

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA



NOMBRE DE LA CARRERA:

INGENIERÍA AMBIENTAL

DENOMINACIÓN DEL TÍTULO A OBTENER:

INGENIERO AMBIENTAL

TÍTULO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

CALIDAD DEL SUELO Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN UNIDADES DE PRODUCCIÓN CON *Theobroma cacao* EN LA PROVINCIA DE NAPO

AUTORES:

GÉNESIS GABRIELA FERNÁNDEZ CEDEÑO

HAMILTON LEONEL AZOGUE AZOGUE

DIRECTOR DEL PROYECTO:

Dr. CARLOS ALFREDO BRAVO MEDINA. PhD

PUYO – ECUADOR

2019 - 2020

DLECARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Por medio del presente nosotros, Azogue Azogue Hamilton Leonel con C.I 1600658445 y Fernández Cedeño Génesis Gabriela con C.I 2200070684, declaramos ser los autores del trabajo titulado: **“CALIDAD DEL SUELO Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN UNIDADES DE PRODUCCIÓN CON *Theobroma cacao* EN LA PROVINCIA DE NAPO”**, a la vez cedemos los derechos de autor a la Universidad Estatal Amazónica, para que pueda realizar publicaciones sobre la misma de la forma que crea conveniente, así como su almacenamiento tanto en medios físicos como electrónicos.

AUTORES

Azogue Azogue Hamilton Leonel

C.I: 1600658445

Fernández Cedeño Génesis Gabriela

C.I: 2200070684

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Certifico que el siguiente trabajo fue realizado por el **Sr. Hamilton Leonel Azogue Azogue** y la **Srta. Génesis Gabriela Fernández Cedeño**, egresados de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Estatal Amazónica, bajo mi supervisión en calidad de director del proyecto de titulación: **“CALIDAD DEL SUELO Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN UNIDADES DE PRODUCCIÓN CON *Theobroma cacao* EN LA PROVINCIA DE NAPO”**, previo a la obtención del título de Ingenieros Ambientales.

Dr. Carlos Alfredo Bravo Medina, PhD.

1757015373

Director del proyecto

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El proyecto de investigación y desarrollo, titulado: “**CALIDAD DEL SUELO Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN UNIDADES DE PRODUCCIÓN CON *Theobroma cacao* EN LA PROVINCIA DE NAPO**”, fue aprobado por los siguientes miembros del tribunal.

Dr. Yoel Rodríguez
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

MSc. Fernando Cofre
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

MSc. Edgar Chicaiza
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

AGRADECIMIENTO

*Agradezco a **Dios** por darme la vida, por darme la oportunidad de terminar mis estudios en esta prestigiosa universidad, gracias a la Universidad Estatal Amazónica por permitirme convertir en un profesional apasionado por la carrera de Ingeniería Ambiental, agradezco a mi tutor en conjunto con su grupo de trabajo y a la ingeniera **Daysi Changoluisa** quien nos brindó sus conocimientos en este proceso de trabajo, gracias a cada maestro que en todo el transcurso de mi vida universitaria supo entregar su sabiduría para mi formación profesional; como recuerdo y prueba viviente en la historia; esta tesis perdurará dentro de los conocimientos y desarrollo de las generaciones futuras.*

Hamilton Leonel Azogue Azogue

*Agradezco a **Dios** por permitirme cumplir una meta más de las que me he propuesto en la vida y por no dejarme desfallecer ante cualquier adversidad; a mis queridos padres **Manuel** y **Jesús**, quienes me han brindado todo su apoyo y amor incondicional en cada trayecto de este arduo camino, a mi adorada hermana **Esthefani** por sus innumerables manifestaciones de cariño las cuales me llenan de felicidad. Mi más sincero agradecimiento a la Universidad Estatal Amazónica por permitirme llegar a ser profesional en lo que más me apasiona; a mis profesores quienes entregaron con transparencia sus conocimientos y su sabiduría en mí a lo largo de la carrera y en especial al **Dr. Carlos Bravo** por su paciencia e incalculable guía para el desarrollo de la presente investigación; a todos aquellos que me ayudaron en la concepción de este trabajo, y hoy comparten la alegría de ver concluir con éxito el mismo.*

Génesis Gabriela Fernández Cedeño

DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a **Dios** por estar siempre a mi lado, haberme guiado por un buen camino en todo el transcurso de mi vida universitaria y sobre todo le agradezco por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional. También va dedicado a la memoria de mi padre **Iván** a quien jure que nunca me dejaría vencer hasta convertirme en una persona profesional; hoy sé que donde quiera que él se encuentre estará orgulloso de mi por cumplir uno de sus sueños, dedico este trabajo a mi madre **Yolanda** quien gracias a su amor incondicional me apoyó en todo momento y medio su ejemplo de ser una persona trabajadora, honrada y humilde. A mis hermanas **Irene** y **Liliana** por estar en todo momento motivándome para crecer como persona, finalmente dedico a mi hijo **Liam** quien ha sido uno de los motivos para no rendirme y siempre seguir superándome.*

Hamilton Leonel Azogue Azogue

*Este trabajo va dedicado a mi padre celestial por acompañarme en cada paso de mi vida y por ser mi fortaleza en los momentos de mayor dificultad al encontrarme lejos de casa, a mis amorosos padres por haberme brindado su confianza y por su constante sacrificio el cual me ha permitido tener una excelente educación y así culminar con éxito mis estudios, a mi hermana por estar a mi lado en cada momento de alegrías como también de tristezas y al más pequeño de la familia mi **nanito**, ya que con su carita feliz me recargaba de energía.*

Génesis Gabriela Fernández Cedeño

RESUMEN

El avance de la frontera agrícola en la Amazonía ecuatoriana se ha incrementado progresivamente, siendo la deforestación una de las principales causas que contribuye a la afectación de la calidad del suelo. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue caracterizar la calidad del suelo y los servicios ecosistémicos mediante diferentes sistemas agroforestales con *Theobroma cacao* en la Provincia de Napo. Para alcanzar dicho objetivo se procedió a realizar un muestreo sistemático en diferentes profundidades de 0-10 cm y 10-30 cm; se seleccionó un conjunto mínimo de indicadores; usando un análisis de componentes principales y matrices de correlación de Pearson. Se seleccionaron solo los indicadores con mayor valor de ponderación en la CP con un coeficiente de correlación $\leq 0,7$. Se analizaron distintos compartimientos como biomasa aérea, hojarasca y suelos. Las unidades de producción con cacao desde una perspectiva ambiental presentan valores adecuados en todos los atributos físicos y biológicos. En general, los atributos químicos mostraron un pH ácido, alto contenido de aluminio intercambiable, baja disponibilidad de nutrientes y alto contenido de materia orgánica. Los conjuntos mínimos de indicadores de la calidad del suelo seleccionados fueron MO, Nt, Da, Pt, K, Ca. Los resultados reflejaron que independientemente de las unidades de producción el ICS fue significativamente mayor ($P \leq 0.05$) en el horizonte superficial. De la comparación de las UPAs cacao, el ICS varió de bajo a moderado en ambas profundidades con mayores índices en las fincas localizadas en Tena, lo cual está asociado a la mayor concentración de MO. La cantidad de carbono almacenado fue muy variada obteniéndose valores de secuestro de carbono que oscilaron entre 4 a 200 Mg C Ha⁻¹ con mayor valor en F1 SV-TENA F10 MM-ARCHI y F13 MM-AROSE. Tales resultados esta asociados a una mayor acumulación de biomasa, lo que a su vez se tradujo en una menor tasa de emisión de CO₂ a la atmosfera, así como una mayor valoración económica (VET CO₂ equivalente).

Palabras claves: Amazonia ecuatoriana, Índice de calidad de suelo, Servicios ecosistémicos, Unidades de producción.

ABSTRACT

The advance of the agricultural frontier in the Ecuadorian Amazon has progressively increased, with deforestation being one of the main causes that contributes to the impact of soil quality. In this context, the objective of this work was to characterize soil quality and ecosystem services through different agroforestry systems with *Theobroma cacao* in the Province of Napo. To achieve this objective, systematic sampling was carried out at different depths of 0-10 cm and 10-30 cm; a minimum set of indicators was selected; using an analysis of principal components and correlation matrices of Pearson's. Only the indicators with the highest weighting value in the CP with a correlation coefficient ≤ 0.7 were selected. Different compartments such as aerial biomass, litter and soil were analyzed. Cocoa production units from an environmental perspective have adequate values in all physical and biological attributes. In general, chemical attributes showed an acidic pH, high exchangeable aluminum content, low nutrient availability and high organic matter content. The minimum sets of soil quality indicators selected were MO, Nt, Da, Pt, K, Ca. The results showed that regardless of the units of production the ICS was significantly higher ($P \leq 0.05$) on the surface horizon. From the comparison of the cocoa UPAs, the ICS varied from low to moderate in both depths with higher indices in the farms located in Tena, which is associated with the highest concentration of MO. The amount of carbon stored was very varied, obtaining carbon sequestration values that ranged from 4 to 200 Mg C Ha⁻¹ with greater value in F1 SV-TENA, F10 MM-ARCHI and F13 MM-AROSE. Such results are associated with a greater accumulation of biomass, which in turn resulted in a lower CO₂ emission rate to the atmosphere, as well as a higher economic valuation (VET CO₂ equivalent).

Keywords: Ecuadorian Amazon, Soil quality index, Ecosystem services, Production units.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. OBJETIVOS:.....	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO II.....	4
2. ANTECEDENTES	4
2.1. BASES TEÓRICAS	5
2.1.1. Suelo.....	5
2.1.2. Impactos de los usos de la tierra sobre la calidad del suelo	5
2.1.3. Calidad del suelo en sistemas agroforestales con cacao.....	5
2.1.4. Indicadores de calidad del suelo	6
2.1.4.1. Indicadores físicos	6
2.1.4.2. Indicadores químicos.....	6
2.1.4.3. Indicadores biológicos.....	6
2.1.5. Servicios ecosistémicos	6
2.1.6. Servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales con cacao	6
2.1.7. Los servicios ecosistémicos y su importancia en la agricultura	7
2.1.8. Clasificación de los servicios ecosistémicos	7
2.1.9. Impacto de la producción del cacao en los servicios ecosistémicos.....	8
2.1.10. Valoración económica ambiental	8
2.1.11. Métodos de valoración de servicios ecosistémicos	8
2.1.12. Inventario forestal para determinación de carbono	9
2.1.13. El almacenamiento de Carbono en distintos componentes (Biomasa, suelo, Hojarasca).....	9
CAPÍTULO III.....	10

3.	MÉTODOLÓGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	10
3.1.	LOCALIZACIÓN	10
3.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	11
3.3.	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	11
3.3.1.	Esquema de muestreo de campo.....	11
3.3.2.	Análisis Físicos.....	12
3.3.3.	Análisis Químicos y Biológicos	13
3.3.4.	Evaluación del índice de calidad del suelo	13
3.3.5.	Secuestro de carbono en las distintas unidades de producción de cacao.....	14
3.3.5.1.	Carbono orgánico del suelo	14
3.3.5.2.	Carbono de la biomasa aérea	14
3.3.5.3.	Carbono de la vegetación no arbórea (Hojarasca).....	15
3.3.5.4.	Valoración económica de fertilidad del suelo y CO ₂ -equi como servicios ecosistémicos.....	15
3.4.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	16
3.4.1.	Diseño experimental	16
3.4.2.	Análisis estadísticos.....	16
3.5.	MATERIALES	17
	CAPÍTULO IV	18
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	18
4.1.	Indicadores físicos del suelo en unidades de producción con cacao	18
4.2.	Indicadores químicos del suelo en unidades de producción con cacao	21
4.3.	Indicadores biológicos del suelo en unidades de producción con cacao	26
4.4.	Evaluación del índice de la calidad del suelo	27
4.5.	Matriz de correlación.....	29
4.5.1.	Porosidad total vs porosidad de retención	29
4.5.2.	Densidad aparente, materia orgánica y nitrógeno total	29
4.5.3.	Magnesio vs Calcio	30
4.6.	Secuestro de carbono en distintos compartimentos (biomasa aérea, hojarasca y suelo) para las 16 fincas consideradas.....	32
4.6.1.	Valor económico total CO ₂ equi de los tres compartimentos.....	32

4.6.2. Valoración económica de fertilidad del suelo y CO ₂ equi como servicio ecosistémico bajo las unidades de producción de cacao.....	36
CAPÍTULO V.....	39
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
5.1. Conclusiones.....	39
5.2. Recomendaciones.....	40
CAPÍTULO VI.....	41
6. BIBLIOGRAFÍA.....	41
CAPÍTULO VII.....	49
7. ANEXOS.....	49

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas geográficas de las unidades de producción de cacao.....	11
Tabla 2. Materiales y equipos utilizados en la investigación.	17
Tabla 3. Valores promedios de propiedades físicas de calidad del suelo en unidades de producción con cacao de la Provincia de Napo.....	19
Tabla 4. Valores promedios de propiedades químicas de calidad del suelo de profundidad (0-10cm).	22
Tabla 5. Valores promedios de propiedades químicas de calidad del suelo de profundidad (10-30cm).	23
Tabla 6. Valores promedios de propiedades biológicas de calidad del suelo de profundidad (0-10cm).	27
Tabla 7. Análisis de componentes principales de indicadores de la calidad del suelo.....	28
Tabla 8. Índice de la calidad de suelo.....	29
Tabla 9. Coeficiente de correlación de las propiedades del suelo en unidades de producción con cacao.	31
Tabla 10. Secuestro de carbono y su valor económico total de Dióxido de carbono equivalente de los distintos compartimentos (biomasa aérea, hojarasca y suelo).	33
Tabla 11. Valoración económica de fertilidad del suelo y CO ₂ equi como servicio ecosistémico bajo las unidades de producción de cacao.	37

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de las zonas del estudio en la Provincia de Napo.....	10
Figura 2. Esquema de muestreo sistemático para el estudio ambiental en cada uso de tierra seleccionado.....	12
Figura 3. Valor económico total CO ₂ equivalente de los tres compartimentos (biomasa aérea, hojarasca y suelo).....	35

TABLA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Función sigmoideal	13
Ecuación 2. Índice de la calidad del suelo	14
Ecuación 3. Carbono orgánico del suelo	14
Ecuación 4. Carbono de la biomasa aérea	15
Ecuación 5. Carbono de la vegetación no arbórea (hojarasca).....	15

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

La Región Amazónica Ecuatoriana alberga una gran cantidad de diversidad biológica, abundancia de recursos naturales de modo que, el ciclo del carbono desempeña un papel primordial para la ecología de la Tierra (Bravo *et al.* 2017a), el componente vegetal está constituido de extensa variedad de biomasa que van desde estratos herbáceos hasta estratos arbóreos y a su vez, el recurso suelo se considera indispensable para el desarrollo de la vida convirtiéndolo en objeto de estudio. En esta región la producción de cacao es uno de los principales cultivos que se llevan a cabo mediante sistemas sostenibles, actividad agrícola realizada por las provincias de la zona noreste como Sucumbíos, Orellana y Napo. Paredes (2009) menciona que, estos cultivos han tenido una evolución rápida con el fomento de estrategias agroecológicas favoreciendo económicamente a los productores como colonos e indígenas.

Estos tipos de sistemas aportan grandes proporciones de biomasa como también de materia orgánica y protegen permanentemente al suelo a su vez mejora los atributos físicos. Los suelos de la Provincia de Napo se caracterizan por ser de buen drenaje, excelente retención de humedad y materia orgánica, pertenecen al orden Inceptisol seguidos por Entisoles, Histosoles y Molisoles en porciones pequeñas (Bravo *et al.*, 2015). El análisis de la calidad de suelos permite detectar cambios en el suelo, especialmente en la parte biológica, provee los aspectos básicos para evaluar la sostenibilidad del manejo del sistema y tiene relación directa con la producción sostenible; por tales razones, la calidad del suelo es el indicador primario del manejo sostenible de suelos (Cerdeña, 2008).

Desde la perspectiva ecológica los recursos naturales entran a las sociedades humanas como bienes o servicios, según cumplan una función. Valorar los servicios ecosistémicos puede ayudar a tomar decisiones sobre distintos aspectos como son el ordenamiento territorial, evaluaciones ambientales estratégicas, compensaciones por carbono y pago por servicios ambientales (Caro y Torres, 2015; Pacha, 2014).

Esta investigación tiene la finalidad de evaluar los suelos mediante la determinación de los atributos físicos, químicos y biológicos; busca determinar el índice de calidad del suelo, para finalizar pretende valorar los servicios ecosistémicos de regulación y soporte en las unidades de producción de cacao.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN

La deforestación en el Ecuador continental entre 1990 y 2008 condujo a la pérdida de 19000 km² de bosque natural en el país. La cobertura de bosque disminuyó de 69.6 % de la superficie forestal potencial del país en 1990 a 63.5 % en el año 2000, y a 60.7 % en el 2008. La mayor parte, cerca del 70 %, fue deforestada en la década de los 1990, con una deforestación anual neta promedio de 1291.5 km². La deforestación anual neta entre el 2000 y el 2008 fue 753.9 km²; 42 % (Sierra, 2013). La región amazónica representa cerca del 50 % del territorio que necesitan ser conservados y manejados con criterios de sustentabilidad, se ha venido observando que la expansión de la frontera agrícola representa el mayor impacto socio ambiental a la Amazonía (Bravo *et al.*, 2015).

En la Provincia de Napo el área deforestada neta anual 2000-2008 fue de 20.5 Km², tomando en cuenta que la deforestación se incrementa en las áreas de mayor accesibilidad, las que tienen excelentes condiciones para suministrar dichos mercados, pero baja en las áreas alejadas donde no existe un acceso. Sin duda alguna la erosión hídrica es la más importante causa de erosión de tierras (Peralta, 2016).

En este caso, la agricultura en la Amazonía ecuatoriana ha venido creciendo y a causa de esto la expansión de tierras deforestadas ha incrementado significativamente. Siendo así la deforestación una de las causas por lo cual el suelo llega a erosionarse debido a que en la amazonia ecuatoriana existe una esporádica precipitación. Mediante el conocimiento de la deforestación producto de las actividades del ser humano como consecuencia tenemos la pérdida de los servicios ecosistémicos entre los que podemos mencionar es la pérdida de la biomasa, reducción de la captura de carbono, aceleración de la descomposición de la materia, entre otros. Contrarrestando a esta problemática que exige evaluar los impactos que se generan a partir del cambio de uso de tierras con distintos sistemas agroforestales tanto para la calidad del suelo como para el aprovisionamiento de los servicios ecosistémicos (Villa *et al.*, 2015).

Por lo tanto, la importancia de esta investigación es conocer los beneficios ecológicos que contrae la aplicación de manejos agroecológicos y saberes ancestrales en las unidades de producción de *Theobroma cacao*, al igual que promover el aprovechamiento sostenible del suelo y por ende contribuir a la resiliencia del cambio climático.

Esta investigación permite desarrollar recomendaciones en beneficio a la gestión sostenible del suelo en sistemas agroforestales, mismos que son base fundamental para la economía de los agricultores (FAO, 2015). Por todo lo anteriormente expuesto se pretende evaluar la calidad del suelo y los servicios ecosistémicos de regulación y soporte en unidades de producción con cacao (*Theobroma cacao*) en la Provincia de Napo.

Para dar una contestación a estos problemas, en los últimos años se ha llevado muchos estudios realizados referente a estos temas como es el proyecto sobre la “evaluación de la calidad de suelo bajo distintos usos de la tierra mediante parámetros ambientales en el Cantón Carlos Julio Arosemena Tola, Provincia de Napo” (Pintado, 2018). Así como también el proyecto de “servicios ecosistémicos del recurso suelo en el sistema de producción con papa china (*Colocasia esculenta*) y el bosque del sector Cajabamba Provincia de Pastaza” (Álvarez, 2019).

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Bajo esta perspectiva la formulación del problema es ¿Cómo el cambio de uso de la tierra de Bosque a sistemas agroforestales con *Theobroma cacao* afecta la calidad del suelo y los servicios ecosistémicos en la Provincia de Napo?

1.3. OBJETIVOS:

1.3.1. Objetivo general

- Caracterizar la calidad del suelo y los servicios ecosistémicos mediante diferentes sistemas agroforestales con *Theobroma cacao* en la Provincia de Napo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físicas, químicas y biológicas y obtener el índice de calidad del suelo para las unidades de producción con *Theobroma cacao* en la Provincia de Napo.
- Valorar los servicios ecosistémicos de soporte (fertilidad) y regulación (secuestro de carbono) que proveen en las unidades de producción con *Theobroma cacao* en la provincia de Napo.

CAPÍTULO II

2. ANTECEDENTES

Hasta mediados del siglo XX la destrucción de los bosques en el mundo se producía en las zonas templadas, pero en las últimas décadas los bosques tropicales han sufrido una tala masiva, alrededor de 20 millones de hectáreas son alteradas cada año, si la deforestación continua los bosques tropicales desaparecerán en el transcurso de los años (Butler y Laurance, 2008).

Los bosques de la Amazonía ecuatoriana son considerados almacenes de carbono, al contribuir con la mitigación de los gases de efecto invernadero. La capacidad de almacenamiento y captura depende de la vegetación, el clima, la humedad, las especies arbóreas, y la densidad del bosque, siendo los estratos arbóreo y herbáceo los que presentan la mayor cantidad de biomasa y de carbono (Ordóñez-Díaz *et al.*, 2015).

En los últimos años, la Amazonía ha venido experimentando altas tasas de deforestación y cambios de usos del suelo, afectando la biodiversidad, el suelo, el agua y la disminución o pérdida de los ecosistemas (Torres *et al.*, 2014). Contribuyendo con el Ministerio del Ambiente (MAE 2016), el cual manifiesta que, del total de las áreas pasaron de bosque a no bosque durante el periodo 2008-2014; el 65% son pastizales, el 12% son mosaicos agropecuarios, 4% cacao, 3% palma africana 3% maíz duro, 2% café y más de 10% en otras características de cobertura.

En la Provincia de Napo con lo que respecta a los procesos de degradación de recursos naturales y sus causas, hace referencia a que las actividades agropecuarias y extractivas afectan a los recursos naturales. A nivel cantonal se manifiesta que la superficie del territorio deforestado es 12.733,14 Ha (3,27%), el incremento de la frontera agrícola es de 9870.651 Ha (2,53%) y la expansión de las zonas urbanas tiene el valor de 204.1 Ha (0,05%). Para la parroquia de Puerto Napo, se ha detectado que la primera causa de degradación es el desplazamiento de la frontera agrícola, puesto que, al estar cerca de la cabecera cantonal, se ha convertido en el huerto local (Gobierno Parroquial Rural de Puerto, 2015).

2.1. BASES TEÓRICAS

2.1.1. Suelo

El suelo es la superficie de la corteza terrestre donde se desarrolla la vida, es un componente muy complejo pues agentes bióticos y edafoclimáticos intervienen en el desarrollo de sus propiedades, además cumple un papel fundamental con respecto al control de emisiones de CO₂ y del cambio climático (Loaiza, 2011). Los suelos amazónicos se caracterizan por tener gran acidez generando niveles bajos de elementos de nutrición y contribuyen la presencia de oligoelementos tóxicos para las plantas (Martín y Pérez, 2009).

De acuerdo a estudios realizados por Bravo *et al.*, (2017a) menciona que los suelos de la Provincia de Napo pertenecientes al orden Inceptisol contienen altos porcentajes de materiales de limo y arcilla permitiendo una mayor susceptibilidad a diversos procesos de degradación física; por lo general varían de color, en el horizonte superficial predominan el negro y marrón muy oscuro mientras que en el horizonte subsuperficial resalta los colores pardo, rojizos y marrón claro.

2.1.2. Impactos de los usos de la tierra sobre la calidad del suelo

El uso de tierras es la intervención antrópica sobre el recurso suelo dónde se ve expuesto como un sistema estratégico de producción pero debido a prácticas inadecuadas y al uso excesivo en actividades como la expansión de la frontera agrícola y sobrepastoreo de ganado (Rico y Rico, 2014). Los impactos del suelo que se podrían generar se destacan la fragmentación, compactación, degradación biológica, pérdida de nutrientes y por ende riesgos ambientales.

2.1.3. Calidad del suelo en sistemas agroforestales con cacao

Estudios de la calidad del suelo realizados en la amazonia ecuatoriana revelan que de acuerdo al tipo de arreglo forestal que se sustituya por áreas de bosque como por ejemplo cacao, café o caucho el daño ocasionado al suelo es mínimo (Bravo *et al.*, 2017a).

Acorde con Cerda (2008) estudios aseguran que sistemas agroforestales disminuyen el empobrecimiento del suelo, ayudan a reciclar mayor cantidad de biomasa y por ende mejorar la calidad del suelo, misma que se analizó mediante varios indicadores pero se enfatizó en la biomasa microbiana la cual en sistemas agroforestales con cacao y laurel tienen mayores valores de materia orgánica del suelo y gran cantidad de hojarasca que una plantación de plátano monocultivo convencional.

2.1.4. Indicadores de calidad del suelo

Constituyen herramientas accesibles de medición que recopilan las características, propiedades y procesos del suelo, por tanto, pueden ser cualitativos o cuantitativos. También estos indicadores son sensibles a perturbaciones lo cual permite evaluar el funcionamiento del suelo (Calderón *et al.*, 2002; García *et al.*, 2012).

2.1.4.1. Indicadores físicos

Las propiedades físicas como (textura, densidad aparente, tasa de infiltración, porosidad total, retención de humedad) son indispensables para la evaluación de la calidad del suelo tanto que se consideran excelentes indicadores (Calderón *et al.*, 2002).

2.1.4.2. Indicadores químicos

Las propiedades químicas como (pH, conductividad eléctrica, fósforo disponible, nitrógeno total, capacidad de intercambio catiónico) comprenden las condiciones que ocasionan daño a la relación que tiene el suelo y la planta (García *et al.*, 2012).

2.1.4.3. Indicadores biológicos

Las propiedades biológicas como (carbono orgánico, macrofauna, N mineralizable) agrupan factores que afectan la calidad del suelo; la biomasa microbiana sirve para identificar a tiempo cambios en la dinámica de la materia orgánica (García *et al.*, 2012).

2.1.5. Servicios ecosistémicos

Según Balvanera (2012) define los servicios ecosistémicos (SE) como los beneficios que proveen los ecosistemas a los seres humanos. El concepto de ecosistema surgió en la indagación por entender las interacciones entre los seres bióticos y abióticos.

2.1.6. Servicios ecosistémicos en sistemas agroforestales con cacao

Los sistemas agroforestales (SAF) son una forma de uso del suelo en donde leñosas perennes (árboles y arbustos) son utilizadas en asociación con cultivos y/o animales; el propósito es diversificar y optimizar la producción sosteniblemente (Moreira y Castro, 2017). Estudios realizados en la Amazonia Ecuatoriana han demostrado que el SE es favorable en la agricultura gracias a la ejecución del sistema agroforestal. Por ejemplo, SE del recurso suelo en el sistema de producción con papa china (*Colocasia esculenta*) y el bosque del sector Cajabamba Provincia de Pastaza; demuestra que los SE tienen una buena valoración económica y que puede ser aprovechada por los agricultores e instituciones para acceder a un pago de servicios ambiental por la conservación del suelo y ayudar a desarrollar un ecosistema sostenible (Álvarez, 2019).

De acuerdo a un estudio realizado sobre sistemas agroforestales adaptación y mitigación en la producción de banano y cacao mencionan que la selección de especies de sombra en cacaotales busca beneficios socioeconómicos y obtención de productos rentables (madera, fruta, leña), baja competencia con el cultivo, fácil manejo, que proporcione poca sombra al cultivo, sin problemas de plagas o enfermedades y que no erosione el suelo (Ortiz, 2006; Vega, 2005; Schroth, 2003). Así mismo, los árboles que prestan un servicio ecosistémico como sombra contribuyen a: modificar el régimen de luz (tanto en calidad como en cantidad), la temperatura, humedad y movimiento del aire dentro de la plantación, que afectan directamente a la fotosíntesis, crecimiento y producción de cacao (Almeida y Valle, 2007; Zuidema *et al.*, 2005).

También favorecen o dificultan la dinámica poblacional y la incidencia de plagas y enfermedades que reducen los rendimientos tanto de cacao y sus especies acompañantes (Schroth *et al.*, 2000); producen cantidades significativas de MO, reciclaje de nutrientes y ayudan a mantener la fertilidad natural del lugar (Hartemink, 2005). Bajo este contexto, resulta importante en cultivos como el cacao la producción de bienes (madera, leña, frutos, resinas, medicamentos, etc.) y servicios (los valores estéticos y culturales, la conservación de la biodiversidad, el suelo y el agua, secuestro de carbono atmosférico etc.) para los hogares y la sociedad global (Bentley *et al.*, 2004; Rice y Greenberg, 2000; Ruf y Schroth, 2004; Schroth y Harvey, 2007).

2.1.7. Los servicios ecosistémicos y su importancia en la agricultura

La biodiversidad presente en el ecosistema proporciona varios servicios como la retención del carbono, ayuda a regular las plagas, contribuye en el ciclo de los nutrientes, normaliza la polinización y mantiene la producción agrícola. Tener los ecosistemas saludables cerciorará la resistencia de la agricultura, a medida que se intensifica para satisfacer la demanda creciente de alimentos (Boñón, 2013).

2.1.8. Clasificación de los servicios ecosistémicos

Al respecto, se han señalado cuatro tipos de servicios ecosistémicos relevantes: los servicios de soporte, son necesarios para que sea posible la generación de otros servicios ecosistémicos; los servicios de aprovisionamiento representados por los productos obtenidos de los ecosistemas como alimentos, agua limpia, combustibles y otros; los servicios culturales que constituyen los beneficios no materiales que las personas obtienen de los ecosistemas por medio del enriquecimiento espiritual, reflexión, recreación.

Finalmente el servicio de regulación, juega un papel importante en la regulación climática, la calidad del aire, controla las enfermedades, los procesos ecosistémicos, mantiene las cuencas hídricas en excelentes condiciones, controla la erosión y contribuye en la polinización (Garzón, 2016).

2.1.9. Impacto de la producción del cacao en los servicios ecosistémicos

Bolívar, Toro, Sandoval y López (2009), mencionan que las actividades agrícolas someten a los ecosistemas a una gran presión antrópica, lo que supone un desequilibrio en la captura de los SE pero el cultivo del cacao influye positivamente en la captura y provisión de beneficios de SE puesto que el cacao es considerado como un cultivo de importancia tanto ecológica como ambiental, por su capacidad de generar materia orgánica, de regular el micro clima, por su facilidad de intercambiar nutrientes, evitar la erosión y promover la actividad macro y micro biótica del suelo.

2.1.10. Valoración económica ambiental

La valoración económica ambiental es un conjunto de métodos cuantitativos que permiten asignar valores monetarios a los servicios ambientales, independientemente de que tengan un mercado o no; su primordial objetivo es suministrar información económica a los tomadores de decisiones (Gaspari *et al.*, 2015). Por medio de la valoración de los servicios ecosistémicos podemos tener un cuadro que nos permite definir los costos y beneficios sobre las diferentes decisiones asociadas a la gestión del territorio, resultando ser una estrategia para optar por una sostenibilidad económica y bienestar humano.

Valorar los SE ayuda a tomar decisiones sobre aspectos como el ordenamiento territorial, evaluaciones ambientales estratégicas, compensaciones por carbono y pago por los servicios ambientales (Pacha, 2014). Los valores económicos de los recursos naturales y ambientales surgen del producto del interés de las personas por usarlo (Arana-Medina, 2015).

2.1.11. Métodos de valoración de servicios ecosistémicos

Arana-Medina (2015), esquematiza algunas de las metodologías empleadas para la valoración:

- a) Métodos de preferencias declaradas: su aplicación arroja de forma explícita la valoración económica del bien mediante la simulación de un mercado hipotético.

- b) Métodos de preferencias reveladas: el valor económico del bien se obtiene a través del análisis de los comportamientos de los consumidores en mercados similares. En estos casos, las decisiones respecto al bien del mercado, sirven como aproximación de las que tendría lugar respecto al bien sin mercado.
- c) Metodologías basadas en gastos: relacionan la estimación de los valores de los costos incurridos para mediar un daño. Estos métodos no proporcionan medidas estrictas del valor económico el cual tiene sus bases metodológicas en la disponibilidad a pagar de los individuos por un bien o servicio.
- d) Metodologías basadas en precios de mercado: estima valores económicos de los productos o servicios de los ecosistemas que son comprados y vendidos en los mercados comerciales, permite cuantificar los cambios de valor en la cantidad o calidad de un bien o servicio.

2.1.12. Inventario forestal para determinación de carbono

Los bosques son reservorios de carbono que absorben aproximadamente 30 % de todas las emisiones de CO₂ en un año (Soriano-Luna *et al.*, 2015). La estimación de la biomasa arbórea juega un papel clave en el manejo forestal sustentable y en la determinación de los almacenes de carbono forestal (Cutini *et al.*, 2001), siendo las especies arbóreas al relacionarse directamente con el área basal las que aportan la mayor cantidad de carbono (Acosta y Carrillo, 2009).

2.1.13. El almacenamiento de Carbono en distintos componentes (Biomasa, suelo, Hojarasca)

Los ecosistemas forestales son la mayor fuente de energía y carbono, como lo muestra los 3400 millones de metros cúbicos anuales de extracción de madera a nivel mundial registrada en (FAO, 2015) y al mismo tiempo son el almacén principal de carbono terrestre, ya que almacena 861 Pg C (1Pg= 10¹⁵ g), este gran almacén de carbono está dividido en diferentes componentes, el 44% (383 Pg C) está en el suelo (1m de profundidad), el 42% (363 Pg C) en la biomasa (aérea y subterránea), el 8% (73 Pg C) en la madera muerta y el 5% (43 Pg C) en el mantillo, aunque esta distribución depende del tipo de bioma, la composición de especies y la intensidad de aprovechamiento (Pan *et al.*, 2011). Los resultados obtenidos en diversas condiciones concuerdan que los sistemas agroforestales que integran la producción de árboles con cultivos y el componente animal tienen un mayor potencial para secuestrar C que pastos o cultivos agrícolas (Bravo *et al.*, 2017).

CAPÍTULO III

3. MÉTODOLÓGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. LOCALIZACIÓN

En la presente investigación se seleccionó usos del suelo con sistemas agroforestales con Cacao (*Theobroma cacao*) en distintas localidades de la Provincia de Napo. En total fueron 16 Unidades de Producción distribuidas en los cantones de: Carlos Julio Arosemena Tola, Tena, Archidona (Figura 1), cuyas coordenadas geográficas se muestran en la Tabla 1.

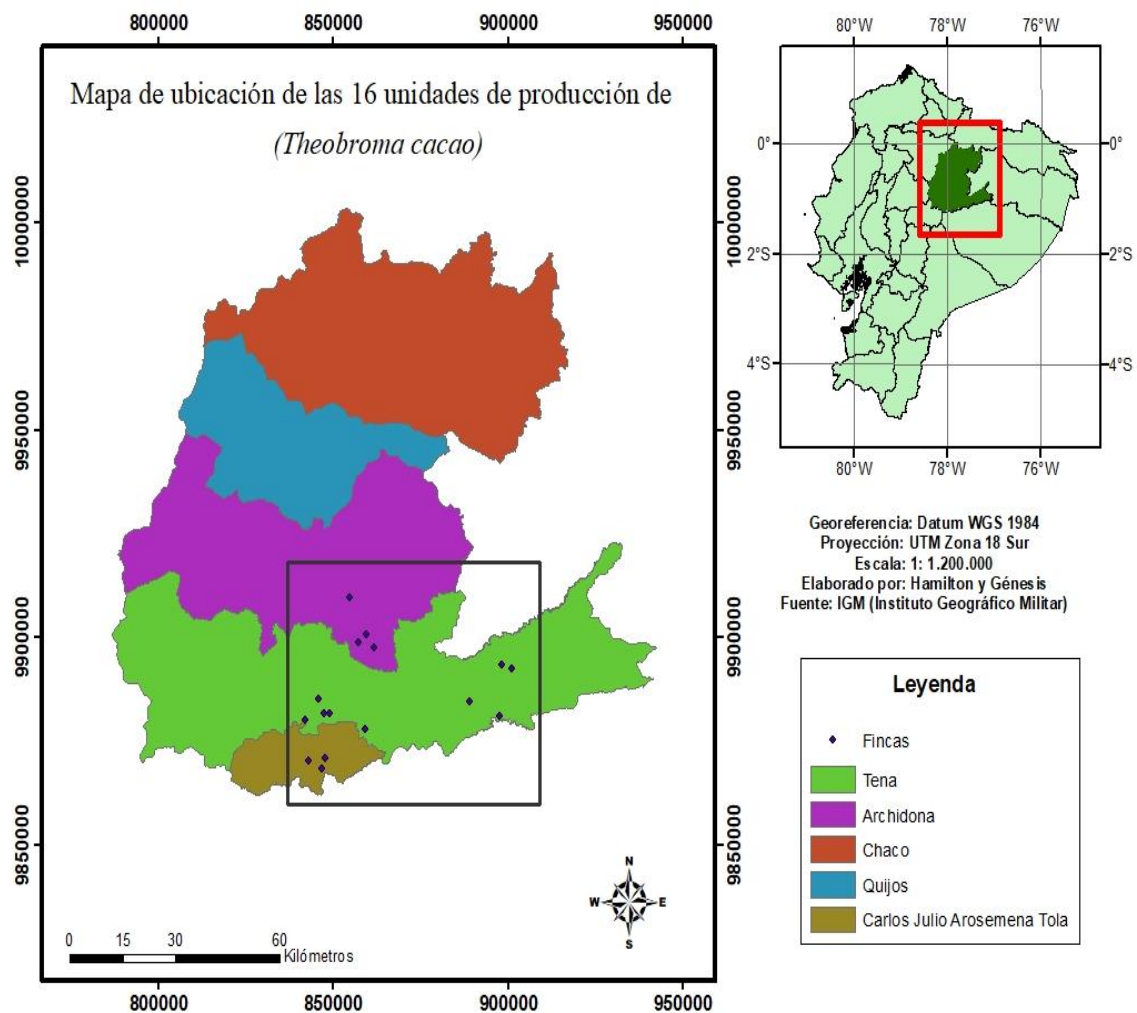


Figura 1. Localización de las zonas del estudio en la Provincia de Napo

Tabla 1. Coordenadas geográficas de las unidades de producción de cacao.

Uso de suelo UPAs cacao	Coordenadas	
	x	y
F1 SV-TENA	232536	9845221
F2 AH-TENA	233193	9892811
F3 AG-TENA	230227	9893730
F4 EA-TENA	174084	9880134
F5 LM-TENA	181181	9881803
F6 GA-TENA	179507	9881629
F7 DS-TENA	177910	9885124
F8 EA-ARCHIDONA	186759	9909671
F9 PG-TENA	193715	9897756
F10 MM-ARCHIDONA	189244	9898845
F11 B-TENA	188435	9854831
F12 RP-AROSEMENA_TOLA	174941	9870174
F13 MM-AROSEMENA_TOLA	174522	9876842
F14 PV-AROSEMENA_TOLA	178838	9868309
F15 CS-ARCHIDONA	191548	9900819
F16 CG-TENA	221192	9884553

Fuente: Autores

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo a las líneas base de la Universidad Estatal Amazónica el proyecto se enmarcó en la Gestión y conservación Ambiental, con el siguiente tipo de investigación: Experimental ya que se obtuvo el índice de la calidad del suelo y se estimó el secuestro de carbono como un servicio ecosistémico; Descriptiva debido a que se evaluó los servicios ecosistémicos y se describieron las propiedades del suelo tanto físicas, químicas y biológicas.

3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

3.3.1. Esquema de muestreo de campo

La metodología de Bravo *et al.*, 2017, se usó para el muestreo en campo (Figura 2).

1. Establecimiento de un transepto que cubra toda la variabilidad topográfica, vegetación y suelo en cada uso de tierra seleccionado (Figura 4).
2. Localización sobre el transepto de tres puntos de muestreo, de manera equidistante y en función del tamaño de la parcela.

3. Establecimiento de una subparcela de 10 por 10 metros en cada punto de muestreo (P1, P2, P3), en la cual se recolectan cinco submuestras de suelo a dos profundidades (0-10 cm y 10-30 cm). Dichas muestras conformaron la muestra compuesta por punto que se usaran para la evaluación de parámetros químicos (Figura 6).
4. En la parte central de la subparcela se colocó un cuadrante donde se tomó la muestra de biomasa (Figura 7), las muestras no alteradas a tres profundidades (0-10,10-20 y 20-30 centímetros) para evaluación de parámetros físicos (Figura 5), y se realizó el conteo del número de lombrices (Figura 8).
5. En los usos de la tierra con árboles se establecieron tres parcelas temporales de 20 m x 20 m, donde se identificaron y se midieron árboles con diámetros mayores o iguales a 10 centímetros a la altura del pecho (Figura 9).

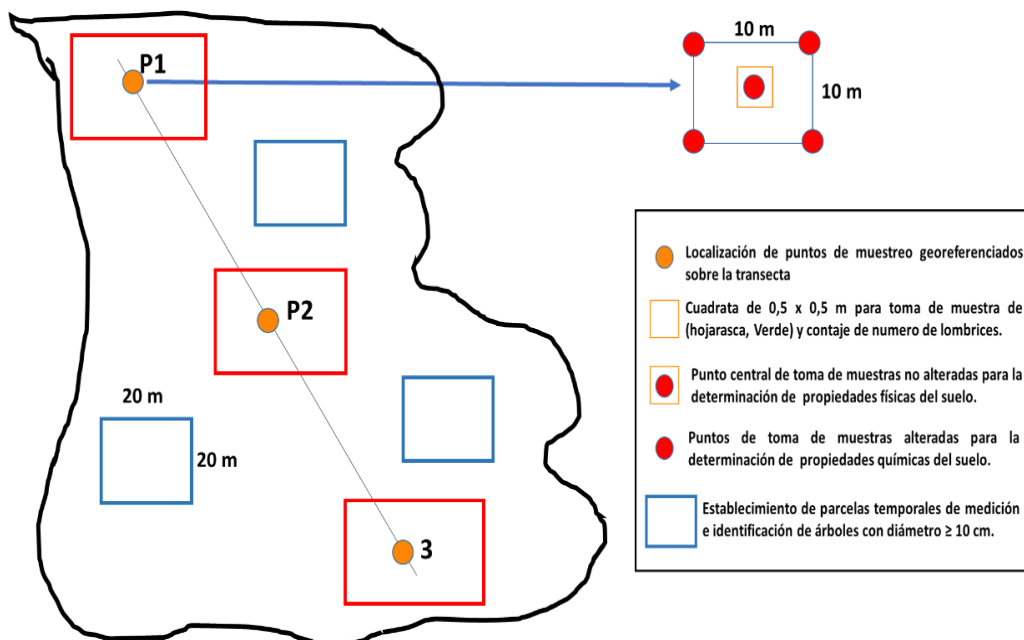


Figura 2. Esquema de muestreo sistemático para el estudio ambiental en cada uso de tierra seleccionado.

3.3.2. Análisis Físicos

Para la determinación de parámetros físicos del suelo se usó muestras no alteradas con cilindros de 5 cm de altura por 5 cm de diámetro recolectados con un toma muestra tipo Uhland, en los cuales se midió las siguientes variables: Densidad aparente (D_a) usando el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986); distribución de tamaño de poros (P_t : porosidad total), porosidad de aireación (P_a : poros de radio $>15 \mu\text{m}$) y porosidad de retención usando la mesa de tensión a saturación y a un potencial mátrico de -10 kPa (Blake y Hartge, 1986) (Figura 17).

3.3.3. Análisis Químicos y Biológicos

Lo atributos químicos evaluados incluyen la determinación del pH que se midió por potenciometría (relación suelo-agua 1:2,5) (Figura 12), la acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^+$) y aluminio intercambiable (Al^{3+}) se extrajeron con KCl 1N y titulados con NaCl, y HCl respectivamente (Figura 18). El contenido de fósforo disponible y las bases cambiables (K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2}) se midieron por la metodología de Olsen modificado (Bertsch, 1998) (Figura 13). El nitrógeno total se determinó a través del método de kjeldahl (Figura 15). El número de lombrices se cuantificó en un área definida por una cuadrata de 0,25 m² considerando los primeros 10 cm de profundidad. En dicha cuadrata se recolectó las muestras de biomasa para determinar peso fresco tanto del verde como de la hojarasca, luego se colocó en una estufa por un periodo aproximado de 24 horas a 70 °C para la determinación del peso seco (Figura 14).

3.3.4. Evaluación del índice de calidad del suelo

El índice de calidad del suelo (ICS) se realizó en tres pasos consecutivos (Masto *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2019): 1) Selección de un conjunto mínimo de Indicadores (CMI); 2) obtención de las puntuaciones del conjunto mínimo de indicadores; y 3) cálculo del valor integrado del ICS. Para seleccionar los indicadores representativos para el CMI se utilizó un análisis de componentes principales (ACP) y el coeficiente de correlación de Pearson's. Para la selección del grupo mínimo de indicadores se escogió solo aquellos componentes principales (CPs) con autovalores ≥ 1 y que al menos explicaran el 5% de la varianza total (Andrews *et al.*, 2003). Luego en cada CP, se seleccionó solo los indicadores con alto factor de carga. Un alto factor de carga se definirá como aquel que tiene un valor absoluto dentro del 10% del factor de carga más alta (Sharma *et al.*, 2005). Cuando más de un indicador sea retenido en un CP, se usó el análisis de correlación de Pearson's para decidir si la variable es redundante y por tanto será necesario su eliminación (Bastida *et al.*, 2006). En este contexto, si los indicadores están adecuadamente correlacionados (coeficiente de correlación $>0,7$), solo se seleccionó el indicador con mayor valor de ponderación en la CP (Andrews *et al.*, 2003). Después se seleccionó el mínimo grupo de indicadores, se utilizó una función de puntuación no lineal para transformar los indicadores de suelo en puntuaciones que variara entre 0 y 1. La función sigmoïdal que se usó es la siguiente (Ec. 1) (Andrews *et al.*, 2002):

$$S = a / [1 + (x/x_0)]^b \quad (1)$$

Donde **S** es la puntuación del indicador de suelo, **a** es la puntuación máxima ($a = 1$), **x** es el valor del indicador, **x₀** es el valor medio de cada indicador de suelo y **b** es el valor de la

pendiente de la ecuación. Los valores de pendiente (**b**) de -2,5 y 2,5 se utilizaron para la normalización de los indicadores y responde a la función que mejor representara al indicador utilizado. Esto puede ser “cuanto mayor es mejor”, “cuanto menor es mejor” o un “óptimo” respectivamente (Bastida *et al.*, 2006). Finalmente, con la puntuación de los indicadores y sus valores de ponderación, se calculó el ICS usando la siguiente Ec. (2) (Masto *et al.*, 2008):

$$ICS = \sum_{i=1}^n Si * Wi \quad (2)$$

Donde W_i el valor de ponderación de los indicadores de suelo seleccionados mediante el ACP, S_i es la puntuación del indicador calculada por Ec. (1) y n es el número seleccionado en CMI.

3.3.5. Secuestro de carbono en las distintas unidades de producción de cacao

El potencial secuestro de carbono de las diferentes fincas con (*Theobroma cacao*) se midió en distintos compartimentos:

3.3.5.1. Carbono orgánico del suelo

Como primer paso se determinó la D_a usando el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986). Para ello, se usó cilindros de 5 cm de altura por 5 cm de diámetro recolectados con una toma muestra tipo Uhland, y fueron trasladadas al laboratorio para colocarlas en estufa a 105°C por 24 horas para obtener el peso seco (Pla, 2010).

El carbono orgánico total (COT) se determinó mediante el método de digestión húmeda Walkley y Black (Nelson y Sommer, 1982), para lo cual se procedió a realizar una oxidación con dicromato de potasio ($K_2 Cr_2O_7$) 1 N con adición de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y consecutivamente la cantidad de carbono orgánico oxidado por el cromo que fue medido por titulación usando una solución de sal de Morh 0,5 N ($H_2SO_4 + FeSO_4 + 7H_2O$). Con el valor de la densidad aparente $Mg\ m^{-3}$, el valor del carbono y la profundidad de cada intervalo de muestreo (0-10 cm, 10-30 cm) se cuantificó la cantidad total de carbono almacenado en el compartimiento suelo (COS).

$$COS = D_a \times CO \times Profundidad \quad (3)$$

3.3.5.2. Carbono de la biomasa aérea

Para estimar el stock de carbono de la biomasa aérea se utilizó una ecuación alométrica aplicada a las mediciones de los árboles y generada para las condiciones de Bosque húmedo tropical. Una vez delimitado el área de estudios se procedió a realizar un inventario florístico,

en los mismos se establecieron 3 parcelas de 20 m por 20 m, donde se identificaron y se midieron árboles con diámetros mayores o iguales a 10 cm a la altura del pecho; medido a 1,30 m de la altura sobre el suelo.

Los individuos fueron identificados con su nombre común, nombre científico y su familia con la colaboración de un especialista en especies vegetales. Posteriormente se realizó una búsqueda bibliográfica acerca de la densidad de madera de cada especie registrada para aplicarla en la ecuación antes mencionada (Chave *et al.*, 2005).

$$BSSárbol = (p * \exp(-1,499 + (2,148 * \ln(D)) + (0,207 * \ln(D)^2) - (0,0281 * \ln(D)^3)) * 0,001 \quad (4)$$

Dónde:

BSSárbol: Biomasa aérea sobre el suelo

P: es la densidad de la Madera (g/cm³)

D: diámetro a la altura del pecho (cm)

3.3.5.3. Carbono de la vegetación no arbórea (Hojarasca)

En los mismos puntos para la toma de muestras de los parámetros físicos se estableció un marco cuadrado de 0.25 m² (0.5 m por 0.5 m) donde se recolectó todo el material orgánico localizado dentro del mismo. A continuación, el material recolectado fue pesado y colocado en bolsas para su secado en la estufa hasta obtenerse un peso constante. Con los valores de peso seco se calculó el total de toneladas de materia seca por hectárea (t. MS /ha) y posteriormente se obtuvo la cantidad de carbono por hectárea (t. C /ha), mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta CBN \text{ muestra} = MS \times CF \quad (5)$$

Donde:

ΔC_{BN} muestra: Cantidad de carbono en la biomasa de la muestra de vegetación no arbórea (kg C/0,25 m²);

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

3.3.5.4. Valoración económica de fertilidad del suelo y CO₂-equi como servicios ecosistémicos.

La valoración de los servicios ecosistémicos (SE) se realizó usando los métodos de valoración de uso directo e indirecto, lo cual permitió obtener el valor económico total (VET) (Hanley *et al.*, 2006). En el caso de los componentes asociados a la fertilidad (Materia

Orgánica, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio) se usó como método el de precio de mercado que estima el valor económico de un bien o SE que se vende en el mercado, por tanto, el costo de los fertilizantes simples como insumo agrícola que se usa en sistemas de producción agrícolas. El caso del carbono su valoración se realizó en función del método basado en el costo, que consideran los costos reales asociados con el costo evitado, el costo del daño o el costo de reposición. Dicho método implica estimar el valor de SE en función de los costos de evitar daños debido a la pérdida de servicios, el costo incurrido debido a daños a los SE, o el costo de reemplazar SE al proporcionar servicios sustitutos (Kumar y Kumar, 2008). En la práctica, los métodos basados en los costos se aplican de forma más adecuada cuando se valoran los servicios de apoyo y regulación. Para ello, la cantidad de carbono almacenado se convertirá el CO₂ equi cuyo valor es comercializado como bonos de carbono (1 bono de carbono es el equivalente a 1 tonelada de CO₂) y cuyo precio es variable en el mercado.

3.4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.4.1. Diseño experimental

Para la recolección de muestras de campo para cada una de las 16 fincas se usó un esquema de muestreo sistemático que cubrió toda la variabilidad de la unidad experimental (Bravo-Medina *et al.*, 2017). Para ello se tomaron 16 unidades de producción de cacao. En cada unidad de producción se realizaron 3 puntos de muestreo P1, P2, y P3 de manera equidistante en función del tamaño de la zona de estudio, en cada subparcela de 10 por 10 m para un área de 100 m², tal como lo muestra la Figura 2 y se recolectaron 5 submuestras de suelo a dos profundidades (0-10 y 10-30 cm), conformando la muestra compuesta, para la evaluación de parámetros químicos. Además, en la parte central se tomó las muestras no alteradas a tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm) para evaluar los parámetros físicos, dentro de la misma se recolectó un cuadrante de 0,25 m², para la toma de muestra de hojarasca (Díaz, 2016).

3.4.2. Análisis estadísticos

El análisis estadístico de las muestras de suelo y de la vegetación se utilizó como factor de comparación las diferentes profundidades consideradas y el uso de suelo. Una vez recolectada la información se empleó Microsoft Excel. Como primer punto se determinó la estadística descriptiva que incluyó la media. La desviación estándar, valores máximos y mínimos. Luego se realizó el análisis de la varianza ANOVA para establecer la diferencia

significativa y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey a un nivel de probabilidad de $P \leq 0,05$. Todos los análisis estadísticos fueron realizados por el programa IBM SPSS Statistics, versión 22.

3.5. MATERIALES

A continuación, se detallan los materiales empleados para la toma de muestras de suelo y los equipos que se utilizaron para los análisis físicos, químicos y biológicos, (Tabla 2).

Tabla 2. Materiales y equipos utilizados en la investigación.

Campo	Materiales		Equipos
		Laboratorio	Laboratorio
Piola, Cinta métrica, Flexómetro,	Cilindros, anillos, lienzos, ligas, papel filtro	Balanza analítica y de precisión	
Pala, Machete, Baldes pequeños	Erlenmeyers, balones aforados, vidrio de reloj	Destilador automático de kjeldahl	
Toallas de cocina, Papel aluminio	Pastillas magnéticas, crisoles, embudos	Phmetro, desecador, estufa, mufla	
Libreta, Marcadores Fundas ziploc y de halar	Probetas, buretas, plato poroso	Sorbona, plancha de calentamiento	
Toma muestras de suelo (Uhland)	Cucharas, pinzas, pipetas, picetas, tamices, catalizador	Espectrofotómetro de absorción atómica	
GPS, Cámara fotográfica	Bandejas, vasos plásticos, vasos de precipitación Tubos de ensayo-digestión, dispensador de reactivos	Agitador reciproco y magnético Multiparametro de sobremesa	

Fuente: Autores

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Indicadores físicos del suelo en unidades de producción con cacao

Las propiedades físicas del suelo se analizaron considerando diferentes índices estructurales los cuales se muestra en la Tabla 3. La densidad aparente (**Da**) presentó diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en las dos profundidades. Se agruparon 6 grupos para el horizonte superficial y 4 grupos para el subsuperficial, registrando valores que oscilaron entre 0,30 a 1,08 Mg m^{-3} (0-10 cm) y de 0,36 a 1,10 Mg m^{-3} (10-30 cm). Independientemente de la unidad de producción con cacao la densidad aparente se incrementó con la profundidad. En ambas profundidades la F2 AH-TENA mostró el valor más alto seguido de la F16 EA-ARCHI mientras que la F8 EA-ARCHI obtuvo el valor más bajo (Tabla 3). Indistintamente de la profundidad y la finca estudiada los valores obtenidos están por debajo del límite crítico de 1,20 Mg m^{-3} para suelos de textura fina (arcilloso) Pla (2010), lo que indica que no existe problemas de compactación y donde las raíces de los cultivos y el agua de lluvia pueden penetrar al suelo (Bravo *et al.*, 2017). En gran parte las unidades de producción con cacao presentaron valores bajos, desde una perspectiva ambiental estos valores son adecuados lo cual indica que no presentan problemas como degradación física coincidiendo con otros estudios realizados en la misma zona por Gaibor (2018), situación que está vinculada por el alto contenido de materia orgánica y por la presencia de raíces (Hernández, 2013). Pintado (2018) obtuvo valores similares demostrando que la densidad aparente aumenta a mayor profundidad debido a que no representa ninguna limitación para la penetración de las raíces y el movimiento de agua-aire en el suelo. La capacidad de aireación de estos suelos se caracterizó por presentar una alta porosidad total (**Pt**) en ambos horizontes con una distribución de tamaños de poros con predominancia de los microporos en comparación con los macroporos ($> 15 \mu\text{m}$). La porosidad total en la primera profundidad presentó diferencia significativa ($P \leq 0,05$) formándose 5 grupos. Se presentaron valores que variaron desde 64,42 % a 97,98 %. Dicha diferencia no se mostró en la segunda profundidad por lo tanto se establece un solo grupo, cuyos valores oscilaron entre 56,22 % a 83,32 %. El mayor porcentaje de Pt registró la F8 EA-ARCHI seguido por la F2 AH-TENA en las dos profundidades, mientras que el valor más bajo fue de la F16 CG-TENA en la profundidad de 10-30 cm (Tabla 3).

Tabla 3. Valores promedios de propiedades físicas de calidad del suelo en unidades de producción con cacao de la Provincia de Napo.

Variables	Densidad aparente (Mg m-3)	Porosidad total (%)	Porosidad de aireación (%)	Porosidad de retención (%)
Profundidad 0-10 cm				
F1 SV-TENA	1,00±0,16a	66,32±2,49 e	12,37±3,04 b	53,94±5,15 c
F2 AH-TENA	1,08±0,16a	67,08±4,15 e	14,93±4,89 a	52,15±5,61 d
F3 AG-TENA	0,84±0,07 b	72,72±4,09 c	22,24±0,55 a	50,48±4,54 e
F4 EA-TENA	0,44±0,16 d	83,59±1,58 a	14,75±3,64 a	68,84±2,17 a
F5 LM-TENA	0,66±0,02 b	78,9±1,37 b	13,24±2,22 b	65,65±1,16 a
F6 GA-TENA	0,51±0,09 d	83,74±1,50 a	10,86±3,73 b	72,88±2,34 a
F7 DS-TENA	0,52±0,08 d	84,65±5,18 a	12,84±1,35 b	71,81±4,46 a
F8 EA-ARCHI	0,22±0,16f	97,98±16,16a	15,55±1,97 a	82,43±16,62 a
F9 PG-TENA	0,46±0,11d	84,19±1,11a	12,18±4,01 b	72,00±2,35 a
F10 MM-ARCHI	0,30±0,02e	88,45±2,74a	16,72±3,69 a	71,73±5,67 a
F11 B-TENA	0,45±0,03d	86,63±4,04 a	16,04±2,36 a	70,59±6,15 a
F12 RP-AROSE	0,47±0,03d	64,42±2,96 e	17,09±1,47a	47,32±1,66 f
F13 MM-AROSE	0,41±0,04d	66,37±3,64 e	16,87±3,45 a	49,49±6,14 e
F14 PV-AROSE	0,30±0,02e	68,18±4,23 d	17,38±0,83a	50,80±4,78 e
F15 CS-ARCHI	0,58±0,10c	78,69±1,73 b	9,99±3,98 b	68,70±2,40 a
F16 CG-TENA	0,88±0,06 a	66,66±4,86 e	12,46±0,17 b	54,20±4,78 b
Profundidad 10-30 cm				
F1 SV-TENA	1,07±0,24a	57,32±11,35 a	7,33±1,09 b	49,99±11,69 a
F2 AH-TENA	0,91±0,35 a	83,45±38,98 a	10,49±1,53 a	69,13±11,44 a
F3 AG-TENA	0,77±0,05 a	66,22±3,50 a	20,79±3,26 a	45,42±4,75 a
F4 EA-TENA	0,69±0,10 a	74,32±5,14 a	8,86±1,68 b	65,46±6,24 a
F5 LM-TENA	0,73±0,12 a	78,44±6,05 a	11,88±3,54 a	66,56±2,77 a
F6 GA-TENA	0,54±0,02 c	82,34±3,76 a	12,58±1,84 a	69,76±5,54 a
F7 DS-TENA	0,63±0,14 b	78,41±1,61 a	11,84±2,71 a	66,57±3,74 a
F8 EA-ARCHI	0,37±0,07d	83,32±9,27 a	14,19±4,09 a	72,96±40,44 a
F9 PG-TENA	0,62±0,15 b	79,77±3,28 a	9,66±1,26 b	70,11±3,26 a
F10 MM-ARCHI	0,38±0,02 d	82,24±4,10 a	13,81±2,09 a	68,43±2,13 a
F11 B-TENA	0,51±0,08 c	81,85±1,32 a	11,48±2,09 a	70,36±0,82 a
F12 RP-AROSE	0,58±0,06 c	60,91±2,62 a	13,70±1,21 a	47,21±1,90 a
F13 MM-AROSE	0,43±0,06 d	64,31±3,04 a	12,57±4,84 a	51,74±6,44 a
F14 PV-AROSE	0,36±0,04 d	71±1,33 a	13,97±2,29 a	57,02±3,41 a
F15 CS-ARCHI	0,82±0,21a	64,50±6,04 a	11,10±8,99 a	53,4±2,96 a
F16 CG-TENA	1,10±0,24 a	56,22±2,18 a	6,06±4,56 b	50,16±2,68 a

Leyenda: Las letras en las columnas representan diferencias significativas ($P < 0,05$); ARCHI: (Archidona); AROSE: (Arosemena Tola).

En ambos horizontes los resultados obtenidos son superiores al 50% sobrepasando el valor límite sugerido por Pla (2010) por debajo del cual hay problemas de aireación. Tales resultados se asocian a una mayor cantidad de materia orgánica que genera una excelente retención y disponibilidad de agua en el suelo (Martínez *et al.*, 2008). Estudios realizados en condiciones amazónicas muestran valores promedios mayor a 60 % indicando que la Pt tiene una buena aireación basado en la presencia de materia orgánica del suelo ya que se descompone y contribuye al aumento de la macroporosidad (Paguay, 2016).

La porosidad de aireación (**Pa**) exhibió diferencias significativas ($P \leq 0,05$) y se agruparon 2 grupos en cada profundidad. En el horizonte superficial se obtuvo valores que oscilaron entre 9,99 % a 22,24 %, no obstante, en el horizonte subsuperficial se observó una disminución de los valores entre 6,06 % a 20,79 %. En la profundidad de 10-30 cm la F3 AG-TENA alcanzó el porcentaje más alto mientras que el porcentaje más bajo fue de la F16 CG-TENA en la profundidad de 10-30 cm (Tabla 3). Mayoritariamente las unidades de producción con cacao obtuvieron resultados superiores al 10 % acorde con el criterio de Pla (2010), por tanto se consideran valores adecuados desde el punto de vista agroecológico, ya que están fuertemente asociados con las variaciones en la densidad aparente y la porosidad total del suelo, es decir estos suelos poseen una buena aireación (Bravo *et al.*, 2008). Los resultados de esta investigación concuerdan con Paguay (2016) y Bravo *et al.*, (2017) los cuales indican que la capa superficial tiene una mayor porosidad de aireación con respecto al horizonte subsuperficial, lo cual está relacionado con los mayores valores de materia orgánica. Los poros de aireación contribuyen activamente al flujo de agua y al movimiento de aire en el suelo proporcionando unas condiciones adecuadas para la actividad biológica del suelo (Álvarez y Taboada, 2008; Bravo *et al.*, 2017).

La porosidad de retención (**Pr**) solo mostró diferencias significativas ($P \leq 0,05$), en la primera profundidad agrupándose 6 grupos. Los valores iniciales oscilaron entre 47,32 % a 88,43 %, mientras que la segunda profundidad fue de 45,42 % a 72,93 % agrupándose en un solo grupo. Esta variable reflejó el valor más alto en la F8 EA-ARCHI y el valor más bajo en la F3 AG-TENA indistintamente de las profundidades (Tabla 3). El valor de referencia según Pla (2010) es del 55 %, por lo general gran parte de los resultados se encuentran por encima de ese valor representando una adecuada capacidad de retención de humedad en el suelo, lo cual es potenciado por la falta de perturbación del suelo y la disminución del proceso de evaporación (Bravo *et al.*, 2008).

Estudios realizados en la cuenca media de Napo por Guallo (2018), coinciden con la presente investigación ya que obtuvo valores promedios desde 45 % a 75 % mostrando alta capacidad de retención de humedad indistintamente del uso de la tierra.

Los parámetros físicos son indicadores sensibles a los cambios del suelo entre otras características, que permiten valorar su estado y observar la capacidad de su funcionamiento; su mejoramiento se manifiesta en la modificación de la estructura y la distribución del espacio poroso del suelo (García *et al.*, 2012; Bravo *et al.*, 2015).

4.2. Indicadores químicos del suelo en unidades de producción con cacao

Las propiedades químicas vinculadas con la calidad del suelo se muestran en la Tabla 4 y 5. El potencial de hidrógeno (**pH**) del suelo presentó diferencias significativas ($P \leq 0,05$) agrupándose en 3 grupos en el horizonte superficial y 4 grupos en el horizonte subsuperficial. El pH en el horizonte superficial mostró valores que oscilaron entre 4,78 a 5,56 reflejando una condición de muy ácido a ácido (Anexo 2), no obstante, la segunda capa exhibió un comportamiento similar de 4,72 a 5,94 variando de muy ácido a medianamente ácido (Anexo 2). El valor más alto fue de la F11 B-TENA mientras que el más bajo fue de la F14 PV-AROSE indistintamente de las unidades de producción con cacao. Acorde con los resultados predominan los suelos ácidos, estos suelos son típicos en condiciones amazónicas sobre todo dónde se presenta altas precipitaciones, provocando escorrentías que realizan el lavado de cationes básicos presentes en el suelo prevaleciendo los cationes ácidos. El pH está asociado con la disponibilidad de nutrientes y la presencia de elementos tóxicos (Al y Mn); las disminuciones de esta variable obedecen a la desintegración de los residuos superficiales (Bravo *et al.*, 2008; Bravo *et al.*, 2015). Trabajos realizados por Gaibor (2018), presenta valores ácidos de pH coincidiendo con la presente investigación, asume que la baja disponibilidad de elementos nutritivos afecta el crecimiento de las plantas.

Tabla 4. Valores promedios de propiedades químicas de calidad del suelo de profundidad (0-10cm).

Variables	pH	Al ³⁺ + H ⁺	Al ³⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	P m kg ⁻¹	Nt, %	MO, %
Profundidad de 0-10 cm									
F1 SV-TENA	5,29±0,12 a	1,97±0,45 a	0,87±0,31 a	0,11±0,05 a	2,29±0,67 a	0,90±0,31 a	3,00±2,78 b	0,20±0,04 e	7,63±1,37 d
F2 AH-TENA	5,33±0,16 a	1,77±0,47 a	0,60±0,20 a	0,10±0,03 a	3,26±1,58 a	0,92±0,21 a	2,67±2,73 b	0,20±0,09 e	5,87±2,51 e
F3 AG-TENA	5,42±0,13 a	1,77±1,15 a	0,47±0,06 a	0,10±0,04 a	3,90±2,22 a	0,97±0,46 a	4,47±5,05 b	0,47±0,10 c	5,93±1,86 e
F4 EA-TENA	5,40±0,06 a	1,63±0,21 a	0,67±0,06 a	0,14±0,08 a	3,16±1,34 a	0,63±0,31 a	3,07±1,33 b	0,34±0,11 d	13,37±2,59 b
F5 LM-TENA	5,45±0,19 a	1,30±0,44 b	0,47±0,06 a	0,03±0,03 b	1,94±0,54 a	0,34±0,13 b	2,17±2,15 b	0,41±0,09 d	10,60±1,78 c
F6 GA-TENA	5,56±0,22 a	0,77±0,12 b	0,37±0,12 a	0,06±0,02 a	3,73±4,18 a	0,44±0,19 b	5,30±1,41 b	0,53±0,05 b	19,30±2,27 b
F7 DS-TENA	4,97±0,34 a	1,83±0,72 a	0,67±0,23 a	0,19±0,11 a	1,96±1,81 a	0,53±0,35 b	3,40±2,98 b	0,48±0,12 c	17,10±5,01 b
F8 EA-ARCHI	5,15±0,27 a	1,27±0,74 b	0,30±0,10 a	0,10±0,06 a	0,58±0,12 b	0,26±0,06 b	1,83±1,46 b	0,86±0,23 a	21,70±3,32 a
F9 PG-TENA	5,32±0,10 a	1,23±0,45 b	0,37±0,06 a	0,07±0,04 a	3,41±1,65 a	0,36±0,18 b	4,70±0,95 b	0,49±0,19 c	15,60±4,88 b
F10 MM-ARCHI	5,00±0,29 a	1,47±0,85 b	0,30±0,17 a	0,15±0,09 a	1,47±1,00 b	0,41±0,24 b	3,50±2,36 b	0,94±0,28 a	30,40±7,46 a
F11 B-TENA	5,26±0,34 a	1,03±0,76 b	0,20±0,10 a	0,17±0,16 a	2,14±1,99 a	0,52±0,46 b	5,73±4,50 a	0,75±0,26 a	19,70±5,31 a
F12 RP-AROSE	5,29±0,09 a	1,53±0,15 b	0,83±0,25 a	0,25±0,13 a	7,09±1,30 a	1,69±0,82 a	6,76±3,15 a	0,36±0,07 d	10,23±3,13c
F13 MM-AROSE	5,26±0,13 a	1,40±0,10 b	0,47±0,29 a	0,29±0,14 a	5,61±0,89 a	1,01±0,14 a	6,22±0,32 a	0,72±0,10 a	22,36±3,31 a
F14 PV-AROSE	4,78±0,23 c	1,67±0,35 a	0,87±0,31 a	0,25±0,03 a	3,50±2,86 a	0,22±0,07 b	2,18±2,05 b	1,00±0,09 a	16,49±2,76 b
F15 CS-ARCHI	4,96±0,18 a	3,77±1,80 a	0,77±0,55 a	0,16±0,08 a	4,45±1,29 a	1,28±0,40 a	13,33±2,52 a	0,16±0,04 e	5,30±1,47 f
F16 CG-TENA	4,90±0,11 b	1,67±0,74 a	0,40±0,17 a	0,09±0,02 a	3,63±1,49 a	1,05±0,48 a	4,43±1,62 b	0,20±0,07 e	5,60±1,59 f

Leyenda: Las letras en las columnas representan diferencias significativas ($P < 0,05$); ARCHI: (Archidona); AROSE: (Arosemena Tola).

Tabla 5. Valores promedios de propiedades químicas de calidad del suelo de profundidad (10-30cm).

Variables	pH	Al ³⁺ + H ⁺	Al ³⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	P m kg ⁻¹	Nt, %	MO, %
Profundidad de 10-30 cm									
F1 SV-TENA	5,73±0,35 a	1,60±0,62 b	0,47±0,25 a	0,13±0,09 a	2,04±0,63 a	0,66±0,27 a	6,77±7,39 a	0,16±0,08 c	4,67±2,12 d
F2 AH-TENA	5,63±0,04 a	1,87±0,75 b	0,87±0,46 a	0,14±0,11 a	3,19±0,14 a	0,68±0,14 a	3,10±0,82 b	0,15±0,09 c	4,73±1,53 d
F3 AG-TENA	5,68±0,10 a	1,23±0,12 b	0,27±0,06 a	0,08±0,05 a	3,11±1,14 a	0,40±0,16 a	15,67±4,62a	0,19±0,07c	6,20±1,85 c
F4 EA-TENA	5,32±0,14 a	2,17±0,21 b	0,73±0,12 a	0,09±0,12 a	1,88±0,70 a	0,40±0,09 a	1,93±2,41 b	0,28±0,11 c	11,57±3,93 b
F5 LM-TENA	5,45±0,23 a	1,60±1,00 b	0,43±0,21 a	0,07±0,07 a	1,92±1,23 a	0,33±0,17 a	0,54±0,45 b	0,30±0,12 c	9,73±3,80 c
F6 GA-TENA	5,43±0,53 a	2,97±3,55 a	0,30±0,10 a	0,06±0,07 a	2,74±1,61 a	0,21±0,13 a	4,47±5,76 b	0,57±0,24 a	18,33±6,49 a
F7 DS-TENA	5,38±0,14 a	2,23±0,29 b	0,57±0,15 a	0,11±0,08 a	2,72±0,61 a	0,45±0,06 a	2,57±2,01 b	0,33±0,12 c	8,70±0,96 c
F8 EA-ARCHI	5,17±0,28 b	1,23±0,67 b	0,33±0,12 a	0,13±0,08 a	0,53±0,11 a	0,23±0,07 a	2,50±0,79 b	0,81±0,21 a	23,27±3,89 a
F9 PG-TENA	5,38±0,16	1,13±0,46 b	0,40±0,10 a	0,06±0,07 a	2,67±1,87 a	0,32±0,28 a	4,00±5,20 b	0,47±0,29 b	14,933±8,03 a
F10 MM-ARCHI	5,07±0,14 b	1,07±0,46 b	0,30±0,00 a	0,11±0,10 a	1,42±1,12 a	0,26±0,14 a	0,87±0,64 b	0,91±0,22 a	25,97±8,60 a
F11 B-TENA	5,94±0,23 a	0,33±0,15 b	0,27±0,12 a	0,20±0,18 a	1,02±0,72 a	0,48±0,42 a	0,67±0,29 b	0,55±0,30 a	15,17±5,59 a
F12 RP-AROSE	5,49±0,11 a	1,80±0,46 b	0,90±0,62 a	0,05±0,04 a	3,30±1,63 a	0,66±0,22 a	4,29±1,38 b	0,29±0,01 c	7,01±1,35 c
F13 MM-AROSE	5,36±0,08 a	0,77±0,06 b	0,40±0,10 a	0,02±0,01 a	1,25±0,59 a	0,27±0,03 a	2,25±1,05 b	0,43±0,05 b	12,52±0,55 b
F14 PV-AROSE	4,72±0,17 d	0,63±0,12 b	0,29±0,19 a	0,12±0,01 a	0,92±0,50 a	0,17±0,02 a	0,33±0,55 b	0,55±0,03 a	7,87±1,21 c
F15 CS-ARCHI	5,22±0,19 b	5,90±2,33 a	0,77±0,15 a	0,05±0,00 a	2,57±0,33 a	0,70±0,34 a	6,87±0,81 a	0,12±0,03 c	3,73±0,93 d
F16 CG-TENA	4,99±0,17 c	2,20±0,61 b	0,83±0,15 a	0,05±0,02 a	2,24±1,20 a	0,55±0,29 a	3,11±2,55 b	0,13±0,04 c	4,00±1,15 d

Leyenda: Las letras en las columnas representan diferencias significativas ($P < 0,05$); ARCHI: (Archidona); AROSE: (Arosemena Tola).

La acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^{+}$) del suelo demostró diferencias significativas ($P\leq 0,05$), se puede observar en las Tablas 4 y 5 la formación de 2 grupos en ambos horizontes. La primera capa osciló entre 0,77 meq/100ml a 3,77 meq/100ml variando de medio a tóxico, sin embargo, la segunda capa obtuvo valores entre 0,33 meq/100ml a 5,90 meq/100ml categorizados de bajo a tóxico (Anexo 2). La F15 CS-ARCHI adquirió el valor más alto y la F11 B-TENA alcanzó el valor más bajo, ambas del horizonte subsuperficial. Estudios realizados por Huera (2019) en condiciones amazónicas concuerdan con los resultados obtenidos, indicando que los valores altos considerados tóxicos pueden afectar el crecimiento de las plantas.

El aluminio intercambiable (Al^{+3}), no presentó diferencias significativas ($P\leq 0,05$) y los valores en el horizonte superficial oscilaron entre 0,20 meq/100ml a 0,86 meq/100ml, no obstante, indistintamente de las unidades de producción con cacao incrementó de 0,26 meq/100ml a 0,90 meq/100ml. Los resultados en ambas profundidades fluctuaron de bajo a medio (Anexo 2). De acuerdo con Calva, *et al.*, (2017) los suelos que no son procedentes de formaciones volcánicas son ácidos y poseen altos contenidos de aluminio intercambiable.

El potasio disponible (K^{+}) (Tabla 4 y 5), mostró diferencias significativas ($P\leq 0,05$) en el horizonte superficial, agrupándose en 2 grupos, no obstante, dicha significancia no se evidenció en el horizonte subsuperficial estableciéndose un solo subgrupo. La primera capa presentó valores que oscilan entre 0,03 meq/100ml a 0,29 meq/100ml mientras que la segunda capa varió de 0,02 meq/100ml a 0,20 meq/100ml indicando que indistintamente de las unidades de producción con cacao disminuyó. Los resultados obtenidos se categorizaron de bajo a medio (Anexo 2). En la mayoría de las fincas los valores fueron menores a 0,2 meq/100ml, encontrando similitudes en los resultados ejecutados por Paguay (2016), quien asume que se debe a la edafogénesis de los suelos además de generar un lavado intensivo de cationes intercambiables.

En las Tablas 4 y 5 se muestra el calcio (Ca^{2+}) a las profundidades consideradas, en la primera profundidad exhibió diferencias significativas ($P\leq 0,05$) formando 2 grupos, misma significancia no se mostró en la segunda profundidad por lo tanto se establece un solo grupo. Los valores iniciales oscilaron entre 0,58 meq/100ml a 7,09 meq/100ml variando de bajo a alto (Anexo 2); por lo contrario, la segunda capa presentó valores que variaron de 0,53 meq/100ml a 3,30 meq/100ml categorizados de bajo a medio (Anexo 2).

La F12 RP-AROSE registró el valor más alto en cambio la F8 EA-ARCHI obtuvo el valor más bajo. Desde una perspectiva ambiental las unidades de producción con cacao carecen de nutrientes debido al alto contenido de pH. Tales resultados concuerdan con Pintado (2018) realizados en la provincia de Napo, dónde mencionan que la profundidad es inversamente proporcional a la concentración de Ca intercambiable.

El Magnesio (Mg^{2+}) (Tablas 4 y 5), presentó diferencias significativas ($P \leq 0,05$), se conformaron 2 grupos en la profundidad de 0-10 cm y en la profundidad de 10-30 cm no se evidenció diferencias significativas ($P \leq 0,05$) por lo cual se estableció un solo grupo. En el horizonte superficial registró valores entre 0,22 meq/100ml a 1,69 meq/100ml categorizados de bajo a alto (Anexo 2), mientras que el horizonte subsuperficial disminuyó de 0,17 meq/100ml a 0,70 meq/100ml categorizados de bajo a medio (Anexo 2). Indistintamente de la profundidad la F12 RP-AROSE exhibió el valor más alto seguido de la F15 CS-ARCHI, no obstante, el valor más bajo fue de la F14 PV-AROSE. Por lo general, las unidades de producción adquirieron valores bajos muy similares con los resultados de Gaibor (2018) corroborando la situación de los suelos amazónicos.

El fósforo disponible (**P**) en las Tablas 4 y 5, mostró diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en ambos horizontes. Los valores en el horizonte superficial oscilaron entre 1,83 m kg⁻¹ a 13,33 m kg⁻¹ mientras que en la segunda capa varió de 0,33 m kg⁻¹ a 15,67 m kg⁻¹. En ambos horizontes los valores fueron categorizados de bajo a medio (Anexo 2). En el horizonte subsuperficial se registró el valor más alto que fue de la F3 AG-TENA mientras que el valor más bajo fue de la F14 CG-TENA. De acuerdo con Bravo *et al.*, (2008) este parámetro es fundamental en la nutrición de las plantas y su incremento se debe a la naturaleza poco móvil del elemento y a la descomposición de residuos. Estos resultados son sustentados por Verón y Ulcuango (2019) cuyos valores reflejan poca disponibilidad de fósforo, estudio realizado en condiciones amazónicas.

El nitrógeno total (**Nt**) exhibió diferencias significativas ($P \leq 0,05$), en la primera capa se formaron 5 grupos y 3 grupos para la segunda capa (Tablas 4 y 5). En el horizonte superficial presentó valores que variaron entre 0,16 % a 1,00 %, no obstante, el horizonte subsuperficial disminuyó de 0,12 % a 0,91 %. Independientemente de la profundidad el porcentaje más alto fue de la F14 PV-AROSE seguido de F10 MM-ARCHI mientras que el más bajo fue de F15 CS-ARCHI.

En general los valores de Nt son bajos, los cuales están asociados con una mayor absorción nitrítica de las plantas y grandes pérdidas por la lixiviación (Bravo *et al.*, 2008). Tales resultados coinciden con Huera (2019), quien argumenta que los valores de nitrógeno total van disminuyendo con la profundidad, además argumenta que este elemento actúa en la descomposición de las proteínas y clorofila de las plantas.

La materia orgánica (**MO**) mostró diferencias significativas ($P \leq 0,05$), (Tablas 4 y 5). La primera capa presentó valores que variaron entre 5,30 % a 30,40 % categorizados altos (Anexo 2), mientras que la segunda capa osciló entre 3,73 % a 25,97 % catalogados de medio a alto (Anexo 2). La F10 MM-ARCHI obtuvo el valor más alto mientras que el valor más bajo fue de la F15 CS-ARCHI. En condiciones amazónicas con vocación potencial para bosque se ha sugerido que la cantidad de hojarasca, y el desarrollo de raíces contribuyen a la construcción de una mayor reserva de materia orgánica en el suelo (Viana *et al.*, 2014, Bravo *et al.*, 2017), lo cual tiene un efecto positivo sobre la formación y estabilidad de agregados del suelo y la retención de nutrientes (Martínez *et al.*, 2008). Los resultados obtenidos concuerdan con Verón y Ulcuango (2019) quienes mencionan que debido a la gran diversidad de vegetación presente en el área de estudio aporta residuos a la superficie, se forman agregados y por ende mejora la estructura del suelo

4.3. Indicadores biológicos del suelo en unidades de producción con cacao

La actividad biológica se evaluó a través de la presencia de lombrices. En la Tabla 6, la variable de **Lombrices** mostró diferencias significativas ($P \leq 0,05$), agrupándose en 2 grupos, cuyos valores oscilaron entre 6,66 a 161,33. Desde el punto de vista ambiental son valores adecuados; el uso de microorganismos contribuye a la detección de cambios en los substratos del suelo además desempeñan alrededor del 80% al 90% de las funciones edáficas relevantes como productiva, filtrante y degradativa (Aciego, 2015; Vallejo, 2013).

La producción de **Hojarasca** (Tabla 6), reflejó diferencias significativas ($P \leq 0,05$), agrupándose en 3 grupos. Los resultados variaron entre 4,48 mg ha⁻¹ a 14,65 mg ha⁻¹. Los resultados obtenidos están fuertemente vinculados con el área de estudio, misma que se caracteriza por la abundancia de especies forestales dispersas y por las características amazónicas donde las unidades de producción con cacao han aportado continuamente a lo largo del tiempo mayor cantidad de hojarasca (Bravo *et al.*, 2015)

Tabla 6. Valores promedios de propiedades biológicas de calidad del suelo de profundidad (0-10cm).

Variables/Tratamiento	Lombrices m²	Hojarasca Mg ha⁻¹
Profundidad 0-10 cm		
F1 SV-TENA	20±0,00 b	5,63±2,41 b
F2 AH-TENA	8±8,00 b	12,28±2,84 a
F3 AG-TENA	20±14,42 b	12,61±2,26 a
F4 EA-TENA	136±86,63 a	7,71±1,36 a
F5 LM-TENA	21,33±18,04 b	11,65±0,92a
F6 GA-TENA	33,33±14,05 a	7,29±1,87 a
F7 DS-TENA	18,66±25,72b	4,48±1,01 c
F8 EA-ARCHI	34,66±76,11 a	5,63±2,31 b
F9 PG-TENA	13,33±8,33 b	8,76±4,26 a
F10 MM-ARCHI	30,66±20,13 a	7,31±2,67a
F11 B-TENA	161,33±142 a	6,48±2,04 b
F12 RP-AROSE	6,66±2,31b	14,65±5,10 a
F13 MM-AROSE	21,33±8,33 b	8,67±0,95 a
F14 PV-AROSE	14,66±6,11b	7,52±0,76 a
F15 CS-ARCHI	20±21,17 b	10,21±4,31 a
F16 CG-TENA	25,33±6,11 b	6,59±1,77 b

Leyenda: Las letras en las columnas representan diferencias significativas ($P<0,05$); ARCHI: (Archidona); AROSE: (Arosemena Tola).

4.4. Evaluación del índice de la calidad del suelo

Los autovalores de todos los componentes principales fueron >1 y explicaron el 72,97 % de la varianza total, Tabla 7. Se seleccionaron solo los indicadores con mayor valor de ponderación en la CP con un coeficiente de correlación $>0,7$. En el primer componente los indicadores con mayor carga fueron nitrógeno total (Nt), materia orgánica (MO), densidad aparente (Da) y porosidad total (Pt), mientras que en el segundo componente se seleccionaron los elementos de potasio (K) y calcio intercambiable (Ca), en los demás componentes principales ningún indicador cumplió con el rango establecido.

Tabla 7. Análisis de componentes principales de indicadores de la calidad del suelo.

Componente Principal	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5
Autovalores	4,11	2,51	1,68	1,44	1,22
Varianza (%)	27,38	16,71	11,17	9,59	8,13
Varianza Acumulada (%)	27,38	44,09	55,26	64,85	72,97
pH	-0,21	-0,27	-0,38	0,69	-0,23
Al ³⁺ + H ⁺	-0,35	0,00	0,63	-0,12	0,31
Al ³⁺ , meq 100 g s ⁻¹	-0,44	0,13	0,60	0,07	0,13
K ⁺ , meq 100 g s ⁻¹	0,16	0,74	0,14	0,08	-0,41
Ca ²⁺ , meq 100 g s ⁻¹	-0,38	0,72	0,00	0,24	-0,07
Mg ²⁺ , meq 100 g s ⁻¹	-0,50	0,67	0,21	0,11	-0,15
P, mg kg ⁻¹	-0,28	0,46	0,02	0,24	0,01
NT	0,81	0,42	0,04	-0,24	0,01
MO, (%)	0,83	0,36	0,02	-0,10	-0,05
Da, Mg m ⁻³	-0,78	-0,26	0,09	0,04	-0,27
Pt, (%)	0,74	-0,04	0,27	0,50	0,25
Pa, (%)	0,17	0,47	-0,58	-0,04	0,35
Pr, (%)	0,66	-0,20	0,46	0,50	0,12
NL	0,34	-0,13	-0,02	0,30	-0,50
Hoj, Mg ha ⁻¹	-0,40	0,21	-0,31	0,39	0,59

Legenda: pH: pH del suelo; Al³⁺+ H⁺: Acidez intercambiable (meq 100 g s⁻¹); Al³⁺: Aluminio intercambiable (meq 100 g s⁻¹); K⁺: Potasio intercambiable (meq 100 g s⁻¹); Ca²⁺: Calcio intercambiable (meq 100 g s⁻¹); Mg²⁺: Magnesio intercambiable (meq 100 g s⁻¹); P: Fosforo (mg kg⁻¹); NT: Nitrogeno total (%); MO: Materia orgánica (%); Da: Densidad aparente del suelo (Mg m⁻³); Pt: Porosidad total (%); Pa: Porosidad de aireación (%); Pr: Porosidad de retención (%); NL: Número de lombrices; Hoj: Hojarasca (Mg ha⁻¹).

El análisis de las correlaciones permitió identificar al conjunto mínimo de indicadores, mismos que sirven de gran aporte para la obtención del índice de calidad del suelo (ICS), dónde se determinó con la siguiente ecuación:

$$\text{ICS} = 0,27x \text{ S (MO)} + 0,27 \times \text{S (Nt)} - 0,27 \times \text{S (Da)} + 0,27 \times \text{S (Pt)} + 0,16 \times \text{S (K)} + 0,16 \times \text{S (Ca)}$$

En la Tabla 8, se muestra el Índice de Calidad del Suelo (ICS), el cual fue significativamente mayor en el horizonte superficial. Se puede apreciar que no presentó diferencias significativas indistintamente de las unidades de producción con cacao, se estableció un solo grupo para cada horizonte. En la primera profundidad de 0-10 cm el ICS osciló entre 0,28 a 0,44, no obstante, la segunda profundidad de 10-30 cm varió entre 0,21 a 0,40. El ICS varió de bajo a moderado en el horizonte superficial y en la capa más profunda con mayores índices en las fincas localizadas en Tena (Anexo 3), lo cual está asociado a la mayor concentración de MO misma que es considerada un atributo clave dada su marcada influencia sobre la mayoría de las propiedades del suelo, (Cantú *et al.*, 2007).

Tabla 8. Índice de la calidad de suelo.

Fincas	Profundidad	
	0-10 cm	10-30 cm
F1 SV-TENA	0,41±0,06 a	0,39±0,11 a
F2 AH-TENA	0,40±0,11 a	0,37±0,09 a
F3 AG-TENA	0,41±0,09 a	0,35±0,08 a
F4 EA-TENA	0,32±0,11 a	0,32±0,03 a
F5 LM-TENA	0,37±0,06 a	0,32±0,11 a
F6 GA-TENA	0,29±0,07 a	0,27±0,09 a
F7 DS-TENA	0,28±0,08 a	0,27±0,06 a
F8 EA-ARCHI	0,37±0,03 a	0,28±0,05 a
F9 PG-TENA	0,31±0,10 a	0,29±0,13 a
F10 MM-ARCHI	0,28±0,09 a	0,25±0,07 a
F11 B-TENA	0,28±0,11 a	0,27±0,01 a
F12 RP-AROSE	0,35±0,06 a	0,29±0,04 a
F13 MM-AROSE	0,37±0,04 a	0,21±0,01 a
F14 PV-AROSE	0,33±0,03 a	0,26±0,04 a
F15 CS-ARCHI	0,44±0,03 a	0,29±0,05 a
F16 CG-TENA	0,44±0,08 a	0,40±0,09 a

Leyenda: Las letras en las columnas representan diferencias significativas ($P < 0,05$); ARCHI: (Archidona); AROSE: (Arosemena Tola).

Tales resultados concuerdan con Cerda (2008), estudio desarrollado en Costa Rica, el ICS en sistemas agroforestales con *Theobroma cacao* obtuvo la mejor calidad y presentó mayor porcentajes de materia orgánica y nitrógeno total, lo cual indica que existe un adecuado reciclaje de biomasa, y se mantiene mejor el nitrógeno; se encontró similitudes en los indicadores de calidad de suelo de mayor peso, los cuales se destacan a continuación Da, K, Ni, Hojarasca y lombrices.

4.5. Matriz de correlación

El grado de asociación entre las distintas variables de suelo se evaluó a través del coeficiente de correlación de Pearson, basado en las categorías propuestas por Martínez Ortega *et al.*, 2009 (Anexo 4), la cual mostro relaciones significativas en algunas variables del horizonte superficial (Tabla 9).

4.5.1. Porosidad total vs porosidad de retención

La porosidad total frente a la porosidad de retención exhibió el mayor valor de correlación positiva, categorizado fuerte de 0,940**, indica que tienen una influencia alta de una variable con la otra puesto que, la Pt determina la capacidad de retención y movimiento del agua que son importantes para el crecimiento de las plantas (Sánchez, 2009).

4.5.2. Densidad aparente, materia orgánica y nitrógeno total

La materia orgánica frente a la densidad aparente presentó una correlación moderada de valor negativo de $-0,654^{**}$ mostrando que, si aumenta el contenido de MO disminuye la Da y viceversa. Según Jiménez y Khalajabadi (2005), la interacción de estas variables es la que mayor implicación tiene sobre las condiciones que determinan la disponibilidad de agua y aire, el área a ser explorada por las raíces y el crecimiento de las plantas.

El nitrógeno total ante la densidad aparente reflejó una correlación moderada de valor negativo de $-0,697^{**}$, lo cual indica que mientras el Nt aumente el contenido de Da disminuye y viceversa. La hojarasca y las raíces son fuente de N, en consecuencia, estimula la actividad biológica, construyendo el volumen de poros del suelo (Viana *et al.*, 2014).

El nitrógeno total frente a la materia orgánica mostró una correlación fuerte positiva de $0,894^{**}$, esto quiere decir que entre ambas variables existe una influencia alta. Acorde con Yanez *et al.*, (2019) la relación de estas variables indica que la materia orgánica, en este caso, ha contribuido suficiente a la fertilidad del suelo.

4.5.3. Magnesio vs Calcio

El magnesio frente al calcio presentó una correlación moderada de $0,655^{**}$, lo cual indica que tienen una influencia alta de una variable con la otra. El Ca y el Mg son cationes intercambiables atraídos por la materia orgánica del suelo y una vez retenidos son absorbidos por las plantas asegurando las proporciones requeridas de nutrientes, pero en suelos de regiones tropicales donde la precipitación es alta fácilmente se lixivian (Pellegrini, 2017).

Tabla 9. Coeficiente de correlación de las propiedades del suelo en unidades de producción con cacao.

	Da	Pt	Pa	Pr	pH	Al ³⁺ + H ⁺	Al ³⁺	MO	NT	P	K+	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Hoj	NL
Da	1,00														
Pt	-,539**	1,00													
Pa	-,398**	0,07	1,00												
Pr	-,384**	,940**	-,271**	1,00											
pH	,238*	0,00	-0,04	0,02	1,00										
Al ³⁺ + H ⁺	,216*	-0,12	-0,19	-0,05	-,225*	1,00									
Al ³⁺	,225*	-0,146	-0,191	-0,076	-0,078	,442**	1								
MO	-,654**	,504**	,210*	,414**	-,250*	-,254*	-,339**	1,00							
NT	-,697**	,435**	,238*	,338**	-,414**	-,226*	-,292**	,894**	1,00						
P	0,173	-0,111	0,107	-0,144	0,023	0,145	0,073	-0,051	-0,045	1					
K+	-,219*	0,07	0,20	0,00	-0,10	-0,09	0,11	,329**	,386**	0,16	1,00				
Ca ²⁺	0,13	-,214*	0,13	-,250*	0,06	0,04	,214*	-0,04	-0,06	,425**	,405**	1,00			
Mg ²⁺	,292**	-,281**	0,065	-,293**	-0,075	,208*	,355**	-0,19	-0,165	,331**	,484**	,655**	1		
Hoj	0,10	-0,10	,293**	-0,20	,223*	0,08	0,13	-,310**	-,290**	,202*	-0,10	,308**	,249*	1,00	
NL	-0,18	,230*	0,01	,219*	0,16	-0,11	-0,13	0,17	0,11	-0,05	0,14	-,221*	-0,17	-,222*	1,00

Leyenda: Da: Densidad aparente del suelo (Mg m⁻³); Pt: Porosidad total (%); Pa: Porosidad de aireación (%); Pr: Porosidad de retención (%); pH: pH del suelo; Al³⁺+ H⁺: Acidez intercambiable (meq 100 g s⁻¹); Al³⁺: Aluminio intercambiable (meq 100 g s⁻¹); MO: Materia orgánica (%); NT: Nitrógeno total (%); P: Fósforo (mg kg⁻¹); K+: Potasio intercambiable (meq 100 g s⁻¹); Ca²⁺: Calcio intercambiable (meq 100 g s⁻¹); Mg²⁺: Magnesio intercambiable (meq 100 g s⁻¹); Hoj: Hojarasca (Mg ha⁻¹); NL: Número de lombrices.

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

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

4.6. Secuestro de carbono en distintos compartimentos (biomasa aérea, hojarasca y suelo) para las 16 fincas consideradas.

4.6.1. Valor económico total CO₂ equi de los tres compartimentos

Al analizar los distintos compartimentos como la biomasa aérea, hojarasca y muestras de suelos de las 16 unidades de producción con cacao (*Theobroma cacao*) se pudo observar diferencias significativas como se muestra en la Tabla 10. De los tres componentes, independientemente de las fincas registradas se puede señalar que la mayor captura de carbono en Mg ha⁻¹ es la biomasa aérea, seguido por el componente suelo y quien menos aporta en la captura de carbono es la hojarasca, cabe recalcar que el suelo presenta valores aceptables de almacenamiento de carbono.

Después de la incineración de los combustibles fósiles, el cambio de uso del suelo es la segunda causa mundial de las emisiones de CO₂, y unos de estos cambios corresponden a los sistemas agrícolas, como la agricultura y ganadería es uno de los principales casos por los cuales los bosques son deforestados (IPCC, 2007). El propósito principal es optimizar la producción para un manejo sostenible además de generar bienes y servicios ecosistémicos, como el aumento de las reservas de carbono en la biomasa aérea y en el suelo (Kumar y Nair, 2004).

La cantidad de carbono almacenado en las diferentes fincas localizadas en los cantones Arosemena Tola, Tena, Archidona pertenecientes a la provincia de Napo fue muy variada obteniéndose valores de secuestro de carbono que oscilaron entre 4 a 200 Mg C Ha⁻¹ (Tabla 10) y donde la F1 SV-TENA, F10 MM-ARCHI, F13 MM-AROSE presentaron mejor comportamiento. Tales resultados esta asociados a una mayor acumulación de biomasa, lo que a su vez se tradujo en una menor tasa de emisión de CO₂ a la atmosfera.

También estas fincas fueron la que mayor valoración económica (VET CO₂ equivalente) como se muestra en la Figura 3. También, la mayor cantidad de árboles aportan más biomasa, por lo tanto, genera mayor cantidad de hojarasca, esta a su vez se convierte en materia orgánica (Tabla 10), lo cual ayuda a mejorar el potencial de secuestro de carbono por tanto a mayor potencial de secuestro de Carbono con menor tasa de emisión CO₂ al ambiente.

Resultados similares presenta el compartimento de la biomasa aérea reportados por Huera (2019) al compartir condiciones tropicales semejantes. Sin embargo, la captura de carbono no depende de las circunstancias ambientales sino del manejo de suelo que se dé, el cual puede causar cambios en el stock de carbono, otras investigaciones reportan una disminución de secuestro de carbono cuando hay conversión de bosques a sistemas intensivos (Bravo *et al.*, 2017b; Martínez *et al.*, 2008).

Tabla 10. Secuestro de carbono y su valor económico total de Dióxido de carbono equivalente de los distintos compartimentos (biomasa aérea, hojarasca y suelo).

FINCAS	BA	Carbono Mg ha	CO ₂ Mg ha	C suelo Mg ha	Hojarasca Mg	CTA Mg Ha	CO ₂ eq Total	VET CO ₂ equi
F1 SV-TENA	398,06	199,03	730,45	80,98	2,82	282,83	1037,99	15569,78
F2 AH-TENA	211,07	105,54	387,32	89,61	6,14	201,28	738,71	11080,65
F3 AG-TENA	166,27	83,13	305,10	66,07	6,30	155,51	570,73	8560,94
F4 EA-TENA	91,69	45,85	168,26	128,65	3,86	178,35	654,54	9818,16
F5 LM-TENA	159,64	79,82	292,93	108,99	5,83	194,63	714,30	10714,49
F6 GA-TENA	154,95	77,48	284,34	162,27	3,65	243,39	893,26	13398,89
F7 DS-TENA	82,01	41,01	150,49	114,94	2,24	158,18	580,54	8708,05
F8 EA-ARCHI	112,57	56,29	206,57	117,30	2,82	176,40	647,40	9710,93
F9 PG-TENA	157,21	78,60	288,48	162,90	4,38	245,89	902,42	13536,30
F10 MM-ARCHI	208,98	104,49	383,48	152,70	3,66	260,85	957,31	14359,70
F11 B-TENA	43,37	21,69	79,59	132,87	3,24	157,80	579,11	8686,70
F12 RP-AROSE	244,49	122,25	448,64	86,23	7,32	215,80	791,97	11879,62
F13 MM-AROSE	308,50	154,25	566,09	97,77	4,34	256,36	940,83	14112,40
F14 PV-AROSE	8,36	4,18	15,34	67,24	3,76	75,18	275,92	4138,77
F15 CS-ARCHI	199,83	99,91	366,69	50,05	5,11	155,07	569,12	8536,87
F16 CG-TENA	126,70	63,35	232,49	77,15	3,30	143,80	527,74	7916,06

Leyenda: BA: biomasa aérea, CO₂: Dióxido de carbono, C: carbono, CTA: carbono total almacenado, CO₂eq: dióxido de carbono equivalente, VET CO₂equi: valor económico total de dióxido de carbono equivalente, ARCHI: (Archidona); AROSE: (Arosemena Tola).

Fuente: Autores

El carbono capturado en la hojarasca no presenta diferencias significativas entre las unidades de producción de cacao, representando el menor aporte de secuestro de carbono en comparación a la biomasa aérea y el suelo, criterios similares lo manifiesta Moreno (2018). Por otro lado el inadecuado manejo y uso de que se dé al suelo daría una baja tasa de retención de CO₂, para obtener impactos positivos se debería realizar una adecuada selección de usos y manejo del suelo (Díaz 2016; González *et al.*, 2013). Dependiendo el uso que se dé al suelo esto puede actuar como depósito o fuente de carbono (Martínez *et al.*, 2008).

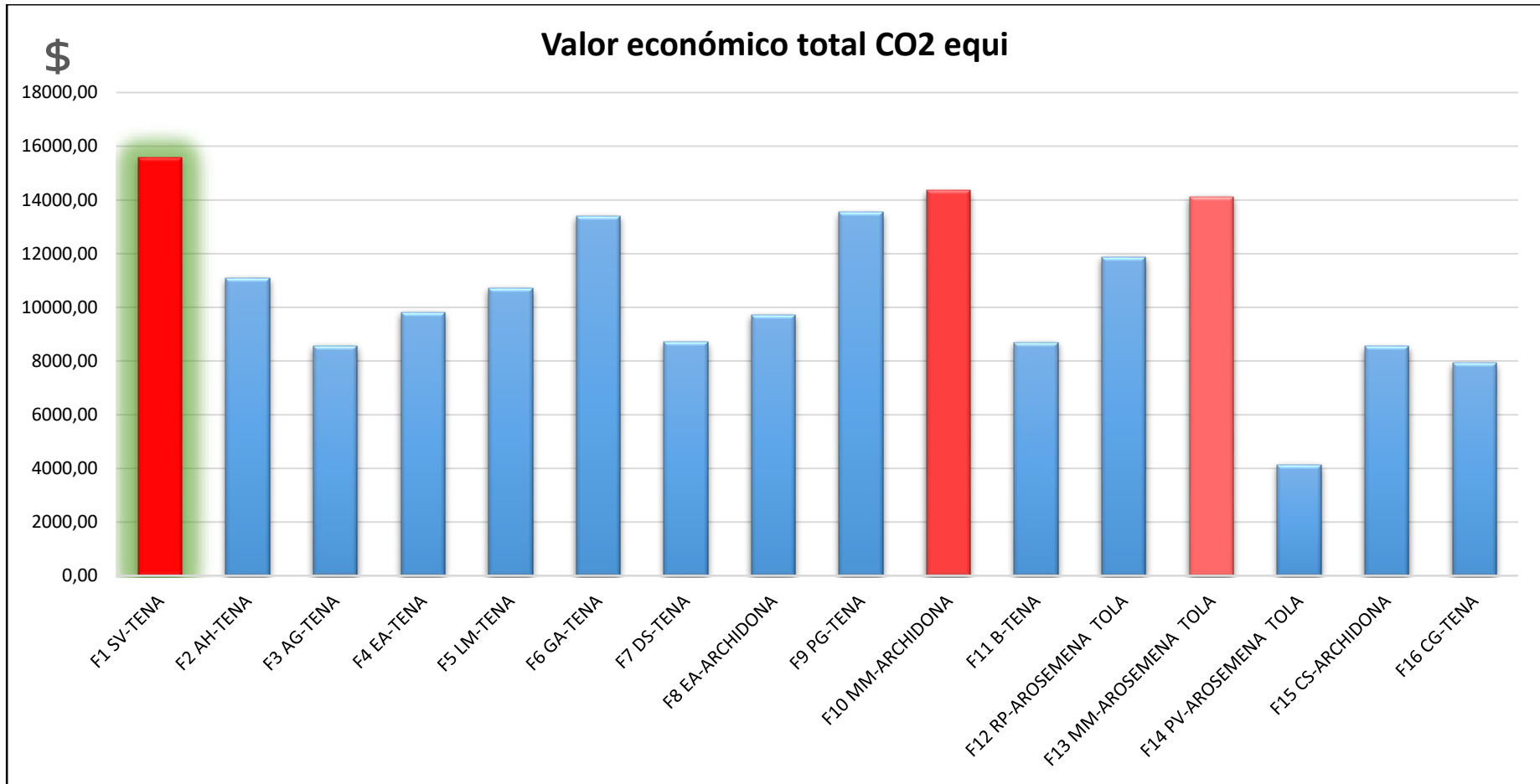


Figura 3. Valor económico total CO₂ equivalente de los tres compartimentos (biomasa aérea, hojarasca y suelo)

4.6.2. Valoración económica de fertilidad del suelo y CO₂ equi como servicio ecosistémico bajo las unidades de producción de cacao.

Utilizar la valoración económica en el contexto de los servicios ecosistémicos tiene varias e importantes ventajas según Ortega (2008), entre ellas: facilita analizar las mejores alternativas para la sociedad, cuando los valores se miden de la misma manera; es más fácil y eficaz brindar información a los tomadores de decisiones en términos monetarios antes que los biofísicos; y el esquema de pago por servicios ecosistémicos requieren ediciones en términos monetarios y no biofísicos. La determinación del valor del servicio ecosistémicos se puede estimar por la medición de la provisión de servicios; determinando el valor monetario y el diseño de herramientas políticas para gestión de servicios ecosistémicos (Barroso-Tagua, 2017).

Indistintamente de las 16 unidades de producción de cacao, se puede apreciar las concentraciones de cada elemento (Tabla 11). El aporte económico total es 221133,60 \$ha⁻¹, donde los mayores aportes los atribuye la materia orgánica del suelo (MOS) refleja como mayor valor económico de fertilidad del suelo, seguido sucesivamente del calcio, nitrógeno inorgánico, magnesio, potasio y fósforo. La materia orgánica fue estimado con un valor económico de 125 \$ por Mg, precio que se obtuvo de los productos que distribuye la casa comercia de agroquímicos (Agripac, 2018), con aporte en su total de 211965,78 \$ha⁻¹, (Tabla 11), resultando ser la F9 PG-TENA debido a que mayor valor de fertilidad de suelo contiene por estar conformado de biomasa aérea y la F15 CS-ARCHI presenta menor fertilidad de su suelo como servicio ecosistémico, sin embargo las demás unidades de producción aportan valores similares e importantes.

En cuanto al valor económico (VE) del nitrógeno, fósforo y potasio en Kgha⁻¹, fue estimado a un precio de 1,8; 0,95 y 1,16 \$ por Kg respectivamente, precios que se obtuvo de la casa de Agroquímicos (Agripac, 2018). En cuanto al VET se destaca la F9 PG-TENA por contener un alto valor en la MO 20363,11 60 \$ha⁻¹, mientras que la F15 CS-ARCHI presentó el menor aporte 6256,75 \$ha⁻¹, pero este a su vez el P, K, Ca y Mg sus aportes económicos son mayores que la F9 PG-TENA

Tabla 11. Valoración económica de fertilidad del suelo y CO₂ equi como servicio ecosistémico bajo las unidades de producción de cacao.

FINCAS	Valor Económico (\$) MOS	Valor Económico (\$) NI	Valor Económico (\$) P	Valor Económico (\$) K	Valor Económico (\$) Ca	Valor Económico (\$) Mg	Valor Económico (\$) Total
F1 SV-TENA	10122,58	65,59	25,58	124,11	525,23	106,09	10969,19
F2 AH-TENA	11200,98	72,58	10,21	121,82	738,89	97,41	12241,88
F3 AG-TENA	8259,30	53,52	37,48	59,83	593,52	57,36	9061,01
F4 EA-TENA	16080,97	104,20	5,04	52,14	318,25	39,87	16600,48
F5 LM-TENA	13623,35	88,28	2,10	35,54	304,60	32,04	14085,91
F6 GA-TENA	20283,83	131,44	9,10	27,87	381,35	15,91	20849,50
F7 DS-TENA	14367,25	93,10	6,26	74,38	374,25	39,47	14954,71
F8 EA-ARCHI	14662,30	95,01	3,13	39,72	43,71	11,60	14855,47
F9 PG-TENA	20363,11	131,95	10,34	37,61	412,75	29,80	20985,56
F10 MM-ARCHI	19087,53	123,69	1,75	38,20	120,41	14,32	19385,90
F11 B-TENA	16608,96	107,63	2,80	84,39	147,82	32,82	16984,42
F12 RP-AROSE	10778,41	69,84	9,43	43,02	504,44	64,72	11469,87
F13 MM-AROSE	12221,63	79,20	4,72	28,89	212,61	24,84	12571,89
F14 PV-AROSE	8404,87	54,46	0,79	45,04	113,62	10,41	8629,19
F15 CS-ARCHI	6256,75	40,54	21,44	45,72	520,18	91,08	6975,71
F16 CG-TENA	9643,97	62,49	13,79	52,35	642,27	98,02	10512,91
TOTAL (\$)	211965,78	1373,54	163,96	910,64	5953,91	765,76	221133,60

Leyenda: ha: hectáreas; MOS: materia orgánica del suelo; NI: nitrógeno inorgánico; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio, ARCHI: (Archidona); AROSE: (Arosemena Tola).

Fuente: Autores

Como lo manifiesta Salamanca y Sadeghian (2006), las concentraciones de cada elemento se relacionan directamente con la materia orgánica, que es el resultado de la acumulación de los residuos de un bosque originando la formación de una capa superficial netamente orgánica, resultado de todo material orgánico vegetal y animal, que se encuentra en la superficie del suelo y es descompuesto por los microorganismos, contribuyendo a mejorar las condiciones del suelo y favoreciendo al crecimiento de plantas (Díaz, 2016).

A partir del apareamiento de los proyectos de mecanismos de desarrollo Limpio (MDL), el secuestro de carbono halla un valor en el mercado (Miranda *et al.*, 2007). El pago de servicios ambientales por fijación y acopio de carbono simboliza una opción para brindar un valor adherido a la producción, lo que podría darse la ocasión de tener una gran importancia para los productores (González *et al.*, 2013). La valoración económica de CO₂ equivalente como servicio ecosistémico tiene un valor económico en el mercado de 15 \$ por mega gramo (Mg) SENDECO2 (2018).

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Las propiedades físicas (Da, Pt, Pa, Pr) evaluadas en las unidades de producción con cacao presentaron valores óptimos desde una perspectiva ambiental los suelos no presentan problemas como degradación física o compactación.
- Las propiedades químicas (pH, A^{1+3+H^+} , A^{1+3} , K, Ca, Mg, P, Nt, MO) determinadas reflejaron suelos ácidos por ende altas concentraciones de aluminio intercambiable, denotan baja fertilidad natural, presentan baja disponibilidad de nutrientes como potasio, calcio, magnesio y fósforo, poseen bajas concentraciones de nitrógeno total y alto contenido de materia orgánica por el reciclaje continuo de biomasa.
- Las propiedades biológicas (lombrices, hojarasca) valoradas en las unidades de producción con cacao mostraron valores adecuados, se recicla continuamente mayor cantidad de hojarasca, se cumplen funciones edáficas relevantes con la ayuda de los microorganismos.
- Los conjuntos mínimos de indicadores de la calidad del suelo seleccionados fueron MO, Nt, Da, Pt, K, Ca. El Índice de Calidad de Suelo fue mayor en el horizonte superficial y no presentó diferencias significativas varió de bajo a moderado (0,28-0,44) de la misma forma en la capa más profunda (0,21-0,40) con mayores índices en las fincas localizadas en Tena.
- La cuantificación de los servicios ecosistémicos basados en la valoración económica de fertilidad y CO₂ equivalente permite tener claro la importancia y los beneficios que tiene los ecosistemas amazónicos, mostrando que el mayor valor económico de fertilidad se registró en la Finca 9 PG-TENA con \$20985,56 y en el caso de Valor Económico Total de Dióxido de Carbono equivalente fue \$15569,78 en la Finca 1 SV-TENA.

5.2. Recomendaciones

- Fomentar investigaciones continuas acerca de la calidad del suelo con la finalidad de recopilar la información necesaria para evaluar los atributos físicos, químicos y biológicos y proporcionar los resultados obtenidos a cada propietario de las fincas para posterior a ello se proceda a la toma de decisiones sobre el manejo y uso adecuado del suelo.
- Implementar metodologías de valoración económicas y dar a conocer la importancia que tiene la fertilidad y CO₂ equivalente como servicio ecosistémico debido a que genera un valor económico en el mercado, por lo tanto, los propietarios de las fincas deben innovar la forma de cultivar para evitar causar daño al suelo aplicando buenas prácticas ambientales como: implementar sistemas forestales y agroforestales; así obtendrán beneficios de pago por servicios ambientales y bonos de carbono.

CAPÍTULO VI

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aciego, J.** (2015). *Indicadores microbianos de la calidad del suelo*. 5.
- Acosta, M. y Carrillo, A.** (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105-114.
- Agripac.** (2018). Empresa de agroquímicos del Ecuador. Guayaquil-Ecuador: Agripac S.A. Recuperado de <http://www.agripac.com.ec/es/inicio/>.
- Almeida AAF, Valle RR.** (2007). Ecophysiology of the cacao tree. *J Plant Physiol* 19(4):425-448.
- Álvarez, D.** (2019). *Servicios ecosistémicos del recurso suelo en el sistema de producción con papa china (Colocasia esculenta) y el bosque del sector Cajabamba Provincia de Pastaza* (tesis de pregrado). Universidad Estatal Amazónica, Ecuador.
- Andrews, S., Flora, C., Mitchell, J., Karlen, D.** (2003). Growers' perceptions and acceptance of soil quality indices. *Geoderma*. 114, 187-213.
- Andrews, S.S., Mitchell, J.P., Mancinelli, R., Karlen, D.L., Hartz, T.K., Horwath, W.R., Pettygrove, G.S., Scow, K.M., Munk, D.S.** (2002). On-farm assessment of soil quality in California's central valley. *Agronomy Journal*. 94, 12-23
- Arana-Medina, V.** (2015). Análisis y valoración de los servicios de los ecosistemas de humedales asociados al río León (Urabá Antioqueño - Colombia). Su relación con el sistema hídrico subterráneo y con el bienestar humano. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de la Plata, Colombia.
- Balvanera, P.** (2012). *Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales*. 12.
- Barroso-Tagua, R., Álvarez, D., Huera, T., Changoluisa, D. y Bravo, C.** (2017). La fertilidad del suelo como un servicio ecosistémico en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L), en la provincia de Napo, 101-108. En: Alemán, R., Reyes, H. y Bravo, C. (Eds.) (2017). Libro de memorias: Simposio internacional sobre Manejo sostenible de tierras y seguridad alimentaria. Universidad Estatal Amazónica. Puyo, Ecuador. 279 pp.
- Bastida, F., Moreno, J.L., Hernandez, T., García, C.** (2006). Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biology and Biochemistry*. 38, 3463-3473.

- Bentley JW, Boa E, Stonehouse J.** (2004). Neighbor trees: shade, intercropping and cacao in Ecuador. *Hum Ecol* 32(2):241-270.
- Bertsch, F.** (1998). La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Blake, G. R. y Hartge, K.** (1986). Bulk Density 1. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods (methodsofsoilan1)*, 363-375.
- Bolívar, M. Toro, M. Sandoval y M. López,** (2009). «Importancia ambiental y socioeconómica de las micorrizas en el cultivo de cacao caso: Hacienda cata, Municipio de costa de oro, Estado aragua,» *Agronomía Tropical*, pp. 492-501.
- Boñón, G. H. A.** (2013). *Estudio de servicios ecosistemicos*. 98.
- Bravo, C., Benítez, D., Burgos, J. C. V., Alemán, R., Torres, B., y Marín, H.** (2015). Caracterización socio-ambiental de unidades de producción agropecuaria en la Región Amazónica Ecuatoriana: Caso Pastaza y Napo. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(1), 3-31.
- Bravo, C., Lozano, Z., Hernández, R., Canchica, H., y Hernández, M.** (2008). Siembra directa como alternativa agroecológica para la transición hacia la sostenibilidad de las sabanas. *Acta Biológica Venezuelica*, 28, 15-28.
- Bravo, C., Marín, H., Marrero-Labrador, P., Ruiz, M. E., Torres, B., Navarrete-Alvarado, H., y Durazno-Alvarado, G.** (2017b). *Evaluación de la sustentabilidad mediante indicadores en unidades de producción de la provincia de Napo, Amazonia Ecuatoriana*. 14.
- Bravo, C., Ramírez, A., Marín, H., Torres, B., Torres, R., Navarrete, H., y Changoluisa, D.** (2017). Factores asociados a la fertilidad del suelo en diferentes usos de la tierra de la Región Amazónica Ecuatoriana. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 18(11), 1-16.
- Bravo, C., Torres, B., Alemán, R., Marín, H., Durazno, G., Navarrete, H., Gutiérrez, E. T., y Tapia, A.** (2017a). Indicadores morfológicos y estructurales de calidad y potencial de erosión del suelo bajo diferentes usos de la tierra en la Amazonía Ecuatoriana. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 37(2), 247-264. <https://doi.org/10.5209/AGUC.57725>
- Butler, R. A. y Laurance, W. F.** (2008). New strategies for conserving tropical forests. *Trends in ecology and evolution*, 23(9), 469-472.

- Calderón, M. A., Moreno, M. M., y Barra, J. E.** (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605-620.
- Calva, C y Espinosa, J.** (2017). Efecto de la aplicación de cuatro materiales de encalado en control de la acidez de un suelo de Loreto, Orellana. *Siembra* 4 (1) 110-120.
- Cantú, M., Becker, A., Bedano, J., y Schiavo, H.** (2007). *Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices*. 25.
- Caro, C. I., y Torres, M. A.** (2015). Servicios ecosistémicos como soporte para la gestión de sistemas socioecológicos: Aplicación en agroecosistemas. *Orinoquia*, 19(2), 237. <https://doi.org/10.22579/20112629.338>
- Cerda, R.** (2008). *Calidad de suelos en plantaciones de cacao (Theobroma cacao), banano (Musa AAA) y plátano (Musa AAB) en el valle de Talamanca, Costa Rica*. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A1822E/A1822E.PDF>
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J., Eamus, D., . . . Kira, T.** (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99.
- Cutini, A., Chianucci, F. y Manetti, M. C.** (2013). Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *IForest* 6: 331-337.
- Díaz, A.** (2016). Impacto ambiental del cambio de uso del suelo sobre los parámetros edáficos en la Reserva de Biosfera Sumaco, Provincia de Napo. (Tesis de pregrado). Universidad Estatal Amazónica, Pastaza
- FAO.** (2015). *Agricultura sostenible: Una herramienta para fortalecer la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe*. 48.
- Gaibor, K.** (2018). *Servicios ecosistémicos del recurso suelo bajo distintos usos de la tierra en agroecosistemas de la cuenca alta del río Napo*. Universidad Estatal Amazónica.
- García, Y., Ramírez, W., y Sánchez, S.** (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: Una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138.
- Garzón, M. A. M.** (2016). *Aproximación a la valoración socio-cultural de los servicios ecosistémicos en el territorio del Municipio de Villavicencio – Meta* (Colombia). 115.
- Gaspari, F. J., Díaz-Gómez, A. R., Delgado, M.I. y Senisterra, G. E.** (2015). Evaluación del Servicio Ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 144, (214-221)..

- Gobierno Parroquial Rural de Puerto,** (2015). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Recuperado de <https://odsterritorioecuador.ec/wp-content/uploads/2019/04/PDOT-PARROQUIA-PUERTO-NAPO-2015-2019.pdf>
- González, D y Figueroa, J.** (2013). Valoración del Servicio Ecosistémico Secuestro de Carbono, como una vía para contribuir con el Desarrollo Sostenible de un país. Caso: Venezuela. LACCEI; *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*.
- Guallo, N.** (2018). *Secuestro de Carbono como servicio ecosistémico en distintos usos de la tierra en la cuenca media del río Napo, región amazónica ecuatoriana*. Universidad Estatal Amazónica.
- Hanleyet, N., Wright, R. E. y Alvarez-Farizo, B.** (2006). Estimating the economic value of improvements in river ecology using choice experiments: an application to the water framework deirective . *J. Eviron. Manag.* 78, 183-193.
- Hartemink AE.** (2005). Nutrient stocks, nutrient cycling, and soil changes in cocoa ecosystems: a review. *Adv Agron* 86:227-253.
- Hernández, A. V.** (2013). *Espamciencia*, 59-65.
- Huera, T.** (2019). *Valoración de los servicios ecosistémicos en diferentes usos del suelo del paseo turístico río Puyo, Provincia de Pastaza*. Universidad Estatal Amazónica.
- Jiménez, A. S., y Khalajabadi, S. S.** (2005). *La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana*. 17.
- INIAP.** (2012). Definición de suelo. *Suplemento Tecnológico*, 22. Obtenido de Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- IPCC.** (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4): Cambridge university press.
- Kumar, M. y Kumar, P.** (2008). Valuation of the ecosystem services: a psycho-cultural perspective. *Ecol. Econ.* 64, 808-819.
- Kumar, B. M., y Nair, P. R.** (2004). The enigma of tropical homegardens. *Agroforestry Systems*, 61(1-3), 135-152.
- Loaiza Usuga, J.** (2011). El recurso suelo. *Suelos Ecuatoriales*, 41, 6-18.
- MAE.** (2016). Bosques para el Buen Vivir - Plan de Acción REDD+ Ecuador (2016-2025). Quito, 223.

- Martín, N. J., y Pérez, G.** (2009). Evaluación agroproductiva de cuatro sectores de la provincia de Pastaza en la Amazonía ecuatoriana. *Cultivos Tropicales*, 30(1).
- Martínez H, E., Fuentes E, J. P., y Acevedo H, E.** (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., y Cánovas, A. M.** (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de spearman caracterización. *Habanera de Ciencias*, 8(2), 20.
- Masto, R.E., Chhonkar, P.K., Singh, D., Patra, A.K.** (2008). Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental monitoring and assessment*. 136, 419-435.
- Miranda, T., Machado, R., Machado, H., y Duquesne, P.** (2007). Carbono secuestrado en ecosistemas agropecuarios cubanos y su valoración económica.: Estudio de caso. *Pastos y Forrajes*, 30.
- Moreira D y Castro C.** (2017). Sistemas agroforestales Adaptación y mitigación en la producción de banano y cacao. Extraído de <http://repositorio.iica.int/bitstream/11324/3049/1/BVE17068963e.pdf>.pp3-12
- Moreno, G. F.** (2018). *Biodiversidad y Potencial de captura de carbono en distintos tipos de bosque de la cuenca alta del río Napo* (tesis de pregrado). Universidad Estatal Amazónica, Ecuador.
- Nelson, D y Sommers, L. E.** (1982). Total carbón, organic carbón, and organic matter1. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties (methodsofsoilan2), 539-79.
- Ordóñez Díaz, J. A. B., Rivera Vázquez, R., Tapia Medina, M. E., y Ahedo Hernández, L. R.** (2015). Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6, 7-16.
- Ortega, S. C. (Ed).** (2008). Reconocimiento de los servicios Ambientales: *Una Oportunidad para la Gestión de los Recursos Naturales en Colombia*. Bogotá, Colombia. 2013 pp.

- Ortiz M.** (2006). Conocimiento local y decisiones de los productores de Alto Beni, Bolivia, sobre el diseño y manejo de la sombra en sus cacaotales [Tesis de maestría]. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Pacha, M. J.** (2014). *Valoración de los servicios ecosistémicos como herramienta para la toma de decisiones: Bases conceptuales y lecciones aprendidas en la Amazonía* (Primera). Supernova Design.
- Paguay, D.** (2016). *Influencia de los sistemas agroforestales y monocultivo de cacao sobre la calidad del suelo, en el cantón Arosemena Tola* (tesis de pregrado). Universidad Estatal Amazónica, Ecuador.
- Paredes Andrade, N.** (2009). *Manual de cultivo de cacao para la Amazonía Ecuatoriana*. Quito / INIAP / 2009.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A. ... y Hayes, D.** (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333:988-992.
- Pellegrini, A.** (2017). *Potasio, calcio y magnesio en el suelo*. http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/35408/mod_resource/content/1/14%20-%20CALCIO%2C%20MAGNESIO%20Y%20POTASIO.pdf
- Peralta, R. S.** (2016). *Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la subcuenca del río shullcas 2000 – 2013, huancayo*. 111.
- Pintado, S.** (2018). *Evaluación de la calidad del suelo bajo distintos usos de la tierra mediante parámetros ambientales en el cantón Carlos Julio Arosemena Tola, Provincia de Napo* (tesis de pregrado). Universidad Estatal Amazónica, Ecuador.
- Pla, I.** (2010). Medición y evaluación de propiedades físicas de los suelos: dificultades y errores más frecuentes. *Propiedades Mecánicas. Suelos Ecuatoriales*. 40, 75-93.
- Rice RA, Greenberg R.** (2000). Cacao cultivation and the conservation of biological diversity. *Ambio* 29(3):167-173.
- Rico, F., y Rico, H.** (2014). El uso del suelo, ¿Un problema de capacidad productiva y de políticas públicas? *Logos, Ciencia y Tecnología*, 5(2), 213-231.
- Ruf F, Schroth G.** (2004). Chocolate forest and monocultures: a historical review of cocoa growing and its conflicting role in tropical deforestation and forest conservation. En: Schroth G, da Fonseca G, Harvey CA, Gascon C, Vasconcelos H, Izac AM, editores. *Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes*. Washington DC: Island Press. pp. 107-134.

- Salamanca, A., y Sadeghian, S.** (2006). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana.
- Sánchez, R.** (2009). *Tamaño de partícula y relación micromorfológica en propiedades físicas de perlita y zeolita*. 10.
- Schroth G.** (2003). Decomposition and nutrient supply from biomass. En Schroth G, Sinclair F, editores. *Trees, crops and soil fertility: concepts and research methods*. Wallingford, UK: CAB International.
- Schroth G, Harvey CA.** (2007). Biodiversity conservation in cocoa production landscapes: na overview. *Biodivers Conserv* 16(8):2237- 2244.
- Schroth G, Krauss U, Gasparoto L, Duarte JA, Vohland K.** (2000). Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agrofor Syst* 50:199-241.
- Vallejo Quintero, V. E.** (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16(1), 83-99.
- SENDECO2.** (2018). Sistema europeo de negociación de CO2. Sur de Europa: "IETA" Market solutions for climate change. Recuperado de <https://www.sendeco2.com/es/>.
- Sharma, K., Mandal, U.K., Srinivas, K., Vittal, K., Mandal, B., Grace, J.K., Ramesh, V.** (2005). Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil Tillage Res.* 83, 246-259.
- Sierra, R.** (2013). Patrones y factores de deforestación en el Ecuador continental, 1990-2010. Y un acercamiento a los próximos 10 años. *Conservación Internacional Ecuador y Forest Trends*. Quito, Ecuador.
- Soriano-Luna, M. d. I. A., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F. O. y Razo-Zárate, R.** (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49, 423-438.
- Torres, B., Starnfeld, F., Vargas, J. C., Ramm, G., Chapalbay, R., Ríos, M. ... Cordoba-Bahle, S. D.** (2014). *Gobernanza participativa en la Amazonía del Ecuador: recursos naturales y desarrollo sostenible*. Universidad Estatal Amazónica, Ministerio del

Ambiente del Ecuador, Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Napo y Cooperación Alemana al Desarrollo. Puyo, Ecuador. P.12.

Vallejo Quintero, V. E. (2013). Importancia Y Utilidad De La Evaluación De La Calidad De Suelos Mediante El Componente Microbiano: Experiencias En Sistemas Silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16(1), 83-99.

Vega M. (2005). Planificación agroforestal participativa para el enriquecimiento de fincas cacaoteras orgánicas con especies leñosas perennes útiles en Alto Beni, Bolivia [Tesis de maestría]. Turrialba, Costa Rica: CATIE

Verón Jean Pierre y Ulcuango Jeimy (2019). *Evaluación de la calidad físico-químico del suelo bajo uso con Bosque primario y secundario en la microcuenca del río Puyo, Provincia de Pastaza* (tesis de pregrado). Universidad Estatal Amazónica, Ecuador.

Viana, R. M., Ferraz, J. B. S., Neves, A. F., Vieira, G., y Pereira, B. F. F. (2014). Soil quality indicators for different restoration stages on Amazon rainforest. *Soil and Tillage Research*, 140, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.005>

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

Yáñez, P. B., Ríos, J. G., Sandoval, B. F., y Cossio, F. G. (2019). *Materia orgánica y caracterización de suelos en proceso de recuperación con coberturas vegetativas en zonas templadas de México*. 11.

Zhang, Y., Xu, X., Li, Z., Liu, M., Xu, C., Zhang, R., Luo, W., (2019). Effects of vegetation restoration on soil quality in degraded karst landscapes of southwest China. *Sci. Total Environ.* 650, 2657-2665.

Zuidema PA, Leffelaar AF Gerritsma W, Mommer K, Anten NPR. (2005). A physiological production model for cocoa (*Theobroma cacao*): model presentation, validation and application. *Agric Syst* 84:195-225.

CAPÍTULO VII

7. ANEXOS

Anexo 1. Valores óptimos para evaluar los parámetros físicos

Indicador	Unidad	Valores
Densidad Aparente (Da)	Mg m ⁻³	1,20
Porosidad Total (Pt)	%	50
Porosidad de Aireación (Pa)	%	10
Porosidad de Retención (Pr)	%	55

Fuente: (Pla, 2010)

Anexo 2. Niveles críticos para la interpretación de los análisis de suelos

	Muy Ácido	Ácido	Mediana Ácido	Ligeramente Ácido	Prácticamente Neutro	Ligeramente Alcalino	Medianamente Alcalino	Alcalino
pH	0,0-<5,00	5-5,5	>5,5-6	>6-6,5	>6,5-7,5	>7,5-8	>8-8,5	>8,5
Nutriente	Unidad	Bajo	Medio	Alto				
P	ppm	<10	10.-20	>20				
K	meq/100ml	<0,2	0,2-0,38	>0,38				
Ca	meq/100ml	<2	2- 5.	>5				
Mg	meq/100ml	<0,5	0,5-1,5	>1,5				
MO	%	<3	3-5	>5				
Nutriente	Unidad	Bajo	Medio	Tóxico				
Al+H	meq/100ml	<0,50	0.5-1,5	>1,5				
Al	meq/100ml	<0,30	0.3-1,00	>1,00				

Fuente: (INIAP, 2012)

Anexo 3. Clases de calidad del suelo

Clases	Índice de Calidad de Suelo	Escala
1	Muy alta calidad	0,80 – 1,00
2	Alta calidad	0,60 – 0,79
3	Moderada calidad	0,40 – 0,59
4	Baja calidad	0,20 – 0,39
5	Muy baja calidad	0,00 – 0,19

Fuente: (Cantú *et al.*, 2007)

Anexo 4. Rangos de categorización (Spearman y Pearson)

Rango	Relación
0 – 0,25	Escasa o nula
0,26 – 0,50	Débil
0,51 – 0,75	Moderada
0,76 – 1,00	Fuerte

Fuente: (Martínez Ortega *et al.*, 2009)

		
<p>Figura 4 Delimitación de subparcelas</p>	<p>Figura 5 Toma de muestras con Uhland para análisis físicos</p>	<p>Figura 6 Recolección de muestras para análisis químicos</p>
		
<p>Figura 7 Recolección de hojarasca</p>	<p>Figura 8 Cuantificación de lombrices</p>	<p>Figura 9 Realización del inventario forestal</p>



Figura 10 Colocación de la muestras de suelo



Figura 11 Trituración de las muestras



Figura 12 Determinación de pH



Figura 13 Análisis de, P, K, Ca, y Mg del suelo.



Figura 14 Pesaje de la hojarasca



Figura 15 Determinación de Nitrógeno Total



Figura 16 Determinación de materia orgánica



Figura 17 Obtención de porosidad



Figura 18 Análisis de Al+H y Al