.63±26.54 a
Cantidad de CO ₂ retenido Mg CO ₂ ha ⁻¹	314.12±58.06 b	241.88±74.11 b	1815.30±97.41 a

SSPG: Sistema Silvopastoril con Gramalote; **SSPB:** Sistema Silvopastoril con Brachiaria **BS:** Bosque Secundario, Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre los usos de suelo a un nivel de significancia $P \leq 0,05$

Resultados similares fueron obtenidos en un estudio realizado en el municipio de Albania en Colombia, que reporta una mayor capacidad del bosque para almacenar carbono en el estrato aéreo, que los usos de suelos ganaderos con árboles aislados (Rojas-Vargas et al., 2019). Igualmente, en Chiapas, México, obtienen diferencias significativas en el carbono almacenado en la biomasa aérea entre un bosque (144.45 Mg C ha⁻¹) y un sistema ganadero (75.95 Mg C ha⁻¹), pero no hubo diferencias significativas en el reservorio de carbono orgánico del suelo (Aryal et al., 2018).

Otras investigaciones donde se comparan usos de suelos con bosques con sistemas ganaderos en Colombia, concluyeron que el uso de la tierra y las especies de plantas también influyen significativamente en las estimaciones de CAS (Ibrahim et al., 2006; Moreno y Lara, 2003).

Los resultados del secuestro de carbono en los compartimientos analizados demostraron que el componente de carbono en el suelo, en los sistemas ganaderos, representa entre 64 y 70 % del carbono total almacenado. El carbono de la biomasa aérea contribuye de 30 a 36 % al CTA, destacando la importancia del suelo en su función reguladora del cambio climático en los sistemas pastoriles. Los sistemas ganaderos, formados por cuatro componentes básicos (suelo-planta-animal-hombre), poseen gran complejidad en sus interrelaciones y pueden contribuir al almacenamiento de carbono, debido precisamente a esta amplia gama de posibles combinaciones y funciones (Lok et al., 2013).

En el bosque el carbono almacenado en el suelo contribuye en un 8 % al CTA, mientras que el carbono de la biomasa aérea aporta un 92 %, lo cual se corroboró por el alto grado de correlación ($r=0.99$) entre la biomasa y CTA (figura 4)

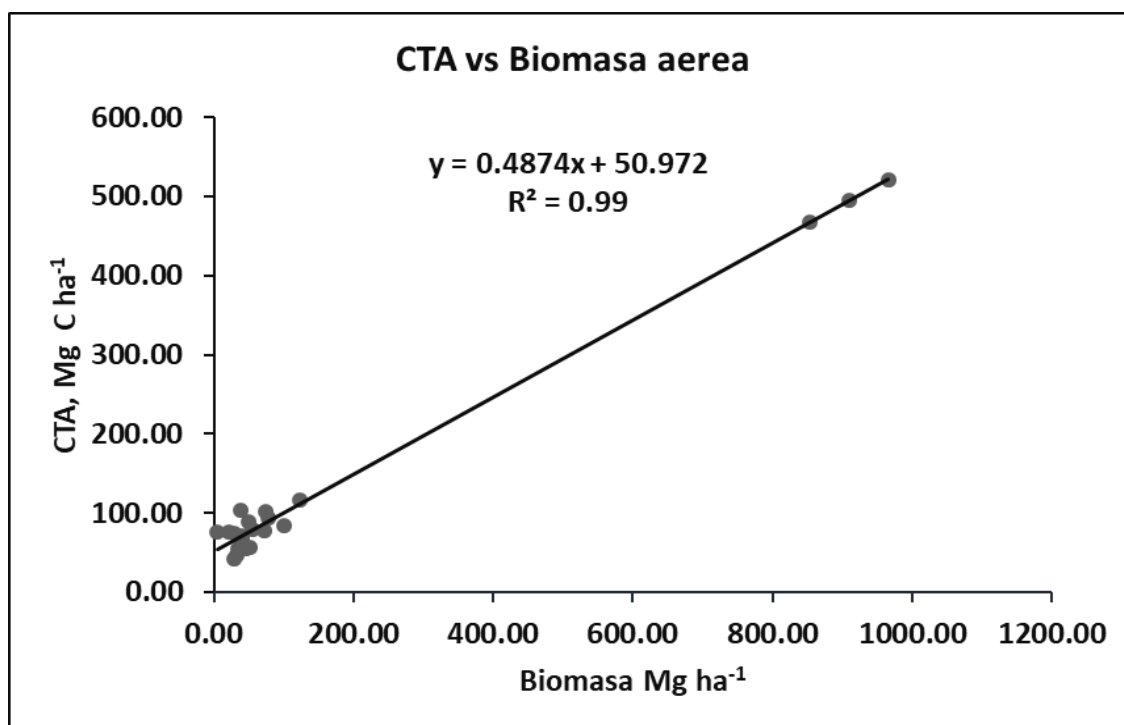


Figura 4: Relación carbono total almacenado (CTA) y biomasa aérea (BA)

Estos resultados indican, por un lado, la importancia de los ecosistemas naturales como grandes reservorios de C y por otro, el importante daño ambiental que se produce cuando se generan procesos de deforestación (Torres et al., 2019).

Fisher et al., (1994) reportan, para un oxisol de las llanuras orientales de Colombia, que las áreas cultivadas con pasturas mostraron una considerable acumulación de carbono, principalmente en capas más profundas (10-20 cm) menos vulnerables a la oxidación y la pérdida. Estos resultados concuerdan con la acumulación en el contenido de carbono orgánico observada en este estudio, principalmente en el SSPG.

4.4. RELACIÓN ENTRE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO Y MACRONUTRIENTES.

La relación entre la MOS y los macronutrientes se evaluó a través de la correlación de Pearson que tiene valores entre $-1 \leq \rho \leq 1$. Para su interpretación hay que tener en cuenta la dirección y fuerza. Si el valor de relación entre las variables es cercano a 1 o -1 se interpreta como fuerte la relación y si los valores se acercan a cero, como débil.

Cuando el coeficiente de correlación está entre 0 y 0,4 o entre 0 y -0,4 la relación es débil. Si los valores están entre 0,4 y 0,7 o entre -0,4 y -0,7 la relación es moderada y entre 0,7 y 1 o -0,7 y -1 la relación es fuerte. Si el coeficiente es positivo las variables son directamente proporcionales, es decir aumentan o disminuyen a la vez. Si el coeficiente es negativo entonces las variables son inversamente proporcionales, o lo que es lo mismo, si una de las variables aumenta la otra disminuye.

Las relaciones establecidas en los horizontes estudiados entre distintas propiedades del suelo, los macronutrientes y la MOS se observan en las tablas 8 y 9.

Tabla 8. Relación entre la MOS y la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K) en el horizonte superficial (0-10 cm).

VARIABLES	Da	K _{sat}	Pt	Pa	Pr	COT	MOS	pH	Nt	NH ₄ ⁺	P	K	S
Da	1												
K _{sat}	-0,07	1											
Pt %	-0,76**	-0,09	1										
Pa %	-0,33**	0,35**	0,41**	1									
Pr %	-0,65**	-0,30**	0,86**	-0,12	1								
COT %	-0,63**	-0,15	0,46**	0,09	0,44**	1							
MOS	-0,62**	-0,14	0,44**	0,09	0,43**	0,99**	1						
pH	-0,50**	0,16	0,66**	0,45**	0,46**	0,18	0,17	1					
Nt %	-0,62**	-0,14	0,44**	0,09	0,43**	0,99**	0,99**	0,17	1				
NH ₄ ⁺	-0,01	-0,03	-0,01	0,07	-0,10	0,13	0,12	0,02	0,12	1			
P disponible	0,07	-0,24*	-0,04	0,08	-0,09	0,07	0,07	0,07	0,07	0,39**	1		
K ⁺	-0,13	0,12	0,19	0,17	0,12	0,25*	0,28*	0,32**	0,28*	0,11	0,16	1	
S	-0,12	0,06	0,14	0,11	0,09	0,19	0,19	0,39**	0,20	0,05	0,13	0,49**	1

Da: Densidad aparente (Mg m⁻³); **K_{sat}:** Conductividad hidráulica saturada (cm h⁻¹); **Pt:** Porosidad total (%); **Pa:** Porosidad de aireación (%); **Pr:** Porosidad de retención (%); **COT:** Carbono Orgánico total (%); **MOS:** Materia orgánica del suelo (%); **Nt:** Nitrógeno total (%); **NH₄⁺:** Amonio disponible (mg kg⁻¹); **P:** Fosforo disponible (mg kg⁻¹); **K⁺:** Potasio Intercambiable (meq 100 g s⁻¹); **S:** Azufre disponible (mg kg⁻¹), ** correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral). * La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 9. Relación entre la MOS y la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K) en el horizonte subsuperficial (10-30 cm),

Variables	Da	K _{sat}	Pt	Pa	Pr	COT	MOS	pH	NT	NH ₄ ⁺	P	K	S
Da	1												
K _{sat}	0,10	1											
Pt	-0,93**	-0,18	1										
Pa	-0,09	0,43**	-0,03	1									
Pr	-0,86**	-0,29**	0,96**	-0,32**	1								
COT	-0,51**	0,12	0,41**	0,22*	0,32**	1							
MOS	-0,51**	,126	0,40**	0,23*	0,31**	0,99**	1						
pH	-0,53**	-0,02	0,54**	-0,04	0,52**	0,25*	0,24*	1					
Nt	-0,51**	0,13	0,40**	0,23*	0,31**	0,93**	0,93**	0,24*	1				
NH ₄ ⁺	-0,16	0,15	0,06	0,10	0,02	0,14	0,15	-0,19	0,15	1			
P disponible	0,03	-0,14	0,03	-0,15	0,06	-0,16	-0,17	0,24*	-0,17	0,15	1		
K ⁺	0,04	0,16	-0,03	-0,07	-0,01	-0,09	-0,08	-0,14	-0,08	0,11	-0,13	1	
S	-0,28*	0,18	0,18	0,18	0,12	0,48**	0,49**	0,14	0,49**	0,17	0,00	-0,15	1

Da: Densidad aparente (Mg m⁻³); **K_{sat}:** Conductividad hidráulica saturada (cm h⁻¹); **Pt:** Porosidad total (%); **Pa:** Porosidad de aireación (%); **Pr:** Porosidad de retención (%); **COT:** Carbono Orgánico total (%); **MOS:** Materia orgánica del suelo (%); **Nt:** Nitrógeno total (%); **NH₄⁺:** Amonio (mg kg⁻¹); **P:** P disponible (mg kg⁻¹); **K⁺:** Potasio Intercambiable (meq 100 g s⁻¹); **S:** Azufre disponible (mg kg⁻¹).

** correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral). * La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

La relación entre la MOS y el nitrógeno total (Nt) en ambas profundidades, fue positiva y fuertemente relacionada (figura 5), con valores de correlación de Pearson que oscilaron de $r=0,99$ a $r=0,93$ respectivamente (Tabla 8 y 9). Las altas relaciones de ambas variables sugieren que la materia orgánica en su proceso de descomposición constituye una fuente importante de nitrógeno (Martínez et al., 2008). El NH_4^+ mantiene una correlación positiva, pero en valores débiles (0,13 para la primera profundidad y 0,14 para la segunda). Vásquez y Macías (2017), Von Lützw et al (2007) y Reyes et al (2002) obtienen resultados similares entre el COT y el N. Estos elementos presentaron alta significancia y se relacionaron positivamente, lo cual mostró una estrecha relación entre el COT y los compuestos nitrogenados.

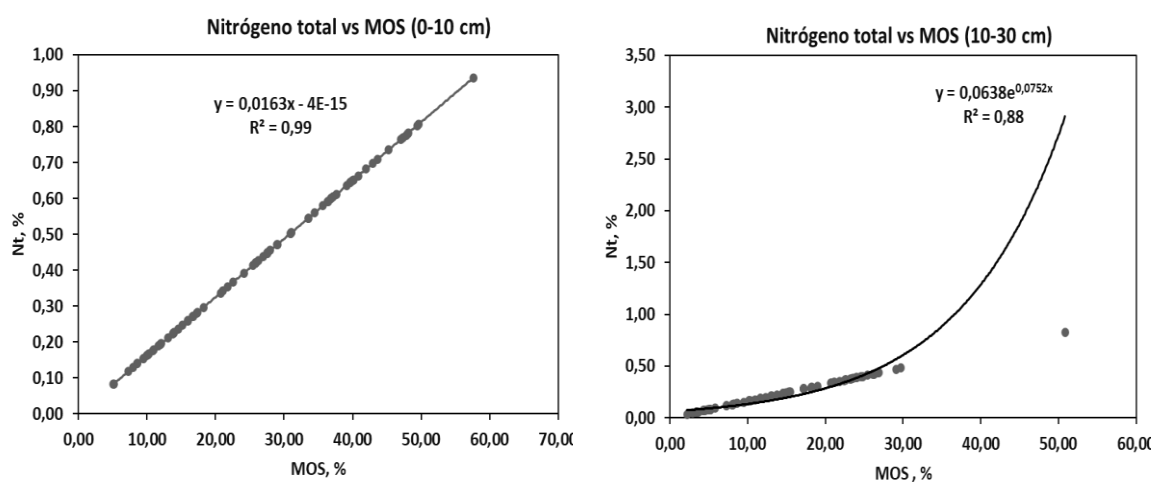


Figura 5: Relación entre materia orgánica del suelo (MOS) y el nitrógeno total (Nt) en las dos profundidades.

El fósforo disponible en ambas profundidades, mostró relaciones muy débiles y no significativas con la materia orgánica del suelo, tal como se aprecia en la figura 6. Los suelos de la Amazonía ecuatoriana normalmente presentan valores muy bajos de fósforo disponible con rangos menores del límite crítico de 10 mg kg^{-1} (Bravo et al., 2017b). Estos valores solo puede satisfacer entre 10 y 15 % de la demanda de las plantas (McGrath et al., 2014).

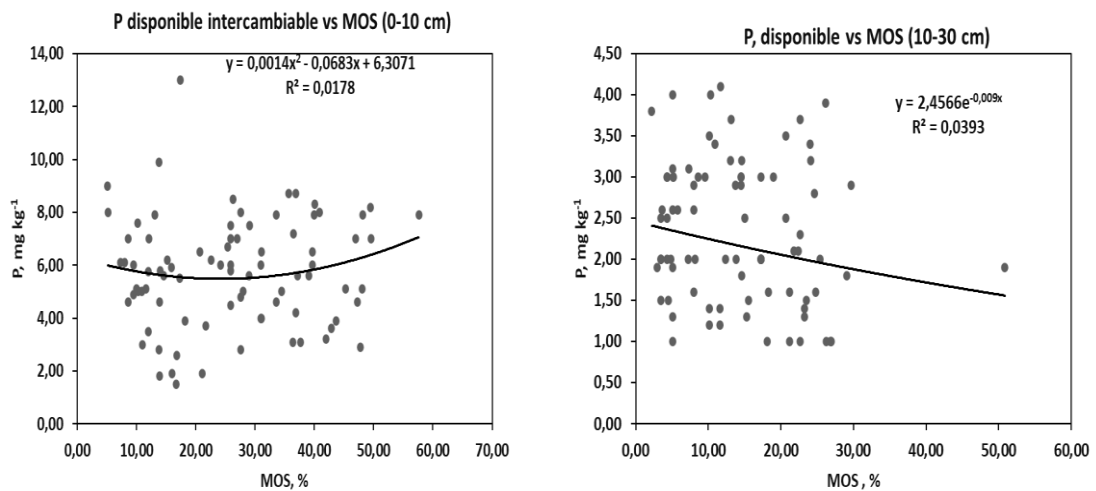


Figura 6: Relación entre materia orgánica del suelo (MOS) y fósforo disponible (P) para las profundidades consideradas.

En estas condiciones el P absorbido por las plantas es usado para satisfacer sus demandas y cumplir con sus funciones metabólicas y fisiológicas, por tanto, el aporte que puede retornar al suelo a través de la hojarasca es muy baja.

Resultados similares han sido reportados en estudios realizados en bosques y pasturas en la Amazonía brasileña, donde no se encontraron diferencias significativas en las cantidades de fósforo, cuyos valores extraíbles en el suelo del bosque variaron de 5.3 mg kg^{-1} , en la capa superficial, a 2.6 mg kg^{-1} en la capa de subsuperficial (Müller et al., 2004).

La correlación del contenido de materia orgánica del suelo (MOS) con el potasio intercambiable (K^+), mostró relaciones positivas y significativas en el horizonte superficial con $r=0,28$) (Tabla 8) (figura 7).

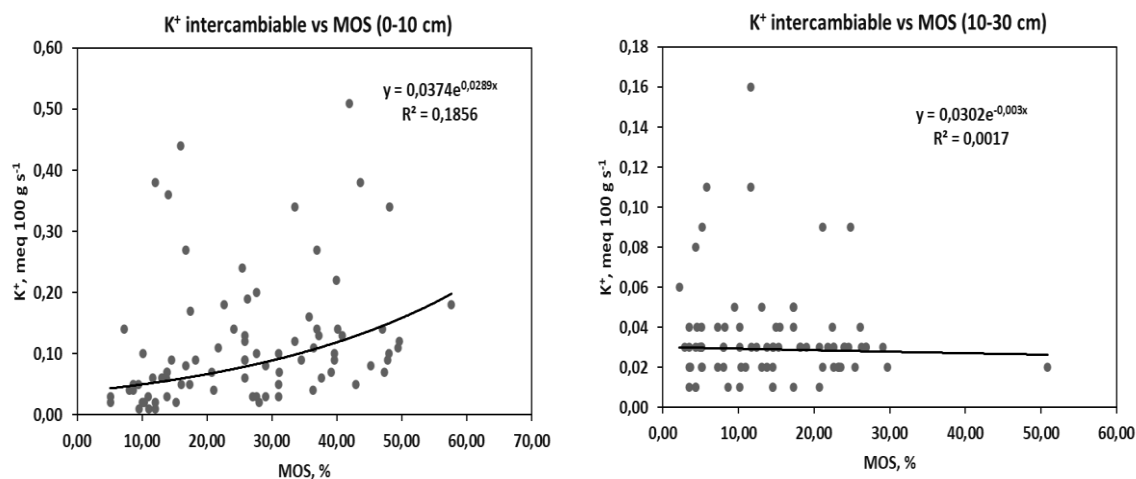


Figura 7: Relación entre la materia orgánica del suelo (MOS) y potasio intercambiable (K⁺), en las profundidades consideradas.

Los suelos de la Amazonía ecuatoriana han sido señalados como suelos altamente lixiviados, con alto contenido de aluminio intercambiable, presencia de arcilla de baja capacidad de intercambio (caolinita) y baja disponibilidad de bases intercambiables, lo cual está asociado a la influencia de los factores formadores (Gardi et al., 2014; Custode y Sourdat, 1986). Todo esto podría estar vinculado con la baja relación encontrada entre el potasio intercambiable y la materia orgánica del suelo.

Resultados similares han sido reportados por Müller et al (2004) y Reyes et al (2002), quienes reportan relaciones positivas y débiles entre el potasio intercambiable y la MOS.

5. CONCLUSIONES:

- Los sistemas de pastoreo afectaron significativamente la disponibilidad de nitrógeno y potasio, con mayores valores de nitrógeno en los sistemas con pasto gramalote (PGCA y PGSA) y mayor contenido de potasio intercambiable en ambos sistemas silvopastoriles (SSPG, SSPB) en comparación con el bosque secundario.
- El potencial de secuestro de carbono en el suelo fue mayor en los SSP en comparación con el bosque secundario, mientras que el carbono en la biomasa aérea y el carbono total almacenado fue superior en el bosque secundario. Estos resultados reflejan la importancia de los distintos compartimientos como reserva de carbono y su impacto en la disminución de las emisiones de CO₂ y la mitigación del cambio climático.
- La relación entre MOS y los macronutrientes, en los distintos usos de suelo, solo mostró asociación con el nitrógeno total y el potasio intercambiable, la cual varió de fuerte a débil respectivamente. Estas relaciones reflejan, en gran medida la naturaleza de los suelos amazónicos, modelados por los factores formadores de suelo.

6. RECOMENDACIONES:

- Evaluar mayor número de variables edáficas para determinar el efecto que sobre ellas ejerce el cambio de uso del suelo.
- Tener en cuenta variables productivas de los sistemas de pastoreo, como la carga animal, para evaluar el efecto que tendrían sobre las variables edáficas.
- Realizar estudios periódicos con mayor número de muestras por usos de suelos y en diferentes épocas del año para poder evaluar el efecto del cambio de uso del suelo de forma sistemática.
- La ganadería en la RAE se debe basar en sistemas semiestabulados, donde los animales permanezcan pocas horas en las áreas de pastoreo, las cuales deben ser sistemas silvopastoriles con combinaciones de gramíneas y leguminosas. Además se deben establecer bancos de proteínas e incorporar razas bovinas autóctonas. Todo ello integrado con buenas prácticas agropecuarias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Alemán-Pérez, R., Bravo-Medina, C., Vargas-Burgos, J., y Chimborazo-Sarabia, C. (2020). Tipificación agroecológica de los sistemas ganaderos en la región amazónica ecuatoriana. *Livestock Research for Rural Development*, 32, 6.
- Acevedo, E. et al. 2005. Criterios de calidad de suelo agrícola. Ministro de la Agricultura. Servicio agrícola y ganadero. Gobierno de Chile. 205 p. <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?>
- Álvarez, CR y M.A Taboada. (2008). Fertilidad física de los suelos. Segunda Edición. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. 237 p.
- Aquino, R. E. D., Marques Júnior, J., Campos, M. C. C., Oliveira, I. A. D., & Siqueira, D. S. (2014). Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44(1), 32-41.
- Astier-Calderón, M., Maass-Moreno, M., & Etchevers-Barra, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605-620.
- Raj Aryal, D., Gómez Castro, H., Carmen García, N. D., José Ruiz, O. D. J., Molina Paniagua, L. F., Jiménez Trujillo, J. A., ... & Guevara Hernández, F. (2018). Potencial de almacenamiento de carbono en áreas forestales en un sistema ganadero. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(48), 150-180.
- Baccini, A., Laporte, N., Goetz, S.J., Sun, M., & Dong, H. (2008). A first map of Africa's above ground biomass derived from satellite imagery. *Environ. Res. Lett.* 3, 045011 (9 pp.).
- Benítez, D., Torres, V., Vargas, J. C., & Soria, S. (2016). The productive efficiency of rearing herds in Pastaza, Ecuador. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 50(2).
- Bertsh, F. (1995). La fertilidad de los suelos y su manejo. 1 ed. San José. Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 157 p.
- Bhagwat, S. A., Willis, K. J., Birks, H. J. B., & Whittaker, R. J. (2008). Agroforestry: a refuge for tropical biodiversity?. *Trends in ecology & evolution*, 23(5), 261-267.
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164-200.

- Blake, G. R., and Hartge, K.(1986).Bulk Density 1, in: Methods of Soil Analysis: Part 1— Physical and Mineralogical Methods, 363-375.
- Bravo, C., Lozano, Z., Hernández-Hernández, R. M., Cánchica, H., González, I. (2008). Siembra directa como alternativa agroecológica para la transición hacia la sostenibilidad de las sabanas. Venezuela: Acta Biológica. 28 (1):7-26.
- Bravo, C. 2014. Caracterización del recurso suelo como base para la conversión agroecológica de áreas bajo pastizales a agroecosistemas sostenibles de Cacao y Ganadería en la región amazónica: Caso Pastaza y Napo. Ecuador Proyecto Prometeo- Universidad Estatal Amazónica. Secretaria de ciencia y tecnología (SENESCYT). Informe final Prometeo.120 pp.
- Bravo, C; Benítez, D; Durazno, G; Navarrete, H; Torres, B; Ramírez, A; Torres, V; Armijo, H; Paguay, D; Díaz, A y Vinueza, R. (2015). Informe Final: Diagnóstico ambiental de unidades de producción agropecuaria en tres pisos altitudinales de la provincia de Napo, Ecuador. 54 p.
- Bravo, C., Benítez, D., Vargas, J., Alemán, R., Torres, B., y Marín, H. (2015). Caracterización socio-ambiental de unidades de producción agropecuaria en la Región Amazónica Ecuatoriana: Caso Pastaza y Napo. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(1), 3-31.
- Bravo, C., Torres, B., Alemán, R., Changoluisa, D., Marín, H., Freile, J., y Navarrete, H. (2017a). Indicadores de calidad física y carbono orgánico en suelos de la Región Amazónica Ecuatoriana bajo diferentes usos de la tierra. En, R. Alemán, H. Reyes y C. Bravo (Eds.), *Libro de memorias: Simposio Internacional sobre Manejo Sostenible de Tierras y Seguridad Alimentaria – Ecuador 2017*. Ecuador: Universidad Estatal Amazónica.
- Bravo, C., Ramírez, A., Marín, H., Torres, B., Alemán, R., Torres, R., y Changoluisa, D. (2017b). Factores asociados a la fertilidad del suelo en diferentes usos de la tierra de la Región Amazónica Ecuatoriana. *Revista Electrónica de Veterinaria*, 18(11).
- Bravo, C., Marín, H., Marrero-Labrado, P., Ruiz, M.E., Torres-Navarrete, B., Navarrete-Alvarado, H., Durazno-Alvarado, G y Changoluisa-Vargas, D.(2017c). Evaluación de la sustentabilidad mediante indicadores en unidades de producción de la provincia de Napo, Amazonía Ecuatoriana. Ecuador: Bioagro, 29(1): 23-36.

- Bravo, C., Torres, B., Alemán, R., Changoluisa, D., Marín, H., Reyes, H., y Navarrete, H. (2017d). Soil structure and carbon sequestration as ecosystem services under different land uses in the Ecuadorian Amazon Region. En, *International Workshop of Natural Products and Agro-Industrial Processes*. MOL2NET. doi: 10.3390/mol2net-03-xxxx.
- Bravo, C., Alemán, P, R., Marín, H., Chimborazo, C., & Navarrete, H. (2018). Potencial de sustentabilidad en agroecosistemas ganaderos de la región amazónica ecuatoriana. *Cadernos de Agroecología*, 13(1).
- Buitrago- Guillen, M.E., Ospina, L.A., & Narváez-Solarte, W. (2018). Sistemas silvopastoriles: alternativa en la mitigación y adaptación de la producción bovina al cambio climático. Colombia. Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. U. de caldas, 22(1): 31-42. DOI: 10.17151/bccm. 2018.22.1.2.
- Burgarin, J.O. (2012). La interacción suelo, planta, animal en un Sistema silvopastoril. México. Revista computarizada de producción porcina, 19 (2) 2012.
- Cairo- Cairo, P. (2018). Effect of *Leucena leucocephala* on structure and content of organic matter in the soil of two cattle rearing units in Villa Clara, Cuba. Cuban Journal of Agricultural science 51: 29- 35
- Caiza, D. (2015). “*Estudio de la degradación física del suelo y plan de manejo ambiental para la finca Luis Cevallos*”. Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador.
- Casanova, E. (2005). Introducción a la ciencia del suelo. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Chave, J.; Andalo, C.; Brown, S.; Cairns, M.A.; Chambers, J.Q.; Eamus, D.; Fölster, H.; Fromard, F.; Higuchi, N.; Kira, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87–99, doi:10.1007/s00442-005-0100-x.
- Crespo G. 2011. Comportamiento de la materia orgánica del suelo en pastizales. Revista Cubana de Ciencia Agrícola, 45: 343-347.
- Cuenca, K.F. (2014). Impacto de la ganadería sobre las características físicas – química del suelo en el predio los Altares. CEAD, 2014.
- Custode, E., y Sourdat, M. (1986). Paisajes y suelos de la Amazonía ecuatoriana: entre la conservación y la explotación. *Cultura: Revista del Banco Central del Ecuador*, 24, 325-33.

- De Moraes, J.L., Alcarde, C., Rioyei, A., Duque, L., Couto, A., Stahl, J., de Barros, S.F., de Paula, W., Santin, P.H., Hubner, A., Daniel, J.P., Laclau, J.P., Nouvellon, Y., Epron, D. (2013). Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecol. Manage.* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>
- Díaz, P., Fachin, G., Tello, C., y Arévalo, L. (2016). Carbono almacenado en cinco sistemas de uso de tierra, en la región San Martín Perú. *RINDERESU*, 1(2), 57-67.
- Dixon, R. K. 1995. Agroforestry system: sources or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry Systems*,31: 99-116.
- Dumont, B., Fortun-Lamothe, L., Jouven, M., Thomas, M. & Tichit, M (2013). Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal*. 7:1028-1043, 2013.
- Espinosa, J., Moreno, J., y Bernal, G. (2018). *The soils of Ecuador*. Springer International Publishing AG.
- Fernandez, P. R., Acevedo, D. C., Villanueva, A., & Uribe, M. (2016). Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(359), 65- 77.
- Fisher, M. J., I. M. Rao, M. A. Ayarza, C. E. Lascano, J. I. Sanz, R. J. Thomas, and R. R. Vera. (1994). Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371:236–238.
- Frageria, N.K. & Moreira, A. (2011). The role of mineral nutrition on root growth plants. *Adv. Agron.* 110:251.
- Freitas, I., Santos, F., CustódioFilho, R., Correchel, V., y Silva, R. (2013). Agroecosistemas de produção familiar da Amazônia e seus impactos nos atributos do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(12), 1310-1317.
- Gallardo, J. 2004. Ciclo biogeoquímico (y secuestro) de carbono. *Apuntes de Ciencia y Tecnología*, 10, 40-49.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., y Jones, A. (2014). Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. Luxemburgo: Comisión Europea – Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.

- Gliessman, S. R. (2007). *Agroecology. The ecology of sustainable food system*. Second Edition. Taylors & Francis Group. New York. United States. 384 pp.
- Grijalva J; Ramos R; Arevalo P; Barrera J y Gerra J. 2013. Alternativas de intensificación, adaptación y mitigación a cambios climáticos. Los sistemas silvopastoriles en la subcuenca del río Quijos de la Amazonía ecuatoriana. Publicación miscelánea INIAP No. 414. Quito, 68 p.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Cambio Climático 2007. Informe de síntesis, disponible en http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf, [Accesado: el 03 de agosto de 2020].
- Guillaume, T., Maranguit, D., Murtillaksono, K., & Kuzyakov, Y. (2016). Sensitivity and resistance of soil fertility indicators to land-use changes: New concept and examples from conversion of Indonesian rainforest to plantations. *Ecological Indicators*, 67, 49-57.
- Hernández-Hernández R. M; E. Ramírez; I. Casto y S. Cano. (2008). Cambios en indicadores de calidad de suelos de ladera reforestados con pinos (*Pinus caribaea*) y Eucaliptos (*Eucalyptus robusta*). *Agrociencia* 42:253-266.
- Huerta-Lwanga, E., Rodríguez- Olan, J., Evia- Castillo, I., Montejo- Meneses, E., de la Cruz- Mondragon, M., & García- Hernández, R (2008). Relación entre la fertilidad del suelo y la población de Macroinvertebrados. *Terra Latinoamérica*, 26, 171-181.
- Hünemeyer, J.A. et al. (1997). Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. San José, Costa Rica. 157 p.
- Ibrahim, M., Villanueva, F., Rojas, J. (2006). Sistemas silvopastoriles como una herramienta para el mejoramiento de la productividad y restauración de la integridad ecológica de paisajes ganaderos. *Pastos y Forrajes*, Vol. 29, No. 4, 2006.
- Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F., Rojas, J. (2007). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*. N° 45.

- IPCC, 2014. Annex II: Glossary [Mach, K.J., S. Planton and C. von Stechow (eds.)]. In: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 117-130.
- Jiménez, L.S., Mezquida, E.T., Benito, M., & Rubio, A (2007). Cambios en las Propiedades del Suelo por Transformación de Áreas Boscosas En Pastizales en Zamora chinchipe (Ecuador). *Sociedad Española Ciencias Forestales*. 22: 65- 70 (2007).
- Jordão, H. (2018). Atributos químicos de solos sob ambientes naturais e antropizados no município de Humaitá, AM (Tesis de maestría). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil.
- Kassa, H., Dondeyne, S., Poesen, J., Frankl, A., Nyssen, J. (2017). Impact of deforestation on soil fertility, soil carbon and nitrogen stocks: the case of the Gacheb catchment in the White Nile Basin, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 247, 273-282.
- Klute, A. (1986). *Methods of soil analysis, part 1 physical and mineralogical methods*, Arnold Klute ed. Agronomy. 9.
- Labrador, J. (2008). *Manejo del suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica*. España: SEAE, 2008.
- Lao, C. (2017). “Fracciones del carbono orgánico lábil en suelos de la Amazonía peruana bajo diversos sistemas de uso” (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Lal, R. (2008). Soil carbon stocks underpresent and future climate with specific referenceto European core regions. *Nutr. Cycling Agroecosyst*, 81, 113–127.
- Laskowski, R., Niklin´ ska, M., Maryan´ ski, M. (1995). The dynamics of chemical elements in forest litter. *Ecology* 76, 1393–1406.
- Lemenih, M., Itanna, F. (2004). Soil carbon stocks and turnovers in various vegetation types and arable lands along elevation gradients in Southern Ethiopia. *Geoderma* 123, 177–188. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.02.004>.
- Loaiza, J. (2010). El recurso suelo. *Suelos Ecuatoriales* 41 (1):6-18

- Lok, S., Fraga, S., Noda, A. y Garcia, M. (2013). Almacenamiento de carbono en el suelo de tres sistemas ganaderos tropicales en explotaciones con ganado vacuno. *Rev. Cubana Cienc. Agric. Agric.* 47(1): 75- 82.
- López-Santiago, J.G.; Casanova-Lugo, F.; Villanueva-López, G.; Díaz-Echeverría, V.F.; Solorio-Sánchez, F.J.; Martínez-Zurimendi, P.; Aryal, D.R.; Chay-Canul, A.J. Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. *Agrofor. Syst.*(2019), 93, 199–211, doi:10.1007/s10457-018-0259-x.
- López, F., Duval, M., Martínez, J., y Galantini, J. (2016). Porosidad de Ustoles bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 34(2), 137-184.
- López-Vigoa, O., Sánchez-Santana, T., Iglesia- Gómez, J. M., Lamela- López, L., Socá-Perez, M., Arece- Garcia, J., & Milera- Rodriguez, M. de la C. (2017). Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción animal sostenible en el contexto de la ganadería tropical. *Pastos y Forrajes*, 40(2), 83-95.
- Maldonado, L., Samaniego, E., y Barrero, H. (2016). Caracterización de suelo del bosque primario adyacente en el cantón Arajuno. *Revista Forestal Baracoa*, 35, 1-9.
- Martin, N. y Adad, Idaybis. (2006). Generalidades más importantes de las ciencias del suelo. En: *Disciplina Ciencias del Suelo. Tomo I. Pedología*. Universidad Agraria de La Habana. Cuba. 504 p.
- Martín NJ, Pérez G (2009). Evaluación agroproductiva de cuatro sectores de la provincia de Pastaza en la Amazonía ecuatoriana. *Cultivos Tropicales* 30: 1-8
- Martínez, E; Fuentes JP y Acevedo-H, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8 (1) (68-96).
- Martinkoski, L., Vogel, G., Jadoski, S., y Watzlawick, L. (2017). Qualidade física do solo sob manejo silvipastoril e floresta secundária. *Floresta e Ambiente*, 24, e20160282. doi: 10.1590/2179-8087.028216.
- Mascarenhas, A., Scoti, M., Melo, R., Corrêa, F., Souza, E., Andrade, R., y Müller, M. (2017). Atributos físicos e estoques de carbono do solo sob diferentes usos da terra em Rondônia, Amazônia-sul-occidental. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 37(89), 19-27.
- Mc Bratney, A.B; DJ. Field and A Koch. (2013). The dimensions of soil security. *Geoderma* 213(2014): 203-213.

- McGrath, J., Spargo, J., y Penn, C. (2014). Soil fertility and plant nutrition. En, *Plant Health* (pp. 166-184). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-444-52512-3.00249-7.
- Mengel, K., (2006). Potassium. In: Barker, A.V., Pilbeam, D.J. (Eds.), *Handbook of Plant Nutrition*. CRC Press, Boca Raton, pp. 91–120.
- Miller, G., 2007, *Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral*, 8va edición, Editores Internacional Thomson, México.
- Minasny, B., Mcbratney, A.B. (2017). Limited effect of organic matter on soil available water capacity: limited effect of organic matter on soil water retention. *Eur. J. SoilSci.* <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>.
- Molina, M., Medina, M., Mahecha, L. (2008). Microorganismos y micronutrientes en el crecimiento y desarrollo del Aliso (*alnusacuminata* H.B.K) en un sistema silvopastoril alto andino. Colombia. *Livestock Research for rural Development*. Volume 20, Artículo #54. Retrieved November 4, 2019, from <http://www.lrrd.org/lrrd20/4/moli20054.htm>.
- Montagnini, E., Somarriba, E. Murgueitio, H., Fassola y B. Eibl. (2015). Costa Rica. *Sistemas Agroforestales. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales*. Serie Técnica. Informe Técnico 402.
- Moraes, J.F.L, Volkoff, B; Cerri, C. C. and Bemoux, M. (1996). Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondonia, Brazil. *Geoderma*, 70: 63-81.
- Moraes, M.F., Cantarella, H., Quaggio, J.A., Coscione, A.R. (2007). Ion mobility in acid soils with surface application of lime, organic acid and crop residues. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 31, 673–684.
- Moreno, F; Lara, W. (2003). Variación del carbono orgánico del suelo en bosques primarios intervenidos y secundarios. In Orrego, SA; Del Valle, JI; Moreno, FH. eds. *Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia, contribuciones para la mitigación del cambio climático*. Bogotá, CO, Universidad Nacional de Colombia-Centro Andino para la Economía del Medio Ambiente (CAEMA). p. 189-213.

- Murgueitio, E., Xóchitl Flores, M., Calle, Z., Chará, J., Barahona, R., Molina, C.H.(2015). Costa Rica. Productividad en sistemas silvopastoriles intensivos en América Latina. en *Sistemas agroforestales. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Editorial CIPAV, Cali, Colombia, pp.; 59-101.
- Mutuo, P. K., Cadisch, G., Albrecht, A., Palm, C. A., & Verchot, L. (2005). Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 71(1), 43-54.
- Müller, M.M., Guimaraes, M.F., Desjardins, T. & Mitja, D. (2004). The relationship between pasture degradation and soil properties in the Brazilian Amazon: a case study. *Agric. Ecosyst. Environ.* 103:279
- Nair, PK; Kumar, BM; Nair, VD. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *J. Plant Nutr. SoilSci.* 172, 10–23.
- Navas Panadero, A. (2010) Importancia de los sistemas silvopastoriles en la reducción del estrés calórico en sistemas de producción ganadera tropical. *Revista de Medicina Veterinaria*,(19),113-122. <https://doi.org/mv.782>.
- Nelson, D., and Sommers, L. E. (1982). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Total carbon, organic carbon, and organic matter. , 1143 pp.
- Nieto, C. y Caicedo, V. (2012). Análisis reflexivo sobre el desarrollo agropecuario sostenible en la Amazonía Ecuatoriana. INIAP-EECA. Publicación Miscelánea N 405 Joya de los Sachas, Ecuador. 102 p
- Nogueira, E., Fernandes, A., Ruivo, M., Rodrigues, T., y Sarrazin, M. (2004). Características físicas de um Gleissolo do rio Guamá sob diferentes sistemas de uso. *Revista de Ciências Agrarias*, (42), 85-96.
- Oliveira, M. (2014). Funcionamiento físico-hídrico do solo em duasto possequeen ciassob floresta e pastagem em sistema agro extrativistana Amazônia Oriental (Tesis doctoral). Universida de de São Paulo, Piracicaba, Brasil.
- Oliveira IAd, Campos MCC, Freitas Ld, Soares MDR (2015). Characterization of soils under different land uses in the southern region of the Amazonas. *Acta Amaz* 45: 1-12.

- Patiño, J., Rlivra, B., Patiño, M., & Vargas, J.E. (2017). Interpretaciones y recomendaciones sobre las prácticas profesionales desde el proyecto “Asistencia técnica para el fortalecimiento de la producción lechera en Caldas”. *Revista Veterinaria y Zootecnia*, 11(2): 34-54.
- Paul, M., Catterall, C.P., Pollard, P.C., Kanowski, J. (2010). Recovery of soil properties and functions in different rainforest restoration pathways. *For. Ecol. Manage.* 259, 2083–2092.
- Paula, M., Santos Filho, B., Pena, H., y Macedo, E. (2014). Avaliação da dinâmica dos atributos químicos do solo em sistemas agroflorestais no município de Santa Bárbara-PA, Amazônia-Brasil. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, (201).
- Pereira Filho, R. (2016). Determinação das propriedades físicas do solo em função do uso e ocupação em Caçapava do Sul – RS. Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, Brasil.
- Pérez, E., Soca, M., Díaz, L., & Corzo, M. (2008). Comportamiento etológico de bovinos en sistemas silvopastoriles en Chiapas en México. *México. Pastos y Forrajes*, 31(2), 1-1.
- Pire, R., y Pereira, A. (2011). Estabilidad de las propiedades físicas de sustratos hortícolas de uso común en el Estado Lara, Venezuela. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, (29), 80-88.
- Pla, I. (2010). Medición y evaluación de propiedades físicas de los suelos: Dificultades y errores más frecuentes. Colombia. *Suelos ecuatoriales*, 40 (2): 75-93.
- Pradhan, B.M.; Awasthi, K.D.; Bajracharya, R.M. (2012). Soil organic carbon stocks under different forest types in pokhare khola sub-watershed: A case study from Dhading district of Nepal. *WIT Trans. Ecol. Environ.*, 157, 535–546, doi:10.2495/AIR120471.
- Primavesi, A.(2006). Soil system management in the humid and subhumid tropic. In: Taylor y Francis (eds.). *Biological approaches to sustainable soil system*. CRC Press. pp. 15-26.
- Raij, B., (2011). Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. International Plant Nutrition Institute, Piracicaba.

- Ramírez, M. (2004). Indicadores de estado: factores biológicos que limitan la calidad agrícola de los suelos. *Primer Taller Nacional sobre indicadores de calidad de suelo. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Palmira, Colombia.*
- Rocha Junior, P. (2012). Indicadores de qualidade do solo e determinação de níveis de degradação de pastagens (Tesis de maestría). Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, Brasil.
- Rojas- Vargas, E, P., Silva- Agudelo, E, D., Guillén- Motta,.A.Y., Motta- Delgado, P.A., & Herrera- Valencia, W. (2019). Carbono almacenado en estrato arbóreo de sistemas ganaderos y naturales del municipio de Albania, Caqueta, Colombia. *Ciencias y Agricultura*, 16(3), 35-46. <https://doi.org/10.19053/01228420.v16.n3.2019.9515>.
- Reyes, J. I., Martínez, E., Silva, P., Acevedo, E. (2002). Labranza y propiedades de un suelo aluvial de Chile central. *Boletín N° 18. Sociedad chilena de la ciencia del suelo y Universidad de Talca. IX Congreso nacional de la ciencia del suelo, Talca, Chile.*p. 7881.
- Rodríguez Laguna, R., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, Ó. A., & Treviño Garza, E. J. (2006). Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. *Ciencia UANL*, 9(2).
- Ruiz, T. E., Febles, G. J., Savón, J., Savón, L. y Chongo, B. (2014). *Tithonia diversifolia*, sus posibilidades en sistema ganaderos. *Rev. Cubana cienc. Agric.* 48(1): 79- 82.
- Sales, A., Silva, A., Veloso, C., Carvalho, E., y Miranda, B. (2018). Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentá velna Amazônia legal. *Colloquium Agrariae*, 14(1), 1-15.
- Santos, L., y López, S. (2015). Valoración de servicios ecosistémicos generados por la construcción de infraestructuras. Desarrollo de la metodología. Salamanca, España: Ediciones Universidad de Salamanca.
- Scharlemann, J.P., Tanner, E.V., Hiederer, R., & Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5 (19), 81- 91. <http://doi.org/10.4155/cmt.13.77>.
- Schroth, G., Fonseca, G. A. B., Harvey, C. A., Gascon, C., Vasconcelos, H. & Izac, A. N. (2004). *Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes*. Island Press, Washington, District of Columbia, USA. p. 1-12.

- Shibu, J & Dollinger, J. (2019). Silvopasture: a sustainable livestock production system. *Agroforest Syst* 93:1–9. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00366-8>
- Seddaiu, G., Porcua, L., Luigi, P. P. Roggero., A. Agnelli, and G. Cortic. (2013). “Soil Organic Matter Content and Composition as Influenced by Soil Management in a Semi-Arid Mediterranean Agro-Silvo-Pastoral System.” *Agriculture, Ecosystems and Environment* 167: 1–11. doi:10.1016/j. agee.2013.01.002.
- Serrano, J., Shahidian, J., Marques Da Silva, E., Sales-Baptista, I., Ferraz De Oliveira, J. Lopes De Castro, Alfredo Pereira, M. Cancela De Abreu, Eliana Machado & Mário de Carvalho (2017): Tree influence on soil and pasture: contribution of proximal sensing to pasture productivity and quality estimation in montado ecosystems, *International Journal of Remote Sensing*, DOI: 10.1080/01431161.2017.1404166.
- Shaver, T., Peterson, G., Ahuja, L., Westfall, D., Sherrod, L., y Dunn, G. (2002). Surface soil physical properties after twelve years of dryland no-till management. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4), 1296-1303.
- Silveira Junior, O., Santos, A., Santos, P., Rocha, J., y Alexandrino, E. (2014). Distribuição espacial de atributos químicos do solo em áreas sob diferentes usos agrícolas. *Engenharia Agricultura*, 22(5), 442-455.
- Simpson, R. J., Stefanski, A., Marshall, D. J., Moore, A. D., & Richardson, A. E. (2015). Management of soil phosphorus fertility determines the phosphorus budget of a temperate grazing system and is the key to improving phosphorus efficiency. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 212, 263-277.
- Singer, M.J. & Ewing, S. (2000). Soil quality. In: *Handbook of soil science*. (Ed. M.E. Sumner). CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. p. 271
- Silver, W. L., J. Neff, M. McGroddy, E. Veldkamp, and M. Keller. (2000). Patterns in soil chemical properties and root biomass along a soil texture gradient in a lowland Amazonian tropical forest. *Ecosystems*. 3:193–201.
- Smith, L. (2001). *Ecología*. Pearson Educación, Madrid. 62 – 64 pp. Referenciada. 11/06/2009. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/449/4495428.pdf>. Sobre el Cambio Climático. Santiago de Chile, 2001.

- Smith, P., House, J.I., Bustamante, M., Sobocka, J., Harper, R., Pan, G., Pugh, T. A.M (2016). Global change pressures on soil from land use and management. *Global Change Biology*, 22(3), 1008- 1028. <https://doi.org/10.1111/gcb.13068>.
- Solomon, D., Fritzsche, F., Lehmann, J., Tekalign, M., Zech, W. (2002). Soil organic matter dynamics in the sub humid agro ecological systems of the Ethiopian Highlands: evidence from ¹³C abundance and particle size fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 969–978.
- SQI-Soil Quality Institute. 1996. Indicators for soil quality evaluation. USDA natural resources conservation service. The National Soil Survey Center / The Soil Quality Institute, NRCS, USDA / The National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- Soto, G. (2006). Calidad de los suelos: una nueva visión del suelo. I Congreso Latinoamericano de Experimentadores e Investigadores en Producción Orgánica. *Managua, Nicaragua*.
- Srinivasarao, C., Venkateswarlu, B., Lal, R., Singh, A.K., Kundu, S., Vittal, K.P.R., Patel, J.J., Patel, M.M. (2014). Long-term manuring and fertilizer effects on depletion of soil organic carbon stocks under pearl millet-cluster bean-castor rotation in Western India. *Land Degrad. Dev.* 25 (2), 173–183. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.1158>.
- Srinivasarao, C., Lal, R., Kundu, S., Babu, M., Venkateswarlu, B., and Singh, A. K. (2014). Soil carbon sequestration in rainfed production systems in the semiarid tropics of India, *Science of The Total Environment*, 487, 587-603, 2014.
- Steinfeld, H., Pierre, G., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. & Haan, C. (2006). *La Larga Sombra Del Ganado*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma.
- Torres, B., Vasseur, L., López, R., Lozano, P., García, Y., Arteaga, Y., Bravo, C., Barba, C. y García. A. (2019). Structure and above ground biomass along an elevation small-scale gradient: case study in an Evergreen Andean Amazon forest. Ecuador. *Agroforestry Systems*, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-00342-8>
- Trujillo, W., Fisher, M.J. & Lal, R. (2006). Root dynamics of native savanna and introduced pastures in the Eastern Plains of Colombia. *Soil Tillage Res.* 87:28.

- Valera C, Junior RV, Varandas S, Fernandes LS, Pacheco F. (2016). The role of environmental land use conflicts in soil fertility: a study on the Uberaba River basin, Brazil. *Sci Total Environ* 562: 463-473.
- Vallejo, V.E., Roldán, F., Arbeli, Z., Terán, W., Lorenz, N., & Dick, R.P. (2012). Effect of land management and *Prosopis juliflora* (Sw.) DC trees on soil microbial community and enzymatic activities in silvopastoral systems of Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 150, 139-148.
- Vallejo-Quintero, V. E. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. Colombia. *Colomb.for.*, 16, 83-99.
- Vallejo, V., Diaz-Fierros, F., & De la Rosa, D. (2005). Impactos sobre los Recursos Edáficos. *Impactos Del Cambio Climático En España*, 355-398.
- Vargas-Burgos, J.C., D. Benítez, S. Ríos, A. Torre, H. Navarrete, M. Andino y R. Quinteros. (2013). Ordenamiento de razas bovinas en los ecosistemas amazónicos. Estudio de caso provincia de Pastaza. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología* 2(3): 133-146.
- Vargas, J.C., Benítez-Jiménez, D; Bravo, C; Leonard, I; Pérez, M, Torres, V; Ríos, S y Torres, A. (2015). Retos y posibilidades para una ganadería sostenible en la provincia de Pastaza de la Amazonía Ecuatoriana. Universidad Estatal Amazónica. Puyo, Ecuador. 174 pp.
- Vásquez Polo, J.R, & Macías Vázquez, F. (2017). Fraccionamiento químico del carbono en suelos con diferentes usos en el departamento de Magdalena, Colombia. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 7-17.
- Vera, S., Lozano, Z., Lobo, D., Bravo, C., Hernández, R.M y Delgado, M. (2012). Propiedades físicas del suelo y distribución de raíces de maíz bajo diferentes tipos de cobertura y fertilización en un sistema conservacionista cereal-ganado. *Rev. Fac. Agron. (UCV)* 38(2): 49-63. 2012.
- Veldkamp, E. (1994). Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 175-180
- Viana, R.C., Ferraz, JBS., Neves J.R., A.F., Viera, G., Pereira, B.F.F., (2014). Soil quality indicator for different restoration stages on Amazon rainforest. *Soil & Tillage Research* 140, 1-7.

- Vitousek, P.M., Sanford, R.L., (1986). Nutrient cycling in moist tropical forests. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 17, 137–167.
- Von Lützow, M., I. Kögel-Knabner, K. Ekschmitt, H. Flessa, G. Guggenberger, E. Matzner, and B. Marschner. (2007). SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biol. Biochem.* 39: 2183-2207.
- Wang, W., C. Wang, J. Sardans, Q. Min, C. Zeng, C. Tong, and J. Peñuelas. (2015). Agricultural land use decouples soil nutrient cycles in a subtropical riparian wetland in China. *Catena* 133: 171-178. doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.003.

ANEXOS 1

Niveles críticos de parámetros de fertilidad edáfica para la interpretación de análisis de suelos.

	Muy ácido	Ácido	Medianamente ácido	Ligeramente ácido	Prácticamente neutro
pH	0,0 - < 5,0	5,0 - 5,5	> 5,5 - 6,0	> 6,0 - 6,5	> 6,5 - 7,5
	Unidad		Bajo	Medio	Tóxico
Acidez	meq 100 ml		< 0,5	0,5 - 1,5	> 1,5
Al³⁺	meq 100 ml		< 0,3	0,3 - 1,0	> 1,0
	Unidad		Bajo	Medio	Alto
P	mg kg ⁻¹		< 10	10 - 20	> 20
K¹⁺	meq 100 ml		< 0,20	0,20 - 0,38	> 0,38
Ca²⁺	meq 100 ml		< 2,0	2,0 - 5,0	> 5,0
Mg²⁺	meq 100 ml		< 0,5	0,5 - 1,5	> 1,5
COT	%		< 3,0	3,0 - 5,0	> 5,0

Fuente: INIAP, 2012