UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR EN OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL

TEMA:

SECUESTRO DE CARBONO Y RESERVA DE MACRONUTRIENTES EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CACAO, CANTON AROSEMENA TOLA, PROVINCIA DE NAPO, AMAZONIA ECUATORIANA

AUTOR:

JEFFERSON PAUL PONCE GOMEZ

DIRECTOR DE PROYECTO:

Dr. CARLOS ALFREDO BRAVO MEDINA, PhD

Puyo-Ecuador

2021

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Quien suscribe, Ponce Gomez Jefferson Paul portador de la cedula de identidad N° 1600528218, hago constar que soy el autor del Trabajo de Integración Curricular titulado: "SECUESTRO DE CARBONO Y RESERVA DE MACRONUTRIENTES EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CACAO, CANTON AROSEMENA TOLA, PROVINCIA DE NAPO, AMAZONIA ECUATORIANA", el cual constituye una elaboración personal realizada únicamente con la dirección del Tutor de dicho trabajo, Dr. Carlos Alfredo Bravo Medina. En el sentido, manifiesto la originalidad de la conceptualización del trabajo como interpretación de datos y elaboración de conclusiones dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores se han referenciado debidamente en el texto de dicho trabajo.

En el cantón Pastaza, a los 21 días del mes de julio del 2021.

_____

Jefferson Paul Ponce Gomez
C.I: 1600528218

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El tribunal de sustentación del Trabajo de Integración Curricular aprueba el proyecto de Investigación titulado: “SECUESTRO DE CARBONO Y RESERVA DE MACRONUTRIENTES EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CACAO, CANTON AROSEMENA TOLA, PROVINCIA DE NAPO, AMAZONIA ECUATORIANA”.



Firmado electrónicamente por:
SEGUNDO BOLIER
TORRES NAVARRETE

Dr. Segundo Bolier Torres Navarrete, Ph.D.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

MARIA KATHARINA ELISABETH DE DECKER

Firmado digitalmente por MARIA KATHARINA ELISABETH DE DECKER
Fecha: 2021.07.21 14:28:08 -05'00'

MSc. María Katharina Elisabeth de Decker
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
YAMILA LAZO PEREZ

MSc. Yamila Lazo Pérez
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND

Certificado No. 213-SAU-UEA-2021

Puyo, 24 de julio de 2021

Por medio del presente **CERTIFICO** que:

El Proyecto de Investigación correspondiente al estudiante: Ponce Gomez Jefferson Paúl, con C.I 1600528218, con el Tema: **"SECUESTRO DE CARBONO Y RESERVA DE MACRONUTRIENTES EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CACAO, CANTON AROSEMENA TOLA, PROVINCIA DE NAPO, AMAZONIA ECUATORIANA."**, de la carrera, Ingeniaría Forestal. Director de la investigación, Dr. Carlos Alfredo Bravo Medina, PhD, ha sido revisado mediante el sistema antiplagio URKUND, reportando una similitud del 4%, Informe generado con fecha 21 de julio de 2021 por parte del director conforme archivo adjunto.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
ITALO MARCELO

Ing. Italo Marcelo Lara Pilco M.Sc.
ADMINISTRADOR DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND – UEA - .

CERTIFICADO DE PORCENTAJE DE SIMILITUD OBTENIDO EN EL SISTEMA PLAGIO

Quien suscribe el presente Dr. Carlos Alfredo Bravo Medina con CI: 1757015373, certifica que el Trabajo de Integración Curricular titulado: "SECUESTRO DE CARBONO Y RESERVA DE MACRONUTRIENTES EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CACAO, CANTON AROSEMENA TOLA, PROVINCIA DE NAPO, AMAZONIA ECUATORIANA", ha sido examinado a través del sistema Antiplagio URKUND y presenta un porcentaje de similitud del 4%.

En el cantón Pastaza, a los 21 días del mes de julio del 2021.



Dr. Carlos Alfredo Bravo Medina, PhD.
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Jefferson Paul Ponce Gomez, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular.

_____

Jefferson Paul Ponce Gomez
C.I: 1600528218

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación quiero dedicarlo primeramente a Dios, por haberme dado la vida, por brindarme las fuerzas necesarias para superarme como estudiante, como persona y futuro profesional, por poner en mi camino a personas correctas y capaces de brindarme su apoyo incondicional en esta vida ya sea de una forma moral, económico o afectivo.

De igual forma dedico este proyecto de titulación, a mis padres por inculcar en mí, el ejemplo de la disciplina, esfuerzo y perseverancia. Quienes, con amor y paciencia, me han ayudado y apoyado incondicionalmente a cumplir uno de mis sueños tan anhelados. Y a mi familia en general por sus valiosos consejos y por ser motivo de inspiración e impulsarme a conseguir mis metas.

Igualmente, a mis docentes de la carrera de Ingeniería Forestal, de la Universidad Estatal Amazónica. Los cuales compartieron sus conocimientos y experiencias aprendidas en sus vidas profesionales, para así poder alcanzar tan anhelada meta.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por acompañarme, protegerme y darme fuerzas para superar diversas dificultades que se me han presentado a lo largo de toda mi vida.

Me encuentro muy agradecido con mis padres, familia y personas cercanas por brindarme todo el apoyo, palabras de aliento, comprensión y compañía durante todos estos años.

Agradezco profundamente a mi director de proyecto, Dr. Carlos Bravo por su esfuerzo y dedicación, quien con su conocimiento, paciencia y motivación ha logrado en mí que pueda terminar con éxito este proyecto de investigación. De la misma manera quiero agradecer a la Ing. Daysi Changoluisa, por el apoyo y colaboración en el laboratorio de suelos.

A la Universidad Estatal Amazónica, porque dentro de sus aulas recibí los conocimientos necesarios para culminar mis estudios.

Agradezco también a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés), por facilitar los datos para este proyecto de titulación académica. La información de campo se recogió en el marco del proyecto: GCP/GLO/534/ITA "Agricultura Climáticamente Inteligente en cacao bajo sistema agroforestal en Ecuador" ejecutado por FAO-Ecuador, en colaboración con la Corporación para el Desarrollo Sostenible Conservación y Cambio Climático (DSC) y varios docentes de la Universidad Estatal Amazónica. También agradecemos a las familias de la Asociación Tsatsayaku del cantón Arosemena Tola por compartir información durante el período del trabajo de campo del proyecto.

RESUMEN

La deforestación en la Región Amazónica Ecuatoriana (RAE) para ampliar la frontera agropecuaria, afecta los servicios ecosistémicos relacionado con el secuestro de carbono y la fertilidad. El objetivo del trabajo fue determinar el potencial en el secuestro de carbono y la disponibilidad de macronutrientes del suelo de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) en SAFs con Cacao, en el Cantón Arosemena Tola, Provincia de Napo, Amazonia Ecuatoriana. En las 12 finca se realizó un muestreo de suelo a profundidades de 0-10 cm, 10-30 cm y de 30-60 cm. El secuestro de carbono se midió en el suelo, hojarasca y en las raíces. La disponibilidad de macronutrientes como nitrógeno en forma amoniacal (NH_4^+), fósforo disponible (P) y potasio intercambiable (K^+) fueron evaluadas. Se realizó un análisis de varianza bifactorial para evaluar las diferencias entre los SAFs en función de las 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. Los resultados de la densidad aparente (Da), evidenciaron adecuadas condiciones estructurales. El potencial de secuestro de carbono en el compartimiento suelo, fue mayor que el Carbono, proporcionado por la hojarasca y raíces. La concentración de NH_4^+, arrojó valores con un rango de variación de medio a alto en el horizonte superficial y de valores medios en los horizontes subsuperficiales, mientras que el contenido de fosforo disponible y potasio intercambiable mostraron contenidos categorizados como bajo en todas las profundidades. En general, la relación entre Materia Orgánica del Suelo (MOS) y los macronutrientes, mostraron relaciones positivas y significativas que oscilaron de bajas a moderadas en las profundidades. Estas relaciones reflejan, en gran medida la naturaleza de los suelos amazónicos, modelados por los factores formadores de suelo.

Palabras clave: Cacao, Amazonía, secuestro de carbono, fertilidad.

ABSTRACT

Deforestation in the Ecuadorian Amazon Region (RAE) to expand the agricultural frontier, affects ecosystem services related to carbon sequestration and fertility. The objective of the work was to determine the potential in carbon sequestration and the availability of macronutrients of the soil of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K) in SAFs with Cacao, in Canton Arosemena Tola, Province of Napo, Ecuadorian Amazon. In the 12 farms, soil sampling was carried out at depths of 0-10 cm, 10-30 cm and 30-60 cm. Carbon sequestration was measured in the soil, litter and roots. The availability of macronutrients such as nitrogen in ammonia form (NH4 +), available phosphorus (P) and exchangeable potassium (K +) were evaluated. A bifactorial analysis of variance was performed to evaluate the differences between the SAFs as a function of depths and the comparison of means using the Tukey test ($p \leq 0,05$). The degree of association of organic matter with macronutrients was established using the Pearson correlation coefficient. The results of the apparent density (Da), showed adequate structural conditions. The potential for carbon sequestration in the soil compartment was greater than the Carbon, provided by the litter and roots. The concentration of NH4 +, showed values with a range of variation from medium to high in the surface horizon and of average values in the subsurface horizons, while the content of available phosphorus and exchangeable potassium showed contents categorized as low in all depths. In general, the relationship between Soil Organic Matter (SOM) and macronutrients showed positive and significant relationships that ranged from low to moderate at depths. These relationships largely reflect the nature of Amazonian soils, shaped by soil-forming factors.

Keywords: Cacao, Amazon, carbon sequestration, fertility.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I 1
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SU JUSTIFICACIÓN 3
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 4
1.3 OBJETIVOS 4
1.3.1 Objetivo general 4
1.3.2 Objetivos específicos 4
CAPÍTULO II 5
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 5
2.1 El cambio climático 5
2.1.1 El cambio climático y biodiversidad 5
2.1.2 Adaptación y mitigación ante el cambio climático 6
2.2 Sistemas agroforestales (SAF) 6
2.2.1 Características de los sistemas agroforestales 7
2.2.2 Clasificación de los sistemas agroforestales 8
2.2.3 Funciones ambientales de los sistemas agroforestales 9
2.3 Suelos 10
2.3.1 Los bosques y el suelo 10
2.3.2 Calidad y propiedades del suelo 11
2.3.3 Nutrientes en los suelos 12
2.4 El carbono (C) 13
2.4.1 El ciclo del carbono 14
2.4.2 Secuestro y almacenamiento de carbono en SAF 14
2.4.3 Valoración económica del secuestro y almacenamiento de C en SAF 15
2.5 Generalidades de la especie en estudio 16
2.5.1 Cacao (*Theobroma cacao*) 16
2.5.2 Chakras en SAF con cacao (*Theobroma cacao*) 17
CAPÍTULO III 18
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 18
3.1 Localización del área de estudio 18
3.2 Tipo de investigación 19

3.3 Método de investigación 20
3.3.1 Esquema de muestreo en campo 20
3.3.2 Carbono almacenado en el componente suelo (COS) 21
3.3.3 Carbono almacenado en la hojarasca y raíces 22
3.3.4 Análisis químicos 22
3.3.5 Análisis estadístico de datos 23
CAPÍTULO IV 24
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES 24
4.1 Parámetros de evaluación físicos del suelo en SAF con cacao 24
4.2 Cuantificación del potencial de secuestro de carbono en el suelo, la hojarasca y raíces en los SAF con cacao 26
4.3 Determinación de la disponibilidad de nitrógeno en forma de amonio (NH^{+4}), fósforo disponible y potasio intercambiable en el suelo bajo sistemas agroforestales 28
4.3.1 Nitrógeno amoniacal (NH_4, mg kg^{-1}) 29
4.3.2 Contenido de fosforo disponible (P, mg kg^{-1}) 31
4.3.3 Potasio intercambiable (K^+, meq 100 g s^{-1}) 34
4.4 Relaciones entre el contenido de materia orgánica del suelo y la disponibilidad de macronutrientes (N – P – K) en los diferentes usos del suelo 36
CAPITULO V 39
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 39
5.1 Conclusiones 39
5.2 Recomendaciones 40
CAPÍTULO VI 41
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Arreglos de los 12 SAFs con cacao…….. 19

Tabla 2. Coordenadas de los puntos de muestreo de los 12 SAF…… 19

Tabla 3. Materiales y equipos utilizados en el proyecto de investigación……...23

Tabla 4. Valores de la densidad aparente (Da Mg m^{-3}), de 0-10 cm en SAF con cacao…. 25

Tabla 5. Valores de la densidad aparente (Da, Mg m^{-3}), de 10-30 cm en SAF con cacao.. 25

Tabla 6. Valores de la densidad aparente (Da, Mg m^{-3}), de 30-60 cm en SAF con cacao.. 26

Tabla 7. Valores promedios de nitrógeno amoniacal (NH4, mg kg^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad de (0-10 cm)…….. 30

Tabla 8. Valores promedios de nitrógeno amoniacal (NH4, mg kg^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad de (10-30 cm)…… 30

Tabla 9. Valores promedios de nitrógeno amoniacal (NH+4, mg kg^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad de (30-60 cm)…… 31

Tabla 10. Valores promedios de fósforo disponible (P, mg kg^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad (0-10 cm)……..32

Tabla 11. Valores promedios de fósforo disponible (P, mg kg^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad (10-30 cm)……32

Tabla 12. Valores promedios de fósforo disponible (P, mg kg^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad (30-60 cm)……33

Tabla 13. Valores promedios de Potasio intercambiable (K+, meq 100 g s^{-1}), en SAF con cacao, a una profundidad (0-10 cm)……. 34

Tabla 14. Valores promedios de Potasio intercambiable (K+, meq 100 g s^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad (10-30 cm)……... 35

Tabla 15. Valores promedios de Potasio intercambiable (K+, meq 100 g s^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad (30-60 cm)……... 35

Tabla 16. Relación entre MOS y la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K), de 0-10 cm en suelos de SAF con cacao……..37

Tabla 17. Relación entre MOS y la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K), de 10-30 cm en suelos de SAF con cacao……..37

Tabla 18. Relación entre MOS y la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K), de 30-60 cm en suelos de SAF con cacao……..38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio, de los 12 SAF con Theobroma cacao. 18

Figura 2. Esquema de muestreo sistemático a utilizar bajo distintos sistemas agroforestales con cacao (Theobroma cacao) en el Cantón Arosemena Tola, Provincia de Napo. 20

Figura 3. Parámetros de suelo a evaluar en los sistemas agroforestales con cacao en el Cantón Arosemena Tola, Provincia de Napo. 21

Figura 4. Carbono total en el suelo y secuestro de carbono en distintos compartimientos (Suelo, hojarasca y raíz) bajo distintos sistemas agroforestales con cacao. Letras distintas para un mismo compartimiento indican diferencias significativas (P<0,05). 27

Figura 5. Carbono total almacenado (CTA) y cantidad de CO2 que se deja de emitir bajo distintos sistemas agroforestales con cacao. Letras distintas para un mismo compartimiento indican diferencias significativas (P<0,05). 28

CAPÍTULO I
1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día los temas ambientales han alcanzado relevancia en la humanidad, a diferencia que en años anteriores. Esto comenzó a tomar relevancia con la concesión del Comité Noruego del Nobel, el cual decidió que el Premio Nobel de la Paz 2007, a Al Gore y al Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas (ONU) fueron galardonados, acreditándolos por aumentar la conciencia mundial sobre la gravedad del cambio climático inducido por el hombre, el cual fue un momento decisivo en la historia. Ahora en la actualidad es ampliamente aceptado que el calentamiento global es el problema ambiental más grave que afecta la vida humana a escala mundial. Se considera que el calentamiento global, el cambio en la temperatura y los océanos cercanos a la superficie de la Tierra en los últimos años, se debe principalmente al aumento de las concentraciones atmosféricas de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI), principalmente del dióxido de carbono (CO_2) (Gore, 2007).

El dióxido de carbono (CO_2) es uno de los principales GEI, en el cual diversas investigaciones han concebido que el aumento continuo de concentraciones de este gas en la atmosfera es debido a las actividades antropogénicas como: la quema de combustibles fósiles, la deforestación de los bosques y el cambio en el uso del suelo. Uno de los enfoques para poder mitigar los efectos de las concentraciones de CO_2 en la atmosfera es a través de la captura de carbono (C), mediante el proceso de la fotosíntesis, ya que las plantas utilizan CO_2 y liberan O_2 durante este proceso, así mismo almacenan componentes de carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados, ya sea como biomasa o como carbono orgánico del suelo (COS), en la cual se va a ver involucrado todo tipo de vegetación y organismos vivos (Nair et al., 2009).

El COS es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de los materiales orgánicos producidos por los organismos vivos, y los cuales pueden subsistir en el suelo durante décadas, siglos o incluso milenios. Sin embargo, al ser muy dinámico puede llegar a perderse en forma de dióxido de carbono (CO_2), o también como metano (CH_4), siendo así nuevamente emitidos hacia la atmosfera, por lo que es clave en el ciclo del

carbono y constituye en sí como el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS). Esa última aporta básicamente a sus funciones, respecto al ciclo de nutrientes, la estabilización de la estructura del suelo, la aireación, la productividad, la infiltración, la humedad y el almacenamiento de agua, entre otros aspectos como la salud del suelo, la fertilidad y la producción de alimentos, es por ello, que la perdida COS se le considera como un indicador del grado de degradación del suelo. Esto quiere decir que a mayor contenido de COS, la calidad y la salud del suelo serán mucho mayor, frente a un suelo que presenta un bajo contenido de COS. Este carbono en algunos casos puede ser liberado hacia la atmosfera si el suelo llega a ser trabajado inadecuadamente debido a prácticas agroforestales insostenibles, como el riego y la labranza excesiva, el sobrepastoreo, el abuso en la aplicación de pesticidas y fertilizantes, la compactación, la perdida de cobertura vegetal, así como también la producción de cultivos sin considerar la aptitud o capacidad del uso del suelo. Por el contrario, mediante la implementación de sistemas agroforestales (SAF) sostenibles, el COS puede llegar a ser preservado para mitigar las emisiones de los GEI principalmente del CO_2 (Loayza et al., 2020).

Los SAFs, hoy en día son considerados como una opción viable, los cuales pueden llegar a almacenar entre 12 y 228 t C ha^{-1}, la importancia de estos SAF se ve incrementada cuando se les asocia con especies forestales, las cuales van a presentar una mayor eficiencia en la fijación y almacenamiento de carbono. Esto puede llegar a tener un impacto positivo asociado a la conservación de la biodiversidad, mitigación de la pobreza y seguridad alimentaria ya que llega a funcionar a través de múltiples interacciones entre árboles, cultivos, animales, ambiente y el ser humano, así como también en la reducción de costos de producción (Gardini, 2004).

En Ecuador, el cultivo de cacao (*Theobroma cacao)* es considerado como uno de los productos agrícolas no tradicionales de gran importancia social y económica, esto debido a que genera ingresos económicos de una manera directa e indirectamente, al ser un producto de alta demanda nacional como internacional. Este producto se viene cultivando en asociaciones con especies forestales, ya que los SAF con cacao producen muchas ventajas positivas, siendo de resaltarse en el aspecto socioeconómico y ambiental, para en si mejorar las potencialidades de los cacaotales y al mismo tiempo promoverse como una alternativa de

manejo sostenible. A los sistemas agroforestales basados como cultivo principal el cacao, se le atribuye el mérito de almacenar grandes cantidades significativas de carbono (Somarriba et al., 2013).

En este contexto de la Amazonía Ecuatoriana, los sistemas agroforestales tradicionales localmente denominados "*Chakra"* que combinan la seguridad alimentaria con la producción agrícola y practicas ancestrales de las poblaciones kichwas de la Amazonía Ecuatoriana, características de este sistema que generan una relevante importancia en los ámbitos económicos, sociales y ecológicos (Torres et al., 2015; Jadán et al., 2015; Coq-Huelva et al., 2017; Vera et al., 2019). Es por esto que el presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal, Evaluar el efecto de los sistemas agroforestales con cacao sobre el secuestro de carbono en distintos compartimientos y la reserva de macronutrientes en el Cantón Arosemena Tola, Provincia de Napo, de la Amazonia Ecuatoriana.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SU JUSTIFICACIÓN

Los bosques de la amazonia ecuatoriana, son aquellos ecosistemas naturales que secuestran y almacenan una mayor cantidad de carbono en la biomasa vegetal y especialmente en el suelo, por lo cual cumplen funciones muy importantes en el intercambio de carbono entre la biosfera y la atmosfera, considerándolo así a los bosques de la amazonia como los más importantes desde el punto de vista de conservación y reserva de carbono (Villa et al., 2015).

Por ende, la implementación de sistemas agroforestales, es una de las pocas alternativas de uso de suelo, la cual combina la producción de bienes y servicios con la conservación de los recursos naturales y la mejora de la calidad ambiental. Insertar sistemas agroforestales significa conservar el estado productivo de los suelos agrícolas o recuperar suelos degradados, incrementar la biodiversidad y facilitar los flujos de macronutrientes, pero al mismo tiempo significa garantizar una producción sostenible y diversificada en el sector (Villa et al., 2015).

Por ello se planteó el presente estudio para contar con información actualizada y fiable sobre el secuestro de carbono en el suelo en distintos compartimientos. Además, es necesario saber la reserva de macronutrientes presentes en este sistema agroforestal con cacao de la amazonia ecuatoriana, en este sentido la información obtenida puede ser utilizada tanto para reportes locales, nacionales e internacionales, el cual contribuirá a la aplicación de estrategias en la mitigación del cambio climático a nivel mundial.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo los sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao)* afectan la reserva de carbono en los distintos compartimentos (suelo, hojarasca y raíces), y la disponibilidad de macronutrientes en condiciones amazónicas?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar el efecto de los sistemas agroforestales con cacao sobre el secuestro de carbono en distintos compartimientos y la reserva de macronutrientes en el Cantón Arosemena Tola, Provincia de Napo, de la amazonia ecuatoriana.

1.3.2 Objetivos específicos

- Cuantificar el potencial de secuestro de carbono en el suelo, la hojarasca y raíces en los sistemas agroforestales con cacao.
- Determinar la disponibilidad de nitrógeno total, fosforo y potasio en el suelo de los sistemas agroforestales con cacao.
- 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

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 El cambio climático

Al cambio climático se lo podría definir como las transformaciones irreversibles de las condiciones climáticas en amplias zonas del planeta tierra, esto provocado por acciones simultaneas de diversos factores los cuales pueden llegar a ser tanto naturales como antropogénicos (Luís & Lecha, 2010). En la actualidad, el tema sobre el cambio climático genera una gran preocupación en la sociedad a nivel mundial, esto debido a que día a día habitar en el planeta tierra cada vez se hace más complicado, debido al acelerado cambio de vida para la sobrevivencia humana. Por ello, hay que recalcar que dichos cambios generalmente se hallan enfocados en el desarrollo y crecimiento económico que la humanidad anhela tener, sin importar las consecuencias que provocarían hacia los ecosistemas estas malas prácticas (Díaz, 2012).

2.1.1 El cambio climático y biodiversidad

El cambio acelerado observado en el patrón climático, provocado por procesos naturales o antropogénicos, pueden llegar a provocar la inestabilidad del sistema terrestre, pudiendo impactar de una manera negativa en los procesos sociales, económicos, biológicos y ecológicos que rigen en el planeta tierra. Desde el principio de la industrialización en el siglo XVIII, las concentraciones atmosféricas de los llamados GEI aumentaron drásticamente. Los GEI llegaron a provocar un fenómeno climático llamado efecto invernadero, un fenómeno el cual impide que la radiación proveniente del sol retorne hacia el espacio, llegando a provocar cambios en el clima, principalmente en la temperatura media mundial y viéndose también un aumento considerado en el nivel del mar (IPCC, 2001).

A la diversidad biológica se lo llegó a considerar como la cantidad y abundancia relativa de diferentes familias (diversidad genética), especies y ecosistemas (comunidades) en una zona determinada. El mantenimiento de la biodiversidad conduce a la protección de una mayor cantidad de grupos genéticos, de los cuales pueden llegar a surgir nuevos genotipos de especies adaptadas al cambio climático y a las condiciones ambientales presentes en el lugar.

Este mantenimiento requiere regímenes naturales de alteraciones, mientras tanto que el manejo para la máxima captura de carbono tiende a evitar las alteraciones (IPCC et al., 1996).

2.1.2 Adaptación y mitigación ante el cambio climático

La adaptación y mitigación ante el cambio climático, tiene como objetivo contemplar medidas para evitar o enfrentar las consecuencias que este pueda generar en los diferentes ecosistemas o en la población humana. Estas medidas están encaminadas principalmente en mejorar e incrementar el secuestro de carbono y en la reducción de los gases de efecto invernadero. Si bien hoy en día se ha creado políticas de adaptación y mitigación en conjunto con países y diversas organizaciones mundiales, la adaptación implica amoldarse a las nuevas condiciones creadas por el cambio climático, mientras tanto que la mitigación en cambio busca reducir los efectos del mismo fenómeno. A partir del protocolo de Kyoto, los diferentes países que conforman parte de la Convención Marco de las Naciones Unidad sobre el Cambio Climático (CMNUCC), incluido Ecuador, suscribieron diferentes acuerdos para lograr en conjunto la reducción de los GEI, e incluir al mismo tiempo estrategias en sus gestiones, para poder alcanzar la adaptación y mitigación frente al cambio climático, así como también minimizar o detener el incremento de la temperatura a nivel global debido al acelerado incremento de los GEI (Perez, 2018).

2.2 Sistemas agroforestales (SAF)

Los SAF se los puede definir como aquellos sistemas donde se va presentar una combinación de especies leñosas con especies herbáceas en el mismo tiempo y espacio, además de esto va a existir un conjunto de técnicas de uso del suelo, el cual va a tratar de crear un sistema de producción sostenible del recurso, aplicando técnicas adaptadas al agricultor junto con desarrollar actividades acordes con el sistema implementado. Dicho sistema busca ser uno cerrado donde no se necesite ingresar agroquímicos, y donde los desechos orgánicos sean aprovechados para la nutrición vegetal del resto de especies presentes en ese sistema (Mendieta et al., 2007).

Un sistema agroforestal, es considerado como un sistema cuyos componentes son árboles, cultivos o animales. El SAF, cumple los atributos de cualquier otro sistema, los cuales son; limites, componentes, interacciones, ingresos y egresos, una relación jerárquica con el sistema de finca y una dinámica fluida (Mendieta et al., 2007).

En donde el límite, llega a definir los bordes básicos del sistema agroforestal; los componentes, son aquellos elementos físicos, biológicos y socioeconómicos; los ingresos, llegarían a ser la energía solar, mano de obra, productos agroquímicos, etc.; y mientras tanto que los egresos serian la madera, productos animales, frutos, cultivos, leña, etc.; los ingresos y egresos son la energía o materia que se intercambia entre diferentes sistemas; las interacciones, son las relaciones, o la energía o materia que se llega a intercambiar entre los componentes de un sistema; la jerarquía, en si llegaría a indicar la posición del sistema con respecto a otros sistemas y las relaciones entre ellos (Mendieta et al., 2007).

Un ejemplo de un SAF claro en la amazonia ecuatoriana, es que sobresalen los SAF tradicionales (Chakras), con cultivo de cacao (*Theobroma cacao)* bajo la sombra de árboles podados periódicamente. Los componentes son el cacao y los árboles, que se van a encontrar en los límites de la parcela seleccionada. Los ingresos o entradas van a incluir el agua, energía solar, fertilizantes y mano de obra. Mientras tanto que los egresos o salidas, incluirá las cosechas de cacao, la leña y madera resultante del aprovechamiento de los árboles y cacaotales. Las interacciones serian el reciclaje de nutrientes de la hojarasca de los arboles hacia el suelo y la sombra de los árboles sobre los cacaotales, entre otras. La dinámica del sistema podrá incluir cambios en la densidad de los árboles, la periodicidad y densidad de la poda, en el tipo de cultivos asociados y en especial en la fertilidad de los suelos. Todos estos cambios influirán en las actividades futuras del manejo del sistema agroforestal (Mendieta et al., 2007).

2.2.1 Características de los sistemas agroforestales

La implementación de sistemas agroforestales, están concentrados en realizar cambios innovadores para poder recuperar, mantener o aumentar el nivel de productividad del suelo con sistemas de producción agroforestales en el área a ser intervenida, estas técnicas innovadoras se encuentran concentradas principalmente a proteger al suelo de la degradación

o erosión y así poder mantener y asegurar el ciclo de nutrientes y de agua, un SAF bien diseñado y estructurado debe va a poseer de manera teórica tres características primordiales al momento de querer hacer el establecimiento del mismo, los cuales son; Productividad, Sostenibilidad y Adaptabilidad (Jiménez et al., 2001).

2.2.2 Clasificación de los sistemas agroforestales

La clasificación de los sistemas agroforestales es muy necesaria para su caracterización, evaluación y mejoramiento de dicho sistema. En donde la complejidad presente de los SAF hace de una tarea difícil su clasificación bajo un esquema determinado. Los criterios que se considera más frecuente para poderlos clasificar son; la estructura o función del sistema, las zonas agroecológicas donde el sistema existe o es adaptable y por último el escenario socioeconómico del sector. Sin embargo, estos criterios anteriormente mencionados no son considerados independientes ni excluyentes. La clasificación estructural basada en la naturaleza de la combinación entre los componentes y el estado actual en el que se encuentre el recurso de los suelos es la más utilizada (Nair, 1993).

En relación a la estructura, y según Nair, (1993), estos sistemas pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Sistema Agrosilvicultural.

En este sistema se combina especies leñosas perennes (árboles, arbusto entre otros), con cultivos agrícolas y pasto, en la misma área.

- Sistema Silvopastoriles.

En este sistema se combina especies de leñosas perennes (árboles, arbusto entre otros), con cultivos agrícolas, pastos y animales en el mismo tiempo y espacio.

- Sistema Agrosilvopastoriles.

Son una forma especial de combinación de árboles maderables o frutales con animales, sin la presencia de cultivos.

- Sistema de Producción Forestales Multipropósito.

Están involucrados los sistemas especializados como; silvoacuacultura, silvoentomologia entre otros.

2.2.3 Funciones ambientales de los sistemas agroforestales

2.2.3.1 Los SAF en la mitigación y adaptación ante el cambio climático

Los SAF se les considera como un mecanismo de adaptación ante el cambio climático (CC) en el planeta tierra, esto gracias a los diferentes diseños implementados en los sistemas, los cuales favorecen con un microclima moderado provisto por las sombras de los árboles, en donde la temperatura puede disminuir en un promedio de 2 a 5 º C. Las alteraciones del clima afectan a este sector de una forma muy diversa, en donde los principales efectos del cambio climático sobre los SAF recaen en la duración y estabilidad de los ciclos de cultivo, alteraciones fisiológicas por exceder las temperaturas, a los cuales los cultivos se encuentran adaptadas, deficiencia de agua y aumento en la erosión por la desecación del suelo y mayor escorrentía superficial. Estos sistemas agroforestales, mediante una buena implementación y manejos adecuados acorde a su finalidad, pueden llegar también a tener altas tasas de acumulación de carbono, convirtiéndose así en una herramienta efectiva para la mitigación y adaptación del cambio climático. La mayor remoción de los GEI, es llevada a cabo por los incrementos en la biomasa forestal y otras fuentes de almacenamiento leñosas, las cuales se van a incorporar secuencialmente al suelo (Montagnini et al., 2015).

2.2.3.2 Servicios ecosistémicos de los SAF

Los servicios ecosistémicos que brindan los SAF, se los llega a definir en base a las diferentes funciones que va a poseer dicho ecosistema, para poder proporcionar bienes y servicios, capaces de satisfacer las necesidades humanas, ya sea de una forma directa o indirecta. Llegando a ser cada función el resultado de diferentes interacciones complejas entre componentes bióticos y abióticos. Hoy en día los pagos por servicios ecosistémicos, se han convertido en un instrumento económico para la conservación de los mismos. Ya que son una forma directa y efectiva para convertir los valores ambientales, en incentivos económicos para los diferentes actores involucrados en la conservación de estos servicios (De Groot et al., 2002).

Entre los principales servicios ecosistémicos, que brindan los SAF, está la conservación del recurso suelo, la conservación de la calidad del agua, la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad, en donde diferentes organizaciones y gobiernos se encargan de incentivar económicamente a estos diferentes sectores (Montagnini et al., 2015).

2.3 Suelos

Al suelo se lo puede llegar a considerar como un cuerpo natural que forma parte de la superficie de la tierra, el cual se va a encontrar constituido por material de origen orgánico y mineral, incluyendo así mismo diferentes especies vegetales, animales y microorganismos que van a interactuar entre sí mediante procesos físicos y biológicos. El suelo corresponde un componente ambiental importante para el bosque, ya que va a servir de soporte y al mismo tiempo va a controlar la disponibilidad del agua y los nutrientes que llegue a ser requeridos para el desarrollo de las plantas en ese ecosistema forestal. El suelo también puede llegar a determinar un factor muy importante que es la calidad de un sitio, siendo así un indispensable componente del ecosistema forestal, el cual va a influir considerablemente en la tasa de crecimiento del bosque, en la calidad de la madera, resistencia de las especies a enfermedades y también frente a ciertos factores abióticos adversos como son los fuertes vientos (Gayoso & Alarcon, 1999).

2.3.1 Los bosques y el suelo

A los bosques se los puede llegar a considerar, como un equilibrio dinámico, esto en relación con el carbono bajo ciertas condiciones climáticas y para ciertas concentraciones atmosféricas de CO_2. Los bosques se encargan de capturar, almacenar y liberar carbono como resultado de los procesos fotosintéticos, de respiración y degradación de la materia seca, son considerados como los ecosistemas terrestres responsables de la mayor parte de flujo de carbono entre la tierra y la atmosfera. El almacenamiento neto de carbono orgánico en los bosques va a depender indispensablemente del manejo que se le dé a la cobertura vegetal, edad, distribución de tamaños, estructura y composición de esta. El servicio ambiental que proveen los diferentes bosques y selvas como secuestradores de carbono, permite reducir de una manera considerable este elemento de la atmosfera, misma de las cuales se incrementa debido a las emisiones de las diferentes actividades humanas (J. Torres & Guevara, 2002).

2.3.2 Calidad y propiedades del suelo

La calidad de los suelos se lo podría llegar a definir como la capacidad del suelo para llegar a funcionar dentro de los límites de los ecosistemas para sostener la productividad biológica, mantener la calidad del medio ambiente, y promover la sanidad vegetal y animal. La calidad del suelo llega a integrar las funciones y relaciones entre las propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales llegan a ser medidas y evaluadas según la capacidad del suelo de cumplir las funciones correspondientes de cada una en dicho ecosistema (Arevalo, 2014).

2.3.2.1 Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas de los suelos, se van a ver ligadas en gran medida a la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre los sujeta. Estas propiedades son fundamentales ya que determinan la rigidez y la fuerza de sostenimiento de las plantas, la facilidad de penetración de las raíces hacia diferentes profundidades del suelo, la aireación del suelo, capacidad de drenaje y almacenamiento del agua, la plasticidad y la retención de nutrientes, entre otros. Además de todo esto es indispensable conocer de manera clara las propiedades físicas del suelo, para poder entender en qué medida y cómo influyen en el crecimiento de las plantas, en qué medida y como la actividad humana podría llegar a modificarlas, y tratar de entender la importancia de mantener las mejores condiciones físicas del suelo posible para la productividad y conservación del mismo (Rucks et al., 2004).

2.3.2.2 Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas de los suelos, pueden llegar a medir las diferentes interacciones entre los minerales, y las cuales dependen directamente de las composiciones químicas del suelo. Permiten reconocer ciertas cualidades del mismo cuando se provocan cambios químicos o reacciones que alteran la composición y acción de los mismo. Las propiedades químicas de los suelos se encuentran determinadas principalmente por la materia orgánica y las arcillas, por ser estas dos las fuentes principales aportadoras de nutrientes (León, 2011).

2.3.2.3 Propiedades biológicas del suelo

La biología del suelo es la ciencia encargada la cual se ocupa del estudio de los organismos vivos, que de una u otra manera actúan sobre el suelo modificando su composición, su estructura y sus diferentes funciones que lleguen a cumplirse. Todos estos organismos suelen llegar a ser clasificados según su tamaño como; macrofauna, mesofauna y microfauna. Los cuales pueden ser organismos vertebrados o invertebrados, efectuando así cambios tanto físicos como químicos en el suelo del sector, debido a que son los responsables de acelerar la descomposición y mineralización de la materia orgánica, lo que posteriormente promueve la estimulación del crecimiento vegetal y la descomposición de componentes minerales insolubles (Carvajal, 1997).

2.3.3 Nutrientes en los suelos

El suelo es considerado como un sistema vivo ya que llega a albergar una gran diversidad de macro y micro nutrientes, los cuales van a interactuar entre si y cumpliendo diferentes funciones que contribuyan a los ciclos globales de los ecosistemas. Las bacterias, hongos y actinomicetos son los microorganismos más importantes en la relación suelo-planta y en el incremento y/o disminución del subministro de nutrientes, siendo así de gran importancia en la nutrición de los cultivos y en la sostenibilidad de los sistemas agroforestales (Mora et al., 2019).

El desarrollo del sistema se va a ver influenciado por la presencia de elementos químicos que llegan a estar de una u otra forma presentes en la naturaleza. Para su desarrollo, las plantas logran utilizar alrededor de 19 elementos, los cuales son reconocidos como elementos esenciales, 16 de ellos provienen del suelo (N, K, Ca, Mg, P, S, Si, Cl, Fe, B, Mn, Na, Zn, Cu, Ni, Mo) y los elementos como H, C Y O se encuentran contenidos en el agua y en el dióxido de carbono (Taiz & Zeiger, 2006).

Los macronutrientes son bioelementos los cuales se encuentran de una forma inorgánica en el suelo (N, S, P, K, Ca y Mg) estos se hallan en los tejidos vegetales en concentraciones de 0.1% de materia seca, sus funciones van a radicar en la importancia fisiológica y estructural de la planta. Mientras tanto, los micronutrientes en su mayoría hacen parte de las moléculas

enzimáticas (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl), estas son esenciales para las plantas, pero en cantidades muy bajas (Báez, 2018).

Teniendo en cuenta el papel fundamental y de utilización, los elementos realizan labores específicas. El N es el elemento con mayor utilización en las plantas, hace parte de los aminoácidos y ácidos nucleicos, es por ello que se dice que, si este elemento no llega a esta presente en cantidades suficientes en el ambiente, se llega a presentar clorosis en las hojas, en los tallos delgados y leñosos. El P participa en el metabolismo energético de la planta, en la fotosíntesis, respiración y síntesis de almidones, la falta de P va a causar enanismo en las plantas. El K es considerado como un activador enzimático y de equilibrio, muy esencial para el aumento en la producción y crecimiento. También se menciona que la deficiencia de N, P y K, son comunes en los suelos ácidos, debido al bajo contenido de materia orgánica, la reducción de minerales portadores de nutrientes y la fijación del fosfato peróxidos de Fe y Al (Báez, 2018).

2.4 El carbono (C)

El carbono (C), es considerado como uno de los elementos fundamentales de las moléculas orgánicas y también como el más abundante en la Tierra para la vida. Ya que, de hecho, el carbono constituye misma la definición de vida, en donde su presencia o ausencia ayuda a puntualizar si una molécula se lo clasifica como orgánica o inorgánica. Todos los organismos de la tierra necesitan carbono para su estructura, energía o, como es el caso de los humanos, para ambos. Además, el carbono se va a encontrar en formas muy diversas como el gas de dióxido de carbono (CO_2) y en solidos como la piedra caliza ($CaCO_3$), madera, plásticos, diamantes, grafito, etc. La dinámica del C en sus diversas formas, en los distintos compartimientos ambientales, ya sea en la atmosfera, sistemas marinos, sistemas terrestres, entre otros, llegan a conformar el ciclo global del carbono, siendo así uno de los principales ciclos biogeoquímicos (Harrison, 2003).

Una de las formas más estudiadas del carbono, tanto a corto como a largo plazo por la comunidad científica en general, es el CO_2 (Dióxido de Carbono), esto por ser el GEI más abundante en la atmosfera y por su relevante implicación en el cambio climático del planeta. Debido a esto, la reducción en las emisiones de CO_2, así como también su secuestro como

almacenamiento, son las propuestas de mayor relevancia para la adaptación y mitigación frente al cambio climático del planeta tierra (Harrison, 2003).

2.4.1 El ciclo del carbono

El ciclo del carbono, es un ciclo biogeoquímico, en el cual el C se va a intercambiar entre la biosfera, la litosfera, la hidrosfera y la atmosfera del planeta tierra. Por lo consiguiente, el carbono va a circular a través de los océanos, de la atmosfera, de la superficie y el interior terrestre en un gran ciclo llamado biogeoquímico. El ciclo del carbono se va a ver conformado por cuatro reservorios principales de C, interrelacionados por rutas de intercambio. Los reservorios son la atmosfera, los océanos (que contiene el carbono inorgánico disuelto, los organismos marítimos y la materia no viva), los sedimento (que conforman los combustibles fósiles), la biosfera terrestre (que por lo general incluye sistemas de agua no dulce y materia orgánica no viva, como el carbono del suelo). Todos estos movimientos del carbono entre los diferentes reservorios, van a ocurrir debido a varios procesos químicos, físicos, geológicos y biológicos (Velasquez & Gálvez, 2017).

2.4.2 Secuestro y almacenamiento de carbono en SAF

Los ecosistemas forestales llegan a contener grandes cantidades de C secuestrándolos y almacenándolos en la biomasa viva, muerta y en el suelo. En los árboles de los diferentes sistemas, el carbono supone en generar alrededor del 20% de su peso. Sin embargo, además de los arboles mismos, el conjunto de la biomasa forestal orgánica del suelo de los bosques, como el humus, producido por la descomposición de la materia orgánica vegetal muerta, también llegaría a actuar como depósito de carbono en el suelo. La vegetación, es la encargada de poder incorporar el C atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis. Donde la capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar C en forma de biomasa aérea, va a variar en función de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada uno de los estratos por comunidad vegetal. Los diferentes bosques del mundo son los responsables de poder secuestrar y almacenar más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre, y llegan a participar con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmosfera y el suelo (Ordóñez & Masera, 2001).

Es por ende que, en las últimas décadas, a los diferentes sistemas agroforestales se les ha tomado en cuenta con gran interés, ya que éstos son considerados como los grandes secuestradores de gases de CO_2 en el planeta, y es de ahí de donde nace la idea de incrementar la diversidad de vegetación arbórea mediante la reforestación y métodos de manejo del suelo, de áreas que han sido degradadas o reforestadas. En este contexto se refuerza la idea que la reforestación ha provocado destrucciones en los ecosistemas del planeta, y para poder llegar a procesos de remediación y reducción de estos daños, se los podría lograr a través de distintos enfoques que incluyan la restauración de áreas forestales degradadas, evitar también la deforestación y manejar sustentablemente los bosques naturales (Rodríguez-Larramendi et al., 2017). Además, los resultados obtenidos en múltiples condiciones concuerdan que los sistemas agroforestales, que llegan a integrar la producción de árboles con cultivos y el componente animal tienen una mayor potencia para poder secuestrar C que pastos o cultivos agrícolas (Bravo et al., 2017).

2.4.3 Valoración económica del secuestro y almacenamiento de C en SAF

El bosque hoy por hoy, está siendo deforestado de una manera muy acelerada, principalmente por diversas actividades antrópicas, debido que de estos ecosistemas se obtiene madera y otros bienes, tanto para el consumo como para materia prima, así como también para diferentes actividades de transformación. Y nosotros para poder llegar a conocer el valor económico de este servicio forestal, nos permitirá tomar decisiones mucho más aceleradas sobre la aplicación que se le debería de dar a las políticas y programas de conservación (Cedeño & Macias, 2018).

En el mundo científico existen numerosos estudios de cuantificación y valoración de la captura de carbono para cada deposito, más desarrollados en sistemas terrestres y en el recurso suelo. Se dice que el 26% del total del carbono está depositado en el océano, el 20% en la atmosfera, 14% en sistemas terrestres y el 40% restante se encuentra empleado en el suelo. Actualmente, las inversiones forestales del secuestro de C realizadas por propietarios privados cuentan con distintos porcentajes de colaboración, según el tipo de trabajo del que se vaya a realizar en dicho sistema. Cada organismo se encarga de poder determinar dichos

porcentajes y los requisitos de percepción, a través de sus correspondientes normativas de planes de ayuda monetaria. Estas normativas de cada territorio deberán de contemplar y valorar económicamente el secuestro de carbono como uno de los servicios ofrecidos por los SAF. Es por ende que en los últimos años se viene realizando grandes esfuerzos de parte de la comunidad científica, en poder estimar el carbono secuestrado y almacenado en la biomasa y suelo de los ecosistemas terrestres, y poder valorar los bienes y servicios ambientales, para así poder saber el impacto ambiental, y lograrlo incluir en el sistema de cuentas de cada país, y definir adecuadamente los instrumentos de la política y gestión ambiental (Artetxe et al., 2016).

2.5 Generalidades de la especie en estudio

2.5.1 Cacao (*Theobroma cacao*)

Theobroma cacao es un árbol el cual pertenece al género *teobroma*, que en griego llegaría a significar "alimento de dioses" El cacao es un árbol, cultivado en zonas tropicales con temperaturas entre 24 °C y 28 °C y humedades relativamente altas. Puede llegar a alcanzar hasta los 20 metros de altura y tener entre 10 a 15 frutos, estos son de forma alargada y llegan a pesar hasta 1kg. Las hojas son de tamaño grande, alternadas, colgante y elípticas sus especificaciones generales son 20 a 35 cm de lago y 4 a 15 cm de ancho, las flores aparecen en forma de racimos ubicadas en la parte de las ramas y tronco, poseen una coloración rosa, púrpura o blanca con tamaños de 0.5 a 1cm de diámetro y 2 a 2.5 cm de largo. Este género muy conocido mundialmente, contiene varias especies, de las cuales solamente Cacao (*Theobroma cacao*) es la que sobresale debido a su alta demanda comercial, y el cual es considerado como un cultivo de importancia económica para muchos agricultores del país, que se dedican a este cultivo a tal punto de convertirse en el eje del sistema productivo (Arevalo, 2011). La producción de cacao, genera ingresos y empleo a decenas de miles de familias campesinas del ecuador. La obtención de cacao en el país se encuentra mayoritariamente ligada a las condiciones del ecosistema, siendo así esto un factor determinante para poder incrementar el rendimiento del producto en el país (Chang et al., 2014).

El cacao se originó como un árbol del sotobosque, en los bosques de la Cuenca Amazónica, en las zonas comprendidas entre Colombia, Ecuador, Perú y Brasil. Los países productores

de cacao van a generar grandes divisas económicas por exportaciones del cacao en grano y sus múltiples derivados. Recientemente el cacao ha sido denominado como como un "cultivo sostenible" con implicaciones económicas, sociales y ecológicas (Arevalo, 2014).

2.5.2 Chakras en SAF con cacao (*Theobroma cacao*)

La Chakra, es un espacio productivo el cual va a incluir diversos sistemas agroforestales espaciales o temporales, desarrollados en un claro del bosque o del realce, el mismo que es acondicionado deliberadamente. En la Chakra, las familias conjugan variedades de estrategias de mercado y de subsistencias, cuyos atributos lo van a definir como un sistema prioritario de uso sostenible de la tierra en la amazonia. Los componentes vegetales de las Chakras, muestran una alta biodiversidad representada por especies de uso múltiple, que se van a encontrar ubicadas en diferentes estratos y categorías de uso (Grijalva et al., 2011).

La chakra es considerado como un lugar de aprendizaje en donde, no solo se socializa los conocimientos ancestrales sobre la producción forestal, sino también el repertorio del conocimiento técnico, con las comunidades nativas en la construcción conjunta de aprendizajes sobre el manejo silvicultura, de tal modo que conjuguen una visión compartida y de respeto mutuo, en lo que concierne a la gestión sostenible de los SAF. Actualmente las comunidades indígenas y colonos de la amazonia ecuatoriana, han logrado realizar avances significativos en el conocimiento y aplicación de buenas prácticas silviculturales de producción y de post cosecha del cacao, principal rubro generado de ingresos, que les permite producir y comercializar en mercados nacionales e internacionales (Grijalva et al., 2011).

Los SAF de cacao, acompañadas con especies arbóreas maderables, son hoy en día uno de los sistemas productivos más importantes en las Chakras de las comunidades indígenas de la amazonia ecuatoriana, no solo por los ingresos económicos que estos generan a las familias del sector, sino también por su contribución a la biodiversidad y por su función de poder secuestrar y almacenar grandes cantidades de carbono en el suelo del SAF, cumpliendo así un papel relevante en la mitigación del cambio climático, todo esto va a depender de la cantidad de especies forestales, tipo de cultivo, edad y tipo de suelo (Ortiz et al., 2008).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Localización del área de estudio

En esta investigación se utilizó información de campo levantada del proyecto titulado: "Agricultura Climáticamente Inteligente en cacao bajo sistema agroforestal en Ecuador" Proyecto GCP/GLO/534/ITA ejecutado en la provincia de Napo por la FAO-Ecuador, en colaboración con la Corporación para el Desarrollo Sostenible, Conservación y Cambio Climático (DSC). El estudio se realizó en el Cantón Arosemena Tola, Provincia de Napo con una altura alrededor de 500 msnm (Figura 1). Para lo cual se seleccionaron 12 sistemas agroforestales con cacao (Chakra) con diferentes arreglos (Tabla 1). Geográficamente se encuentra en la zona 18S con coordenadas UTM (Tabla 2). El clima es característico del bosque húmedo tropical siempre verde en ecosistema de Selva Alta, con un régimen pluviométrico cercano a 3000 mm anuales, evapotranspiración entre 50 mm a 100 mm al año, temperatura promedio de 21,1 a 22,9°C y una humedad relativa de 86 a 92%. 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., 2017).

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio, de los 12 SAF con Theobroma cacao.

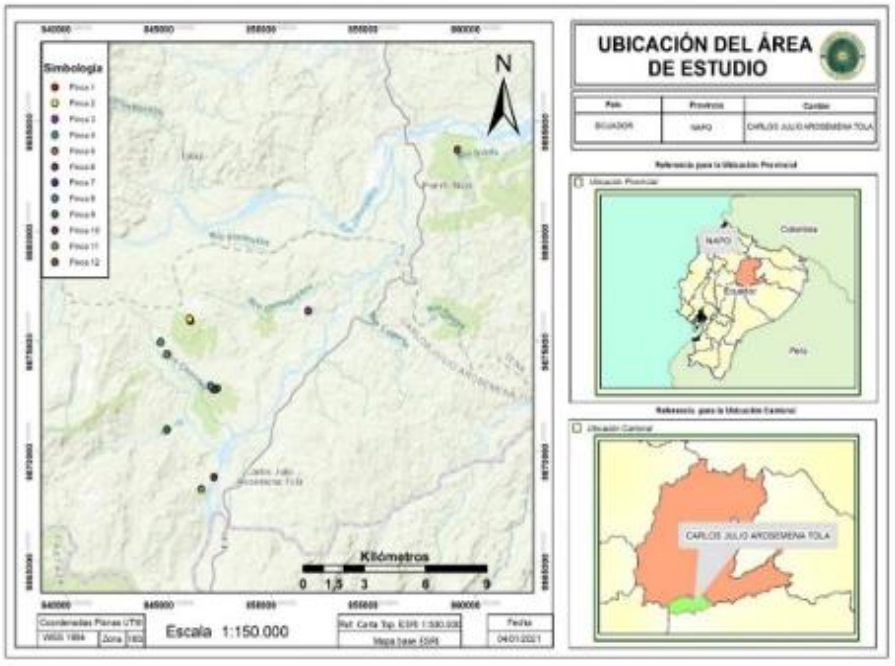


Tabla 1. Arreglos de los 12 SAFs con cacao.

Arreglos de los 12 Sistemas Agroforestales				
Código	**Sub. Parcela.**	**Superficie (m^2)**	**Nº**	**# árboles/ha**
SAF1	4	1600	17	106,25
SAF2	4	1600	20	125,00
SAF3	4	1600	65	406,25
SAF4	4	1600	4	25,00
SAF5	4	1600	19	118,75
SAF6	4	1600	10	62,50
SAF7	4	1600	8	50,00
SAF8	4	1600	30	187,50
SAF9	4	1600	24	150,00
SAF10	4	1600	45	281,25
SAF11	4	1600	4	25,00
SAF12	4	1600	26	162,50

Tabla 2. Coordenadas de los puntos de muestreo de los 12 SAF.

Nº de Finca	Coord. X	Coord. Y	Altitud
Finca 1	178232	9875940	722
Finca 2	178188	9876042	736
Finca 3	183983	9876404	549
Finca 4	176784	9874969	657
Finca 5	177070	9874414	646
Finca 6	179537	9872882	574
Finca 7	179374	9872832	567
Finca 8	179225	9872986	577
Finca 9	177092	9870995	525
Finca 10	179392	9868848	516
Finca 11	178774	9868293	614
Finca 12	191259	9883756	459

3.2 Tipo de investigación

De acuerdo a las líneas base, el presente proyecto de investigación se enmarcó en el programa de Gestión y Conservación Ambiental. El tipo de investigación fue descriptiva, ya que se evaluó y describió las distintas propiedades del componente suelo; físicas (densidad aparente, Da), químicas (carbono orgánico total, Nitrógeno amoniacal, fósforo disponible y

potasio intercambiable) y biológicas (hojarasca y raíces). Los datos de las distintas variables fueron sometidos a un análisis exploratorio, el cual permite la obtención de los estadísticos descriptivos usando el software OriginPro 2020. Las diferencias entre las medias se detectaron a través del análisis de varianza (ANOVA), usando la prueba de Tukey ($p < 0,05$), para separar grupos homogéneos.

3.3 Método de investigación

El presente estudio siguió un método de investigación experimental, el cual se dividió en dos fases, la primera consistió en un muestreo del suelo en los diferentes sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao)*. Consiguientemente a partir de las muestras recolectadas en campo en enero del 2020, se procedió con los respectivos análisis en el laboratorio, para determinar las diferentes variables tanto físicas como químicas del recurso suelo (Bravo et al., 2017).

3.3.1 Esquema de muestreo en campo

Para la recolección de la información de campo se usó un esquema de muestreo sistemático y en cada uso seleccionado se estableció un cuadrante de 40 x40 m sobre el cual se ubicaron cinco puntos de muestreo (Figura 2).

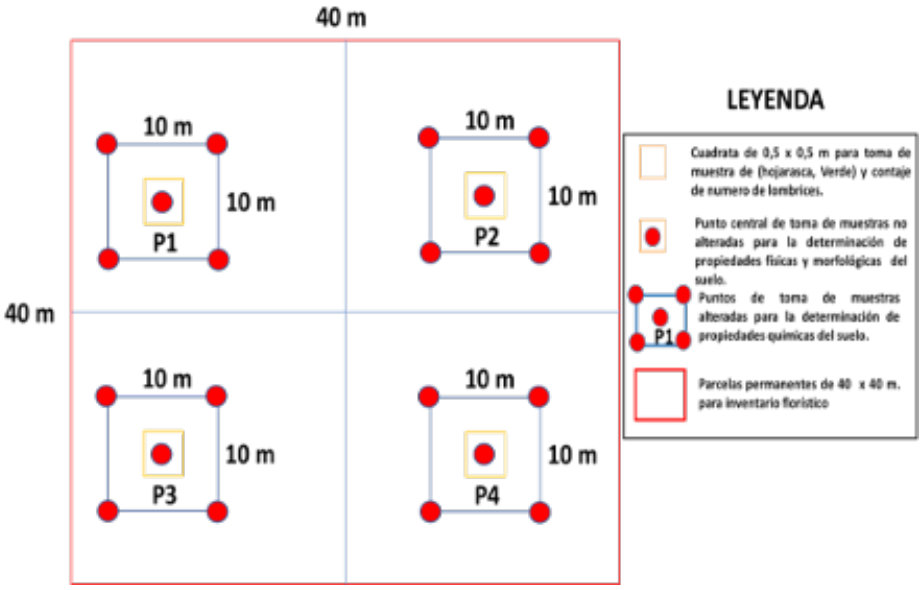


Figura 2. Esquema de muestreo sistemático a utilizar bajo distintos sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao*) en el Cantón Arosemena Tola, Provincia de Napo.
Fuente. Proyecto FAO (2020)

En cada punto se recolectaron muestras de suelo a tres profundidades (0-10, 10-30 y 30-60 cm) para la evaluación de los distintos parámetros físicos, químicos y biológicos (Figura 3). Para la determinación de la densidad aparente y la densidad de raíces se usaron muestras no alteradas con cilindros de 7 cm de altura x 6 cm de diametro (G. R. Blake, 2015). El contenido de materia orgánica fue determinado mediante el método de calcinación a 550 º C (Nelson & Sommers, 2018).

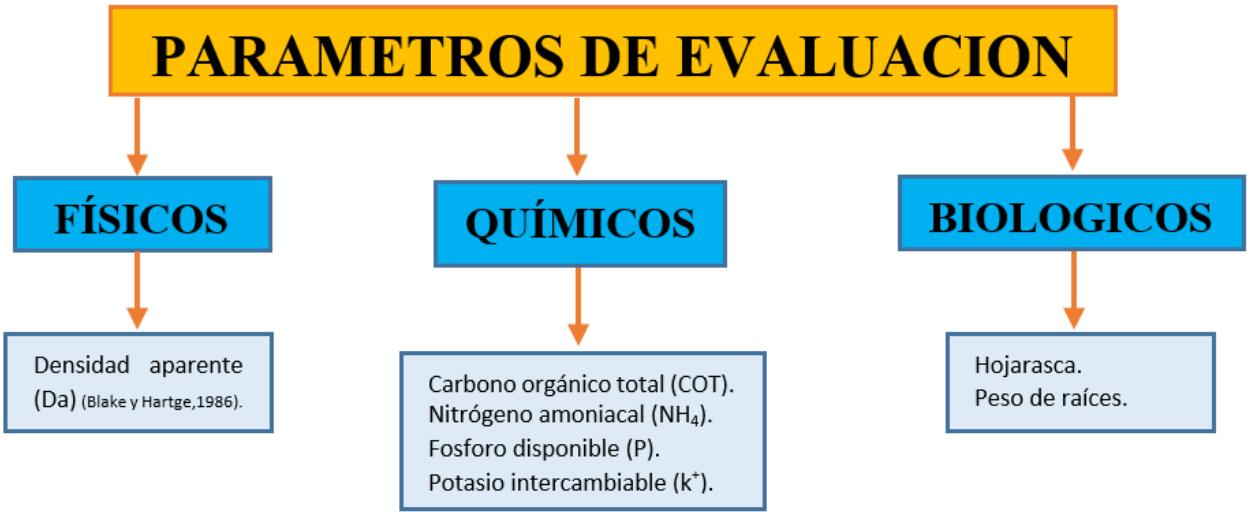


Figura 3. *Parámetros de suelo a evaluar en los sistemas agroforestales con cacao en el Cantón Arosemena Tola, Provincia de Napo.*
Fuente: elaboración propia.

3.3.2 Carbono almacenado en el componente suelo (COS)

Como primer paso se determinó la densidad aparente (Da) usando el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986). Para ello, se usaron cilindros de 7 cm de altura x 6 cm de diámetro recolectados con toma muestra tipo Uhland, y posteriormente se colocaron en estufa a 105ºC 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). Con el valor de la densidad aparente (Mg m^{-3}), el valor del carbono y la profundidad de cada intervalo de muestreo (0-10; 10-30 y 30-60 cm), se cuantificaron la cantidad total de carbono almacenado en el compartimiento suelo, mediante la siguiente ecuación (López-Santiago et al., 2019):

$$\boldsymbol{COS} = Da\ xCOT(\%)\ x\ P(m)x100$$

Donde:

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

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

P: Profundidad (m).

3.3.3 Carbono almacenado en la hojarasca y raíces

Para el carbono almacenado en la hojarasca y las raíces, una vez recolectadas estas muestras fueron pesadas y colocadas en bolsas para su secado, en la estufa hasta obtener un peso constante. Se utilizó el valor del peso seco, el cual fue multiplicado por 0,5 para estimar la reserva de carbono mediante la siguiente ecuación (López-Santiago et al., 2019):

$$\boldsymbol{\Delta CBN\ muestra\ = MS\ x\ CF}$$

Donde:

ΔC_{BN} muestra: Cantidad de carbono en la biomasa de la muestra de vegetación no arbórea (kg C/0,25 m^2) y raíces.

CF: es la fracción de carbono (kg C /kg MS) determinada mediante el valor propuesto por el IPCC de 0,5.

3.3.4 Análisis químicos

El carbono orgánico total (COT) se determinó mediante el método de digestión húmeda Walkley y Black. 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 medió por titulación usando una solución de sal de Morh 0,5 N (H_2SO_4 + $FeSO_4.7H_2O$). El nitrógeno total se determinó por el método de Kjeldahl. El potasio intercambiable (K^+) y contenido de fósforo fueron medidos por la metodología de Olsen modificado (Nelson & Sommers, 2018).

3.3.5 Análisis estadístico de datos

Los datos de las distintas variables fueron sometidos a un análisis exploratorio que permitió la obtención de los estadísticos descriptivos usando el software OriginPro, 2020. Las diferencias entre las medias se detectaron a través del análisis de varianza (ANOVA) bifactorial, usando la prueba de Tukey ($p < 0,05$), para separar grupos homogéneos.

3.4 Recursos humanos y materiales.

Tabla 3. Materiales y equipos utilizados en el proyecto de investigación.

MATERIALES DE CAMPO	EQUIPOS DE LABORATORIO	REACTIVOS	RECURSO HUMANO
• Uhland. • Pala. • Fundas plásticas. • Papel aluminio. • Fundas zi-ploc. • Cilindros de 7cm de largo y 6cm de diámetro. • Balanza. • Tijeras. • Piola. • Marcador. • GPS. • Machete. • Navaja. • Papel. • Libreta. • Esfero.	• Probetas. • Vasos de precipitación. • Papel filtro. • Balanza analítica. • Estufa. • Espectrofotómetro. • Peachimetro. • Termómetro. • Destilador de agua. • Pipetas. • Hidrómetro. • Crisoles. • Mufla. • Balones aforados. • Bandejas. • Plato poroso. • Pinzas.	• Agua destilada. • Cloruro de potasio (KCL). • Ácido sulfúrico (H_2SO_4). • Solución de Oslen. • Catalizador. • Ácido bórico al 2%. • Dicromato de potasio (K2Cr2O7)1 N.	• Equipo de trabajo.

CAPÍTULO IV.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Parámetros de evaluación físicos del suelo en SAF con cacao

La caracterización del área de estudio de los 12 sistemas agroforestales (Chakra) con cacao, contemplo una serie de parámetros físicos, en donde los valores promedios de densidad aparente (Da), aparecen en las Tablas 4, 5 y 6. En la profundidad de 0-10 cm, la densidad aparente presentó un rango desde 0,34 Mg m^{-3} hasta 0,93 Mg m^{-3} (Tabla 4), en donde hubo diferencia significativa ($P<0,05$), mostrando los mayores valores en el SAF 9, SAF 10, SAF 12 y SAF 3, seguidamente del SAF 8, y con menores valores en el SAF 2, SAF 11, SAF 1, SAF 6, SAF 7, SAF 4 y SAF 5. Independientemente del uso de tierra a la profundidad de 0-10 cm, los valores obtenidos están muy por debajo de los valores críticos (>1,4 Mg m^3) para esta clase textural (Arcillosa, Franco-Arcillosa). Estos resultados indican que no existen problemas de compactación ni de aireación, por tanto, se favorece el desarrollo de raíces y la penetración de agua y una mayor posibilidad de que las plantas absorban nutrientes (Bravo et al., 2017). Para la profundidad de 10-30 cm, los valores estuvieron entre el rango de 0,43 Mg m^{-3} a 1,23 Mg m^{-3} (Tabla 5), igualmente hubo diferencia significativa, en donde los mayores valores estuvieron en el SAF 9, SAF 10, SAF 12 y SAF 3, consecutivamente del SAF 8, y por último los menores valores estuvieron en el SAF 2, SAF11, SAF1, SAF 6, SAF 7, SAF 4 y SAF 5. Los resultados conseguidos a esta profundidad están por debajo de los valores críticos (>1,4 Mg m^3), lo cual muestra que no existen problemas de compactación ni de aireación en el suelo. A la profundidad de 30-60 cm, los valores oscilaron de 0,46 Mg m^{-3} a 1,33 Mg m^{-3} (Tabla 6), con diferencias significativa, donde los mayores valores se presentaron en el SAF 12, SAF 9 y SAF 10, continuo del SAF 3, y los valores menores estuvieron en el SAF 8, SAF 2, SAF 4, SAF 1, SAF 11, SAF 7, SAF 5 y SAF 6. Los valores obtenidos están por debajo de los valores críticos (>1,4 Mg m^3), por esta razón se estima que no tendrán ningún problema en la retención de humedad y crecimiento de raíces.

Tabla 4. Valores de la densidad aparente (Da Mg m^{-3}), de 0-10 cm en SAFs con cacao.

(0-10 cm)	DENSIDAD APARENTE (DA) (Mg m^{-3})				
		Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTOS	N	1	2	3	Grupos
SAF5	4,00	0,34			C
SAF4	4,00	0,35			C
SAF7	4,00	0,36			C
SAF6	4,00	0,37			C
SAF1	4,00	0,39			C
SAF11	4,00	0,40			C
SAF2	4,00	0,45			C
SAF8	4,00	0,54	0,54		B, C
SAF3	4,00		0,71	0,71	A, B
SAF12	4,00			0,87	A
SAF10	4,00			0,87	A
SAF9	4,00			0,93	A
Sig.		0,26	0,49	0,17	

Tabla 5. Valores de la densidad aparente (Da, Mg m^{-3}), de 10-30 cm en SAFs con cacao.

(10-30 cm)	DENSIDAD APARENTE (DA) (Mg m^{-3})				
		Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTOS	N	1	2	3	Grupos
SAF11	4,00	0,43			C
SAF5	4,00	0,43			C
SAF6	4,00	0,46			C
SAF1	4,00	0,47			C
SAF7	4,00	0,48			C
SAF4	4,00	0,48			C
SAF2	4,00	0,58			C
SAF8	4,00	0,60			C
SAF3	4,00		0,86		B
SAF10	4,00			1,10	A
SAF9	4,00			1,14	A
SAF12	4,00			1,23	A
Sig.		0,14	1,00	0,52	

Tabla 6. Valores de la densidad aparente (Da, Mg m^{-3}), de 30-60 cm en SAFs con cacao.

(30-60 cm)	DENSIDAD APARENTE (DA) (Mg m^{-3})				
		Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTOS	N	1	2	3	Grupos
SAF6	4,00	0,46			C
SAF5	4,00	0,48			C
SAF7	4,00	0,49			C
SAF11	4,00	0,51			C
SAF1	4,00	0,51			C
SAF4	4,00	0,51			C
SAF2	4,00	0,60			C
SAF8	4,00	0,63			C
SAF3	4,00		0,96		B
SAF10	4,00		1,22	1,22	A,B
SAF9	4,00			1,25	A
SAF12	4,00			1,33	A
Sig.		0,63	0,08	0,97	

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 (Martínez et al., 2008; Vera et al., 2012).

Grupos con letras distintas, indican que existen diferencias significativas en el suelo, a un nivel de P≤ 0,05, según pruebas de comparación de medias de Tukey.

4.2 Cuantificación del potencial de secuestro de carbono en el suelo, la hojarasca y raíces en los SAF con cacao

Los sistemas agroforestales (Chakra) afectaron significativamente tanto el carbono orgánico del suelo como el secuestro de carbono en los distintos compartimientos en el horizonte superficial (Figura 4). El carbono en el suelo osciló desde 0,44 % (SAF 9) a 2,89 % (SAF 1), lo cual está categorizado de valores bajos a medios respectivamente, lo que probablemente está asociado a las diferencias entre los arreglos de los sistemas agroforestales, lo que a su vez incide en el aporte de hojarasca y de incorporación de materia orgánica en el suelo. Estas diferencias en el % de carbono en el suelo incidieron en la cantidad de secuestro de carbono

en el suelo. Como se aprecia en la figura 4, el secuestro de carbono en el suelo mostró rangos que oscilaron desde 2,97 SAF 9 a 8,37 Mg C ha^{-1} SAF 1 respectivamente.

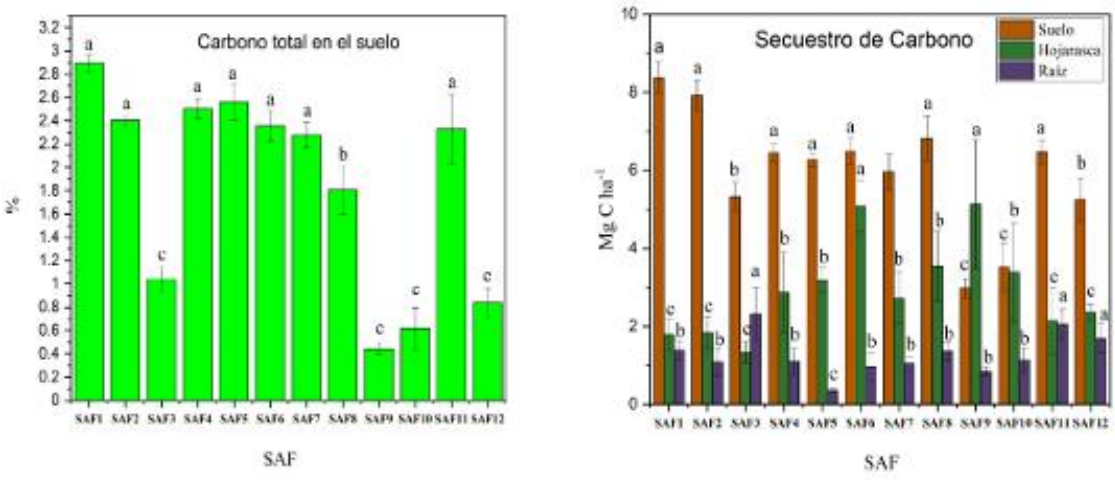


Figura 4. Carbono total en el suelo y secuestro de carbono en distintos compartimientos (Suelo, hojarasca y raíz) bajo distintos sistemas agroforestales (Chakra) con cacao. Letras distintas para un mismo compartimiento indican diferencias significativas (P<0,05).

El carbono secuestrado en la hojarasca osciló desde 1,32 a 5,12 Mg C ha^{-1} en la SAF 3 y SAF 9, mientras que el carbono almacenado por las raíces varió de 0,17 a 1,16 Mg C ha^{-1} en la SAF 5 y SAF 3 respectivamente. De los tres compartimientos, el carbono almacenado en el suelo fue mayor que el C proporcionado por la hojarasca y de las raíces, lo cual confirma la importancia del suelo como principal fuente de reserva (Martínez et al., 2008; Bravo et al., 2017). La sumatoria de cada uno de los componentes evaluados mostró diferencias en carbono total almacenado (CTA) y en la cantidad de CO_2 que se deja de emitir a la atmosfera (Figura 5), resaltando el papel regulador que ejerce el suelo, la hojarasca y las raíces de las plantas para mitigar el calentamiento global (Srinivasarao et al. 2014).

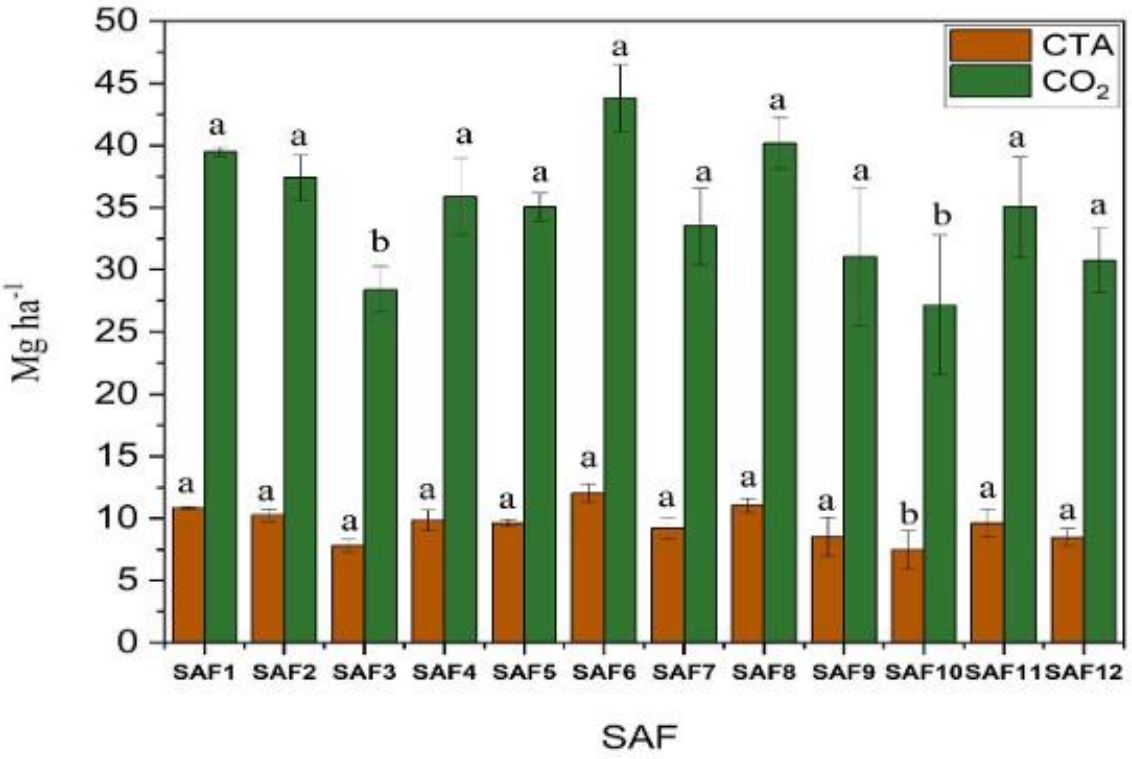


Figura 5. Carbono total almacenado (CTA) y cantidad de CO2 que se deja de emitir bajo distintos sistemas agroforestales (Chakra) con cacao. Letras distintas para un mismo compartimiento indican diferencias significativas (P<0,05).

4.3 Determinación de la disponibilidad de nitrógeno en forma de amonio (NH^{+4}), fósforo disponible y potasio intercambiable en el suelo bajo sistemas agroforestales (Chakra) con cacao

En las Tablas 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15 se muestran los valores promedios del contenido de nitrógeno amoniacal (NH_4, mg kg^{-1}), fósforo disponible (P, mg kg^{-1}) y Potasio intercambiable (K^+, meq 100 g s^{-1}), considerando los sistemas agroforestales con Cacao y las distintas profundidades. los cuales mostraron diferencias significativas (P < 0,05) y distintos niveles de concentración a distintas profundidades del suelo (0-10, 10-30 y de 30-60 cm).

4.3.1 Nitrógeno amoniacal (NH_4, mg kg^{-1})

El nitrógeno en forma amoniacal (NH^+_4, mg kg^{-1}), en la profundidad de 0-10 cm, presentó diferencias significativas (Tabla 7), en donde su mayor valor osciló entre 91,32 mg kg^{-1} (SAF 11), y el menor estuvo a 45,56 mg kg^{-1} (SAF 12). A la profundidad de 10-30 cm, no se presentó una diferencia significativa en el suelo, el cual sus valores estuvieron en el rango de 39,96 mg kg^{-1}, hasta 68,24 mg kg^{-1} (Tabla 8). Mientras tanto en la profundidad de 30-60 cm, si se presentó una diferencia significativa, con un valor mayor de 50,45 mg kg^{-1}, hasta 26,44 mg kg^{-1} (Tabla 9).

Como se puede apreciar los mayores valores de nitrógeno en forma de amonio se ubicaron en el horizonte superficial con rango de que variaron de medios a altos en el horizonte superficial, lo cual significa que puede suplir las necesidades de nitrógeno de las plantas entre un 50 y 75 % (Casanova, 2005). Para las otras dos profundidades las concentraciones de nitrógeno generalmente fueron categorizados como medios, lo que en términos prácticos significa que solo puede suplir el 50% de las necesidades de los cultivos.

Cabe señalar que la concentración de nitrógeno en el suelo está determinada en gran medida por la cantidad de MO de éstos, la cual contribuye de forma positiva en los ciclos biogeoquímicos mejorando el contenido de algunos nutrientes en especial del N (Vera et al., 2012). El conocimiento de los sistemas agroforestales debería conducir a investigaciones que evalúen la incidencia en elementos fundamentales de los agroecosistemas como el flujo de energía y el reciclaje de nutrientes.

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 (Bravo et al., 2017; B. Torres et al., 2019), 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 son importantes para comprender los ciclos de carbono y nitrógeno del suelo, así como los patrones que controlan la fertilidad del mismo. La contribución más importante para la retención de nutrientes en estos suelos probablemente lo representa el nivel de materia orgánica.

Tabla 7. Valores promedios de nitrógeno amoniacal (NH_4, mg kg^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad de (0-10 cm).

(0-10 cm)	Nitrógeno amoniacal (NH_4, mg kg^{-1})			
		Subconjunto para-alfa = 0,05		
TRATAMIENTOS	N	1	2	GRUPOS
SAF12	4,00	45,56		B
SAF6	4,00	68,63	68,63	A, B
SAF7	4,00	71,84	71,84	A, B
SAF3	4,00	74,77	74,77	A, B
SAF9	4,00	74,97	74,97	A, B
SAF8	4,00	75,11	75,11	A, B
SAF2	4,00		76,86	A
SAF4	4,00		77,95	A
SAF5	4,00		79,64	A
SAF10	4,00		83,27	A
SAF1	4,00		88,45	A
SAF11	4,00		91,32	A
Sig.		0,07	0,33	

Tabla 8. Valores promedios de nitrógeno amoniacal (NH_4, mg kg^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad de (10-30 cm).

(10-30 cm)	Nitrógeno amoniacal (NH_4, mg kg^{-1})		
		Subconjunto para-alfa = 0,05	
TRATAMIENTOS	N	1	GRUPOS
SAF12	4,00	39,96	A
SAF9	4,00	46,12	A
SAF5	4,00	47,53	A
SAF1	4,00	51,72	A
SAF6	4,00	56,26	A
SAF7	4,00	56,39	A
SAF11	4,00	56,61	A
SAF3	4,00	57,58	A
SAF10	4,00	57,63	A
SAF8	4,00	59,78	A
SAF4	4,00	60,80	A
SAF2	4,00	68,24	A
Sig.		0,57	

Tabla 9. Valores promedios de nitrógeno amoniacal (NH_4, mg kg^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad de (30-60 cm).

(30-60 cm)	Nitrógeno amoniacal (NH_4, mg kg^{-1})			
		Subconjunto para alfa = 0,05		
TRATAMIENTOS	N	1	2	Grupos
SAF10	4,00	26,44		B
SAF5	4,00	26,68		B
SAF4	4,00	29,23	29,23	A, B
SAF3	4,00	30,90	30,90	A, B
SAF12	4,00	33,29	33,29	A, B
SAF9	4,00	35,49	35,49	A, B
SAF1	4,00	36,05	36,05	A, B
SAF6	4,00	36,65	36,65	A, B
SAF7	4,00	40,25	40,25	A, B
SAF11	4,00	43,99	43,99	A, B
SAF2	4,00	45,37	45,37	A, B
SAF8	4,00		50,45	A
Sig.		0,16	0,07	

4.3.2 Contenido de fosforo disponible (P, mg kg^{-1})

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., 2017). El fosforo es uno de los elementos de mayor importancia para el crecimiento y desarrollo de las plantas siendo un contribuyente primario responsable de la transferencia y acumulación de energía para las plantas. Este elemento encontrado en el suelo se transfiere a la planta en pequeñas cantidades mediante el contacto con la superficie radicular lo cual permita un crecimiento normal de la planta (Báez, 2018).

El resultado del fosforo en el SAF con cacao, a la profundidad de 0-10 cm, mostró valores de 4,79 mg kg^{-1} (SAF 3), a 12,54 mg kg^{-1} (SAF 10) (Tabla 10). A la profundidad de 10-30 cm, se presentó diferencias significativas (Tabla 11), el mayor valor fue de 9,77 mg kg^{-1}, y el menor fue de 1,11 mg kg^{-1}. En la última profundidad de 30-60 cm, se observó diferencias significativas, donde el mayor fue de 7,99 mg kg^{-1} y el menor de 0,89 mg kg^{-1} (Tabla 12).

Tabla 10. Valores promedios de fósforo disponible (P, mg kg^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad (0-10 cm).

(0-10 CM)	Fósforo disponible (P, mg kg^{-1})		
		Subconjunto para alfa = 0,05	
TRATAMIENTOS	N	1	Grupos
SAF3	4,00	4,79	A
SAF7	4,00	5,02	A
SAF6	4,00	5,82	A
SAF8	4,00	6,03	A
SAF1	4,00	6,03	A
SAF4	4,00	6,42	A
SAF5	4,00	6,47	A
SAF9	4,00	8,48	A
SAF11	4,00	8,60	A
SAF2	4,00	8,94	A
SAF12	4,00	10,18	A
SAF10	4,00	12,54	A
Sig.		0,07	

Tabla 11. Valores promedios de fósforo disponible (P, mg kg^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad (10-30 cm).

(10-30 cm)	Fósforo disponible (P, mg kg^{-1})			
		Subconjunto para alfa = 0,05		
TRATAMIENTOS	N	1	2	GRUPOS
SAF1	4,00	1,11		B
SAF4	4,00	1,85		B
SAF6	4,00	1,99		B
SAF5	4,00	2,30		B
SAF7	4,00	2,45		B
SAF2	4,00	2,53		B
SAF8	4,00	4,14		B
SAF9	4,00	4,98		B
SAF11	4,00	5,08		B
SAF12	4,00	5,40	5,40	A, B
SAF3	4,00	5,63	5,63	A, B
SAF10	4,00		9,77	A
Sig.		0,05	0,07	

Tabla 12. Valores promedios de fósforo disponible (P, mg kg^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad (30-60 cm).

(30-60 cm)	Fósforo disponible (P, mg kg^{-1})				
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0,05			GRUPOS
		1	2	3	
SAF5	4,00	0,89			C
SAF4	4,00	0,95			C
SAF1	4,00	1,93	1,93		B,C
SAF2	4,00	2,75	2,75		B,C
SAF7	4,00	2,94	2,94		B,C
SAF9	4,00	2,94	2,94		B,C
SAF8	4,00	3,23	3,23		B,C
SAF6	4,00	3,39	3,39	3,39	A,B,C
SAF11	4,00	3,45	3,45	3,45	A,B,C
SAF3	4,00	5,21	5,21	5,21	A,B,C
SAF10	4,00		6,30	6,30	A, B
SAF12	4,00			7,99	A
Sig.		0,10	0,09	0,06	

En general, los valores obtenidos para las tres profundidades pueden ser categorizados como bajos, con valores menores de 10 mg kg^{-1} de P disponible, lo cual resulta en una baja reserva para cubrir las necesidades de las plantas ya que puede aportar apenas el por debajo de 25 % de sus requerimientos (Bravo et al., 2017).

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+} (Espinosa et al., 2018), 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., 2017).

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 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 (Bravo et al., 2017; Torres et al., 2019), 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 agroforestales.

4.3.3 Potasio intercambiable (K^+, meq 100 g s^{-1})

Con respecto al potasio intercambiable, en función de los distintos usos del suelo en los SAF con cacao, no se presentaron diferencias significativas (P≤0,05) en las tres profundidades. En donde los valores en la profundidad de 0-10 cm, fueron de 0,08 meq 100 g s^{-1}, hasta 0,25 meq 100 g s^{-1} (Tabla 13). Para el horizonte de 10-30 cm de profundidad el mayor valor fue de 0,18 meq 100 g s^{-1} y el menor de 0,07 meq 100 g s^{-1} (Tabla 14). Indistintamente a la profundidad de 30-60 cm, los valores estuvieron entre 0,18 meq 100 g s^{-1}, a 0,05 meq 100 g s^{-1} (Tabla 15).

Tabla 13. Valores promedios de Potasio intercambiable (K^+, meq 100 g s^{-1}), en SAF con cacao, a una profundidad (0-10 cm).

(0-10 cm)	Potasio intercambiable (K^+, meq 100 g s^{-1})		
		Subconjunto para alfa = 0,05	
TRATAMIENTOS	N	1	GRUPOS
SAF10	4,00	0,08	A
SAF9	4,00	0,13	A
SAF2	4,00	0,16	A
SAF8	4,00	0,16	A
SAF1	4,00	0,19	A
SAF7	4,00	0,19	A
SAF4	4,00	0,20	A
SAF11	4,00	0,20	A
SAF12	4,00	0,21	A
SAF6	4,00	0,21	A
SAF5	4,00	0,22	A
SAF3	4,00	0,25	A
Sig.		0,13	

Tabla 14. Valores promedios de Potasio intercambiable (K^+, meq 100 g s^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad (10-30 cm).

(10-30 cm)	Potasio intercambiable (K^+, meq 100 g s^{-1})			
		Subconjunto para alfa = 0,05		
TRATAMIENTOS	N	1	2	GRUPOS
SAF10	4,00	0,07		B
SAF9	4,00	0,07		B
SAF2	4,00	0,08	0,08	A,B
SAF3	4,00	0,08	0,08	A,B
SAF1	4,00	0,09	0,09	A,B
SAF4	3,00	0,10	0,10	A,B
SAF11	4,00	0,10	0,10	A,B
SAF5	4,00	0,12	0,12	A,B
SAF6	4,00	0,12	0,12	A,B
SAF7	4,00	0,12	0,12	A,B
SAF12	4,00	0,15	0,15	A,B
SAF8	3,00		0,18	A
Sig.		0,17	0,06	

Tabla 15. Valores promedios de Potasio intercambiable (K^+, meq 100 g s^{-1}) en SAF con cacao, a una profundidad (30-60 cm).

(30-60 cm)	Potasio intercambiable (K^+, meq 100 g s^{-1})		
		Subconjunto para alfa = 0,05	
TRATAMIENTOS	N	1	GRUPOS
SAF10	4,00	0,05	A
SAF9	4,00	0,06	A
SAF4	3,00	0,06	A
SAF1	4,00	0,07	A
SAF11	4,00	0,07	A
SAF3	4,00	0,08	A
SAF2	4,00	0,08	A
SAF5	4,00	0,08	A
SAF7	4,00	0,11	A
SAF6	4,00	0,15	A
SAF8	3,00	0,16	A
SAF12	4,00	0,18	A
Sig.		0,40	

Todos los valores de K^+ obtenidos en el presente estudio, incluso los valores más altos en los SAFs, están por debajo del umbral crítico: < 0,2 meq 100 g s^{-1} (INIAP, 2012), lo que expresa que este nutriente represente un factor limitante para la productividad de los sistemas agroforestales.

Los resultados obtenidos se asemejan a los obtenidos para la Amazonía ecuatoriana, con mayores valores de K^+ intercambiable en el primer horizonte (0-10 cm) y en los sistemas ganaderos, bosque, cacao agroforestal y cacao monocultivo (Bravo et al., 2017).

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).

4.4 Relaciones entre el contenido de materia orgánica del suelo y la disponibilidad de macronutrientes (N – P – K) en los diferentes usos del suelo

La relación entre la MOS y los macronutrientes (N-P-K), se evaluó mediante la correlación de Pearson que tiene valores entre $-1 \leq \rho \leq 1$. Para la 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 una relación alta, y si los valores se acercan a cero como baja.

Cuando el coeficiente de correlación esta entre 0 y 0,30, o entre 0 y -0,30 la relación es baja. Si los valores están entre 0,30 y 0,60, o entre -0,30 y -0,60 la relación es media y entre 0,60 y 1, o -0,60 y -1 la relación es alta. Si el coeficiente es positivo las variables son directamente proporcionales, esto significa que aumenta o disminuye a la vez. En cambio, si el coeficiente es negativo, entonces las variables son inversamente proporcionales, a lo que es lo mismo, si una de las variables aumenta, la otra disminuye.

Las relaciones establecidas a diferentes profundidades de los SAF con cacao, estudiados entre distintas propiedades del suelo, los macronutrientes y la MOS se observan en las siguientes tablas 16, 17 y 18. La relación entre MOS y nitrógeno amoniacal NH_4, mg kg^{-1}, en las tres profundidades, fue positiva y fuertemente relacionada. Con valores de correlación de Pearson que oscilaron desde r=0,18 r=0,20 y r=0,31 respectivamente.

Tabla 16. Relación entre MOS y la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K), de 0-10 cm en suelos de SAF con cacao.

(0-10 cm)	Da Mg m^{-3}	Arena %	Limo %	Arcilla %	pH	MO %	NH_4 mg kg^{-1}	P, mg kg^{-1}	K meq 100 g s^{-1}
Da	1,00								
Arena	-0,46**	1,00							
Limo	0,12	-0,803**	1,00						
Arcilla	0,628**	-0,790**	0,27	1,00					
pH	0,23	-0,729**	0,678**	0,478**	1,00				
MO	-0,894**	0,392**	-0,03	-0,609**	-0,13	1,00			
NH_4	-0,26	0,570**	-0,431**	-0,488**	-,655**	**0,317***	1,00		
P	0,332*	0,03	0,00	-0,05	-0,08	**-0,23**	0,326*	1,00	
K	-0,26	-0,15	0,13	0,11	0,27	**0,371****	0,10	-0,04	1,00

Da: Densidad aparente (Mg m^{-3}); **MOS**: Materia orgánica del suelo (%); **NH^+_4**: Amonio disponible (mg kg^{-1}); **P:** Fosforo disponible (mg kg^{-1}); **K^+:** Potasio Intercambiable (meq 100 g s^{-1}). ****** correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral). ***** La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 17. Relación entre MOS y la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K), de 10-30 cm en suelos de SAF con cacao.

(10-30 cm)	Da Mg m^{-3}	Arena %	Limo %	Arcilla %	pH	MO %	NH_4 mg kg^{-1}	P, mg kg^{-1}	K meq 100 g s^{-1}
Da	1,00								
Arena	-0,33*	1,00							
Limo	-0,30	-0,549**	1,00						
Arcilla	0,629**	-0,738**	-0,15	1,00					
pH	0,03	-0,560**	0,635**	0,16	1,00				
MO	-0,855**	0,23	0,443**	-0,648**	0,17	1,00			
NH_4	-0,20	0,09	-0,09	-0,06	0,13	**0,18**	1,00		
P	0,56**	0,03	-,457**	0,341*	-0,04	**-0,419****	0,04	1,00	
K	-0,07	-0,388*	0,30	0,22	0,398**	**0,17**	0,06	-0,09	1,00

Da: Densidad aparente (Mg m^{-3}); **MOS**: Materia orgánica del suelo (%); **NH^+_4**: Amonio disponible (mg kg^{-1}); **P:** Fosforo disponible (mg kg^{-1}); **K^+:** Potasio Intercambiable (meq 100 g s^{-1}). ****** correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral). ***** La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 18. Relación entre MOS y la disponibilidad de macronutrientes (N-P-K), de 30-60 cm en suelos de SAF con cacao.

(30-60 cm)	Da Mg m^{-3}	Arena %	Limo %	Arcilla %	pH	MO %	NH_4 mg kg^{-1}	P, mg kg^{-1}	K meq 100 g s^{-1}
Da	1,00								
Arena	-0,460**	1,00							
Limo	-0,18	-0,28	1,00						
Arcilla	0,56**	-0,78**	-0,373*	1,00					
pH	-0,06	-0,22	0,560**	-0,14	1,00				
MO	-0,819**	0,322*	0,488**	-0,625**	0,23	1,00			
NH_4	-0,20	-0,02	-0,04	0,05	-0,364*	**0,20**	1,00		
P	0,568**	-0,407**	-0,16	0,494**	0,16	**-0,433****	0,08	1,00	
K	0,09	-0,389*	0,25	0,21	0,391**	**0,08**	0,22	0,452**	1,00

Da: Densidad aparente (Mg m^{-3}); **MOS**: Materia orgánica del suelo (%); **NH^+_4**: Amonio disponible (mg kg^{-1}); **P:** Fosforo disponible (mg kg^{-1}); **K^+:** Potasio Intercambiable (meq 100 g s^{-1}). ****** correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral). ***** La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

El fosforo disponible en las tres profundidades mostro relaciones medianas y no significativas con la materia orgánica del suelo. Los suelos de la amazonia ecuatoriana normalmente presentan valores muy bajos de fosforo disponible con rangos menores del límite critico de 10 mg kg^{-1} (Bravo et al., 2017).

La correlación del contenido de materia orgánica del suelo con el potasio intercambiable (K meq 100 g s^{-1}), mostró relaciones positivas y significativas en las tres profundidades. Con valores que estuvieron desde r= 0,08, r= 0,17 y r= 0,371**, indica que los residuos orgánicos retienen cierta cantidad de K^+ que puede ser una pequeña reserva para las plantas.

Por otra parte, es importante destacar, que 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.

CAPITULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La densidad aparente (Da) para las tres profundidades consideradas y en todos los SAFs con cacao, evidenciaron adecuadas condiciones estructurales, lo cual sugiere que no existe problemas de compactación ni de aireación y por el contrario se ve favorecida el desarrollo de raíces, la penetración de agua y por tanto una mayor posibilidad de que las plantas absorban nutrientes.
- El potencial de secuestro de carbono en el compartimiento suelo, fue mayor que el carbono proporcionado por la hojarasca y raíces, lo cual confirma la importancia del suelo como principal fuente de reserva de carbono y en donde los SAFs con cacao en la región amazónica se convierten en manejos adecuados que permiten potenciar el secuestro de carbono.
- La concentración de NH_4^+ arrojó valores con un rango de variación de medio a alto en el horizonte superficial y de valores medios en los horizontes subsuperficiales, mientras tanto que el contenido de fosforo disponible y potasio intercambiable, mostraron contenidos categorizados como bajos en todas las profundidades, de todos los SAFs con cacao, característicos de suelos amazónicos.
- La relación entre MOS y los macronutrientes NH_4, P, y K^{+1}, mostraron relaciones positivas y significativas que oscilaron de bajas a moderadas en las tres profundidades de los SAFs con cacao. Estas relaciones reflejan, en gran medida la naturaleza de los suelos amazónicos, modelados por los factores formadores de suelo.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda a que se realicen más análisis de suelos de SAFs de la Amazonia ecuatoriana, para poder determinar la variabilidad que existan entre los diferentes SAFs y realizar labores de conservación y mitigación ante el cambio climático.
- Mediante los análisis realizados de secuestro de carbono, se determinó que los SAFs con cacao de la Amazonia ecuatoriana, tienen un gran potencial de secuestro de C, por lo que se recomienda incentivar a las prácticas de reforestación forestal en los bosques con fines de retención de CO_2, beneficiando así al ambiente.

CAPÍTULO VI

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arevalo, E. (2011). *Identificación del cacao criollo como producto nativo de la biodiversidad de San Martín y evaluación de su potencialidad regional*. https://es.slideshare.net/RIICCHPeru/identificacin-de-cacao-nativosanmartn-por-enrique-arevaloperubiodiverso2011

Arevalo, E. (2014). *Dinámica de los indicadores de calidad del suelo en el manejo de sistemas agroforestales con cacao*. 132.

Artetxe, A., Del Hierro, O., Gartzia, N., Pinto, M., & Arias, A. (2016). *Sumideros de carbono de la comunidad autónoma del País Vasco* (Issue June). http://www.bibliotekak.euskadi.net/WebOpac

Báez, E. (2018). Producción y aporte de nutrientes en la hojarasca de las especies abarco (Cariniana piryformis M), teca (Tectona grandis L.f.) y cacao (Theobroma cacao L.) en un sistema agroforestal en los municipios de Rionegro, Santander y Muzo, Boyacá. *Photosynthetica*, *2*(1), 1–13. https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/1026/Producci%F3n y aporte de nutrientes en la hojarasca de las especies abarco,.pdf?sequence=1

Blake, G. R. (2015). *Bulk Density* (pp. 374–390). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c30

Blake, J., & Hartge, L. (1986). Methods of Soil Analysis. *Soil Science*, *100*(5), 376. https://doi.org/10.1097/00010694-196511000-00020

Bravo, C., Ramírez, A., Marín, H., Torres, B., Alemán, R., Torres, R., Navarrete, H., & Changoluisa, D. (2017). Factores asociados a la fertilidad del suelo en diferentes usos de la tierra de la Región Amazónica Ecuatoriana. *Revista Electronica de Veterinaria*, *18*(11).

Carvajal, R. R. (1997). *PROPIEDADES FÍSICAS QUÍMICAS y BIOLÓGICAS DE LOS SUELOS*. http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6636/1/083.pdf

Cedeño, D., & Macias, D. (2018). *VALORACIÓN DE LA CAPTACIÓN DE CARBONO PARA LA CONSERVACIÓN AMBIENTAL EN EL SECTOR LA PITA DE LA PARROQUIA QUIROGA*. http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/33

Chang, J. V., Torres, C. V., Moran, D. P., Rodríguez, W. M., Véliz, J. M., & Remache, R. R. (2014). Atributos físicos-químicos y sensoriAles de lAs AlmendrAs de quince clones de cAcAo nAcionAl. *Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Pichilingue*, *7*(2), 21–34. https://www.uteq.edu.ec/revistacyt/publico/archivos/C2_en construccion.pdf

De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, *41*(3), 393–408. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7

Díaz, G. (2012). CIENCIA Y SOCIEDAD Volumen XXXVII, Número 2 Abril-Junio 2012 EL CAMBIO CLIMÁTICO. In *Ciencia y Sociedad: Vol. XXXVII* (Issue 2).

Gardini, E. A. (2004). Cacao: manejo integrado del cultivo y transferencia de tecnología en la amazonía peruana. In *ICT* (pp. 99–101). https://books.google.com.ec/books/about/Cacao.html?id=IVlXGwAACAAJ&redir_esc=y

Gayoso, J., & Alarcon, D. (1999). *Guía de conservación de Suelos Forestales*. file:///F:/6to/5 to/conservacion de suelos/gcsuelo.pdf

Gore, A. (2007). *Al Gore - Nobel Lecture*. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.nobelprize.org/prizes/peace/2007/gore/26118-al-gore-nobel-lecture-2007/

Grijalva, O. ., Limongi, R. ., Arevalo Vizcaino, V. ., Vera, R. ., Quiroz, J. ., & Cerda, A. . (2011). *Mejoramiento de Chakras. Una alternativa de Sistema Integrado con cacao, cultivos anuales y árboles en el alto Napo.*

https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/325/4/iniapscbd372.pdf

Harrison, J. (2003). *The Carbon Cycle*. Visionlearning. https://www.visionlearning.com/en/library/Earth-Science/6/The-Carbon-Cycle/95

IPCC. (2001). *CAMBIO CLIMÁTICO 2001*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/TAR_syrfull_es.pdf

IPCC, Intergubernamental, G., & Sobre, D. E. E. (1996). Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático. In *Documento técnico I del IPCC*. https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-I-sp.pdf

Jiménez, F., Muschler, R., & Köpsell, E. (2001). *Funciones y aplicaciones de sistemas agroforestales*. http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/2202/Funciones_y_aplicaciones_de_sistemas_agroforestales.pdf?sequence=1&isAllowed=y

León, G. (2011). *Edafología 1*. www.espaciograficosa.com

Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., & Oyonarte, C. (2020). *Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador*. *29*(2), 1–13.

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. (2019). Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. *Agroforestry Systems*, *93*(1), 199–211. https://doi.org/10.1007/s10457-018-0259-x

Luís, B., & Lecha, E. (2010). *El cambio climático: sus orígenes, los impactos potenciales, las medidas de mitigación y adaptación más apropiadas para Cuba*. http://www.veterinaria.org/revistas/redvet-http://revista.veterinaria.orgVol.11,Nº03B,Marzo/2010-http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n030310B.html

Martínez, H., Juan Pablo Fuentes, E., & Edmundo Acevedo, H. (2008). Carbono orgánico y

propiedades del suelo. *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutricion Vegetal*, *8*(1), 68–96. https://doi.org/10.4067/s0718-27912008000100006

Mendieta, M., López, Lester, R., Rocha, M., Managua, N., Marcia, López, M., Lester, & Molina, R. R. (2007). *UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA " Por un Desarrollo Agrario Integral y Sostenible "*.

Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., & Eibl, B. (2015). *SISTEMAS AGROFORESTALES FUNCIONES PRODUCTIVAS, SOCIOECONÓMICAS Y AMBIENTALES* (Issue 402). https://www.academia.edu/13565833/Montagini_F_2015_Sistemas_Agroforestales

Mora, J., Silva, A., & Escobar, N. (2019). *Bioindicadores en suelos y abonos orgánicos*. file:///C:/Users/DIEGO ALLAUCA/Downloads/Bioindicadores de suelos (2).pdf

Nair, P. K. R. (1993). An Introduction to Agroforestry. *Outlook on Agriculture*, *23*(4), 306–306. https://doi.org/10.1177/003072709402300413

Nair, P. K. R., Kumar, B. M., & Nair, V. D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *172*(1), 10–23. https://doi.org/10.1002/jpln.200800030

Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (2018). *Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter* (pp. 961–1010). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34

Ordóñez, J. A., & Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. In *Madera y Bosques* (Vol. 7, Issue 1).

Ortiz, Á., Riascos, L., & Somarriba, E. (2008). *Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (Theobroma cacao) y laurel (Cordia alliodora).* https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5764/Almacenamiento_y_tasas_de_fijacion_de_biomasa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Perez, L. V. (2018). Facultad de ciencias ambientales carrera profesional de ingeniería ambiental. *Universidad Científica Del Sur. Facultad de Ciencias Ambientales. Ingeniería Ambiental.*, 1–126. http://repositorio.cientifica.edu.pe:8080/handle/UCS/710

Rodríguez-Larramendi, L. A., Guevara-Hernández, F., Reyes-Muro, L., Ovando-Cruz, J., Nahed-Toral, J., Prado-López, M., & Campos Saldaña, R. A. (2017). Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *7*(37), 77–94. https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i37.53

Rucks, L., Garcia, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf

Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T., Mavisoy, H., Ávila, G., Alvarado, E., Poveda, V., Astorga, C., Say, E., & Deheuvels, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *173*, 46–57. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.013

Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Fisiologia Vegetal Volumen II*. http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FisiologiaVegetalVolumenII espanhol.pdf

Torres, B., Vasseur, L., López, R., Lozano, P., García, Y., Arteaga, Y., Bravo, C., Barba, C., & 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 2019 94:4*, *94*(4), 1235–1245. https://doi.org/10.1007/S10457-018-00342-8

Torres, J., & Guevara, A. (2002). El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica*, *63*, 40–59. https://www.redalyc.org/pdf/539/53906303.pdf

Velasquez, J., & Gálvez, E. (2017). *CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO RELACIONADO CON LA TOTORA "Schoenoplectus Californicus" DEL ÁREA DE CONSERVACIÓN REGIONAL ALBUFERA DE MEDIO MUNDO-VÉGUETA 2017*. http://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/UNJFSC/3622/INFORME FINAL DE TESIS - jorge velasquez .pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vera, S., Lozano, Z., Lobo, D., Bravo, C., Hernández, R., & 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. *Revista de La Facultad de Agronomía*, *38*(2), 63. https://www.academia.edu/11488901/Propiedades_físicas_del_suelo_y_distribución_de_raíces_de_maíz_bajo_diferentes_tipos_de_cobertura_y_fertilización_en_un_sistema_conservacionista_cereal_ganado

Villa, P. M., Martins, S. V., Delgado Monsanto, L., de Oliveira Neto, S. N., & Mota Cancio, N. (2015). La agroforestería como estrategia para la recuperación y conservación de reservas de carbono en bosques de la Amazonía. *Bosque*, *36*(3), 347–356. https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300002