

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“CALIDAD DE SUELOS Y RESERVORIOS DE CARBONO DE LOS SUELOS
ASOCIADOS A DOS MANEJOS DE PIÑA (ORGÁNICO Y CONVENCIONAL) Y UNA
ZONA DE BOSQUE SECUNDARIO EN LA VIRGEN DE SARAPIQUÍ, HEREDIA”

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del
Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales
para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos
Naturales con énfasis en Suelo

ROBERTO CLEMENTE AGUIRRE ELIZONDO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2021

Dedicatoria

A mi abuelo (Q.D.E.P) Israel Elizondo Fernández, que fue siempre una persona trabajadora y servicial con toda mi familia. Lo vamos a extrañar por siempre.

A mis papas, porque ambos a través de todos sus esfuerzos me permitieron llegar a donde estoy y me brindaron las herramientas para ser una persona responsable y trabajadora.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme lograr finalizar con mi maestría y por darme salud.

Al proyecto VI-733-B9466 “Secuestro de carbono, biomasa, actividad y estructura de la comunidad microbiana del suelo en sistemas agrícolas dedicados a la producción de piña orgánica y convencional”, esto debido a que a través del mismo pude realizar todo lo relacionado con mi tesis.

Al personal del CIA (M.Sc Rafael Mata, Lic. Leida Castro y Lic. Natalia Zúñiga), CICA (Lic. Melvin Alpízar) y otros investigadores involucrados en el proyecto (Dra. Ana María Durán, M.Sc. Paola Fuentes y M.Sc. Daniela Vidaurre).

Especialmente quiero agradecerle a la Dra. Lidieth Uribe por brindarme su ayuda durante muchos años en mi licenciatura y durante la maestría, además de permitirme participar en el proyecto en el cual se desarrolló esta tesis. También a la Dra. Cristina Chinchilla, por brindarme la oportunidad de hacer esta tesis bajo su dirección y aprender muchas cosas durante mi posgrado.

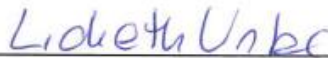
A todos los asistentes y personal de la UCR que aportaron en el desarrollo de este estudio. Agradeciendo particularmente al Ing. Oldemar Vargas y la Sra. Rebeca Vargas por su colaboración en las giras y análisis de las muestras.

A Edgar Vindas y Pamela Zúñiga por su amistad y compañerismo durante la maestría, además de ser apasionados por el estudio del suelo.

Al Dr. Juan Carlos Méndez por sus observaciones y comentarios con lo relacionado a la química de suelos.

Al Dr. Manuel Spínola por sus observaciones y correcciones para el análisis estadístico de los datos.

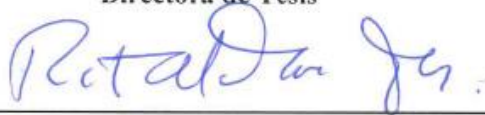
“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelo.”



Dra. Lidieth Uribe Lorío
**Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado**



Dra. Cristina Chinchilla Soto
Directora de Tesis



M. Sc Rafael Mata Chinchilla
Lector



Dra. Ana María Durán Quesada
Lectora



Dra. Catalina Salas Durán
Directora

Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales



Roberto Clemente Aguirre Elizondo
Candidato

Tabla de contenidos

Índice	
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Hoja de aprobación	iv
Tabla de contenidos	iv
Resumen	ix
Índice de figuras	x
Índice de cuadros	xii
Índice de anexos	xiv
1. Capítulo 1: Generalidades del cultivo de la piña y su producción en Costa Rica.	1
Introducción	1
Objetivos	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos.....	3
Literatura citada	5
2. Capítulo 2: Marco Teórico	7
Cultivo de piña	7
<i>Problemas en la producción de piña</i>	8
Calidad del suelo	9
<i>Indicadores de calidad del suelo</i>	9
Carbono orgánico del suelo (COS)	12
<i>Composición del carbono orgánico del suelo</i>	14
<i>Influencia sobre propiedades edáficas</i>	14
Literatura citada	16

3. Capítulo 3: Génesis y clasificación suelos asociados a dos manejos de piña (orgánico y convencional) y una zona de bosque secundario en La Virgen de Sarapiquí, Heredia.	23
Resumen	23
Introducción	24
<i>Material Parental</i>	24
<i>Relieve</i>	25
<i>Cobertura vegetal</i>	25
<i>Clima</i>	26
Metodología	26
<i>Sitios de estudio</i>	26
<i>Trabajo de campo</i>	26
<i>Métodos de análisis físicos y químicos del suelo</i>	27
<i>Criterios de clasificación taxonómica</i>	27
Resultados	28
<i>Datos Climáticos</i>	28
<i>Características físicas de los perfiles en estudio</i>	30
<i>Características químicas de los perfiles en estudio</i>	34
<i>Clasificación taxonómica</i>	37
Literatura Citada	38
Anexos	40
4. Capítulo 4: Índices de calidad asociados a dos manejos de piña y una zona de bosque secundario en La Virgen de Sarapiquí, Heredia.	43
Resumen	43
Introducción	44
Metodología	45
<i>Sitio Experimental</i>	45

<i>Manejos del suelo</i>	45
<i>Diseño experimental</i>	46
<i>VARIABLES ESTUDIADAS</i>	46
<i>Análisis de datos</i>	47
<i>Análisis estadístico</i>	49
Resultados	50
<i>Propiedades de los suelos evaluados</i>	50
<i>Generación del Índice de Calidad</i>	56
<i>Índice de calidad</i>	59
Discusión	60
<i>Características químicas por uso de suelo</i>	60
<i>Características biológicas por uso de suelo</i>	62
<i>Índice de calidad por método estadístico (ME)</i>	63
<i>Índice de calidad por criterio experto (CE)</i>	64
<i>Implicaciones sobre la calidad del suelo</i>	65
Conclusiones	68
Literatura citada	69
Anexos	80
5. Capítulo 5: Reservorios de carbono y nitrógeno en suelos ultisoles bajo dos tipos de cultivo de piña y un bosque secundario en la zona norte de Costa Rica.	82
Resumen	82
Introducción	83
Metodología	86
<i>Sitio Experimental</i>	86
<i>Diseño experimental</i>	86

<i>Variables analizadas</i>	86
<i>Análisis estadístico</i>	87
<i>Modelos lineales para estimar la densidad de carbono y nitrógeno del suelo</i>	87
Resultados	90
<i>Contenido de carbono, nitrógeno y densidad aparente</i>	90
<i>Reservorio de carbono y nitrógeno por profundidad y total</i>	91
<i>Modelos lineales para densidad de carbono y nitrógeno</i>	94
Discusión	97
<i>Carbono total, nitrógeno total y densidad aparente</i>	97
<i>Efecto del uso de suelo sobre el reservorio de carbono y nitrógeno</i>	98
<i>Factores relacionados con los reservorios de carbono y nitrógeno</i>	101
Conclusiones	104
Anexos	118
6. Capítulo 6: Discusión general	119
<i>Índice de calidad por método estadístico</i>	120
<i>Índice de calidad por criterio experto</i>	120
<i>Comparación de índices de calidad</i>	121
<i>Reservorios de carbono y nitrógeno</i>	122
<i>Factores que determinan el reservorio de carbono</i>	123
7. Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones	125
<i>Conclusiones</i>	125
<i>Recomendaciones</i>	126
8. Capítulo 8: Literatura general citada	127

Resumen

La piña es uno de los cultivos más importantes en Costa Rica tanto por su área de cultivo como por el impacto económico que esta posee, aunque, existe una percepción negativa del cultivo debido a los impactos que este provoca sobre el ambiente y el suelo.

Este trabajo se estableció en dos fincas localizadas en Bajos de Chilamate (piña orgánica y bosque secundario) y en San Isidro de La Virgen (piña convencional), en el cantón de Sarapiquí. Para la selección de sitios, se realizó un muestreo preliminar y luego, se realizó una clasificación taxonómica a nivel de subgrupo dando como resultado que los tres usos clasificaran como Typic Palehumults. Para el índice de calidad, se estudió el impacto de los manejos evaluados sobre la calidad del suelo mediante la cuantificación de 21 atributos del suelo y el posterior desarrollo de un índice de calidad del suelo con dos estrategias (ME; método estadístico y CE; criterio experto). Los atributos del suelo se midieron para establecer un conjunto mínimo de datos para crear un índice de calidad aditivo ponderado globalmente. Las propiedades se midieron en muestras a 3 profundidades (0 a 10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm) y el resultado a partir de ambas estrategias, mostró que la piña orgánica tuvo un índice de calidad superior a los otros dos usos, lo que sugiere un menor impacto del manejo sobre la calidad del suelo, mientras que el uso de bosque secundario y piña convencional tuvieron menores valores de índice de calidad respectivamente. La meta del índice a partir de ambas estrategias, era determinar el enfoque más práctico y que pudiera determinar diferencias entre los diferentes manejos analizados. Para el estudio del carbono en el suelo, se cuantificaron los reservorios de carbono y nitrógeno en los 3 usos de suelos, además, se establecieron las propiedades del suelo que explicarían los contenidos de carbono y nitrógeno presentes en el suelo, a través de un modelo lineal. Los reservorios de carbono y nitrógeno no fueron significativamente distintos entre los usos del suelo evaluados. El suelo bajo uso de bosque, piña convencional y piña orgánica, presentaron valores de $135,00 \pm 7,51 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$, $145,59 \pm 5,65 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$ y $143,87 \pm 9,70 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$, para el reservorio de carbono y $(16,01 \pm 0,88 \text{ Mg N. Ha}^{-1}$, $16,96 \pm 0,44 \text{ Mg N. Ha}^{-1}$ y $17,14 \pm 0,90 \text{ Mg N. Ha}^{-1}$, para el caso del reservorio de nitrógeno según el uso de suelo, respectivamente. Los modelos lineales para el carbono y nitrógeno, estuvieron conformados por: profundidad, contenido de hierro, contenido de limo y arcilla.

Índice de figuras

Figura 1.1. Distribución de las regiones dedicadas al cultivo de piña en Costa Rica (Tomado de CANAPEP 2019).	1
Figura 3.1. Precipitación (barras) y evapotranspiración potencial (círculos) para los sitios de Bajos de Chilamate (piña orgánica y bosque secundario) y San Isidro (piña convencional) de La Virgen de Sarapiquí entre 1980-2017. Datos tomados de Quesada et al. (s.f).....	28
Figura 3.2. Temperaturas máximas, promedio y mínima (°C) para los sitios de Bajos de Chilamate (piña orgánica y bosque secundario) y San Isidro (piña convencional) de La Virgen de Sarapiquí entre 1980-2017. Datos tomados de Quesada et al. (s.f)	29
Figura 3.3. Comportamiento del contenido de arcilla a través de la profundidad para los perfiles de piña orgánica (A), bosque secundario (B) y piña convencional (C) (n= 1).....	30
Figura 3.4. Comportamiento de la densidad aparente (g.cm-3) a través de la profundidad para los perfiles de piña orgánica (A), bosque Secundario (B) y piña convencional (C) (n=1).	31
Figura 3.5. Curvas de retención de humedad para los dos primeros horizontes de los perfiles de piña orgánica, bosque secundario y piña convencional (n=1).	32
Figura 3.6. Contenido de carbono a través de los perfiles piña orgánica (A), bosque secundario (B) y piña convencional (C) (n=1).....	34
Figura 3.7. Comportamiento de la saturación de bases (%) a través de los perfiles piña orgánica (A), bosque secundario (B) y piña convencional (C) (n=1).	35
Figura 4.1. Marco de trabajo conceptual para la herramienta de evaluación de manejos de suelos (Tomado y modificado de Andrews et al. 2004).	47
Figura 4.2. Distribución de la clasificación textural para los usos de suelo evaluados en la zona norte de Costa Rica.	55
Figura 4.3. Índice de calidad obtenido a 3 profundidades por uso de suelo evaluado en la zona norte de Costa Rica utilizando el método estadístico (ME). Las barras de error representan el error estándar de la media (n=5).	59
Figura 4.4. Índice de calidad obtenido a 3 profundidades por uso de suelo evaluado en la zona norte de Costa Rica utilizando el criterio experto (CE). Las barras de error representan el error estándar de la media (n=5).	60
Figura 5.1. Diagrama de flujo del proceso de selección de modelos de carbono y nitrógeno.	89
Figura 5.2. Reservorios de carbono (Mg C. Ha ⁻¹) (A) y nitrógeno (Mg C. Ha ⁻¹) (B) por uso de suelo evaluado en la zona norte de Costa Rica. Las barras de error representan el error estándar de la media (n=5).	94

Figura 5.3. Valores observados y predichos obtenidos a partir de los modelos seleccionados para densidad de carbono (A) y densidad de nitrógeno (B) en suelos ultisoles de la zona norte de Costa Rica.96

Índice de cuadros

Cuadro 2.1. Indicadores clave de suelo para la evaluación de la calidad del suelo (Larson y Pierce 1991, Doran et al. 1994, Gregorich y Carter 1997, Arshad y Martin 2002).	10
Cuadro 2.2. Interrelaciones entre indicadores de suelo (Tomado de Arshad y Martin 2002).	12
Cuadro 2.3. Impacto del carbono orgánico del suelo (COS) sobre la calidad del suelo (Tomado de Lal 2014)	13
Cuadro 3.1. Características morfológicas y variables físicas obtenidas para los perfiles de los sitios de piña orgánica (O), bosque secundario (B) y piña convencional (C).....	33
Cuadro 3.2. Características químicas obtenidas para los perfiles de los sitios de piña orgánica (O), bosque secundario (B) y piña convencional (C).	36
Cuadro 3.3. Fertilidad disponible en los primeros 2 horizontes para los perfiles de los sitios de piña orgánica (O), bosque secundario (B) y piña convencional (C).....	37
Cuadro 4.1. Propiedades del suelo relacionadas a la fertilidad química bajo tres usos de suelo evaluados en la zona norte de Costa Rica.....	51
Cuadro 4.2. Propiedades del suelo relacionadas con acidez y características reductores bajo tres usos de suelo evaluados en la zona norte de Costa Rica.	53
Cuadro 4.3. Resultados de biomasa microbiana y respiración microbiana del suelo bajo tres usos de suelo evaluados en la zona norte de Costa Rica.	54
Cuadro 4.4. Resultados de estabilidad de agregados y porosidad bajo tres usos de suelo evaluados en la zona norte de Costa Rica.....	56
Cuadro 4.5. Autovalores, porcentaje de varianza explicada y acumulada del conjunto de datos.....	57
Cuadro 4.6. Valores de cargas factoriales de las variables consideradas para los componentes rotados por rotación tipo varimax a partir del análisis de componentes principales realizado al conjunto de datos totales del estudio.	58
Cuadro 5.1. Resultados de carbono total, nitrógeno total y densidad aparente por profundidad bajo diferentes usos de suelo en la zona norte de Costa Rica.	91
Cuadro 5.2. Reservorio de carbono y nitrógeno por profundidad bajo diferentes usos de suelo en la zona norte de Costa Rica.....	92

Cuadro 5.3. Determinación del mejor modelo para explicar la densidad de carbono según el criterio de información de akaike corregido (AICc) a partir de los datos de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo evaluadas en los tres usos evaluados en la zona norte de Costa Rica..... 95

Cuadro 5.4. Determinación del mejor modelo para explicar la densidad de nitrógeno según el criterio de información de akaike corregido (AICc) a partir de los datos de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo evaluadas en los tres usos evaluados en la zona norte de Costa Rica..... 95

Índice de anexos

Anexo 3.1. Descripción morfológica y perfil de Lote Piña Orgánica, Sarapiquí, Heredia ..	40
Anexo 3.2. Descripción morfológica y perfil de Bosque Secundario, Sarapiquí, Heredia. .	41
Anexo 3.3. Descripción morfológica y perfil de Piña convencional, Sarapiquí, Heredia....	42
Anexo 4.1. Descripción de los usos de suelo evaluados para la determinación de un índice de calidad en la zona norte de Costa Rica.	80
Anexo 4.2. Matriz de correlación de Pearson aplicada al conjunto inicial de datos utilizados en el proceso de la selección de modelos lineales	81
Anexo 5.1. Determinación de los cumplimientos de supuestos para el modelo lineal seleccionado para la variable de respuesta densidad de carbono.	118
Anexo 5.2. Determinación de los cumplimientos de supuestos para el modelo lineal seleccionado para la variable de respuesta densidad de nitrógeno.	118
Anexo 5.3. Datos de reservorios de carbono para suelos bajo dos enfoques de muestreo en la zona norte de Costa Rica.	118



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Roberto Clemente Aguirre Elizondo, con cédula de identidad 2-719-581, en mi condición de autor del TFG titulado "Calidad de suelos y reservorios de carbono de los suelos asociados a dos manejos de pifa (orgánico y convencional) y una zona de bosque secundario en La Virgen de Sarapiquí, Heredia"

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1. Capítulo 1: Generalidades del cultivo de la piña y su producción en Costa Rica.

Introducción

La piña forma parte de la familia de las bromelias. Los tipos cultivados pertenecen al género *Ananas* que reagrupa varias especies, entre ellas, la *Ananas comosus*, que es la que se explota con fines comerciales (Garita 2014). En Costa Rica, actualmente hay alrededor de 44.500 hectáreas netas dedicadas al cultivo. La distribución de las áreas de siembra (figura 1), está en 16 cantones, divididos en los siguientes sectores: Zona Norte 24.653 hectáreas (56% del área cultivada); Atlántico 11.188 hectáreas (25%), Pacífico 8.659 hectáreas (19% del área cultivada) en manos de unos 250 productores de piña, en todo el país (CANAPEP 2019).

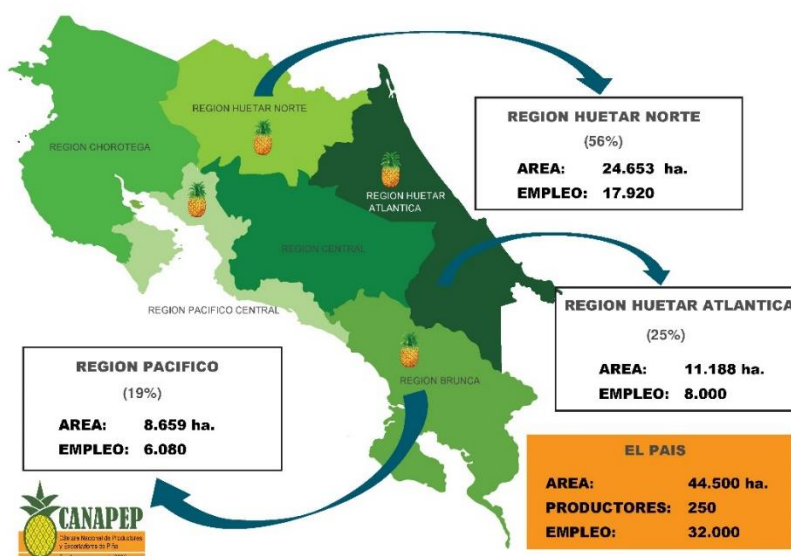


Figura 1.1. Distribución de las regiones dedicadas al cultivo de piña en Costa Rica (Tomado de CANAPEP 2019).

Para un adecuado crecimiento, el cultivo de piña requiere una temperatura media anual que oscile entre 23 y 30°C (con un óptimo de 27°C); ya que temperaturas menores de 22 °C, aceleran la floración, pero disminuyen el tamaño del fruto; en caso contrario, mayores de 30 °C, queman la epidermis (golpe de sol) (Dopazo et al. 2009) y un régimen de lluvias de entre los 1500 y 3500 mm anuales (Hepton 2003). El desarrollo óptimo del cultivo de la

piña se da en suelos profundos, bien drenados, con fertilidad moderada y ligeramente ácidos (pH entre 4,5 – 5,5) (Guido 1983, Bartholomew et al. 2002).

Existen dos tipos de manejo claramente diferenciados en la producción piñera, por un lado, están los cultivos de piña convencionales que abarcan grandes extensiones de tierras y requieren de la aplicación de una gran cantidad de agroquímicos, principalmente plaguicidas y sustancias que aceleran la maduración de la fruta. Por el otro lado, los cultivos orgánicos se caracterizan por una menor extensión en el uso del suelo y el uso de agroquímicos en menor medida (Montiel-Segura 2015).

Con la piña orgánica se reduce el impacto ambiental, ya que hay una diferencia en el tipo y cantidad de agroquímicos usados, dando una producción más sustentable (Acuña 2006). En los cultivos orgánicos, se hace uso de insumos de origen natural (uso de microorganismos y extractos vegetales) que no tienen un impacto severo como los agroquímicos utilizados en la producción convencional, estos insumos alteran el equilibrio ecológico y provocan contaminación del ambiente (Garita 2014).

Salazar (2008), mantiene que la cantidad de insumos químicos manejados en la producción de la piña son muy elevados, tanto por la peculiaridad de la fruta y ciclo productivo, el cual se debe acelerar en función de la demanda del mercado mundial. Por otra parte, como resultado de la expansión de la actividad piñera se instalaron complejos industriales para la recolección y empaque del producto, que cambiaron drásticamente el paisaje en varios sitios del país (Acuña 2006).

La calidad del suelo se define como la capacidad del suelo para llevar a cabo funciones ecológicas que apoyan a las comunidades terrestres (incluidos los agro ecosistemas y los humanos), resisten la erosión y reducen los impactos negativos sobre los recursos asociados de aire y agua (Doran et al. 1994, Karlen et al. 1997, Gregorich y Carter 1997).

Esta cualidad es un producto de interacciones inherentes (material parental, clima, topografía) y antropogénicas (por ejemplo, labranza y cultivo, usos de la tierra) (Karlen et al. 1997) que se da en el desarrollo del suelo. Al hablar de calidad de suelo, hay que considerar las características propias del suelo (dadas por los procesos de origen y formación) y, que a menudo, no responden a las prácticas de manejo del suelo y los cultivos (Mirsal 2004). La justificación del uso de indicadores para determinar la calidad del suelo radica en que en la actualidad, hay una necesidad de estimar el impacto que pueden tener las diferentes prácticas

de manejo agrícola sobre el suelo (Vallejo 2013); esto se relaciona de forma concreta con la evaluación del carbono en el suelo.

El suelo es un recurso vivo y dinámico cuya condición es vital tanto para la producción de alimentos y fibra como para el equilibrio global y la función del ecosistema (Doran et al. 1996). Por ello, es de gran importancia estudiar el impacto que las prácticas agrícolas de un cultivo como la piña, del cual se dice que tiene un manejo intensivo (MAG 2010), puede tener sobre el suelo. Ya que en el caso del desarrollo del cultivo, este se da como un sistema productivo dependiente de insumos químicos (herbicidas, fungicidas, nematicidas, insecticidas, fertilizantes y compuestos químicos inductores de la floración de la planta y que regulan la fecha de cosecha), que en la actualidad han demostrado ser un problema por la alta carga que esto le confiere a la fruta y el impacto en el ambiente (Maglianesi Sandoz 2013).

La evaluación del carbono orgánico del suelo es un índice importante de la calidad del suelo, debido a su relación con la productividad del cultivo (Paustian et al. 1997). Como el carbono orgánico del suelo tiene una naturaleza dinámica y está modificado por factores climáticos y antropogénicos, el monitoreo del carbono orgánico del suelo podría ayudar en la evaluación y el mantenimiento de la calidad de la tierra (Gnanavelrajah et al. 2008).

Objetivos

Objetivo general

- Determinar la calidad de suelo y los reservorios de carbono del suelo, asociados a dos tipos de manejo de piña (orgánico y convencional) y bajo una zona de bosque secundario en la Zona Norte de Costa Rica a través de diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas.

Objetivos específicos

1. Cuantificar el reservorio de carbono en los dos tipos manejos de piña y bosque secundario.
2. Determinar las propiedades físicas, químicas y biológicas que definen el comportamiento del reservorio de carbono en el suelo para los dos tipos manejos de piña y bosque secundario.

3. Generar un índice de calidad de suelo a partir de diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas en suelos bajo dos tipos manejos de piña y bosque secundario.

Literatura citada

Acuña, G. 2006. Producción de piña en Caribe y Pacífico Sur de Costa Rica (en línea). *Ambientico* (158):2-8. Disponible en <http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/ambientico/158.pdf>.

Bartholomew, DP; Rohrbach, KG; Evans, DO. 2002. Pineapple Cultivation in Hawaii (en línea). *Fruits and Nuts* . Consultado 30 jun. 2019. Disponible en <http://www2.ctahr.hawaii.edu>.

CANAPEP. 2019. Historia | CANAPEP (en línea, sitio web). Consultado 23 jun. 2019. Disponible en <https://canapep.com/historia/>.

Dopazo, AR; Armenteros, EF; Gafas, J; Peña, O; Fornaris, LM. 2009. Manejo del cultivo de la piña (*Ananas comosus* (L .) Merr .) cv . Española Roja , en Cuba. *Revista CitriFruit* 26(2):71-75.

Doran, JW; Coleman, DC; Bezdicek, DF; Stewart, BA. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. American Society of Agronomy, SSSA Special Publication (en línea). American Society of Agronomy 35. Consultado 4 nov. 2018. Disponible en <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015008223>.

Doran, JW; Sarrantonio, M; Liebig, M. 1996. Soil health and sustainability. *In Sparks, D. (ed.)*. New York, NY, Academic Press, vol.56. p. 1-54.

Garita, R. 2014. La Piña. 1 ed. Cartago, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 568 p.

Gnanavelrajah, N; Shrestha, RP; Schmidt-Vogt, D; Samarakoon, L. 2008. Carbon stock assessment and soil carbon management in agricultural land-uses in Thailand. *Land Degradation and Development* 19(3):242-256. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.838>.

Gregorich, EG; Carter, MR. 1997. Soil quality for crop production and ecosystem health. s.l., Elsevier. 465 p.

Guido, M. (1983). La piña. Managua, s.e.

Hepton, A. 2003. Cultural System. *In Bartholomew, D; Paull, R; Rohrbach, R (ed.)*. New York, NY, CABI Publishing. p. 109-142.

Karlen, DL; Mausbach, MJ; Doran, JW; Cline, RG; Harris, RF; Schuman, GE. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial) (en línea). Soil Science Society of America Journal 61(1):4. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>.

MAG. 2010. Manual de buenas prácticas agrícolas para la producción de Piña. Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para la Producción de Piña (Ananas comosus L.). s.l., s.e. 136 p.

Maglianesi Sandoz, MA. 2013. Desarrollo de las Piñeras en Costa Rica y sus Impactos sobre Ecosistemas Naturales y Agro-Urbanos (en línea). Biocenosis 27(1-2):62-70. Disponible en <https://investiga.uned.ac.cr/revistas/index.php/biocenosis/article/view/611/507>.

Mirsal, IA. 2004. The Origin of Soil (en línea). Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg. p. 2-9 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-05400-0_1.

Montiel-Segura, MA. 2015. Use of agrochemicals in intensive pineapple production in Costa Rica. Ciencias Naturales 15(25):183-195.

Paustian, K; Andrén, O; Janzen, HH; Lal, R; Smith, P; Tian, G; Tiessen, H; Noordwijk, M; Wooster, PL. 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions (en línea). Soil Use and Management 13(s4):230-244. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1997.tb00594.x>.

Salazar, O. 2008. Plantaciones de piña en Costa Rica contra la sostenibilidad ecológica y social. Ambientico 177(149-214):13-14. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

Vallejo, V. 2013. Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles (en línea). Colombia forestal 16(1):83-99. Consultado 7 jul. 2019. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v16n1/v16n1a06.pdf>.

2. Capítulo 2: Marco Teórico.

Cultivo de piña

La piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.) pertenece a la familia Bromeliaceae, es monocotiledónea, herbácea, con una altura aproximada de un metro, semi perenne (se recomiendan dos cosechas por ciclo productivo: la primera a los 12 meses y la segunda, entre 26-30 meses de edad)(Hepton 2003, Garita 2014).

En Costa Rica, la mayor parte de la producción de piña está en manos de Del Monte y Dole, en donde el modelo predominante en la producción de piña es que las transnacionales tengan sus propias plantaciones y los pequeños productores le venden sus productos a las grandes empresas (Acuña 2006); mientras que el sitio que mayor crecimiento ha experimentado respecto a la relación del número de productores y áreas de producción es la Región Huetar Norte. Las principales poblaciones donde se siembra y donde se encuentran la mayor cantidad de productores son: Pital, Río Cuarto, Guatuso y Sarapiquí (MAG 2010)

La mayor parte de las zonas de producción muestran suelos altamente degradados, con un pH bajo, baja disponibilidad de nutrientes, concentraciones de materia orgánica y carbono naturalmente bajos, así como una baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Powers 2004, Cornwell 2014, Chacón et al. 2015). El crecimiento vegetativo de la piña es óptimo en suelos moderadamente ácidos (pH 4.5–6.5), lo que minimiza la infección por hongos y nematodos y maximiza la biodisponibilidad de nutrientes catiónicos, y en suelos bien drenados, lo que previene la anoxia de la raíz (Vásquez-Jiménez, J Bartholomew 2018).

Para mantener el carbono y una fertilidad suficiente, el manejo de las plantaciones de piña puede incluir la labranza de los residuos del cultivo de superficie en el suelo después de la cosecha final y el encalado antes de la próxima plantación (Sherman y Brye 2019). Además, durante los 2 años de crecimiento de la piña en el ciclo de cultivo típico, después de una fertilización inicial aplicada al suelo, la fertilización foliar ocurre aproximadamente cada dos meses y los pesticidas se aplican según sea necesario (Vásquez-Jiménez, J Bartholomew 2018)

Los fertilizantes incluyen nutrientes principales (es decir, N, P y K), Mg, S, B y metales traza (es decir, Cu, Fe y Zn), mientras que el Ca se proporciona principalmente por encalado (Vargas, 2010). Sin embargo, al igual que muchos otros cultivos de exportación, el

N sigue siendo el nutriente requerido en grandes cantidades para el cultivo óptimo de la piña (Vásquez-Jiménez, J Bartholomew 2018)

Problemas en la producción de piña

Se debe evitar usar suelos pesados y arcillosos, porque estos tienden a tener problemas de drenaje, aunque si resulta necesario utilizarlos, la siembra debe realizarse en cama o camellones (Guido 1983). Otra de las problemáticas según Camacho (2002) es el uso de suelos con pH alto (mayor a 5.5), esto porque se produce una clorosis calcárea y se da un déficit de hierro, ya que la piña es una planta acidófila (se desarrolla preferiblemente en suelos ligeramente ácidos); al contrario, en suelos con pH bajo se presentan deficiencias de potasio y calcio en el cultivo (Guido 1983).

Un aspecto importante es el exceso de agua en el suelo, que constituye uno de los principales factores que limitan el cultivo de la piña en la región tropical (Jimenez 1999), ya que si no se evacua el exceso de agua por medio de un buen drenaje, las raíces se ven afectadas por asfixia y crecimiento de hongos, que gradualmente devastan el sistema radical y conducen a la muerte de plantas, por la falta de drenaje y aireación (Jimenez 1999).

Según Cubero y Sandí (2013), hay cinco problemas determinados de manejo que afectan el futuro de la industria piñera, los cuales son: erosión, compactación, deterioro en la actividad microbiológica del suelo, contaminación ambiental y la producción como monocultivo.

De acuerdo con Quijandría et al. (1997), los suelos donde se siembra piña bajo condiciones de alta precipitación, están sometidos a una pérdida de su potencial de producción en una forma acelerada (si el sitio tiene niveles críticos de pendiente, el problema es aún más grave). Situación característica de los suelos piñeros de la zona norte de Costa Rica, que presentan un clima tropical húmedo (típico ecuatorial desplazado), en donde ningún mes del año tiene temperaturas inferiores a los 22°C y no presenta promedios pluviométricos mensuales superiores a los 75 mm (Solano y Villalobos 2012).

Otro problema importante es la compactación, que está asociado a la utilización de maquinaria en procesos de siembra y cosecha del cultivo o ambos (Alfaro y Rodríguez 1992, Quijandría et al. 1997, Rojas y Camacho 2004). En relación al deterioro de la actividad

microbiana del suelo, Alfaro y Rodríguez (1992), indican que en piña, esto se debe a la utilización intensiva de plaguicidas, que son empleados para combatir las plagas y enfermedades a las que es susceptible el cultivo; esto provoca una alteración del balance biológico y químico del suelo, llega a tener consecuencias a mediano y largo plazo, por la pérdida de la capacidad productiva del suelo, no sólo para el cultivo de la piña, sino para cualquier otro cultivo (García 2000). Finalmente otro de los problemas más serios es su producción como monocultivo, lo cual le da vulnerabilidad al cultivo y aunque esto ofrece ventajas como uniformidad en términos de productividad, también le da más desventajas como la dificultad del manejo de plagas que conlleva la siembra de un monocultivo (Cubero y Sandí 2013).

Calidad del suelo

La calidad del suelo se define como la capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar, dentro de los límites de los ecosistemas naturales o gestionados, conservar la productividad de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire (Doran et al. 1994, Karlen et al. 1997, Gregorich y Carter 1997). Esta cualidad es producto de interacciones inherentes (material parental, clima, topografía) y antropogénicas (labranza y cultivo, usos de la tierra) (Karlen et al. 1997), que se da en el desarrollo del suelo. Al hablar de calidad de suelo, también hay que considerar las características propias del suelo (que han sido dadas por los procesos de origen y formación) y, que a menudo, no responden a las prácticas de manejo del suelo y los cultivos (Mirsal 2004). Por otro lado, las propiedades dinámicas del suelo (Carbono orgánico, pH, agregación del suelo, actividad microbiana) responden a las prácticas de manejo y/o uso de la tierra, pero sus tasas de cambio dependen de los atributos inherentes del suelo (Karlen et al. 1997, 2008).

Indicadores de calidad del suelo

Los indicadores deben dar información útil para conocer el funcionamiento del suelo, ser accesibles para los usuarios y aplicables a las condiciones de manejo y clima en campo y ser económico de medir (Anderson et al. 1997), además hay que tomar en cuenta, la variabilidad que puede existir debido a que el suelo está influenciados por el uso y las prácticas de manejo (Carter 2002, Sánchez-Marañón et al. 2002, Dexter 2004, Palm et al. 2014).

Según Parisi et al. (2005), la relevancia científica de un indicador de calidad depende de aspectos como su sensibilidad a las variaciones en el manejo del suelo, correlación con diferentes funciones del suelo y otras variables difíciles de evaluar, beneficio en revelar procesos de ecosistemas, utilidad del indicador como punto de referencia en la toma de decisiones sobre el uso del suelo, además de su practicidad y costo.

Varios autores han propuesto diversos conjuntos de indicadores de calidad del suelo (Doran et al. 1994, 1994, Karlen et al. 1998, Andrews et al. 2004) y han evaluado la calidad del suelo basándose en el método del indicador de conjunto total de datos (CTD) que seleccionaron, para poder determinar la calidad de suelo, tanto en diversos ambientes como diferentes manejos y prácticas agrícolas.

Varios autores han propuesto diversos conjuntos de indicadores de calidad del suelo (Cuadro 2.1) (Doran et al. 1994, 1994, Karlen et al. 1998, Andrews et al. 2004) y han evaluado la calidad del suelo basándose en el método del indicador de conjunto total de datos (CTD) que seleccionaron, para poder determinar la calidad de suelo, tanto en diversos ambientes como diferentes manejos y prácticas agrícolas.

Cuadro 2.1. Indicadores clave de suelo para la evaluación de la calidad del suelo (Larson y Pierce 1991, Doran et al. 1994, Gregorich y Carter 1997, Arshad y Martin 2002).

Indicador seleccionado	Tipo de indicador (Q,F,B)	Justificación para la selección
Materia orgánica	B	Define la fertilidad y la estructura del suelo, la retención de pesticidas y agua, y el uso en modelos de procesos.
Profundidad de capa superficial del suelo	F	Permite estimar el volumen de raíces para la producción de cultivos y la erosión.
Agregación	F	Indica la estructura del suelo, la resistencia a la erosión, la emergencia de cultivos, un indicador temprano del efecto del manejo del suelo
Textura	F	Influencia en la retención y transporte de agua y productos químicos, modelado de uso.

Indicador seleccionado	Tipo de indicador (Q,F,B)	Justificación para la selección
Densidad aparente	F	Indica el comportamiento de penetración de la raíz de la planta, porosidad, ajuste de análisis a base volumétrica.
Infiltración	F	Permite estimar el potencial de escorrentía, lixiviación y erosión.
pH	Q	Define disponibilidad de nutrientes, absorción y movilidad de pesticidas, modelos de proceso.
Conductividad eléctrica	Q	Define el crecimiento de los cultivos, la estructura del suelo, la infiltración del agua; actualmente falta en la mayoría de los modelos de proceso.
Supuestos contaminantes	Q	Determina la calidad de la planta, salud humana y animal.
Respiración microbiana	B	Relaciona actividad biológica, modelado de procesos; estimación de la actividad de la biomasa, alerta temprana del efecto de gestión sobre la materia orgánica.
Formas de nitrógeno	Q	Disponibilidad de cultivos, potencial de lixiviación, tasas de mineralización / inmovilización, modelado de procesos.
Nitrógeno, Fosforo y Potasio extraíbles	Q	Determina la capacidad para soportar el crecimiento de las plantas, indicador de calidad ambiental.

Otro aspecto importante a considerar, es la capacidad de ciertos indicadores de poder englobar otros como lo mencionan diversos autores (Schoenholtz et al. 2000, Arshad y Martin 2002, Karlen et al. 2004, Laishram et al. 2012). Como se puede observar en el Cuadro 2.2, al hacer uso de ciertos indicadores como densidad aparente, agregación, biomasa microbiana y disponibilidad de nutrientes, se puede crear un conjunto de datos

mínimos que puede englobar otras funciones importantes y sirve como una opción viable y practica para evaluar el estado del suelo.

Cuadro 2.2. Interrelaciones entre indicadores de suelo (Tomado de Arshad y Martin 2002).

Indicador seleccionado	Indicadores de calidad del suelo en el Conjunto de Datos Mínimos (CMD) afectados por el indicador seleccionado
Agregación	Materia orgánica, actividad microbiana (especialmente, fúngica), textura
Infiltración	Materia orgánica, agregación, conductividad eléctrica, porcentaje de sodio intercambiable (PSI)
Densidad aparente	Materia orgánica, agregación, profundidad del suelo superficial, PSI, actividad biológica
Biomasa microbiana	Materia orgánica, agregación, densidad aparente, pH, textura, PSI y/o respiración
Disponibilidad de nutrientes	Materia orgánica, pH, profundidad del suelo superficial, textura, parámetros microbianos (mineralización e índices de inmovilización)

Carbono orgánico del suelo (COS)

El carbono orgánico del suelo está compuesto de restos de plantas y animales, en diferentes etapas de descomposición y de la biomasa microbiana y sus subproductos (Lal 2016). Como un componente de materia orgánica del suelo (45-60%), carbono orgánico del suelo es una mezcla heterogénea de materiales orgánicos, incluyendo residuos diversos, hidratos de carbono, y azúcares simples, compuestos orgánicos complejos, algunos materiales inertes, y compuestos de pirógenos (Lal 2016).

Es un componente esencial del ciclo global del carbono ocupando un 69,8 % del carbono orgánico de la biosfera (Robert 2001) y su enorme tamaño de reservorio, significa que un pequeño cambio puede causar variaciones significativas en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera (Schlesinger y Bernhardt 2013), además como se puede observar en el Cuadro 2.3 **Cuadro 2.2**, tiene un impacto importante sobre diferentes variables que determinan la calidad del suelo. A nivel mundial, la cantidad de carbono almacenado en el suelo equivale aproximadamente de 1,467 a 1,548 Pg de C (1 Pg = 1 x 10¹⁵ g) y es el doble

de la cantidad almacenada en la atmosfera (760 Pg) y el triple de la cantidad de carbono de la biomasa vegetal aérea (550 Pg) (Lal 2014).

Cuadro 2.3. Impacto del carbono orgánico del suelo (COS) sobre la calidad del suelo (Tomado de Lal 2014)

Tipo de calidad	Parámetro
Física	<p>Agregación y estabilidad estructural.</p> <p>Inclinación, resistencia a la formación de costras y compactación, y facilidad de cultivo.</p> <p>Aireación y composición gaseosa en el aire del suelo.</p> <p>Retención de agua y disponibilidad.</p> <p>Transmisión de agua (infiltración y percolación).</p> <p>Capacidad de calor Área de superficie.</p> <p>Resistencia/erosión del suelo.</p>
Química	<p>Capacidad de intercambio catiónico.</p> <p>Retención y disponibilidad de nutrientes.</p> <p>Capacidad tampón (contra pH).</p>
Biológica	<p>Biodiversidad del suelo.</p> <p>Alimento y hábitat para biota del suelo.</p> <p>Productividad primaria neta.</p>
Ecológica	<p>Productividad primaria neta.</p> <p>Utilizar la eficiencia de entrada.</p> <p>Ciclo de nutrientes y transformaciones biogeoquímicas.</p> <p>Secuestro de carbón.</p> <p>Tasa de formación de nuevos suelos.</p> <p>Purificación del agua.</p> <p>Desnaturalización de contaminantes.</p>

Composición del carbono orgánico del suelo

La segmentación del carbono es una herramienta útil que provee una diferencia entre las fracciones activas, intermedias y pasivas de carbono, además de valorar el impacto del manejo agrícola en el suelo.

A partir de la magnitud de estos mecanismos, existen tres reservorios principales de carbono (Whitbread 1995):

- ❖ activo o lábil: presenta un tiempo de residencia corto (de meses a décadas), sensible a los cambios en el uso del suelo y se encuentra compuesto por biomasa microbiana, restos de plantas, raíces e hifas de hongos que están en descomposición.
- ❖ intermedio: tiempo de residencia de 10 a 100 años. Está integrado por restos ya en descomposición, y se ha consolidado por medio de la oclusión de la materia orgánica, a través de interacciones órgano-minerales.
- ❖ pasivo o no lábil: con un tiempo de residencia de 100 años. Está compuesto por el carbono orgánico asociado a la fracción mineral, y el carbono estable/recalcitrante. Estabilizado a través de encapsulación dentro de microagregados estables (en microestructuras arcillosas) e interacciones con minerales.

El reservorio más recalcitrante, constituye un componente primordial, no sólo para el secuestro de gases de efecto invernadero, sino para la mejora de la calidad de los suelos física, química y biológicamente.

Influencia sobre propiedades edáficas

Los factores edáficos que tienen mayor influencia sobre la evolución del carbono orgánico son la textura, la estructura, el pH y potencial de reducción (Eh) (Hassink 1997, Caravaca et al. 1999, Ingram y Fernandes 2001, Six et al. 2002).

La densidad aparente consigue influenciar en el COS, ya que el tamaño de los poros, su distribución y conectividad condicionan los procesos biológicos por lo tanto la mineralización de la materia orgánica (Brussaard y van Faassen 1994). La tendencia de reducción de densidad aparente con incrementos de concentración de COS coincide con lo manifestado en otros estudios (Alvarado et al. 2013), ya que la materia orgánica presenta una alta organización estructural que le permite, tanto una mayor capacidad de retener como de conducir agua y aire dentro de su matriz (Périé y Ouimet 2008).

La estructura y la textura afectan la estabilización del carbono orgánico de diferentes formas, bien mediante la formación de agregados, vinculación física con las partículas de arcilla y limo o por la transformación a compuestos de carbono resistentes a la degradación bioquímica (Martínez et al. 2008). El pH influye sobre el COS, debido a que disminuye la tasa de descomposición en condiciones de acidez.

El COS tiene un efecto significativo en la agregación de las partículas del suelo (Six et al. 2004), la presencia de carbono orgánico y nitrógeno procedente de los restos vegetales incorporados al suelo favorece la aparición de agregados (Caravaca et al. 1999), los cuales a su vez disminuyen los procesos de mineralización (Scott et al. 1996, Hassink 1997, Balesdent et al. 2000, Arrouays et al. 2006). Se dice que hay una correlación importante entre el contenido de COS y la agregación (Hermawan y Bomke 1997), así como con la estabilidad de los agregados formados (Pulido-Moncada et al. 2009), debido a la acción enlazante de las sustancias húmicas y otros productos generados por la actividad microbiana (Shepherd et al. 2001). También se menciona, que existe una relación entre tamaño de los agregados y contenido de COS, porque mientras mayor es el contenido de COS lábil, mayor es el tamaño de los agregados; mientras que, a su vez, los agregados de menor tamaño están asociados a la fracción altamente humificada con período de residencia en el suelo mayor a siete años (Buyanovsky et al. 2004).

Al ser la agregación influenciada por la materia orgánica, la biota, los puentes iónicos, arcilla y carbonatos (Bronick y Lal 2005), es vital asociar cambios en actividad biológica y estructura, con pérdida de capacidad para retener carbono orgánico dentro del suelo. Gran parte del COS es el resultado de procesos de integración a través de la formación de agregados y metabolismo microbiano, componentes como la glomalina, desempeñan un papel crítico en la formación de los agregados del suelo que le dan estabilidad contra el intemperismo y la erosión, así como la capacidad de retener agua y oxígeno para las raíces de plantas y microorganismos (González-Minero y Candau 1997).

Literatura citada

- Acuña, G. 2006. Producción de piña en Caribe y Pacífico Sur de Costa Rica (en línea). *Ambientico* (158):2-8. Disponible en <http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/ambientico/158.pdf>.
- Alfaro, R; Rodríguez, J. (1992). Impacto Ambiental de los Desechos Agroindustriales (Café, Piña y Palma Africana) Informe Anual 1992. Heredia, s.e.
- Alvarado, J; Andrade, HJ; Segura, M. 2013. Storage of soil organic carbon in coffee (*Coffea arabica* L.) production systems in the municipality of Líbano, Tolima, Colombia (en línea). *Colombia Forestal* 16(1):21-31. Consultado 11 dic. 2018. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v16n1/v16n1a02.pdf>.
- Anderson, DW; Doran, JW; Janzen, HH; Pierce, FJ. 1997. Chapter 1 Concepts of soil quality and their significance (en línea). *Developments in Soil Science* 25:1-19. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(97\)80028-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(97)80028-1).
- Andrews, SS; Karlen, DL; Cambardella, CA. 2004. The Soil Management Assessment Framework : A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. *Soil Science Society of America Journal* 68(6):1945-1962. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>.
- Arrouays, D; Saby, N; Walter, C; Lemerrier, B; Schwartz, C. 2006. Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use and Management* 22(1):48-51. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00020.x>.
- Arshad, MA; Martin, S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture Ecosystem & Environment* 88:153-160.
- Balesdent, J; Chenu, C; Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage (en línea). *Soil and Tillage Research* 53:215-230. Consultado 6 oct. 2018. Disponible en <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.7739&rep=rep1&type=pdf>.
- Bronick, CJ; Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review (en línea). *Geoderma* 124(1-2):3-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.
- Brussaard, L; van Faassen, HG. 1994. Effects of Compaction on Soil Biota and Soil

Biological Processes (en línea). *Developments in Agricultural Engineering* 11(C):215-235. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50018-0>.

Buyanovsky, GA; Aslam, M; Wagner, GH. 2004. Carbon Turnover in Soil Physical Fractions. *Soil Sci .Soc.Am.J.* 58(1994):1167-1173. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800040023x>.

Camacho, G. 2002. Análisis comparativo del desarrollo de un cultivo de Piña (*Ananas comosus* (L.) Merr) sembrado en labranza mínima y en labranza convencional en finca FRUTEX S.A., Pital, San Carlos. s.l., Instituto Tecnológico de Costa Rica. 92 p.

Caravaca, F; Lax, A; Albaladejo, J. 1999. Organic matter, nutrient contents and cation exchange capacity in fine fractions from semiarid calcareous soils (en línea). *Geoderma* 93(3-4):161-176. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00045-2).

Carter, MR. 2002. Soil Quality for Sustainable Land Management (en línea). *Agronomy Journal* 94:38-47. Disponible en [http://dzumenvis.nic.in/pdf/Soil Quality for Sustainable Land Management.pdf](http://dzumenvis.nic.in/pdf/Soil%20Quality%20for%20Sustainable%20Land%20Management.pdf).

Chacón, P; Lorenz, K; Lal, R; Calhoun, FG; Fausey, N. 2015. Soil organic carbon in some land uses of Costa Rica. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science* 65(4):310-320. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1008563>.

Cornwell, E. 2014. Effects of different agricultural systems on soil quality in northern Limón province, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 62(3):887. DOI: <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i3.14062>.

Cubero, D; Sandí, V. (2013). Técnicas agroambientales para el manejo del cultivo de piña. San José, s.e.

Dexter, ARR. 2004. Soil physical quality: Part III (en línea). *Geoderma* 120(3-4):201-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodermaa.2003.09.005>.

Doran, JW; Coleman, DC; Bezdicek, DF; Stewart, BA. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. American Society of Agronomy, SSSA Special Publication (en línea). American Society of Agronomy 35. Consultado 4 nov. 2018. Disponible en <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015008223>.

Doran, JW; Coleman, DC; Bezdicek, DF; Stewart, BA; Larson, WE; Pierce, FJ. 1994. The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management (en línea). s.l., s.e. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c3>.

García, J. 2000. Introducción a los plaguicidas. San José, EUNED.

Garita, R. 2014. La Piña. 1 ed. Cartago, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 568 p.

González-Minero, FJ; Candau, J. 1997. The influence of tree roots on soil (en línea). *Lagascalía* 19(1-2):513-520. DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.237.6.389>.

Gregorich, EG; Carter, MR. 1997. Soil quality for crop production and ecosystem health. s.l., Elsevier. 465 p.

Guido, M. (1983). La piña. Managua, s.e.

Hassink, J. (1997). The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles (en línea). 191. s.l., Kluwer Academic Publishers. Consultado 3 dic. 2018. Disponible en <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FA%3A1004213929699.pdf>.

Hepton, A. 2003. Cultural System. In *Bartholomew, D; Paull, R; Rohrbach, R (ed.)*. New York, NY, CABI Publishing. p. 109-142.

Hermawan, B; Bomke, AA. 1997. Effects of winter cover crops and successive spring tillage on soil aggregation (en línea). *Soil and Tillage Research* 44(1-2):109-120. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00043-3).

Ingram, JSI; Fernandes, ECM. 2001. Managing carbon sequestration in soils: Concepts and terminology (en línea). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 87(1):111-117. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00145-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00145-1).

Jimenez, J. 1999. Manual práctico para el cultivo de piña de exportación. 1 ed. Cartago, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 222 p.

Karlen, D; Gardner, J; Rosek, M. 1998. A soil quality framework for evaluating the impact of CRP. *Journal of Production Agriculture* 11:56-60.

Karlen, DL; Andrews, SS; Doran, JW. 2004. Soil quality: Current concepts and

applications (en línea). s.l., Academic Press, vol.74. p. 1-40 DOI:

[https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(01\)74029-1](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(01)74029-1).

Karlen, DL; Andrews, SS; Wienhold, BJ; Zobeck, TM. 2008. Soil Quality Assessment: Past, Present and Future (en línea). *J. Integr. Biosci.* 6(1):3-14. Consultado 23 jun. 2019.

Disponible en

<http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub><http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1203>.

Karlen, DL; Mausbach, MJ; Doran, JW; Cline, RG; Harris, RF; Schuman, GE. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial) (en línea). *Soil Science Society of America Journal* 61(1):4. DOI:

<https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>.

Laishram, J; Saxena, KG; Maikhuri, RK; Rao, KS. 2012. Soil Quality and Soil Health : A Review. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* 38(1):19-37.

Lal, R. 2014. Societal value of soil carbon (en línea). *Journal of Soil and Water Conservation* 69(6):186A-192A. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.69.6.186A>.

Lal, R. 2016. Soil health and carbon management. *Food and Energy Security* 5(4):212-222. DOI: <https://doi.org/10.1002/fes3.96>.

MAG. 2010. Manual de buenas prácticas agrícolas para la producción de Piña. Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para la Producción de Piña (*Ananas comosus* L.). s.l., s.e. 136 p.

Martínez, EH; Fuentes, JP; Acevedo, EH. 2008. Carbono Orgánico Y Propiedades Del Suelo (en línea). *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 8(1):68-96. DOI:

<https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>.

Mirsal, IA. 2004. The Origin of Soil (en línea). Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg. p. 2-9 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-05400-0_1.

Palm, C; Blanco-Canqui, H; DeClerck, F; Gatere, L; Grace, P. 2014. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview (en línea). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 187:87-105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>.

- Parisi, V; Menta, C; Gardi, C; Jacomini, C; Mozzanica, E. 2005. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy (en línea). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 105(1-2):323-333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.02.002>.
- Périé, C; Ouimet, R. 2008. Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils (en línea). *Canadian Journal of Soil Science* 88(3):315-325. DOI: <https://doi.org/10.4141/CJSS06008>.
- Powers, JS. 2004. Changes in Soil Carbon and Nitrogen after Contrasting Land-use Transitions in Northeastern Costa Rica (en línea). *Ecosystems* 7(2):134-146. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0123-2>.
- Pulido-Moncada, MA; Lobo-Lujan, D; Lozano-Perez, Z. 2009. Association Between Soil Structure Stability Indicators and Organic Matter in Venezuelan Agricultural Soils. *Agrociencia* 43(3):221-230.
- Quijandría, G; Berrocal, J; Pratt, L. (1997). *La industria de la piña en Costa Rica Análisis de Sostenibilidad*. s.l., s.e.
- Robert, M. (2001). *Soil carbon sequestration for improved land management* (en línea). s.l., s.e. Consultado 2 dic. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-bl001e.pdf>.
- Rojas, L; Camacho, G. 2004. Piña (*Ananas comosus* L. MERR) sembrada en labranza mínima y labranza convencional en San Carlos, Costa Rica (en línea). *Agronomía mesoamericana* 15(2):161-172. Consultado 29 jun. 2019. Disponible en http://www.mag.go.cr/rev_meso/v15n02_161.pdf.
- Sánchez-Marañón, M; Soriano, M; Delgado, G; Delgado, R. 2002. Soil Quality in Mediterranean Mountain Environments (en línea). *Soil Science Society of America Journal* 66(3):948. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.9480>.
- Schlesinger, WH; Bernhardt, ES. (2013). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change* (en línea). s.l., s.e. Consultado 2 dic. 2018. Disponible en <https://sites.duke.edu/biogeochemistry2015/files/2015/08/3rd-edition-BGC-through-Ch-2.pdf>.

Schoenholtz, S.; Miegroet, HV; Burger, J. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities (en línea). *Forest Ecology and Management* 138(1-3):335-356. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0).

Scott, NA; Cole, CV; Elliott, ET; Huffman, SA. 1996. Soil Textural Control on Decomposition and Soil Organic Matter Dynamics (en línea). *Soil Science Society of America Journal* 60(4):1102-1109. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000040020x>.

Shepherd, TG; Saggar, S; Newman, RH; Ross, CW; Dando, JL. 2001. Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils (en línea). *Soil Research* 39(3):465. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR00018>.

Sherman, LA; Brye, KR. 2019. Soil Chemical Property Changes in Response to Long-Term Pineapple Cultivation in Costa Rica (en línea). *Agrosystems, Geosciences & Environment* 2(1):1-9. DOI: <https://doi.org/10.2134/age2019.07.0052>.

Six, J; Bossuyt, H; Degryze, S; Deneff, K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics (en línea). *Soil and Tillage Research* 79(1):7-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>.

Six, J; Conant, RT; Paul, EA; Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils (en línea). s.l., s.e., vol.241. p. 155-176 DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

Solano, J; Villalobos, R. (2012). Regiones y sub-regiones climáticas de Costa Rica (en línea). s.l., s.e. Consultado 12 jul. 2019. Disponible en <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalización+climática+de+Costa+Rica>.

Vásquez-Jiménez, J Bartholomew, D. 2018. The pineapple: botany, production and uses (en línea). Sanewski, GM; Bartholomew, DP; Paull, RE (eds.). Wallingford, CABI. DOI: <https://doi.org/10.1079/9781786393302.0000>.

Whitbread, AM. 1995. Soil Organic Matter : Its Fractionation and Role in Soil Structure (en

línea). *In* Soil organic matter management for sustainable agriculture: A workshop held in Ubon, Thailand, 24-26 August 1994. s.l., s.e. p. 124-130 DOI: <https://doi.org/1-86320-139-4>.

3. **Capítulo 3:** Génesis y clasificación suelos asociados a dos manejos de piña (orgánico y convencional) y una zona de bosque secundario en La Virgen de Sarapiquí, Heredia.

Resumen

Se elaboró un estudio de la génesis de 3 perfiles de suelo ubicados dentro del gran paisaje fisiográfico de las Llanuras aluviales del Norte. Los 3 sitios muestreados se localizaron dentro del cantón de Sarapiquí, comprendieron 2 manejos de piña (orgánica y convencional) y un bosque secundario. Los perfiles para los usos de suelo de piña orgánica y bosque secundario, están en Bajos de Chilamate, distrito de Puerto Viejo; mientras que el perfil del uso de suelo piña convencional, en el poblado de San Isidro, distrito de La Virgen. Los perfiles se ubicaron entre los 95 y 158 msnm, cuyo material parental son depósitos aluviales pertenecientes al periodo del cuaternario, las precipitaciones anuales para el sitio de Bajos de Chilamate son de 2322,54 mm y para el sitio de San Isidro de 3038,61 mm, mientras que las temperaturas promedio son de 25,4 °C y 25,6°C respectivamente. Los suelos desarrollados mostraron un grado de desarrollo alto, baja saturación de bases, exhibieron un endopedón argílico y un epipedón ócrico, por lo que es un suelo con un grado importante de meteorización, de igual forma, esto se manifestó por la presencia de iluviación de arcilla en los horizontes (a través de la observación de argicutas) y por el bajo contenido de CIC y arcilla; por ende, se le asignó el orden Ultisols a los 3 perfiles evaluados. A nivel de suborden para cada uno de los sitios, el pedón modal se clasificó como Humults, ya que son ultisoles con valores de carbono mayores a 0,9 % en los primeros 15 cm del horizonte argílico (Bt1). A nivel de Gran Grupo se clasifican como Palehumults debido a que no hubo una disminución mayor al 20% en ningún horizonte con respecto al horizonte con el mayor contenido de arcilla y a nivel de subgrupo como Typic Palehumults, esto porque, de acuerdo a la clasificación, no presenta características particulares como influencia volcánica u otros.

Introducción

En Costa Rica los órdenes Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles son los suelos más antiguos y que han sufrido un mayor grado de meteorización, por ello, muestran pocos minerales primarios, formados sobre casi cualquier tipo de material parental expuesto intermitentemente desde el Cretácico-Terciario hasta el presente y bajo el efecto de temperatura y precipitación altas y constantes (Alvarado et al. 2014).

El proceso de formación de los Ultisoles ocurre normalmente, por un lavado intenso de solutos con translocación de arcilla desde el horizonte A hacia el horizonte B (Soil Survey Staff 2014), para formar pedones en general arcillosos pero que se comportan como si fueran arenosos (Schwartz 1998); lo anterior pasa por la formación de puentes de H⁺ en las arcillas 1:1 que propician que las partículas se agreguen entre sí, formando estructuras recubiertas de óxidos de Fe y Al que permiten la formación de partículas de mayor tamaño conocidas como “pseudoarenas”. Estos suelos también presentan bajos niveles de bases y Si y una acumulación de Al y Fe; este último elemento, en su forma oxidada, es el que les confiere tonalidades pardo rojizas o rojizas (Alvarado et al. 2014).

Por lo general, los Ultisoles se encuentran en la zona norte (Sarapiquí, San Carlos y Cutris), en el Pacífico sur (Pérez Zeledón y Buenos Aires y en las regiones fronterizas con Panamá), además de las estribaciones de la cordillera de Talamanca hacia el Pacífico (cuenca del Térraba) (Alvarado et al. 2014). Gómez y Chinchilla (2005) concluyen que el 70% de la superficie del país está conformada por entisoles y Ultisoles y que la mineralogía de los pocos suelos estudiados por ellos muestra que los ultisoles tienen caolinita como minerales secundarios dominante con cuarzo, gibsita y hematita en menores cantidades.

En el presente trabajo se estudiaron los suelos ubicados en 3 sitios dentro del distrito de La Virgen de Sarapiquí, asociados a diferentes manejos de uso de suelo. El trabajo se llevó a cabo con el fin de 1) determinar los factores formadores de estos suelos y 2) clasificar taxonómicamente los suelos de acuerdo con Soil Survey Staff (2014).

Material Parental

Según Bergoeing (2017), la geomorfología de los sitios de estudio son depósitos aluviales pertenecientes al periodo del Cuaternario. Estos materiales aluviales se

desarrollaron a partir del límite inferior de depósitos lahar producidos por las cadenas montañosas volcánicas que cubren el límite sur del graben de Nicaragua, se extienden profundamente hacia el norte, alcanzando distancias lineales de 40-60 km y están compuestos por una matriz de bloques volcánicos caóticos (andesita, tobas y basaltos) de varios metros de diámetro, parcialmente alterados en la superficie.

Según Dengo et al. (1968), la zona del Caribe de Costa Rica, se puede dividir en 2 grandes regiones geológicas; en donde se menciona que los suelos del sector Caribe noroeste se desarrollan sobre coladas de lava, lahares, rocas piroclásticas, ignimbritas, rocas andesíticas, basaltos, cenizas volcánicas del cuaternario y pocas rocas sedimentarias.

Relieve

El sitio se localiza en el gran paisaje fisiográfico de las Llanuras aluviales del Norte, de la provincia fisiográfica centroamericana “Depresión Nicaragüense” (Marshall 2007), caracterizada por deposiciones de abanicos aluviales antiguos y flujos de lavas del tipo *debris* provenientes de las cordilleras volcánicas de Guanacaste y Central. El relieve está disectado por ríos que descargan en el río San Juan (Marshall 2007, Bergoeing 2017) que datan del Pleistoceno medio y superior y limitan con los depósitos de lahares provenientes de las cordilleras mencionadas anteriormente, constituidas por arcillas rojas meteorizadas (Bergoeing y Protti 2006).

Cobertura vegetal

Los sitios de estudio se encuentran en la zona de vida de Bosque muy húmedo tropical (bmh-T), según las zonas de vida de Holdridge (Holdridge 1987) y según la clasificación de formaciones vegetales de Costa Rica, se encuentra dentro del Bosque muy húmedo sempervirente de baja altitud (Vargas 1992), que tiene como características que se ubica en altitudes que van desde los 0 msnm hasta los 1000 msnm, la flora presente tiene una relación estrecha con las condiciones climáticas de alta humedad (precipitaciones anuales superiores 3,000 mm, con temperaturas entre 27 y 28°C) y posee una vegetación densa y desarrollada.

Beard y Allen (1958) mencionan una lista de especies que se pueden encontrar en este tipo de formación vegetal, entre los cuales están: *Callophylum brasiliense* (Cedro maria), *Carapa guianensis* (macho), *Pentaclethra maculosa* (gavilán), *Hieronyma alchornoides* (pilón), *Anarcadium excelsum* (espavel), *Ceiba pentandra* (ceibo), *Ficus*

nymphaefolia (higuerón), *Guarea hoffmanniana* (manú), *Peltogyne purpurea* (nazareno), *Virola sebifera* (fruta dorada), *Symphonia globulifera* (cerillo); mientras que en el Caribe, además de las especies anteriores se encuentran: *Sterculia apetala* (panamá), *Cedrella odorata* (cedro amargo), *Coumarouna Panamensis* (cucaracho), *Prioria copaifera* (kativo) y las palmeras *Iriarteia gigantea*, *Astrocaryum standleyanum* (chontadura) y *Socratea durissima* (Holdridge et al. 1971).

Clima

Solano y Villalobos (2012) describen la subregión climática “Llanuras de San Carlos” como una región climática pluvial con una precipitación anual total de 3020 mm, temperatura máxima mínima y promedio de 31°, 20° y 23°C, con un total 184 días de lluvia y sin un periodo de sequía. Mientras que el sector de estudio se encuentra en la sub-región climática RN5 que corresponde al sector de Puerto Viejo de Sarapiquí y alrededores.

Metodología

Sitios de estudio

Se realizó el estudio de los suelos asociados a los dos manejos de piña (orgánico y convencional) y zona de bosque secundario, en el distrito de La Virgen de Sarapiquí. Los sitios de muestreo se ubicaron dentro del gran paisaje fisiográfico de las Llanuras aluviales del Norte.

Trabajo de campo

Para cada sitio, se realizó el levantamiento de transectos, compuestos por una serie de observaciones denominadas barrenadas simples o perforaciones de 120 cm de profundidad con un barreno tipo holandés. En cada barrenada se tomó la ubicación, se separaron los horizontes genéticos del perfil del suelo y se caracterizó según sus horizontes genéticos, textura, color, entre otras características utilizando el Field Book for Describing and Sampling Soils (Schoeneberger et al. 2012).

De estas observaciones se determinó el pedón modal para ubicar la fosa de observación necesaria en la descripción del perfil final. Se describieron y muestrearon 3 fosas de observación en total. La descripción del perfil se llevó a cabo siguiendo los lineamientos descritos en Schoeneberger et al. (2012), se determinó la localización geográfica, fisiografía, relieve, elevación y pendiente, erosión sufrida, fertilidad aparente,

drenaje, pedregosidad, y profundidad del nivel freático. Se identificó cada horizonte y se caracterizó su espesor y profundidad, color en húmedo, estructura y consistencia, porosidad y contenido y distribución de raíces, así como formaciones especiales (Schoeneberger et al. 2012).

Métodos de análisis físicos y químicos del suelo

Los análisis físicos y químicos se realizaron en el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. El pH en agua y la conductividad eléctrica del suelo se midió con un potenciómetro en relación suelo-agua 1:2.5 y el pH en KCl con una pasta con relación suelo-KCl 1:1. Se realizó un análisis químico completo (Ca, Mg, K, Fe, Mn, Cu, P y Zn), a través de la solución extractora Olsen modificado a pH 8,5 y KCl. El contenido de bases extraíbles (Ca, Mg, K, Na) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) con acetato de amonio 1 M (pH 7) se determinaron por absorción atómica (Soil Survey Staff 2014). El Fe y Al amorfos mediante oxalato de amonio 0,2 M (pH 3,5) y determinados mediante absorción atómica. El contenido de carbono y nitrógeno total se determinó mediante combustión seca (Horneck y Miller 1998) y la retención de fosfatos con el método de Blakemore et al. (1987). La textura del suelo se determinó por el método de Bouyoucos modificado por Day (1965), la densidad aparente mediante el método de muestra de volumen conocido, la densidad de partículas con el método de volumen desplazado en un frasco volumétrico calibrado, la retención de humedad con ollas de presión y la conductividad hidráulica saturada con el método de cabeza de agua constante (Forsythe 1985).

Criterios de clasificación taxonómica

A partir de los datos obtenidos anteriormente, se clasificó los suelos a nivel sub grupo taxonómico según el sistema la última edición de la llave de la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff 2014).

Resultados

Datos Climáticos

Precipitación y evapotranspiración potencial

Según los datos de precipitación y evapotranspiración (Figura 3.1), se denota que no existe un periodo mayor a 1 mes consecutivo en donde la evapotranspiración potencial es mayor que la precipitación en ambas zonas de estudio. Este criterio es sumamente importante para determinar el régimen hídrico del suelo, además de determinar posibles situaciones de exceso de agua.

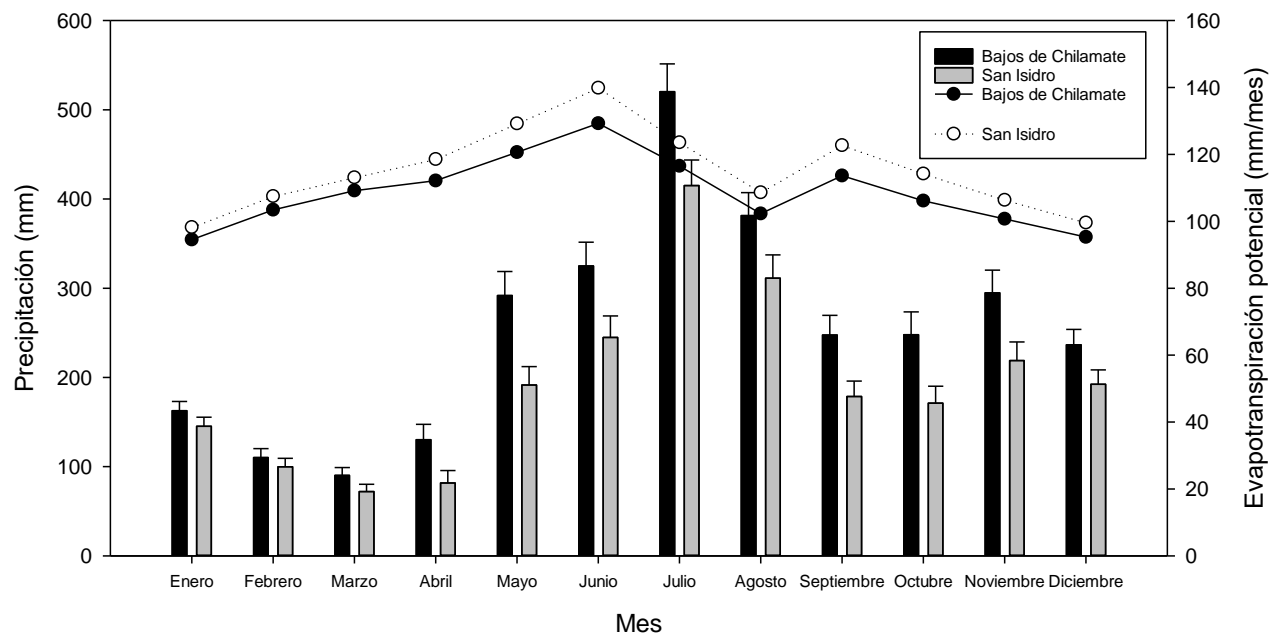


Figura 3.1. Precipitación (barras) y evapotranspiración potencial (círculos) para los sitios de Bajos de Chilamate (piña orgánica y bosque secundario) y San Isidro (piña convencional) de La Virgen de Sarapiquí entre 1980-2017. Datos tomados de Quesada et al. (s.f)

Para los valores de temperaturas máximas, mínimas y promedio, se establece claramente que las temperaturas determinadas en el sitio de Bajos de Chilamate, presente mayores valores para los 3 criterios de temperatura mencionados. Para ambos sitios a través de todo el año los valores se encuentran alrededor de 30°C para la temperatura máxima, 25°C en el caso de la temperatura promedio y alrededor de los 20°C para la temperatura mínima

Figura 3.2

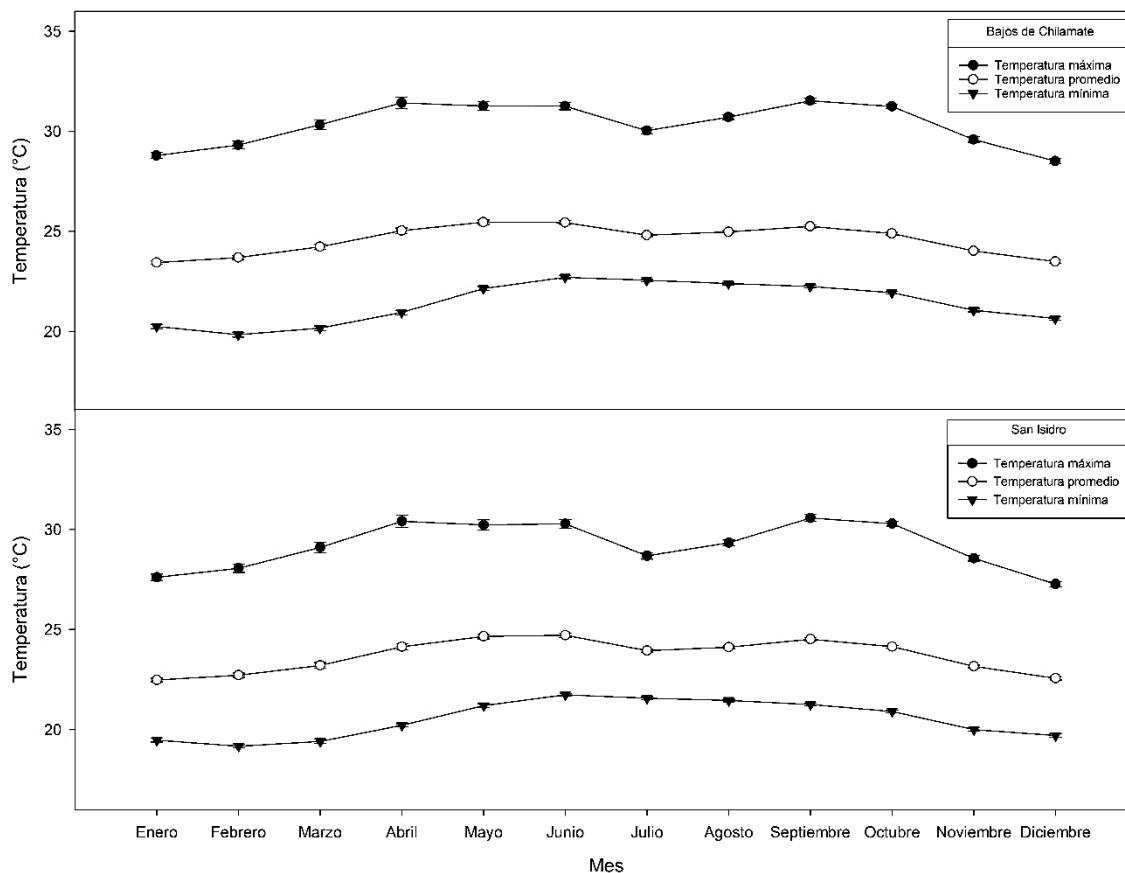


Figura 3.2. Temperaturas máximas, promedio y mínima (°C) para los sitios de Bajos de Chiamate (piña orgánica y bosque secundario) y San Isidro (piña convencional) de La Virgen de Sarapiquí entre 1980-2017. Datos tomados de Quesada et al. (s.f)

Descripción de los perfiles

Todos los sitios de los perfiles se encuentran en una zona con relieve ligeramente ondulado, a una altura de 95 msnm. El material parental corresponde a depósitos aluviales, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, presentan un drenaje bueno, en todos los horizontes se presentaron variantes del color marrón (fuerte, amarillento o rojizo) como se puede observar en el Cuadro 3.2, presenta erosión leve, y pedregosidad nula.

En todos los perfiles estudiados se presentaron texturas finas, estructura blocosa subangular fina y media hasta el horizonte más bajo del perfil (con excepción del primer horizonte en el perfil de piña convencional). De igual forma, en todos los perfiles se presentó una consistencia en húmedo friable, además de que todos los horizontes fueron ligeramente adherentes y plásticos.

En relación a los poros y raíces, todos los perfiles mostraron diferencias notorias entre sí. Para el perfil de pinya orgánica, las raíces fueron comunes y finas en el primer horizonte, que pasan a comunes finas y medias en los horizontes intermedios y se convierten en pocas, finas y comunes, desde los 74 cm de profundidad; además presentó poros comunes finos y muy finos a lo largo del perfil. En el perfil de bosque secundario (B), las raíces fueron abundantes y de tamaños grandes, medios, finos y muy finos, para el primer horizonte, en los horizontes intermedios pasaron a ser comunes y medios de tamaños finos y muy finos, para luego pasar a ser escasos y de tamaños finos y muy finos en los dos últimos horizontes; para el caso de los poros, en el primer horizonte fueron abundantes y de todos los tamaños (grandes, medios, finos y muy finos), mientras que para el resto de los horizontes los poros pasaron a ser comunes y de tamaños medios, finos y muy finos. Para el caso del perfil de Pinya Convencional, las raíces fueron comunes y de tamaño medio y finos para los primeros dos horizontes, pasando a estar ausentes en el resto del perfil; mientras que los poros, fueron comunes y finos a lo largo del perfil descrito.

Características físicas de los perfiles en estudio

Físicamente los suelos estudiados presentaron texturas finas, predominando la clase textural arcillosa, con una distribución relativamente regular de la arcilla través del perfil (Figura 3.3).

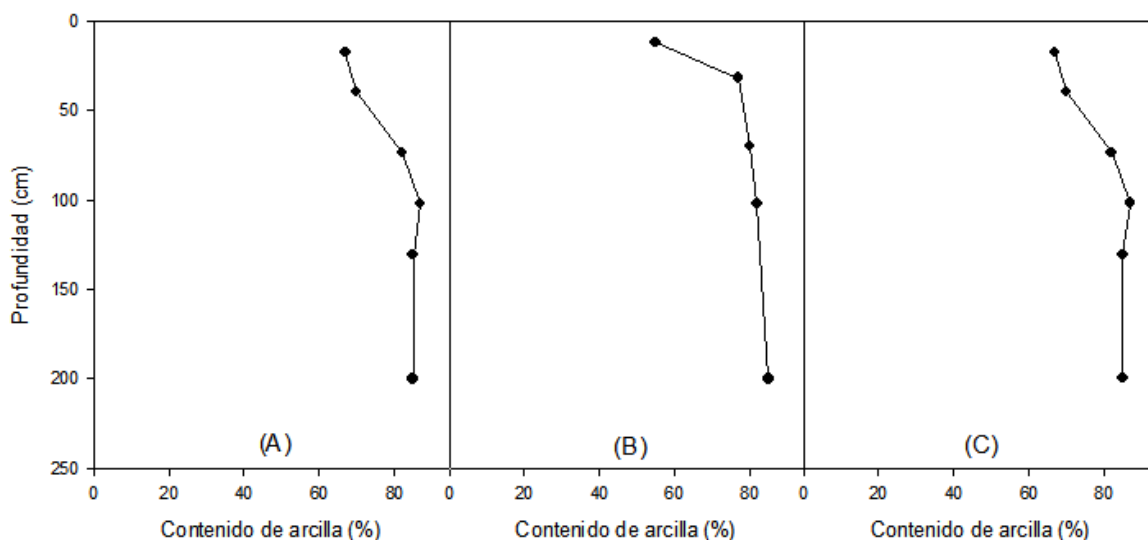


Figura 3.3. Comportamiento del contenido de arcilla a través de la profundidad para los perfiles de pinya orgánica (A), bosque secundario (B) y pinya convencional (C) (n= 1).

El comportamiento de la densidad aparente es muy diferente entre los usos de suelo con piña y lo encontrado en el suelo cuyo uso es el de bosque secundario. Para el perfil del sitio de bosque secundario, se puede observar como el valor de densidad aparente disminuye de forma gradual a través del perfil (Figura 3.4b); mientras que para los perfiles de piña orgánica y convencional (Figura 3.4a y Figura 3.4c), estos valores se incrementan a los 100 cm en el caso del manejo orgánico y alrededor de los 75 cm para el manejo convencional, con un incremento nuevamente a los 200 cm.

En relación con el comportamiento de la retención de agua en los suelos estudiados, se puede observar que en los 3 perfiles se presentaron altos valores de porosidad (Cuadro 3.1), aunque en relación al contenido de agua útil, se puede ver nuevamente una diferencia entre el uso de suelo del Bosque Secundario y los usos de suelo con piña (piña orgánica y convencional).

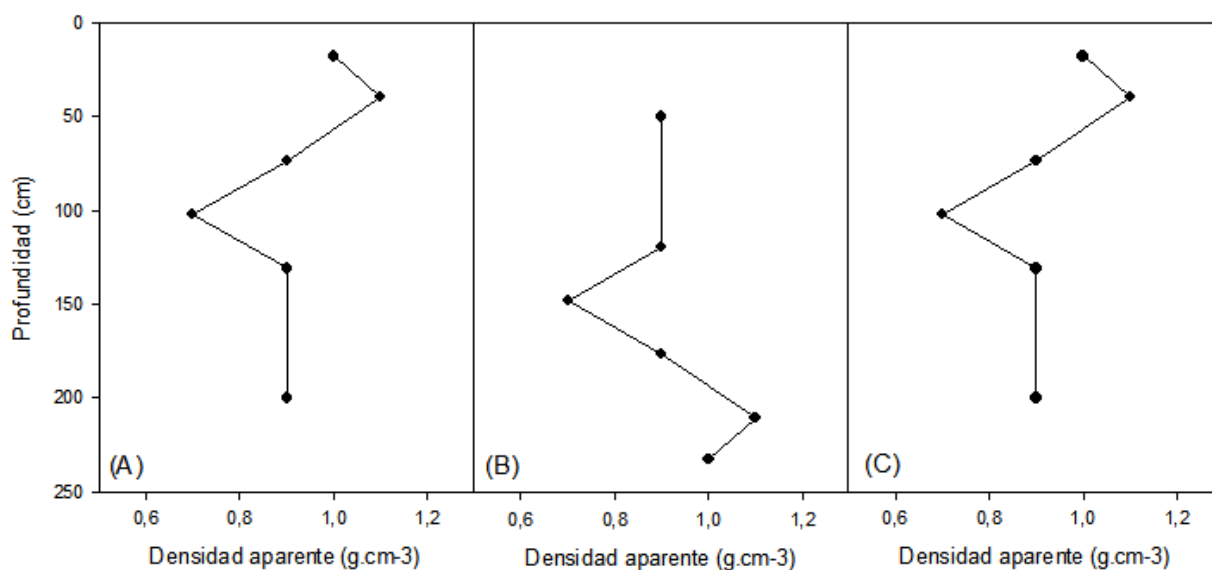


Figura 3.4. Comportamiento de la densidad aparente (g.cm-3) a través de la profundidad para los perfiles de piña orgánica (A), bosque Secundario (B) y piña convencional (C) (n=1).

Al observar la curva de retención de humedad (Figura 3.5), se puede determinar que existe una diferencia notoria entre la capacidad de retención en los horizontes del perfil de bosque secundario al compararlos con los horizontes de los perfiles de piña orgánica y convencional, en donde claramente se nota que el perfil de bosque presenta una mayor retención de humedad y que esta se encuentra a valores bajos de succión.

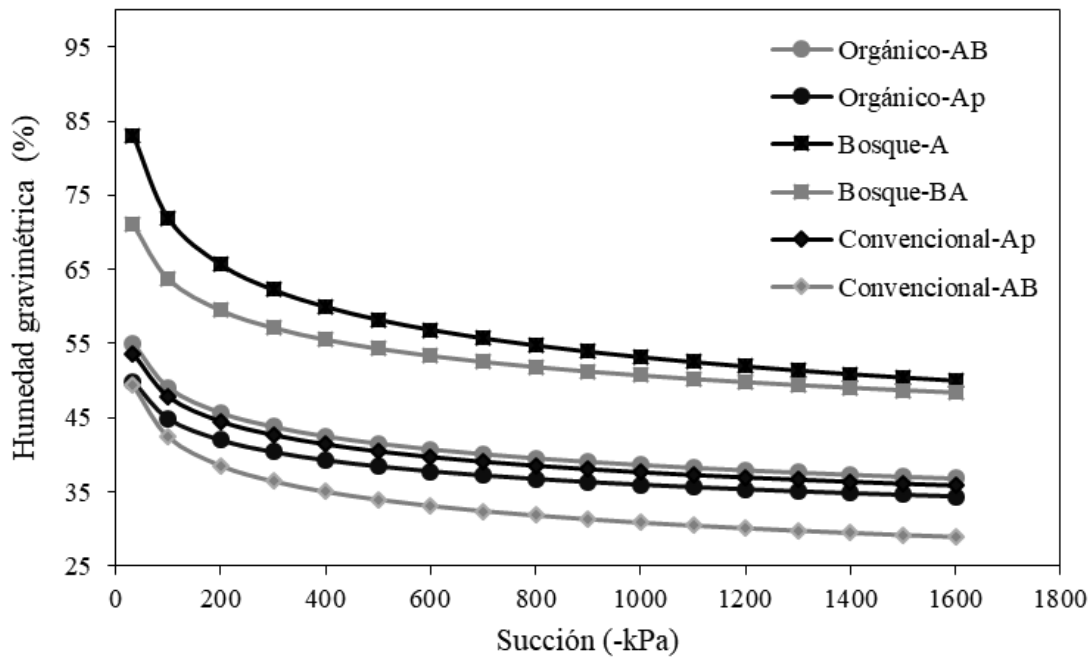


Figura 3.5. Curvas de retención de humedad para los dos primeros horizontes de los perfiles de paja orgánica, bosque secundario y paja convencional (n=1).

Cuadro 3.1. Características morfológicas y variables físicas obtenidas para los perfiles de los sitios de piña orgánica (O), bosque secundario (B) y piña convencional (C).

Horizonte	Profundidad cm	Color (húmedo)	Estructura [†]	Consistencia [†] (húmedo)	Límite [†]	ρ_b	ρ_p	P	θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_{ad} %	Arcilla	Arena	Limo	Txt
Perfil 1 Piña orgánica (O)															
Ap	0-18	10YR 3/2	Sbk/ f/2	SS/SP/ m(FR)	SG	1,0	2,5	60,0	55,6	38,0	17,7	67	12	21	A
AB	18-40	10YR 4/4	Sbk/m/2	SS/SP/ m(FR)	SC	1,1	2,6	57,7	50,0	35,0	14,9	70	15	15	A
Bt ₁	40-74	7.5YR 4/6	Sbk/f/2	SS/SP/ m(FR)	SG	0,9	1,9	52,6	71,4	51,3	20,1	82	7	11	A
Bt ₂	74-102	5YR 4/4	Sbk/f/2	SS/SP/ m(FR)	SG	0,7	2,6	73,1	63,6	48,9	14,7	87	5	8	A
Bt ₃	102-131	5YR 4/4	Sbk/m/2	SS/SP/ m(FI)	SG	0,9	2,7	66,7	68,3	50,2	18,1	85	5	10	A
Bt ₄	131-200	7.5YR 4/3	Sbk/m/2	SS/SP/ m(FI)	-	0,9	2,6	65,4	71,0	49,3	21,7	85	7	8	A
Perfil 2 Bosque secundario (B)															
A	0-12	7.5YR 3/4	Sbk/ f/2	SS/SP/ m(FR)	SC	0,7	2,5	61,01	84,7	52,7	32	55	25	20	A
BA	12-32	7.5YR 4/6	Sbk/m/2	SS/SP/ m(FR)	SG	0,8	2,5	65,04	72,1	50,2	21,9	77	12	11	A
Bt ₁	32-70	5YR 4/6	Sbk/m/2	SS/SP/ m(FR)	SG	0,9	2,6	63,66	80,4	48,1	32,3	80	7	13	A
Bt ₂	70-102	5YR 4/6	Sbk/m/2	SS/SP/ m(FR)	SG	0,9	2,6	63,19	77,2	47,0	30,2	82	7	11	A
Bt ₃	102-200	5YR 4/6	Sbk/m/2	SS/SP/ m(FR)	-	0,9	2,6	60,23	66,4	46,0	20,4	85	7	8	A
Perfil 3 Piña convencional (C)															
Ap	0-20	7.5YR 5/3	Abk/ f/2	SS/P/m(FR)	WC	1,1	2,6	63,97	50,1	30,1	20,0	72	15	13	A
AB	20-35	7.5YR 4/6	Sbk/m/2	SS/P/m(FR)	WC	1,0	2,6	60,52	55,7	39,1	16,6	72	15	13	Af
Bt ₂	35-78	7.5YR 5/6	Sbk/m/2	SS/SP/ m(FI)	SG	0,9	2,5	60,46	63,1	44,0	19,1	80	10	10	A
Bt ₂	78-135	10YR 7/6	Sbk/m/2	SS/SP/ m(FI)	SG	1,0	2,7	59,09	73,7	56,5	17,3	85	7	8	A
Bt ₃	135-200+	10YR 5/8	Sbk/m/2	SS/SP/ m(FI)	-	0,9	2,6	59,74	73,6	55,9	17,6	82	7	11	A

[†] Códigos de descripción según Schoeneberger et al. (2012).

ρ_b : densidad aparente; ρ_p : densidad de partículas; P: porosidad total; θ_{cc} : humedad a capacidad de campo; θ_{pmp} : humedad a marchitez permanente; θ_{ad} : agua disponible; Txt: clase textural.

Características químicas de los perfiles en estudio

Las características químicas correspondientes a los perfiles se detallan en el Cuadro 3.2. Al evaluar los valores de capacidad de intercambio de cationes (CIC) en estos perfiles, se encontró que los horizontes superficiales presentaron variación entre 19,2 y 27,4 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, mientras que los horizontes subsuperficiales presentaron variación entre 15,2 y 21,5 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$.

Por otro lado, los valores de carbono obtenidos en estos perfiles presentaron un descenso regular asociado al incremento de la profundidad, que se puede ver de forma gráfica (Figura 3.4) y que se comportó de la misma manera en todos los perfiles. También se obtuvo una ausencia de propiedades ándicas ($\text{Al}^* + 1/2 \text{Fe}^* \geq 2\%$; retención $\text{PO}_4 \geq 85\%$) en los primeros 40 cm de profundidad en los tres perfiles (Cuadro 3.2).

Químicamente presentó un pH por debajo del valor crítico (5,5) en todo el perfil (Cuadro 3.2) y los contenidos de materia orgánica son altos en los primeros 3 horizontes y luego disminuyen regularmente en el resto de perfil (Figura 3.6) la fertilidad química actual es baja, la acidez es alta y la saturación de acidez es baja (Cuadro 3.3).

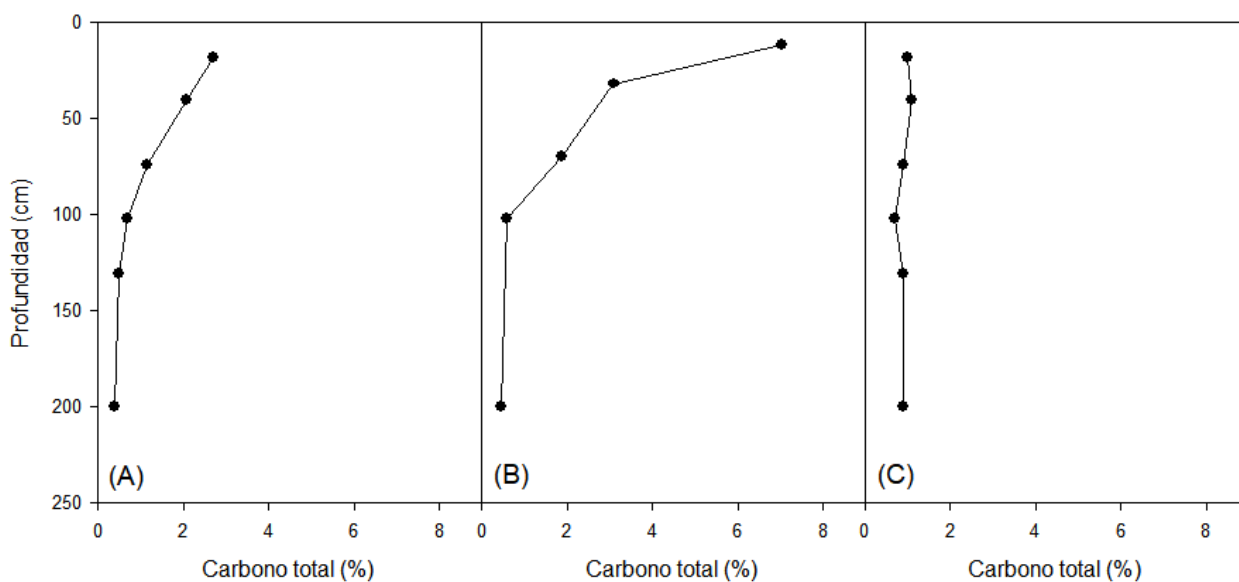


Figura 3.6. Contenido de carbono a través de los perfiles piña orgánica (A), bosque secundario (B) y piña convencional (C) (n=1).

La capacidad de intercambio de cationes es baja (Cuadro 3.2) y la saturación de bases es baja en la mayor parte del perfil, aunque con valores irregulares que se presentaron en los perfiles de Bosque secundario y en el de Piña Convencional (Figura 3.7).

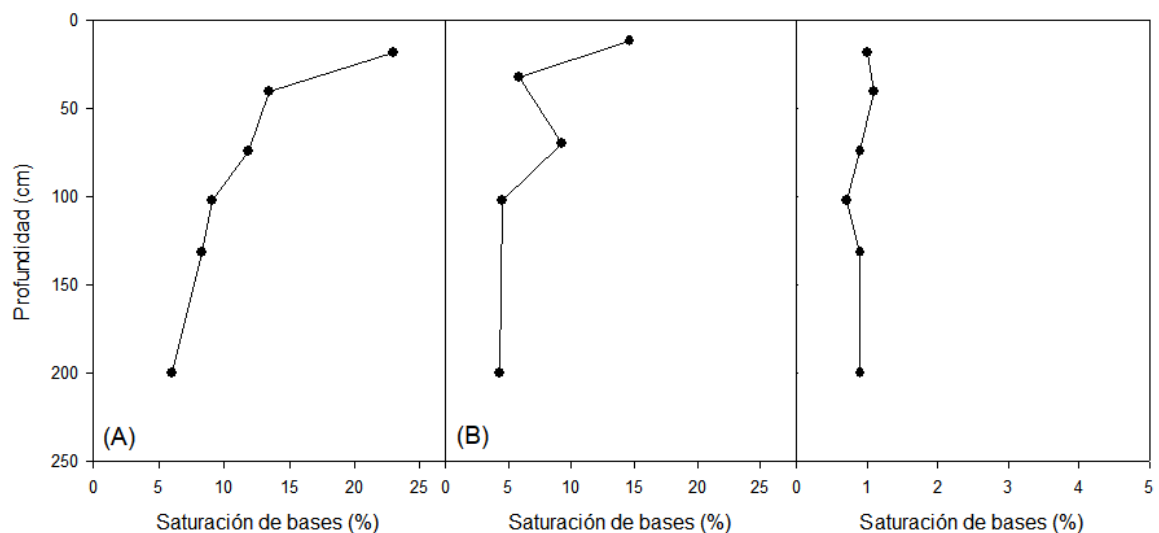


Figura 3.7. Comportamiento de la saturación de bases (%) a través de los perfiles pinya orgánica (A), bosque secundario (B) y pinya convencional (C) (n=1).

Cuadro 3.2. Características químicas obtenidas para los perfiles de los sitios de piña orgánica (O), bosque secundario (B) y piña convencional (C).

Horizonte	Profundidad cm	H ₂ O pH	KCl	CIC ₇	Bases	Al cmol _c kg ⁻¹	†CIC _a	†CICE _a	SB	SAI	C	Al*	Fe*	Retención PO ₄ §
Perfil 1 Piña orgánica (O)														
Ap	0-18	5,2	4,4	19,2	4,40	0,23	28,7	5,71	22,92	4	2,70	0,39	0,47	53,6
AB	18-40	5,2	4,2	17,9	2,41	0,65	25,6	3,31	13,46	20	2,06	0,42	0,45	73,9
Bt ₁	40-74	5,3	4,2	17,0	2,01	0,65	20,7	-	11,82	-	1,15	-	-	-
Bt ₂	74-102	5,4	4,3	15,9	1,45	0,39	18,3	-	9,12	-	0,67	-	-	-
Bt ₃	102-131	5,5	4,6	14,5	1,20	<0,23	17,1	-	8,28	-	0,47	-	-	-
Bt ₄	131-200	4,8	4,8	13,5	0,81	<0,12	15,9	-	6,00	-	0,39	-	-	-
Perfil 2 Bosque secundario (B)														
A	0-12	4,3	4,2	27,4	4,01	0,69	49,8	5,55	14,64	40	7,02	0,34	0,49	67,0
BA	12-32	4,3	3,9	21,1	1,24	1,43	27,4	4,00	5,88	34	3,08	0,38	0,42	63,9
Bt ₁	32-70	4,5	4,1	19,4	1,80	0,93	24,3	-	9,28	-	1,89	-	-	-
Bt ₂	70-102	5,2	4,1	15,9	0,71	1,01	19,4	-	4,47	-	0,59	-	-	-
Bt ₃	102-200	5,2	4,3	15,2	0,66	0,35	17,9	-	4,34	-	0,46	-	-	-
Perfil 3 Piña convencional (C)														
Ap	0-20	4,9	3,8	21,6	0,86	1,99	30,0	4,99	3,98	12	2,45	0,45	0,43	62,8
AB	20-35	4,4	4,0	21,5	1,23	1,57	29,9	4,62	5,72	36	1,77	0,49	0,42	77,4
Bt ₂	35-78	5,0	4,2	20,0	1,44	0,74	25,0	-	7,20	-	1,13	-	-	-
Bt ₂	78-135	5,0	4,7	16,8	0,91	<0,14	19,8	-	5,42	-	0,57	-	-	-
Bt ₃	135-200+	5,1	4,9	15,3	0,76	<0,10	18,7	-	4,97	-	0,56	-	-	-

† CIC_a: capacidad de intercambio de cationes aparente; CICE_a: capacidad de intercambio de cationes efectiva aparente (Buol et al. 2008)
 * Fe y Al amorfo extraído en oxalato de amonio (Soil Survey Staff 2014)
 § Retención de PO₄ según los lineamientos de Blakemore et al. (1981)

Cuadro 3.3. Fertilidad disponible en los primeros 2 horizontes para los perfiles de los sitios de piña orgánica (O), bosque secundario (B) y piña convencional (C).

Horizontes	Piña Orgánica (O)		Bosque Secundario (B)		Piña convencional (C)	
	Ap	AB	A	BA	Ap	AB
Profundidad (cm)	0-18	18-40	0-12	12-32	0-15	15-40
pH (NaF)	9,0	9,4	8,7	9,1	9,4	9,8
Conductividad eléctrica (mS/cm)	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
Fertilidad disponible (cmol(+)/kg de suelo)						
Ca	3,02	1,30	2,59	0,92	0,88	1,20
Mg	0,81	0,41	1,73	0,67	0,24	0,38
K	0,28	0,08	0,26	0,06	0,15	0,11
Acidez	0,43	1,01	0,97	2,35	3,72	2,93
Saturación de acidez (%)	7,5	30,5	17,5	58,8	74,5	63,4
Relaciones catiónicas						
Ca/Mg	3,7	3,4	12,4	35,7	3,7	3,2
Ca/K	12,6	19,0	1,4	1,4	5,9	10,9
Ca + Mg / K	7,3	7,26	10,0	15,3	2,5	4,7
Fosforo y elementos menores (mg/ml)						
P	2	1	ND	ND	6	ND
Zn	3,6	1,4	4,0	1,3	0,5	0,7
Mn	30	46	349	35	9	12
Cu	15	12	16	14	175	153
Fe	142	121	461	345	31	17

Clasificación taxonómica

La clasificación obtenida a partir de los datos físicos, químicos y la descripción de los perfiles modales, dio como resultado que los 3 perfiles estudiados se pudieran clasificar como *Typic Palehumults*. A nivel de orden se clasificaron como Ultisol, ya que todos presentaron un endopedón argílico y un epipedón ócrico, por lo que es un suelo con un grado importante de meteorización y esto se manifestó por la presencia de iluviación de arcilla en los horizontes (a través de la observación de argicutas) y de igual manera, por el bajo contenido de CIC asociado a la fracción arcilla (Cuadro 3.2). A nivel de suborden para cada uno de los sitios, el pedón modal se clasificó como Humults, que son los ultisoles que presentan valores de carbono mayores a 0,9 % en los primeros 15 cm del horizonte argílico (Bt1) como se puede observar en la Figura 3.4. Para el nivel de Gran Grupo se clasifican como Palehumults debido a que no hubo una disminución mayor al 20% en ningún horizonte con respecto al horizonte con el mayor contenido de arcilla como se puede observar en la Figura 3.3 y a nivel de subgrupo como *Typic Palehumults*, debido a que, de acuerdo a la clasificación, no presenta características particulares como influencia volcánica u otros.

Literatura Citada

Alvarado, A; Mata, R; Chinchilla, M. 2014. Arcillas identificada en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931-2014: II. Mineralogía de arcillas en suelos con características vérticas y oxídico caolínicas. *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas* 38(1):107-131.

Beard, JS; Allen, PH. 1958. Rain Forests of Golfo Dulce (en línea). *Ecology* 39(3):564. DOI: <https://doi.org/10.2307/1931785>.

Bergoeing, JP. 2017. The Central Volcanic Mountain Range (en línea). s.l., Elsevier. p. 81-105 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812067-5.00004-6>.

Blakemore, L; Searle, P; Daly, B. 1987. Methods for chemical analysis of soils. Lower Hutt, NZ, New Zealand Soil Bureau. 43 p. DOI: <https://doi.org/10.7931/DL1-SBSR-10A>.

Blakemore, LC.; Searle, PL.; Daly, BK. 1981. Methods for chemical analysis of soils - New Zealand Soil Bureau Scientific Reports - Manaaki Whenua Landcare Research Digital Library (en línea). s.l., s.e. 102 p. DOI: <https://doi.org/10.7931/DL1-SBSR-10A>.

Buol, S; Southard, R; Graham, R; McDaniel, P. 2008. Soil Genesis and Classification. Sexta. Iowa, Wiley-Blackwell. 557 p.

Day, P. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. *In Black, C (ed.)*. Madison, WI, American Society of Agronomy. p. 545-567.

Dengo, G; Dondoli, C; Malavassi, E. (1968). Mapa geológico de Costa Rica. San José, s.e.

Forsythe, W. 1985. Física de suelos: Manual de laboratorio. 2 edición. San José, IICA. 236 p.

Gómez, O; Chinchilla, R. (2005). Estudio taxonómico y mineralógico de los suelos de la cuenca del río Térraba a escala 1:50.000, provincias de Puntarenas y San José. San José, s.e.

Holdridge, LR. 1987. Ecología basada en zonas de vida (Ecology based on life zones) (en línea). s.l., Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 216 p. Consultado 15 jun. 2019. Disponible en <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DO2003100523>.

Holdridge, LR; Grenke, W.; Hatheway, W.; Liang, T; Tosi, JA. 1971. Forest environments in tropical life zones, a pilot study. Oxford, Pergamon Press. 747 p.

Horneck, D; Miller, R. 1998. Determination of total nitrogen in plant tissue. *In Kalra, Y (ed.)*. s.l., Analysis Council Inc. and CRC Press. p. 75-83.

Marshall, JS. 2007. The Geomorphology and Physiographic Provinces of Central America. *In Bundschuh, J; Alvarado, G (eds.)*. Boca Raton, Fla, CRC Press. p. 51.

Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC; Soil Survey Staff. 2012. Field Book for Describing and Sampling Soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center, Lincoln, NE. (en línea). Natl. Soil Surv. Ctr., Lincoln, NE (September). Disponible en <https://books.google.com/books?hl=it&lr=&id=nmfK6wJuIs8C&pgis=1>.

Schwartz, R. 1998. Reactive transport of tracers in a fines textured Ultisol. s.l., Texas A&M University. 183 p.

Soil Survey Staff. (2014). Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. s.l., s.e.

_____. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. Washington, USDA-Natural Resources Conservation Service, vol.12. p. 327-328.

Solano, J; Villalobos, R. (2012). Regiones y sub-regiones climáticas de Costa Rica (en línea). s.l., s.e. Consultado 12 jul. 2019. Disponible en <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalización+climática+de+Costa+Rica>.

Vargas, G. 1992. Las Formaciones vegetales de Costa Rica: un Estudio Ecológico Regional. *Revista Geográfica* (116):113-136.

Anexos

Anexo 3.1. Descripción morfológica y perfil de Lote Piña Orgánica, Sarapiquí, Heredia

Fecha: 28/11/2019

Perfil N°: 1

Nombre del suelo: Piña orgánica

Clasificación de campo: Andic Haplohumults

Localización: 10.47941792, -84.09085963

Fisiografía: Llanuras Aluviales antiguas (Llanuras de Sarapiquí)

Relieve: Plano

Gradiente: 5%

Fertilidad aparente: Baja

Material parental: Lahar antiguo

Ped/Roca superficial: Nula

Descripción:

Proyecto: Piña

Elevación: 95 msnm

Dirección pendiente: 5°

Vegetación/Cultivo: Piña

Clima: Údico

Drenaje: Bien drenado

Nivel freático: mayor de 200 cm

Sales/Alcalinidad: Ausente

Erosión: moderada

Horizontes	Profundidad (cm)	Color (en seco)	Textura	Adhesividad	Estructura	Consistencia (Húmedo)	Formaciones especiales	Poros	Raíces	Limites	Pruebas especiales
Ap	0-18	10YR 3/2	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Finos moderados	Friable	-	Comunes Finos	Comunes Finos	Gradual Plano	NaF leve
AB	18-40	10YR 4/4	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Medios moderados	Friable	Cutanes discontinuos	Comunes Finos	Comunes Finos Medios	Claro Plano	NaF leve
Bt1	40-74	7.5 YR 4/6	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Finos moderados	Friable	Cutanes discontinuos	Comunes Muy finos	Comunes Finos	Gradual Plano	NaF leve
Bt2	74-102	5 YR 4/4	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Finos moderados	Friable	Cutanes continuos	Comunes Muy finos Finos	Pocos Finos Muy finos	Gradual Plano	NaF leve
Bt3	102-131	5 YR 4/4	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Medios moderados	Firme	Cutanes continuos	Comunes Finos	Pocos Finos Muy finos	Gradual Plano	NaF leve
Bt4	131-200	7,5 YR 4/3	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Medios moderados	Firme	Cutanes discontinuos	Comunes Finos	Pocos Finos Muy finos	Gradual Plano	NaF leve

Observaciones: En los horizontes Bt y Bt2 hay lito relictos.

Anexo 3.2. Descripción morfológica y perfil de Bosque Secundario, Sarapiquí, Heredia.

Fecha: 28/11/2019

Perfil N°2

Nombre del suelo: Bosque

Clasificación de campo: Typic Haplohumults

Localización 10.48013145 -84.09070812

Fisiografía: Llanuras de Sarapiquí

Relieve: ligeramente ondulado

Gradiente: 12%

Fertilidad aparente: Baja

Material parental: Lahar antiguo

Ped/Roca superficial: Nula

Descripción:

Proyecto: Piña

Elevación: 95 msnm

Dirección pendiente: 5°

Vegetación/Cultivo: Bosque secundario

Clima: Údico

Drenaje: Bien drenado

Nivel freático: mayor de 200 cm

Sales/Alcalinidad: Ausente

Erosión: Leve

Horizontes	Profundidad (cm)	Color (en humedo)	Textura	Adhesividad	Estructura	Consistencia (Húmedo)	Formaciones especiales	Poros	Raíces	Limites	Pruebas especiales
A	0-12	7,5 YR 3/4	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Finos moderados	Friable	-	Abundantes Grandes Medios Finos Muy finos	Abundantes Grandes Medios Finos Muy finos	Claro Plano	NaF leve
AB	12-32	7,5 YR 4/6	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Medios moderados	Friable	Cutanes discontinuos	Comunes Medios Finos Muy finos	Abundantes Medios Finos Muy finos	Gradual Plano	NaF leve
Bt1	32-70	5 YR 4/6	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Medios moderados	Friable	Cutanes continuos	Comunes Finos Muy finos	Comunes Medios Finos Muy finos	Gradual Plano	NaF leve
Bt2	70-102	5 YR 4/6	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Medios moderados	Friable	Cutanes continuos	Comunes Finos Muy finos	Escasos Finos Muy finos	Gradual Plano	NaF leve
Bt3	102-200	5 YR 4/6	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Medios moderados	Friable	Cutanes continuos	Comunes Finos Muy finos	Escasos Muy finos		

Observaciones: sitio queda aproximadamente a 50 metros de una quebrada. Presencia de diversas especies forestales como aceituno (*Simarouba amara*), *Erythrina spp* y gavilán (*Pentaclethra macroloba*) entre muchas otras.

Anexo 3.3. Descripción morfológica y perfil de Piña convencional, Sarapiquí, Heredia

Fecha: 29/11/2019

Perfil N°3

Nombre del suelo: Piña convencional

Clasificación de campo: Typic Haplohumults

Localización 10.42444690 -84.13982635

Fisiografía: Llanuras de Sarapiquí

Relieve: ligeramente ondulado

Gradiente: 7%

Fertilidad aparente: Baja

Material parental: Lahar antiguo

Ped/Roca superficial: Nula

Descripción:

Proyecto: Piña

Elevación: 158 msnm

Dirección pendiente: 6°

Vegetación/Cultivo: Piña convencional

Clima: Údico

Drenaje: Moderado

Nivel freático: menor de 200 cm

Sales/Alcalinidad: Ausente

Erosión: Moderado

Horizontes	Profundidad (cm)	Color (en húmedo)	Textura	Adhesividad	Estructura	Consistencia (Húmedo)	Formaciones especiales	Poros	Raíces	Limites	Pruebas especiales
Ap	0-20	7,5 YR 5/3	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques angulares Finos moderados	Friable	-	Comunes Finos Medios	Comunes Finos Medios	Claro Ligeramente ondulado	NaF leve
AB	20-35	7,5 YR 4/6	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Medios moderados	Friable	Cutanes discontinuos	Comunes Finos Medios	Comunes Finos Medios	Claro Ligeramente ondulado	NaF leve
Bt1	35-78	7,55 YR 5/6	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Medios moderados	Firme	Cutanes continuos	Comunes Finos Medios	Ausentes	Gradual Plano	NaF leve
Bt2	78-135	10 YR 3/6	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Medios moderados	Firme	Cutanes continuos	Comunes Finos Medios	Ausentes	Gradual Plano	NaF leve
Bt3	135-200	10 YR 5/6	Arcilloso	Ligeramente adherente Plástico	Bloques subangulares Medios moderados	Firme	Cutanes abundantes	Comunes Finos Medios	Ausentes		

4. Capítulo 4: Índices de calidad asociados a dos manejos de piña y una zona de bosque secundario en La Virgen de Sarapiquí, Heredia.

Resumen

El objetivo de esta investigación fue estudiar el impacto de dos manejos de piña (orgánico y convencional) y un bosque secundario sobre la calidad de suelos ultisoles mediante la cuantificación de 21 atributos del suelo y el posterior desarrollo de un índice de calidad del suelo utilizando dos estrategias (ME; método estadístico y CE; criterio experto). Las propiedades del suelo se determinaron para establecer un conjunto mínimo de datos para el desarrollo de un índice de calidad aditivo ponderado globalmente. Los atributos del suelo se midieron en muestras tomadas a 3 profundidades (0 a 10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm) en un lote con manejo de piña orgánica y de piña convencional, además de un sitio bajo bosque secundario como referencia, en la zona norte de Costa Rica. El resultado del análisis a partir de ambas estrategias, dio como resultado que el manejo de piña orgánica tuvo el mayor valor del índice de calidad, lo que sugiere un menor impacto del manejo sobre la calidad del suelo, mientras que el uso de bosque secundario y piña convencional tuvieron menores valores de índice de calidad respectivamente. Cabe destacar que la idea de la generación del índice a partir de ambas estrategias, era determinar el enfoque más práctico y que pudiera determinar diferencias entre los diferentes manejos analizados. A pesar de que el enfoque a partir del ME dio como resultado un índice con pocos indicadores, la estrategia en base al CL, tiene una serie de ventajas como lo son la representatividad de los indicadores para la zona de estudio.

Introducción

La calidad o salud del suelo se conoce como la capacidad continua del suelo, para funcionar como un ecosistema vital que sustenta plantas, animales y humanos (Natural Resources Conservation Service 2018). La evaluación de la calidad del suelo se realiza principalmente a través de las diversas propiedades del suelo, que se denominan “indicadores de la calidad del suelo” y se definen como una propiedad medible que influye en la capacidad de un suelo para realizar una función (Doran et al. 1994, Karlen et al. 1997, Anderson et al. 1997).

Un indicador de calidad de suelos se piensa como una herramienta de evaluación que debe dar información sobre procesos, propiedades y características (Astier-Calderon et al. 2002). Los indicadores son seleccionados a partir de un conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y forman el “conjunto mínimo de datos” (CMD) (Doran et al. 1994, Schoenholtz et al. 2000, Karlen et al. 2003, Andrews et al. 2004, Bastida et al. 2008). Según Andrews et al. (2002), Cherubin et al. (2016), Anaya-Gómez y Jaramillo Jaramillo (2017) este conjunto mínimo de datos (CMD) puede ser escogido usando diversas fuentes, como la opinión de los expertos, funciones de pedotransferencia o procedimientos estadísticos multivariados como el análisis de componentes principales. En la actualidad, también se ha hecho uso de herramientas estadísticas como análisis de correlación múltiple, análisis factorial, análisis de conglomerados y gráficos de estrellas, que pueden utilizarse para seleccionar las variables para su inclusión en el índice, evitando las posibilidades de sesgos disciplinarios en los enfoques basados en la opinión de expertos (Bachmann y Kinzel 1992, J. W. y A. J. 1996, Karlen et al. 2003, Villareal-Núñez et al. 2013)

La elaboración de un índice de calidad del suelo, suele utilizar un enfoque indirecto basado en la evaluación integrada de los indicadores de calidad y sus ponderaciones (Doran et al. 1994, Karlen et al. 1997, 2003). Este es un enfoque ampliamente aceptado, debido a sus ventajas en la identificación de la complejidad sistemática de la productividad del suelo en condiciones naturales y prácticas agrícolas, mediante el uso de métodos matemáticos difusos para evaluar las relaciones entre ciertos factores del suelo y la productividad del suelo (Burrough 1989, Mcbratney y Odeh 1997, Karlen et al. 1997, Andrews et al. 2004). Es importante construir un método indicador simple, sensible y viable para la evaluación de la calidad del suelo (Dumanski y Pieri 2000) y es que, a través de los indicadores, se pueden

llegar a formar índices, que combinan las diversas propiedades del suelo y permiten dar una visión más completa del estado del suelo.

El cultivo de piña es un sistema productivo intensivo y como consecuencia, ha generado un impacto negativo en la salud humana, entorno social y ambiental (Maglianesi Sandoz 2013). Entre los principales problemas ambientales están: contaminación de cuerpos de agua por agroquímicos, cambio de uso del suelo de bosque y áreas de recarga acuífera, degradación del suelo por uso intensivo de maquinaria y manejo incorrecto de los residuos de piña (Montiel-Segura 2015). Lo anterior, demuestra la necesidad de contar con una herramienta de evaluación de la calidad del suelo (Laishram et al. 2012), que a través de diversos indicadores, puede determinar el impacto de las diferentes prácticas en la actividad microbiológica del suelo (Quijandría et al. 1997), contenido de materia orgánica y microorganismos (Rojas y Camacho 2004), erosión, densidad aparente y contenido de agua (Álvarez Rojas y Peña 2013), además de diversas propiedades químicas como pH, metales pesados y contenidos de nutrientes (Guinto y Inciong 2012, Samitha et al. 2018).

En este capítulo se buscó determinar del efecto del uso del suelo sobre variables físicas, químicas y biológicas mediante la generación de un índice de Calidad de suelo. El índice se construyó utilizando dos enfoques distintos (método estadístico y criterio experto) a partir de diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas en suelos bajo dos tipos manejos de piña (orgánica y convencional) y su comparación con un bosque secundario de referencia.

Metodología

Sitio Experimental

El estudio se realizó en el distrito de La Virgen, cantón de Sarapiquí. Este sitio se encuentra en la zona de vida de Bosque muy húmedo tropical (bmh-T), según las zonas de vida de Holdridge (Holdridge 1987). Dentro de sus características climáticas, se puede decir que presenta un ámbito de precipitación que fluctúa entre 4000 y más de 6000 mm de precipitación media anual (Bolaños et al, 2005).

Manejos del suelo

Para el trabajo se evaluaron tres manejos del suelo distintos, que consisten en dos sistemas de manejo de piña (convencional y orgánica) y un bosque secundario. La

descripción de cada uno de los usos de suelo evaluados se realizó con la finalidad de lograr explicar mejor los resultados obtenidos en este trabajo y se detalló el historial de uso, la descripción general del manejo, preparación del suelo y prácticas de manejo (anexo 4.1)

Diseño experimental

Se definió para cada sistema un área representativa aproximada de 1000 m². Para los muestreos en los manejos de piña orgánica y convencional, dentro de una parcela de producción, se establecieron cinco puntos de muestreo con una separación aproximada de 20 m y se evaluó a cinco profundidades (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-65 cm y 65-100 cm) y cada punto de muestreo, se contabilizó como una repetición dentro de cada parcela productiva. En relación al bosque, se siguió la misma metodología de muestreo que en los manejos de piña. El manejo de bosque, se utilizó como línea base para el estudio, a fin de comparar las modificaciones que ha sufrido el sistema bajo las diferentes formas de cultivo.

Variables estudiadas

Se realizó un análisis químico, para determinar el contenido de Ca, Mg, K, Fe, Mn, Cu, P y Zn, a través de la solución extractora Olsen modificado a pH 8,5 (Díaz-Romeu y Hunter 1978). El contenido de pH y conductividad eléctrica (CE) se determinaron en agua a una relación 1:2,5, acidez determinada por valoración con NaOH y Al con HCl, los contenidos de bases extraíbles (Ca, Mg, K, Na) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) con acetato de amonio 1 M (pH 7) se determinaron por absorción atómica (Soil Survey Staff 2014), el contenido de carbono y nitrógeno total se midieron a partir del método de combustión seca (Horneck y Miller 1998) y el potencial redox se evaluó usando un electrodo de platino con un electrodo de calomel saturado como referencia (Søndergaard 2009). El tamaño de partícula se determinó por el método de Bouyoucos modificado por Day (1965). La densidad aparente mediante el método de muestra de volumen conocido, la densidad de partículas con el método de volumen desplazado en un frasco volumétrico calibrado, estabilidad de agregados siguiendo el método estándar (Kemper y Rosenau 1986), de la forma descrita en Reinhart y Vermeire (2016) y la conductividad hidráulica saturada a través del método de columna de agua constante (Klute 1986). Las propiedades biológicas que se midieron fueron biomasa microbiana a partir de la metodología de fumigación extracción de Vance *et al.* (1987), en la forma descrita por Durango *et al.* (2015) y la respiración

microbiana según la metodología de Anderson (1982), tal y como se describe en Durango *et al.* (2015).

Análisis de datos

Determinación del índice de calidad de suelo

Para desarrollar el índice de calidad del suelo, se procedió siguiendo las etapas presentadas en la Figura 4.1, en un proceso de tres pasos: 1) selección de indicadores (físicos, químicos y biológicos) de suelo, 2) interpretación de los valores obtenidos en los análisis a través de la transformación de los valores en puntuaciones de 0 a 1 (mediante curvas de puntuación) y finalmente, 3) integración en un índice general (Karlen *et al.* 1997, 2003, Andrews *et al.* 2004) tal y como se describe en las secciones posteriores.

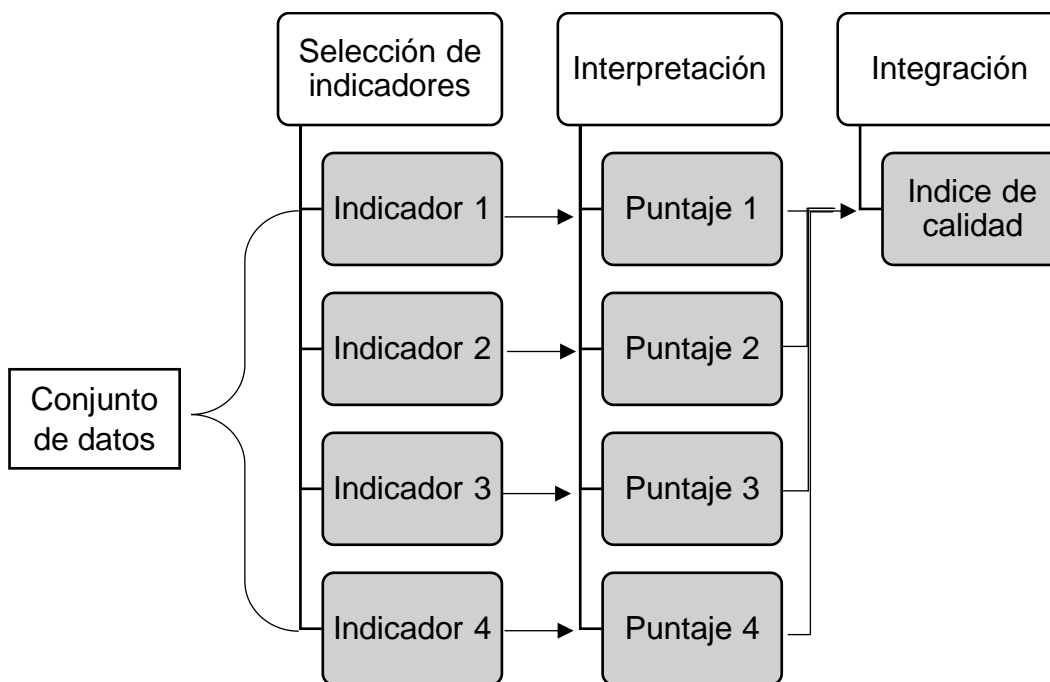


Figura 4.1. Marco de trabajo conceptual para la herramienta de evaluación de manejos de suelos (Tomado y modificado de Andrews *et al.* 2004).

Selección de indicadores

Para la selección de indicadores de suelo se utilizaron 2 enfoques.

- I. Conjunto mínimo de datos (creado a partir del análisis de componentes principales)
- II. Conjunto de datos seleccionados por criterio de expertos (variables seleccionadas basadas en criterios de expertos en microbiología, física y fertilidad de suelos).

Interpretación del indicador.

Todos los valores de los indicadores medidos se transformaron utilizando funciones de puntuación no lineales (Andrews et al. 2002). Con base en las funciones agronómicas y ambientales del suelo, cada indicador se calificó utilizando una de las siguientes curvas:

- I. "más es mejor".
- II. "menos es mejor".

Las ecuaciones lineales 1 y 2 se utilizarán para "más es mejor" y "menos es mejor" punteando las formas de la curva, respectivamente.

$$Puntaje = \frac{\text{valor de cada indicador}}{\text{valor más alto obtenido}} \quad (1)$$

$$Puntaje = \frac{\text{valor más bajo obtenido}}{\text{valor de cada indicador}} \quad (2)$$

En el caso del valor más alto y bajo obtenido, se considera todo el conjunto total de datos analizados para los diferentes usos evaluados.

Integración de indicadores en un índice.

Las puntuaciones de los indicadores se integraron en un índice a través de un enfoque aditivo simple, usando inicialmente la ecuación 3 y luego utilizando la ecuación presente en la ecuación 4 para obtener un valor único para el tipo de manejo.

$$\sum ICS = \sum \text{Valores individuales del índice del parámetros del suelo} \quad (4)$$

$$ICS = \sum_{i=1}^n \frac{Si}{n} \quad (5)$$

En donde, Si es la puntuación del indicador y n el número de indicadores integrados en el índice.

Índice de calidad de suelo

Para determinar el índice de calidad utilizando un enfoque estadístico, se empleó el análisis de componentes principales, mientras que, para el enfoque de criterio experto, se buscó seleccionar parámetros que estuvieran presentes en estudios de suelos ultisoles para el país e idealmente, suelos bajo uso de piña. Para la interpretación de los indicadores, se utilizó una hoja de cálculo de Excel para transformar los valores del indicador de calidad del suelo en puntajes sin unidades. Mientras que para la creación del índice de calidad de suelo, se usó la ecuación 3, según el enfoque aditivo y para obtener el resultado del índice, se utilizó la ecuación 4 (Amacher et al. 2007).

Análisis estadístico

Para determinar la diferencia entre manejos de suelo, se determinó el cumplimiento de normalidad y homocedasticidad de los datos antes de iniciar el análisis estadístico. Si se cumplen los supuestos, entonces se hizo un análisis de varianza (ANDEVA) de una vía, con la función `aov` del paquete `Stats` (RStudio Team., 2020) y cuando existió un valor de P significativo, entonces se realizó un análisis de diferencias significativas honestas de Tukey (Tukey HSD) con la función `TukeyHSD` del paquete `Stats` (RStudio Team., 2020), para determinar diferencias en las diversas propiedades del suelo evaluadas (físico, químico y biológico) entre manejos.

Para la elaboración del índice de calidad, se utilizó una hoja de cálculo de Excel®, en donde se realizaron los pasos de transformación e integración de los índices de calidad (Figura 4.1). Para la selección de indicadores a partir del análisis estadístico, se utilizó un análisis de componentes principales (ACP) (Armenise et al. 2013), este se realizó con la función principal del paquete `psych` (Raiche 2013). La reducción del número de componentes se obtuvo mediante el criterio del valor propio uno, también conocido como criterio de Kaiser (Kaiser 1960). El criterio del valor propio uno sugiere retener cualquier componente con un valor propio superior a 1,00. Esto se debe a que cada variable estandarizada observada aporta una unidad de varianza al total, por lo tanto, una CP con un valor propio $<1,00$ representa menos varianza que la generada por una sola variable estandarizada. A partir del resultado del ACP, se realizó una rotación de tipo varimax con los componentes principales seleccionados de acuerdo al criterio de Kaiser y se escogieron los parámetros con mayor valor de carga (Waswa et al. 2013). De igual manera, se evaluaron coeficientes de correlación multivariante para comprobar la redundancia y la correlación entre las variables. Si las variables están bien correlacionadas ($r > 0,70$), entonces la variable con mayor carga factorial (valor absoluto) se retuvo como indicador entre las variables bien correlacionadas (Andrews y Carroll 2001).

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa R (RStudio Team. 2020) en la interface R Studio versión 1.1.463.

Resultados

Propiedades de los suelos evaluados

Características químicas del suelo

La capacidad de intercambio catiónico no presentó cambios en el primer estrato de muestreo entre usos (Cuadro 4.1), sin embargo, al incrementar la profundidad, se dieron diferencias en donde la piña convencional presentó los valores más altos diferenciándose estadísticamente de los otros dos usos ($p < 0,05$) (excepto en el estrato de 10-20 cm).

Con respecto al contenido de nutrientes presentes, el manejo de piña orgánica tuvo los mayores valores para Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , presentándose diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$), en todas las profundidades con excepción de la profundidad 5 (60-100 cm). Bajo uso de piña orgánica, los valores de Ca^{2+} fueron de $3,36 \pm 0,25$ y $2,28 \pm 0,27$ cmol (+) L^{-1} en los primeros 2 estratos muestreados respectivamente, mientras que bajo el bosque y piña convencional no existieron diferencias estadísticas, con valores de $0,96 \pm 0,08$ y $1,24 \pm 0,10$ cmol (+) L^{-1} respectivamente para los primeros 10 cm de profundidad. En contraste, al analizar la última profundidad, los valores de la piña convencional fueron los mayores con un valor de $1,50 \pm 0,05$ cmol (+) L^{-1} , diferentes estadísticamente de los resultados para el suelo de piña orgánica y bosque, con $1,17 \pm 0,09$ y $0,86 \pm 0,09$ cmol (+) L^{-1} respectivamente.

En relación al magnesio (Cuadro 4.1), la piña orgánica tuvo valores de $1,12 \pm 0,09$ y $0,75 \pm 0,09$ cmol (+) L^{-1} en los primeros 2 estratos de muestreo, el bosque y la piña convencional tuvieron valores casi 50% menores ($0,45 \pm 0,06$ y $0,22 \pm 0,02$ cmol (+) L^{-1} respectivamente en los primeros 10 cm de suelo), al ver los resultados en el segundo estrato, los contenidos de magnesio fueron de $0,32 \pm 0,04$ y $0,24 \pm 0,06$ cmol (+) L^{-1} . Al analizar los datos obtenidos para este elemento en el estrato más profundo, los valores de piña convencional y orgánica no se diferenciaron estadísticamente ($0,35 \pm 0,03$ y $0,38 \pm 0,06$ cmol (+) L^{-1}), aunque sí se distinguieron del suelo bajo bosque.

El contenido de potasio (Cuadro 4.1) determinado en los primeros dos estratos analizados, muestra que la piña orgánica se diferenció estadísticamente de los otros dos usos de suelo, con valores de $0,35 \pm 0,08$ y $0,31 \pm 0,06$ cmol (+) L^{-1} , mientras que solamente en los primeros 10 cm se dieron diferencias estadísticas entre el bosque y la piña convencional. Al analizar los datos de las demás profundidades, se mantiene la tendencia de encontrarse

diferencia estadística entre la piña orgánica y los otros dos manejos evaluados, en donde tanto el suelo bajo bosque y la piña convencional, no se diferenciaron estadísticamente.

Cuadro 4.1. Propiedades del suelo relacionadas a la fertilidad química bajo tres usos de suelo evaluados en la zona norte de Costa Rica.

Profundidad (cm)	Uso de suelo	CIC (cmol/kg)	Ca ²⁺ (cmol (+) L ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol (+) L ⁻¹)	K ⁺ (cmol (+) L ⁻¹)
0-10	Bosque	22,27±0,94 ^a	1,24±0,10 ^b	0,45±0,06 ^b	0,12±0,01 ^c
	Piña convencional	21,58±0,79 ^a	0,96±0,08 ^b	0,22±0,01 ^c	0,18±0,05 ^b
	Piña orgánica	19,65±0,39 ^a	3,36±0,25 ^a	1,12±0,09 ^a	0,35±0,08 ^a
10-20	Bosque	19,32±0,87 ^{ab}	0,87±0,05 ^b	0,32±0,04 ^b	0,06±0,01 ^{bc}
	Piña convencional	22,11±0,94 ^a	0,96±0,12 ^b	0,24±0,07 ^b	0,12±0,03 ^{0b}
	Piña orgánica	18,98±0,29 ^b	2,28±0,27 ^a	0,75±0,088 ^a	0,31±0,059 ^a
20-30	Bosque	18,24±0,84 ^b	0,79±0,03 ^b	0,28±0,03 ^b	0,04±0,01 ^{bc}
	Piña convencional	22,41±0,99 ^a	0,97±0,09 ^b	0,23±0,04 ^b	0,11±0,02 ^b
	Piña orgánica	18,47±0,35 ^b	2,09±0,37 ^a	0,75±0,18 ^a	0,23±0,05 ^a
30-65	Bosque	17,11±0,87 ^b	0,76±0,03 ^b	0,24±0,02 ^b	0,02±0,01 ^b
	Piña convencional	22,80±1,45 ^a	1,06±0,07 ^b	0,25±0,03 ^b	0,09±0,02 ^b
	Piña orgánica	17,82±0,21 ^b	1,63±0,22 ^a	0,59±0,18 ^a	0,15±0,04 ^a
65-100	Bosque	16,45±0,78 ^b	0,86±0,09 ^c	0,19±0,01 ^b	0,01±0,01 ^b
	Piña convencional	23,68±2,12 ^a	1,50±0,05 ^a	0,35±0,03 ^a	0,02±0,01 ^b
	Piña orgánica	16,71±0,46 ^b	1,17±0,09 ^b	0,38±0,06 ^a	0,18±0,06 ^a

Los valores ± son el error estándar de la media (n=5).

Las cifras seguidas de la misma letra en la columna dentro de cada profundidad son estadísticamente similares según diferencias significativas honestas de Tukey.

La acidez presente en el suelo (Cuadro 4.2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), mostró que, bajo el manejo de piña orgánica, los resultados fueron menores (0,58±0,09 cmol (+). L⁻¹) y diferenciados estadísticamente de los otros dos usos de suelo, cuyos valores fueron casi 3 o 4 veces mayores (2,84±0,19 y 3,66±0,50 cmol (+). L⁻¹ para bosque y piña convencional respectivamente). Al incrementar la profundidad, en la piña orgánica los valores de acidez aumentan gradualmente, mientras que, bajo el bosque, los valores se mantienen relativamente constantes y en la piña convencional, son muy variables conforme se incrementa la profundidad.

Los valores de pH (Cuadro 4.2) resultantes bajo piña orgánica fueron estadísticamente diferentes en 4 de las 5 profundidades evaluadas, dándose en los primeros 10 cm de profundidad un pH de $5,04 \pm 0,04$ y obteniéndose un mínimo de $4,76 \pm 0,09$ en la cuarta profundidad evaluada. Tanto el manejo de bosque como el de piña convencional, no se diferenciaron estadísticamente en todas las profundidades evaluadas, en donde los valores máximos se obtuvieron en el estrato más profundo de suelo, con un valor de $4,70 \pm 0,06$ y $4,50 \pm 0,04$, mientras que los resultados mínimos, se presentaron en los primeros 10 cm de profundidad, con valores de $4,27 \pm 0,04$ y $4,36 \pm 0,10$ respectivamente.

Los datos de saturación de acidez demostraron una diferencia estadística significativa entre los manejos de piña orgánica, en comparación con los suelos bajo bosque y piña convencional. Para los primeros 10 cm, la piña orgánica presentó una saturación de $11,19 \pm 2,36$ %, mientras que al incrementar la profundidad de muestreo los valores aumentaron hasta un máximo de $44,48 \pm 2,69$ % en la última profundidad evaluada; en contraste, el bosque y la piña convencional mostraron valores más altos desde los 10 cm iniciales de suelo de $61,07 \pm 3,40$ y $71,57 \pm 4,29$ % y al incrementar la profundidad, los valores bajo bosque y piña convencional mantuvieron variaciones, con un máximo de $67,87 \pm 1,43$ y $72,30 \pm 3,81$ % respectivamente.

En cuanto a las condiciones de potencial redox (Cuadro 4.2) en términos absolutos, el bosque en ciertas profundidades como en el estrato de los 10-20 cm, presentó valores más bajos (menos negativos) de potencial redox, pero en general, se observaron valores reductores en todas las profundidades evaluadas.

Cuadro 4.2. Propiedades del suelo relacionadas con acidez y características reductores bajo tres usos de suelo evaluados en la zona norte de Costa Rica.

Profundidad (cm)	Uso de suelo	Acidez cmol (+). L ⁻¹	pH Log ₁₀ (H ⁺)	Saturación de acidez (%)	Potencial redox (-mV)
0-10	Bosque	2,84±0,19 ^a	4,27±0,041 ^b	61,07±3,40 ^a	-366,50±14,97 ^a
	Piña convencional	3,66±0,50 ^a	4,36±0,10 ^b	71,57±4,29 ^a	-409,00±5,84 ^a
	Piña orgánica	0,58±0,09 ^b	5,04±0,040 ^a	11,19±2,36 ^b	-358,90±32,48 ^a
10-20	Bosque	2,53±0,08 ^b	4,40±0,035 ^b	67,16±1,00 ^a	-307,40±22,76 ^a
	Piña convencional	3,83±0,23 ^a	4,32±0,064 ^b	74,30±3,67 ^a	-402,50±2,70 ^b
	Piña orgánica	1,01±0,24 ^c	4,95±0,035 ^a	23,81±6,01 ^b	-364,60±18,51 ^{ab}
20-30	Bosque	2,29±0,16 ^b	4,55±0,059 ^b	67,19±1,13 ^a	-339,3±17,71 ^a
	Piña convencional	3,53±0,34 ^a	4,28±0,072 ^b	72,30±3,81 ^a	-391,3±12,10 ^a
	Piña orgánica	1,25±0,36 ^b	4,93±0,098 ^a	30,64±9,41 ^b	-371±23,62 ^a
30-65	Bosque	2,16±0,12 ^b	4,66±0,075 ^{ab}	67,87±1,43 ^a	-325,50±21,25 ^a
	Piña convencional	3,32±0,36 ^a	4,37±0,075 ^b	69,63±3,39 ^a	-410,60±2,60 ^b
	Piña orgánica	1,75±0,33 ^b	4,76±0,092 ^a	43,34±8,28 ^b	-374,70±23,17 ^{ab}
65-100	Bosque	2,11±0,22 ^{ab}	4,70±0,059 ^{ab}	65,88±3,09 ^a	-320,50±22,82 ^a
	Piña convencional	3,63±0,90 ^a	4,50±0,042 ^b	61,98±6,27 ^a	-387,80±7,37 ^b
	Piña orgánica	1,38±0,10 ^b	4,85±0,074 ^a	44,48±2,69 ^b	-352,30±19,06 ^{ab}

Los valores ± son el error estándar de la media (n=5).

Las cifras seguidas de la misma letra en la columna dentro de cada profundidad son estadísticamente similares según diferencias significativas honestas de Tukey.

Características biológicas por uso de suelo

Los valores de los diversos parámetros relacionados con la biología del suelo, denotan una marcada diferencia entre los sistemas agrícolas de piña y el bosque, destacando los valores altos en biomasa microbiana (BM) del sistema de piña orgánica (Cuadro 4.3). La respiración para todos los sistemas se comportó de forma similar, aún al darse un incremento de profundidad y para el caso del contenido de materia orgánica, se observa que el sistema de bosque dentro de los primeros 10 cm, tiene una diferencia marcada con los demás sistemas, más no así, cuando se evaluaron muestras a profundidades mayores.

Los resultados de BM presentes, muestran diferencias estadísticas en los primeros dos estratos evaluados, en donde, el bosque tiene los valores más altos de esta variable con $291,75 \pm 24,44$ mg C. Kg⁻¹ suelo en los primeros 10 cm y $203,57 \pm 42,00$ mg C. Kg⁻¹ suelo en el segundo estrato (Cuadro 4.3), aunque en este último, no se dio diferencia estadística con la pinya orgánica. Cabe destacar que, la pinya convencional, tuvo el menor valor de BM a lo largo de 4 de las 5 profundidades evaluadas (excepto en el estrato de 20-30 cm) y que, a partir de los dos estratos iniciales, no hubo diferencias estadísticas. Para la respiración microbiana, esta variable no presentó diferencias significativas entre manejos de suelo evaluados y al incrementarse la profundidad de muestreo, los valores bajo pinya orgánica y convencional aumentaron levemente, mientras que, bajo el bosque, los datos disminuyeron levemente.

Cuadro 4.3. Resultados de biomasa microbiana y respiración microbiana del suelo bajo tres usos de suelo evaluados en la zona norte de Costa Rica.

Profundidad (cm)	Uso de suelo	Biomasa microbiana (mg C. Kg ⁻¹ suelo)	Respiración microbiana (mg C-CO ₂ .g ⁻¹ día)
0-10	Bosque	291,75±24,44 ^a	0,15±0,03 ^a
	Pinya convencional	86,50±6,71 ^b	0,15±0,05 ^a
	Pinya orgánica	127,86±19,77 ^b	0,15±0,05 ^a
10-20	Bosque	203,57±42,00 ^a	0,15±0,03 ^a
	Pinya convencional	76,59±19,99 ^b	0,14±0,04 ^a
	Pinya orgánica	117,28±16,93 ^{ab}	0,16±0,05 ^a
20-30	Bosque	169,96±19,53 ^a	0,09±0,02 ^a
	Pinya convencional	150,16±26,19 ^a	0,17±0,06 ^a
	Pinya orgánica	115,68±24,45 ^a	0,16±0,05 ^a
30-65	Bosque	136,92±30,65 ^a	0,12±0,02 ^a
	Pinya convencional	105,99±20,79 ^a	0,20±0,06 ^a
	Pinya orgánica	99,90±8,63 ^a	0,21±0,04 ^a
65-100	Bosque	133,68±30,69 ^a	0,13±0,04 ^a
	Pinya convencional	95,50±29,68 ^a	0,25±0,08 ^a
	Pinya orgánica	118,53±18,51 ^a	0,19±0,07 ^a

Los valores ± son el error estándar de la media (n=5).

Las cifras seguidas de la misma letra en la columna dentro de cada profundidad son estadísticamente similares según diferencias significativas honestas de Tukey.

Características físicas por uso de suelo

En la estabilidad de agregados (Cuadro 4.4), no existieron diferencias estadísticas significativas entre los diferentes manejos bajo todas las profundidades de muestreo, aunque el bosque presento los valores más altos de este parámetro, llegando a alcanzar un $96,04 \pm 0,58$ % en los 30-65 cm de profundidad. Bajo el manejo de piña orgánica, el máximo valor fue de $94,29 \pm 1,03$ % en la última profundidad evaluada, dándose un ligero incremento a partir del estrato superficial.

La porosidad presento diferencias estadísticas significativas entre el uso de bosque y los manejos de piña, en donde los valores a lo largo del perfil de suelo evaluado fueron mayores al 65% y con un máximo de $71,24 \pm 1,03$ %. En contraste, tanto la piña orgánica como la convencional no se diferenciaron estadísticamente, además de que, los resultados de esta variable, aumentaron ligeramente al incrementar la profundidad de muestreo (Cuadro 4.4).

Los contenidos de arcilla obtenidos bajo uso del bosque, presentan los valores más altos a lo largo de las profundidades evaluadas y, al contrario, muestra los valores más bajos de arena en los estratos muestreados, aunque cabe destacar, que presentan valores intermedios de limo. Los manejos de piña orgánica y convencional presentaron valores de

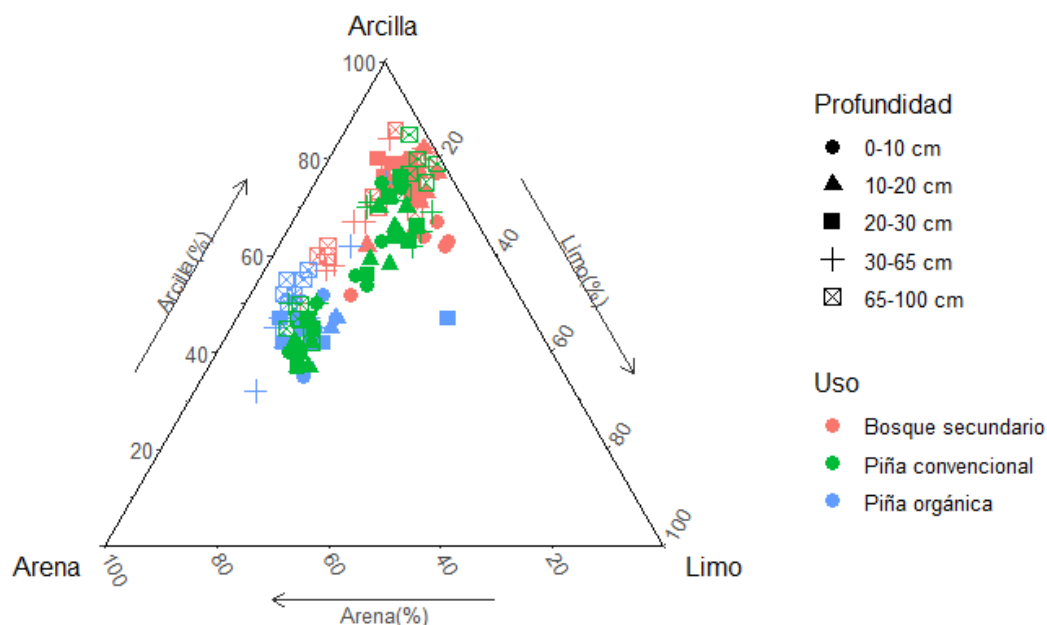


Figura 4.2. Distribución de la clasificación textural para los usos de suelo evaluados en la zona norte de Costa Rica.

contenido de arcilla, limo y arena similares, aunque el suelo bajo piña convencional presentó valores más altos de arcilla y menores de arena, siendo el contenido de limo muy similar (Figura 4.2).

Cuadro 4.4. Resultados de estabilidad de agregados y porosidad bajo tres usos de suelo evaluados en la zona norte de Costa Rica.

Profundidad (cm)	Uso de suelo	Estabilidad de agregados (%)	Porosidad (%)
0-10	Bosque	90,90±3,44 ^a	71,24±1,03 ^a
	Piña convencional	91,08±1,37 ^a	62,89±2,15 ^b
	Piña orgánica	89,51±2,21 ^a	59,91±1,15 ^b
10-20	Bosque	90,80±3,77 ^a	66,06±3,08 ^a
	Piña convencional	89,58±2,52 ^a	57,03±1,50 ^b
	Piña orgánica	90,35±2,41 ^a	56,60±0,93 ^b
20-30	Bosque	91,42±3,07 ^a	68,53±1,33 ^a
	Piña convencional	94,01±1,04 ^a	63,22±1,02 ^b
	Piña orgánica	91,63±1,50 ^a	61,97±1,77 ^b
30-65	Bosque	96,04±0,58 ^a	69,82±1,64 ^a
	Piña convencional	92,14±3,55 ^a	64,34±1,60 ^b
	Piña orgánica	92,92±1,49 ^a	64,32±1,97 ^b
65-100	Bosque	93,36±1,01 ^a	68,02±1,60 ^a
	Piña convencional	94,03±2,35 ^a	64,23±1,65 ^b
	Piña orgánica	94,29±1,03 ^a	64,40±0,65 ^b

Los valores ± son el error estándar de la media (n=5).

Las cifras seguidas de la misma letra en la columna dentro de cada profundidad son estadísticamente similares según diferencias significativas honestas de Tukey.

Generación del Índice de Calidad

Selección de indicadores a partir del ACP

A partir del análisis de componentes principales realizado al conjunto de datos total, se obtuvo que los primeros 4 componentes principales ayudaban a explicar alrededor del 70% de la variación presente y de igual forma, tuvieron autovalores mayores a 1 (Cuadro 4.5).

Cuadro 4.5. Autovalores, porcentaje de varianza explicada y acumulada del conjunto de datos.

Criterio	CP1	CP2	CP3	CP4
Autovalores	6,25	4,63	2,48	1,32
Porcentaje de varianza	0,27	0,21	0,12	0,11
Porcentaje de varianza acumulada	0,27	0,48	0,59	0,70

CP: componente principal

Posteriormente, al realizar una rotación de tipo varimax a los componentes principales obtenidos del análisis anterior, se destacaron los parámetros que explicaban en mayor medida, la variación presente, esto en términos de cargas factoriales (factor loadings) (Cuadro 4.6) y con este resultado, entonces se seleccionaron los parámetros con altos valores de carga y en el caso que dos variables estuvieran correlacionadas, se seleccionó la que presento el mayor resultado de carga (Anexo 4.2).

Cuadro 4.6. Valores de cargas factoriales de las variables consideradas para los componentes rotados por rotación tipo varimax a partir del análisis de componentes principales realizado al conjunto de datos totales del estudio.

Variable	CR1	CR2	CR3	CR4
pH	0,87	-0,35	-0,04	0,04
Acidez	-0,88	0,22	-0,2	0,1
Calcio	0,83	0,23	-0,3	0,16
Magnesio	<u>0,87</u>	0,27	-0,21	0,07
Potasio	0,66	0,33	-0,4	0,04
Saturación de acidez	<u>-0,95</u>	-0,05	0,15	-0,07
Fósforo	0,35	0,61	-0,14	-0,15
Zinc	<u>0,78</u>	0,09	-0,13	-0,19
Cobre	0,65	0,07	0,11	-0,21
Hierro	-0,1	0,74	0,27	-0,46
Manganeso	0,07	0,63	0,11	0,11
Carbono	0,07	<u>0,92</u>	0,12	-0,27
Nitrógeno	0,06	0,91	0,18	-0,29
CIC	-0,43	0,54	-0,35	0,26
Respiración redox	-0,06 0,15	0,01 -0,15	0 0,51	0,51 -0,32
Densidad aparente	0,28	-0,18	<u>-0,87</u>	0,02
Densidad de partícula	0,04	-0,43	0,08	0,75
Porosidad	-0,24	-0,01	0,85	0,36
Estabilidad	-0,01	-0,32	0,09	-0,12
Biomasa microbiana	-0,08	0,46	<u>0,63</u>	-0,05

Cargas factoriales en negrita fueron considerados altamente ponderados y los subrayados fueron mantenidos para el índice de calidad.

Índice de calidad

Los resultados obtenidos demuestran que a partir del Método Estadístico (ME), el índice obtenido estuvo conformado por la saturación de acidez, densidad aparente, contenido de magnesio, contenido de zinc, biomasa microbiana y carbono total. El índice para el suelo bajo el uso de piña orgánica tuvo valores superiores al uso de piña convencional en las 3 profundidades evaluadas, además la piña orgánica se diferenció con el suelo bajo bosque en las tres profundidades evaluadas (superficial de 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm) (Figura 4.3 y Figura 4.4). Al considerar el efecto del uso del suelo sobre el índice de acuerdo a la profundidad, se puede denotar que los parámetros seleccionados por el análisis de componentes, lograron marcar diferencias entre los usos de suelo.

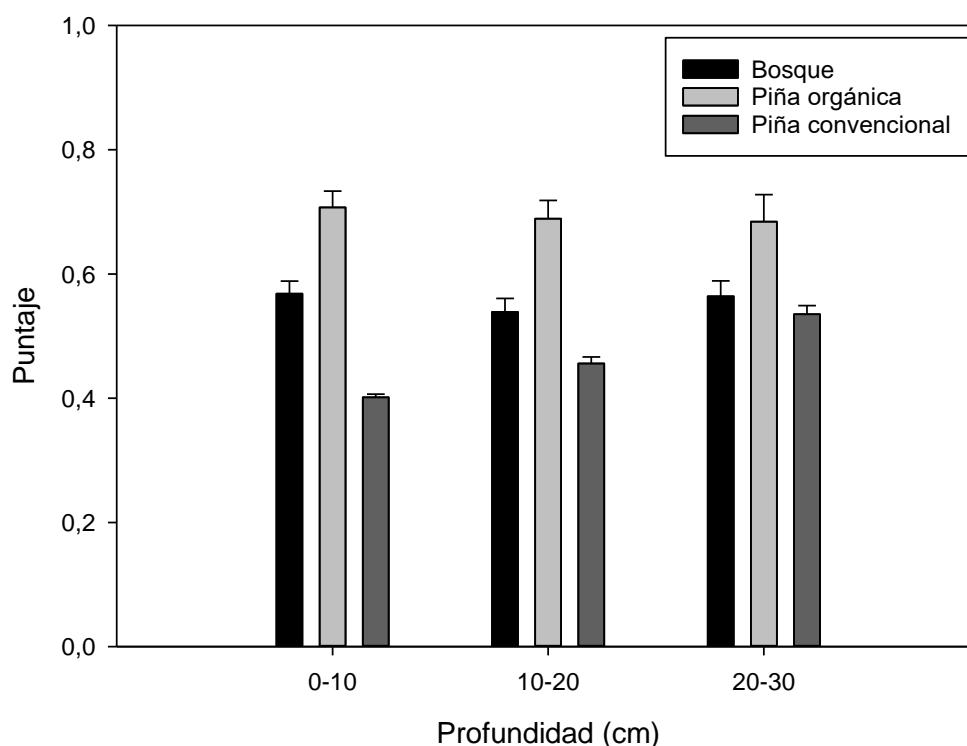


Figura 4.3. Índice de calidad obtenido a 3 profundidades por uso de suelo evaluado en la zona norte de Costa Rica utilizando el método estadístico (ME). Las barras de error representan el error estándar de la media (n=5).

Los valores del índice de calidad elaborados a partir de criterio experto (CE), demostraron una diferencia marcada entre los usos de piña y el bosque (Figura 4.4), esto debido a que muchos de los parámetros usualmente evaluados, tienen como fin evaluar la capacidad del suelo para la producción agrícola, más no para un uso sustentable a través del

tiempo. En esta metodología de índice, hubo diferencias entre el uso bajo piña orgánica y convencional, excepto en la profundidad de 20-30 cm, mientras que, al comparar el uso de piña orgánica y bosque, se dieron diferencias solamente en la profundidad de 20-30 cm.

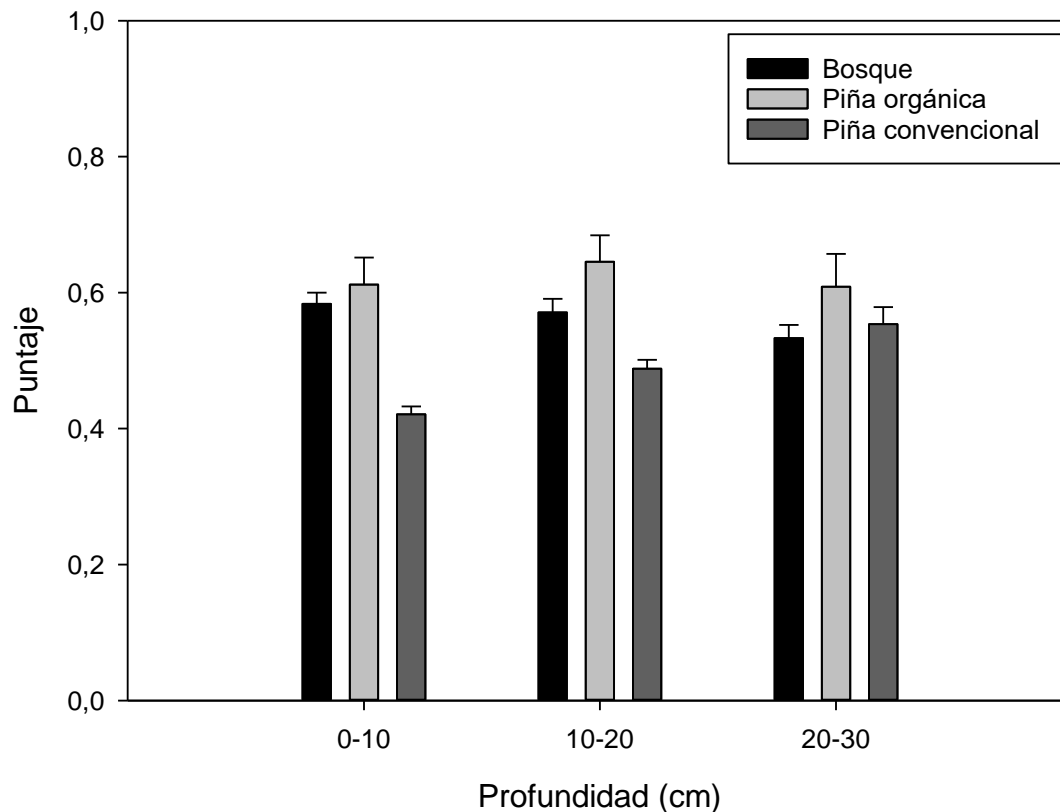


Figura 4.4. Índice de calidad obtenido a 3 profundidades por uso de suelo evaluado en la zona norte de Costa Rica utilizando el criterio experto (CE). Las barras de error representan el error estándar de la media (n=5).

Discusión

Características químicas por uso de suelo

La capacidad de intercambio catiónico efectiva a lo largo del perfil del suelo, mostró valores por debajo del nivel crítico según Méndez y Bertsch (2012), en todas las profundidades para el uso de bosque y piña convencional (a excepción de la profundidad 0-10 cm), mientras que en la piña orgánica, se dieron valores bajos en las profundidades 20-30 y 30-65 cm. Diversa literatura generada en ultisoles de Costa Rica, muestra que este tipo de suelo presenta valores bajos para este parámetro (Rodríguez-Gómez 2010, Méndez 2012,

Miranda-Ortiz 2013, Valerio-Valerio 2013, Furcal-Beriguete 2018, Granados-Cordero 2018, Fonseca-Vargas et al. 2019, Sherman y Brye 2019).

Específicamente en suelos bajo cultivos de piña convencional, diversos trabajos se han realizado para mejorar la fertilidad química y se han dado, resultados muy similares en donde el suelo tiene fertilidad aparente baja (Miranda-Ortiz 2013, Granados-Cordero 2018, Rojas-Ramírez 2019), presentan valores de CIC, Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , por debajo de los niveles críticos y en el caso de los parámetros relacionados con la acidez del suelo, se dan valores bajos de pH, acidez intercambiable por encima del nivel adecuado y problemas serios de saturación de acidez. En cambio, datos de referencia para un tipo de manejo orgánico para piña son escasos, en donde los datos obtenidos en Rodríguez-Gómez (2010), de hecho presentan un panorama distinto, ya que en dicho trabajo, todos los parámetros estuvieron dentro del rango óptimo (excepto el pH), en contraste a lo visto en este trabajo, en donde ciertos parámetros a nivel superficial (0-10 cm) como la acidez intercambiable y la saturación de acidez se mantienen bajos, pero otros parámetros como el pH y los contenidos de nutrientes están por debajo de los niveles críticos.

El problema de la acidez en suelos cultivados de piña en Costa Rica, usualmente está asociado con la producción de este cultivo en suelos con baja fertilidad aparente como lo son los ultisoles (Alvarado et al. 2014), que son el tipo del suelo sobre el que se desarrolla esta fruta (Garita 2014) y además de la acidificación por la fertilización nitrogenada que se utiliza en la producción piñera. Otro factor a considerar, son los problemas de erosión presentes en la piña (Álvarez Rojas y Peña 2013), ya que estos pueden provocar pérdidas importantes de suelo en la capa superficial, debido a la intensidad de la mecanización y al tipo de prácticas agrícolas implementadas (Rojas y Camacho 2004, Gómez-Calderón et al. 2018).

De acuerdo con Mansfeldt (2003), los valores observados de potencial de reducción en este estudio, para todos los usos de suelo se pueden agrupar dentro de condiciones fuertemente oxidantes (valores menores a -100 mV), lo que influenciaría en una serie de procesos en el suelo como lo son el aumento de la solubilidad del aluminio y reducción de la materia orgánica presente (Husson 2013). Al considerar las condiciones del sitio de estudio en general y la variación en el contenido de humedad del suelo, ya sea a lo largo del perfil o hasta dentro de los agregados del suelo, el potencial redox puede variar de forma importante en el suelo e inclusive a nivel de microagregados (Sexstone et al. 1985). Además, como lo

indican Liptzin et al. (2011), esta variable en suelos tropicales, puede ser particularmente propensa a fluctuar, ya que tanto las lluvias abundantes limitan la difusión de oxígeno (O_2) a través de suelos de textura fina, como la alta actividad biológica aumenta el consumo de O_2 , y afecta los procesos de oxidación-reducción (Zhang y Furman 2021).

Características biológicas por uso de suelo

Al comparar la diferencia que existe entre los suelos bajo los usos de piña y el bosque, se conserva la tendencia observada en diversos trabajos (Porras 2006, Durango et al. 2015, WingChing Jones y Uribe Lorío 2016, Sibaja-Matarrita et al. 2017), en donde a nivel superficial, los suelos bajo bosque presentan valores de biomasa microbiana mucho mayores a los obtenidos en suelos agrícolas (a excepción de suelos bajo pasto) y que se atribuye, a un importante aporte de materia orgánica por residuos y poca intervención por mecanización. En relación a los usos de piña, al comparar los resultados obtenidos, con los de Sibaja-Matarrita et al. (2017), se puede ver que, a pesar de evaluaron un suelo bajo piña convencional, el valor reportado fue menor a los de este trabajo ($56,0 \text{ mg C.kg}^{-1}\text{suelo}^{-1}$), para piña de tipo convencional. De acuerdo al tipo de suelo, un estudio de Durango-Cabanilla (2014), al analizar la biomasa microbiana en ultisoles de Orosí, obtuvieron resultados similares al estudio anterior ($66,62 \text{ mg C.kg}^{-1}\text{suelo}^{-1}$); mientras que, Durango et al. (2015), encontraron valores menores en asociaciones de café-banano y café, que los observados en este estudio a excepción del manejo de piña convencional, en suelos ultisoles ubicados en las estribaciones de la cordillera de Talamanca en Grano de Oro. Para el uso de bosque, al comparar los datos presentados en Porras (2006), Durango et al. (2015), WingChing Jones y Uribe Lorío (2016), se puede ver la diferencia que puede existir entre bosque evaluados, ya que todos los resultados presentes en los estudios anteriores, mostraron valores muy superiores que los presentes en el estudio.

En relación a la respiración microbiana, diversos trabajos realizados en Costa Rica muestran una variación en el comportamiento de los datos, por ejemplo, resultados obtenidos en Sibaja-Matarrita et al. (2017), muestran valores similares para un suelo bajo piña convencional, en comparación, con los evaluados en este trabajo, sin embargo, al comparar el valor conseguido en un suelo bajo bosque, los datos son mayores que los observados en este trabajo ($0,26 \text{ mg C-CO}_2.\text{g}^{-1} \text{ día}$ en comparación con $0,15 \text{ mg C-CO}_2.\text{g}^{-1} \text{ día}$ de este experimento). Al comparar suelos ultisoles, los valores obtenidos en Durango-Cabanilla

(2014) y Durango et al. (2015), los valores presentados en este trabajo fueron mucho menores para la capa superficial, tanto en el uso de bosque como en los usos de piña.

Características físicas por uso de suelo

En la actualidad no existen evaluaciones de estabilidad de agregados para suelos bajo piña en Costa Rica, debido a que no es una variable que se analice rutinariamente y también, debido a que la metodología para llevarla a cabo, da resultados muy variados de acuerdo al tipo de arcilla, uso de suelo y condición de humedad al momento de la evaluación (Almajmaie et al. 2017). Datos evaluados en una comparación entre labranza convencional y no labranza, muestran que existe una diferencia entre ambas prácticas y que la menor perturbación del suelo, favorece resultados mayores de estabilidad (Van Eerd et al. 2018), utilizando la metodología de Kemper y Rosenau (1986).

Con relación a la textura presente, se puede ver que los manejos de bosque secundario y piña convencional presentaron los mayores valores de arcilla (superiores al 50%, Figura 4.2) en todas las profundidades evaluadas. Al comparar los valores encontrados con estudios realizados por Chinchilla et al. (2010) y Camacho et al. (2020) en ultisoles de la zona de los Santos y la zona de abanicos aluviales del río General, se pueden ver datos similares para suelos ultisoles con la misma clasificación que en el presente trabajo, aunque con ciertas diferencias en relación a la proporción de arenas y limos.

La alta porosidad presente en el bosque secundario, puede estar justificado tanto por la baja intervención del hombre y el aporte constante de residuos al suelo (Lal 2005), como por el alto contenido de arcilla presente. En el caso de la porosidad encontrada en los manejos de piña son similares entre sí, a pesar, de tener contenidos de arcilla diferentes, por ende, esto puede deberse al proceso de mecanización utilizado que, en ambos casos, da como resultado un grado de perturbación del suelo. De hecho, los valores en este estudio están por debajo de los reportados por Camacho et al. (2015) en ultisoles de San Mateo de Alajuela bajo mecanización.

Índice de calidad por método estadístico (ME)

La función preliminar del ACP es reducir la dimensionalidad de todo el conjunto de datos, que consta de un gran número de variables interrelacionadas, al tiempo que retiene tanto como sea posible las variaciones presentes en el conjunto de datos (Andrews et al. 2002).

El índice obtenido a partir del manejo de piña orgánica fue el más alto en los usos de suelo evaluados para todas las profundidades cuantificadas (Figuras 4.2 y 4.3), dándose diferencias estadísticas significativas con los otros dos usos de suelo en todos los estratos cuantificados. Este resultado se pudo presentar debido a que, al analizar los indicadores bajo esta estrategia, los valores de saturación de acidez como el contenido de magnesio y zinc, fueron muy superiores a los obtenidos bajo los otros usos de suelo (Cuadro 4.2), mientras que al comparar los otros indicadores como lo son el contenido de carbono, biomasa microbiana y la densidad aparente, sus comportamientos fueron similares entre todos los usos de suelo.

El uso de esta estrategia muestra su desventaja principalmente al analizar sistemas en donde hay ciertos parámetros que no son tan importantes para uno de los sistemas, como es el caso del bosque. Según Arifin (2012), en su propuesta de un indicador de calidad de suelo para bosques tropicales en Malasia, hacia la acotación de que no se puede considerar de la misma forma un uso agrícola como la palma aceitera y un bosque secundario, esto por la necesidad de fertilizar en un cultivo agrícola. Debido a lo anterior, esta estrategia no puede hacer distinción de dicha condición y no la considera dentro de sus resultados.

Al considerar los indicadores seleccionados, estos se encuentran dentro de los escogidos en trabajos para evaluar la calidad del suelo en condiciones tropicales (Arifin 2012, Bautista-Cruz et al. 2012, Rangel-Peraza et al. 2017, Huang et al. 2021), principalmente el contenido de carbono y nitrógeno del suelo.

Índice de calidad por criterio experto (CE)

Al estudiar el impacto del uso de suelo sobre la calidad del mismo haciendo uso del criterio expertos, se puede observar que no se dieron diferencias marcadas entre los suelos con bosque y piña orgánica, dando a entender que, considerando los parámetros seleccionados y sus resultados, son sistemas con una calidad similar (Figura 4.3). Bajo este enfoque, se les da prioridad a variables como la estabilidad de agregados, carbono y nitrógeno total, debido a que tienen un impacto importante en diversos procesos dentro del suelo, además de incluir otra serie de indicadores como la capacidad de intercambio catiónico y la acidez del suelo. Al comparar los índices conseguidos, se diferencia el manejo de piña orgánica de los otros dos usos de suelo, particularmente se pueden ver serios problemas de acidez y saturación de acidez, junto con valores de carbono total similares entre el bosque y

la piña convencional, que da como resultado bajos valores de puntaje para sus indicadores y como consecuencia, un índice de calidad bajo en ambos usos. Otros parámetros como lo son el pH, respiración microbiana y densidad aparente, no mostraron diferencias importantes entre los usos de suelo, pero al ser el índice un valor compuesto por los tres tipos de indicadores (variables químicas, físicas y biológicas), existe la posibilidad de que las diferencias entre los otros parámetros evaluados, provoquen las diferencias observadas.

El criterio con experto tiene la ventaja de que existe una diversa cantidad de estudios sobre las variables seleccionadas, pero también puede ocurrir que las variables seleccionadas no respondan de la misma forma en todas las condiciones evaluadas (Karlen et al. 2003). En la zona norte de Costa Rica, se han realizado diversos trabajos en los suelos ultisoles con fertilidad baja. En dichos suelos, normalmente predominan pH bajos, bajos contenidos de bases y una alta acidez intercambiable (Rodríguez-Gómez 2010, Méndez 2012, Miranda-Ortiz 2013, Cornwell 2014, Sibaja-Matarrita et al. 2017, Rojas-Ramírez 2019, Sherman y Brye 2019). También se han analizados los contenidos de carbono en cultivos de piña como lo reportado por Sherman y Brye (2019) y los evaluados en suelos bajo labranza convencional y mínima determinados por Fonseca-Vargas et al. (2019). Por esta razón, se seleccionaron para formar parte del índice en base al criterio experto. Mientras para los indicadores físico, la densidad aparente para ultisoles ha sido analizado por Alvarado y Forsythe (2005) y otra serie de estudios (Powers y Schlesinger 2002, Powers 2004, Camacho et al. 2015, Fonseca-Vargas et al. 2019) y es una de las variables ampliamente utilizadas en la literatura para estudios de calidad de suelos.

Implicaciones sobre la calidad del suelo

Al analizar los índices de calidad obtenidos en ambas estrategias, se puede observar el impacto del manejo de la piña tanto orgánica como convencional sobre el suelo y la diferencia en este parámetro, al compararlo con el bosque secundario de referencia, en donde la intervención humana es sumamente baja y el aporte de las especies forestales, hace que factores como el contenido de carbono y biomasa vegetal (Schroth et al. 2002), den como resultado un suelo con alta actividad microbiana y materia orgánica (Lan et al. 2017); aunque el hecho de que el bosque se desarrollará sobre un suelo altamente meteorizado, tiene como consecuencia valores altos de acidez y pH muy bajo (Silva et al. 2017, Sherman y Brye 2019), ya que como menciona Fujii (2014), incluso en suelos tropicales muy ácidos, las plantas y

microorganismos buscan promover la acidificación para adquirir bases y otra serie de nutrientes.

Al analizar los valores de los índices de calidad obtenidos a partir de las diferentes estrategias, se pudo determinar que existe un impacto debido a la estrategia de selección de parámetros (Figura 2 y 3). En la literatura se menciona que en ocasiones, el enfoque estadístico tiende a ser poco sensible a las variaciones existentes entre usos de suelo o métodos de labranza (Mukherjee y Lal 2014, Stefanoski et al. 2016), mientras que en otras ocasiones, se menciona su utilidad para generar un índice conformado por pocos indicadores (Askari y Holden 2014, Vasu et al. 2016, Vashisht et al. 2020).

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es el proceso de generación de puntaje, ya que en este trabajo se utilizó una puntuación lineal (Andrews et al. 2002). De hecho, (Yu et al. 2018), en su estudio de calidad de suelos en China, menciona una de las dificultades de trabajar con esta estrategia, ya que a pesar de ser beneficiosa en términos de practicidad, puede generar problemas si los indicadores seleccionados presentan una alta variabilidad. Con referencia a ese problema, Andrews et al. (2002) indicó que los resultados del método de puntuación lineal dependen mucho de la varianza de cada indicador y hay que tener cuidado de algún valor atípico, por ello, se requiere de un conocimiento del conjunto de datos utilizado, para saber que debe descartarse; ya que de lo contrario, todos los puntajes posteriores se sesgarán injustamente.

Para Costa Rica existe una escasa literatura sobre estudios en donde se desarrolle un índice de calidad de suelo, ya sea a través del enfoque recomendado por Karlen et al. (2003), en donde se da una combinación de métodos estadísticos para selección de indicadores y generación de índices, con métodos en base a literatura pero con metodologías diversas para calcular índices de calidad o por el contrario, con un marco de trabajo generado por el departamento de agricultura de los Estados Unidos que considera el aporte de conocimiento (Andrews et al. 2004) y otra serie de enfoques desarrollados a partir de base de datos existentes.

Existen trabajos como el publicado para el cultivo de banano en Panamá por Villareal-Núñez et al. (2013), en diversos manejos de café por George (2007) y Chavarría-Bolaños et al. (2012), pero no hay trabajos en donde se busque abordar el enfoque completo de índice de calidad y se considere la sostenibilidad del sistema productivo evaluado. Por ejemplo, en

banano Villareal-Nuñez et al. (2013), utilizaron una amplia cantidad de indicadores de calidad de suelo, en donde incluían parámetros químicos, físicos y biológicos; sin embargo, se usaron variables relacionadas a la productividad del cultivo (circunferencia de la madre, altura del hijo (cm) y número de manos de banano) y se aplicaron diversos métodos estadísticos para lograr la generación de un valor de índice. El detalle que se puede observar en este estudio, es que la calidad de los suelos se asocia de forma directa con la productividad de los sitios, sin embargo, no se considera que cada uno de los sitios de las fincas evaluadas puede tener particularidades, esta situación da como resultado un índice de calidad que no es sensible bajo diversas condiciones y que caracteriza al suelo en relación a que tan productivo puede ser este, sin considerar que, la idea detrás del concepto de calidad es la de caracterizar la capacidad de un sistema para mantenerse productivo.

Mientras que los trabajos realizados en café por George (2007) y Chavarría-Bolaños et al. (2012), utilizaron un enfoque más cercano a lo presentado en este estudio, en donde se inicia con la selección de indicadores físicos, químicos y biológicos para asociarlos a una condición de calidad del suelo, aunque hay que destacar que esta selección se puede ver influenciada por el objetivo para el cual se está realizando el índice. En los índices generados por George (2007) y Chavarría-Bolaños et al. (2012), se busca realizar una determinación del impacto de ciertos tipos de uso sobre el cultivo de café y compararlos con un suelo bajo bosque como línea de referencia. Esta particularidad hace que al analizar los resultados de los indicadores seleccionados adquiera mayor relevancia, debido a que esto ayuda a comprender mejor el impacto que tienen estos sistemas agrícolas, junto con sus variaciones sobre diversos parámetros. En este trabajo se sigue una metodología similar a los estudios realizados por George (2007) y Chavarría-Bolaños et al. (2012), porque se busca caracterizar la calidad de un suelo bajo los diferentes sistemas, a partir de un enfoque cuantificable y no simplemente al considerar el comportamiento de las variables analizadas. La ventaja de este enfoque es que se considera al suelo como un sistema vivo, que puede ser fuertemente influenciado por el tipo de manejo al que esté sometido y que al caracterizarlo tomando en cuenta diversas propiedades del mismo, nos da como resultado una herramienta de diagnóstico.

Conclusiones

El índice obtenido a partir del suelo bajo piña orgánica fue el que obtuvo el mayor valor bajo las dos estrategias analizadas, seguido del manejo de bosque y la piña convencional. La estrategia con base en el criterio estadístico ofreció una serie de ventajas como lo son la escogencia de indicadores representativos y la reducción del conjunto total de parámetros estudiados; mientras que el enfoque del criterio experto, ofrece una mayor representatividad al analizar características del suelo estudiadas previamente en diversos estudios.

El manejo de piña orgánica tuvo resultados superiores para la mayoría de variables físicas, químicas y microbiológicas, en comparación con el suelo con bosque y piña convencional. A partir de estos resultados, se puede ver que este sistema tiene un menor impacto sobre la calidad del suelo, que los otros dos usos evaluados. Sin embargo, hay que considerar los criterios que se utilizaron para la definición de calidad, esto porque si se evaluaran otra serie de parámetros de tipo biológico, el valor que se puede obtener puede ser mayor bajo un uso como lo es el bosque.

Este trabajo permite generar información de referencia para analizar el impacto del cultivo de la piña sobre la calidad del suelo, tomando un enfoque más completo ya que no sólo se analiza el impacto del manejo de piña orgánica o convencional sobre el suelo, sino que se usa el bosque como referencia para describir cómo estaría el suelo sin ningún tipo de intervención.

Literatura citada

Almajmaie, A; Hardie, M; Acuna, T; Birch, C. 2017. Evaluation of methods for determining soil aggregate stability (en línea). *Soil and Tillage Research* 167:39-45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.003>.

Alvarado, A; Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(1):85-94.

Alvarado, A; Mata, R; Chinchilla, M. 2014. Arcillas identificada en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931-2014: II. Mineralogía de arcillas en suelos con características vérticas y oxídico caoliníticas. *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas* 38(1):107-131.

Álvarez Rojas, M; Peña, W. 2013. Estimación de niveles erosivos en suelos con cultivo de piña en Sarapiquí. *Repertorio Científico* 16(1). DOI: <https://doi.org/10.22458/rc.v16i1.594>.

Amacher, MC; O'Neil, KP; Perry, CH. (2007). Soil vital signs: A new Soil Quality Index (SQI) for assessing forest soil health (en línea). s.l., s.e. DOI: <https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-65>.

Anaya-Gómez, ML; Jaramillo Jaramillo, DF. 2017. Determinación de dos índices de la calidad del suelo en la calidad de la taza de café (en línea). *Revista de la Facultad de Ciencias* 6(2):102-123. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v6n2.65667>.

Anderson, DW; Doran, JW; Janzen, HH; Pierce, FJ. 1997. Chapter 1 Concepts of soil quality and their significance (en línea). *Developments in Soil Science* 25:1-19. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(97\)80028-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(97)80028-1).

Anderson, J. 1982. Measurement of CO₂ evolution rates. *In Alef, K; Nannipieri, P (eds.)*. s.l., s.e. p. 831-871.

Andrews, SS; Carroll, CR. 2001. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. *Ecological Applications* 11(6):1573-1585. DOI: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[1573:DASQAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1573:DASQAT]2.0.CO;2).

Andrews, SS; Karlen, DL; Cambardella, CA. 2004. The Soil Management Assessment

Framework : A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. Soil Science Society of America Journal 68(6):1945-1962. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>.

Andrews, SS; Karlen, DL; Mitchell, JP. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. Agriculture, Ecosystems and Environment 90:25-45.

Andrews, SS; Karlen, DL; Mitchell, JP. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California (en línea). Agriculture, Ecosystems & Environment 90(1):25-45. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8).

Arifin, A. 2012. Proposing a suitable soil quality index for natural, secondary and rehabilitated tropical forests in Malaysia (en línea). African Journal of Biotechnology 11(14):3297-3309. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJB11.2903>.

Armenise, E; Redmile-Gordon, MA; Stellacci, AM; Ciccicarese, A; Rubino, P. 2013. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment (en línea). Soil and Tillage Research 130:91-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.02.013>.

Askari, MS; Holden, NM. 2014. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management (en línea). Geoderma 230-231:131-142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.019>.

Astier-Calderon, M; Maass-Moreno, M; Etchevers-Barra, J. 2002. Derivation of soil quality indicators in the context of sustainable agriculture. Agrociencia (Montecillo) 36(5):605-620.

Bachmann, G; Kinzel, H. 1992. Physiological and ecological aspects of the interactions between plant roots and rhizosphere soil (en línea). Soil Biology and Biochemistry 24(6):543-552. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90079-D](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90079-D).

Bastida, F; Zsolnay, A; Hernández, T; García, C. 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective (en línea). Geoderma 147(3-4):159-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>.

Bautista-Cruz, A; del Castillo, RF; Etchevers-Barra, JD; Gutiérrez-Castorena, M del C; Baez, A. 2012. Selection and interpretation of soil quality indicators for forest recovery after

clearing of a tropical montane cloud forest in Mexico (en línea). *Forest Ecology and Management* 277:74-80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.013>.

Burrough, PA. 1989. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation (en línea). *Journal of Soil Science* 40(3):477-492. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01290.x>.

Camacho, ME; Mata, R; Forsythe, W. 2015. Labranza mecanizada de pasturas mediante tres implementos en un ultisol y sus implicaciones físicas e hidropedológicas (en línea). *Agronomía Costarricense* 39:101-115. Disponible en http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242015000300101&nrm=iso.

Camacho, ME; Quesada-Román, A; Mata, R; Alvarado, A. 2020. Soil-geomorphology relationships of alluvial fans in Costa Rica (en línea). *Geoderma Regional* 21(May):e00258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00258>.

Chavarría-Bolaños, N; Tapia-Fernández, A; Soto, G; Virginio-Filho, E. 2012. Efecto de diferentes sistemas de manejo sobre la calidad del suelo, en fincas cafetaleras de la zona de Turrialba y Orosi (en línea). *Revista Intersedes* XIV(26):85-105. Disponible en <http://www.scielo.sa.cr/pdf/is/v14n28/a05v14n28.pdf>.

Cherubin, MR; Karlen, DL; Cerri, CEP; Franco, ALC; Tormena, CA; Davies, CA; Cerri, CC. 2016. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS ONE* 11(3):1-26. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>.

Chinchilla, M; Mata, R; Alvarado, A. 2010. Caracterización y clasificación de algunos ultisoles de la región de Los Santos, Talamanca, Costa Rica (en línea). *Agronomía Costarricense* . DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v35i1.6687>.

Cornwell, E. 2014. Effects of different agricultural systems on soil quality in northern Limón province, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 62(3):887. DOI: <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i3.14062>.

Day, P. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. *In Black, C (ed.)*. Madison, WI, American Society of Agronomy. p. 545–567.

Díaz-Romeu, R; Hunter, A. 1978. Metodología de muestreo de suelo, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero. Turrialba, CATIE. p. 61.

Doran, JW; Coleman, DC; Bezdicek, DF; Stewart, BA. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. American Society of Agronomy, SSSA Special Publication (en línea). American Society of Agronomy 35. Consultado 4 nov. 2018. Disponible en <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015008223>.

Dumanski, J; Pieri, C. 2000. Land quality indicators: research plan (en línea). Agriculture, Ecosystems & Environment 81(2):93-102. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00183-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00183-3).

Durango-Cabanilla, WD. 2014. Efecto de dosis crecientes de enmiendas orgánicas en un andisol y un ultisol sobre la biomasa microbiana, respiración y actividad enzimática, en condiciones de invernadero (en línea). s.l., Universidad de Costa Rica. 136 p. Disponible en <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1355/1/T-SENESCYT-00506.pdf>.

Durango, W; Uribe, L; Henríquez, C; Mata, R. 2015. Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. (en línea). Agronomía Costarricense 39(1):37-46. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/436/43638524003.pdf>.

Van Eerd, LL; DeBruyn, AH; Ouellette, L; Hooker, DC; Robinson, DE. 2018. Quantitative and qualitative comparison of three wet aggregate stability methods using a long-term tillage system and crop rotation experiment (en línea). Canadian Journal of Soil Science 98(4):738-742. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2018-0101>.

Fonseca-Vargas, R; Furcal-Beriguete, P; Campos-Rodríguez, R; Esquivel-Segura, E. 2019. Retención de carbono en un suelo dedicado al cultivo de piña (*Ananas comosus* (L.) bajo un manejo convencional y de mínima labranza (en línea). Revista Tecnología en Marcha 32(4):116-132. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i4.4797>.

Fujii, K. 2014. Soil acidification and adaptations of plants and microorganisms in Bornean tropical forests (en línea). Ecological Research 29(3):371-381. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11284-014-1144-3>.

Furcal-Beriguete, P. (2018). Fertilización del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L) en un cantón de la Región Huetar Norte de Costa Rica. San Carlos, s.e.

Garita, R. 2014. La Piña. 1 ed. Cartago, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 568 p.

George, A. 2007. Estudio comparativo de indicadores de calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica. s.l., Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 121 p.

Gómez-Calderón, N; Villagra-Mendoza, K; Solórzano-Quintana, M. 2018. La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria) (en línea). *Revista Tecnología en Marcha* 31(1):170. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>.

Granados-Cordero, A. 2018. Efecto de la aplicación de enmiendas líquidas en la fertilidad del suelo y el crecimiento de piña (*Ananas comosus* (L) Merr. híbrido MD-2 en Venecia de San Carlos, Alajuela. s.l., Universidad de Costa Rica. 73 p.

Guinto, DF; Inciong, MM. 2012. Soil quality, management practices and sustainability of pineapple farms in Cavite, Philippines: Part 1. Soil quality. *Journal of South Pacific Agriculture* 16(1):30-41.

Holdridge, LR. 1987. Ecología basada en zonas de vida (Ecology based on life zones) (en línea). s.l., Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 216 p. Consultado 15 jun. 2019. Disponible en <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DO2003100523>.

Horneck, D; Miller, R. 1998. Determination of total nitrogen in plant tissue. *In Kalra, Y (ed.)*. s.l., Analysis Council Inc. and CRC Press. p. 75-83.

Huang, W; Zong, M; Fan, Z; Feng, Y; Li, S; Duan, C; Li, H. 2021. Determining the impacts of deforestation and corn cultivation on soil quality in tropical acidic red soils using a soil quality index (en línea). *Ecological Indicators* 125:107580. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107580>.

Husson, O. 2013. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy (en línea). *Plant and Soil* 362(1-2):389-417. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7>.

J. W., D; A. J., J. (1996). *Methods for Assessing Soil Quality*. s.l., s.e.

Kaiser, HF. 1960. The Application of Electronic Computers to Factor Analysis (en línea). *Educational and Psychological Measurement* 20(1):141-151. DOI: <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>.

Karlen, DL; Ditzler, CA; Andrews, SS. 2003. Soil quality: Why and how? (en línea). *Geoderma* 114(3-4):145-156. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9).

Karlen, DL; Mausbach, MJ; Doran, JW; Cline, RG; Harris, RF; Schuman, GE. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial) (en línea). *Soil Science Society of America Journal* 61(1):4. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>.

Kemper, WD; Rosenau, RC. 1986. Aggregate Stability and Size Distribution' (en línea). *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods* 9(9):425-442. Disponible en <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/732/3/585.pdf>.

Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. *In Klute, A (ed.)*. Madison, WI, Elsevier. p. 635–662.

Laishram, J; Saxena, K.; Maikhuri, RK; Rao, KS. 2012. Soil quality and soil health : A review . *Soil Quality and Soil Health : A Review*. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* 38(1):19-37.

Lal, R. 2005. Forest soils and carbon sequestration (en línea). *Forest Ecology and Management* 220(1-3):242-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>.

Lan, G; Li, Y; Jatoi, MT; Tan, Z; Wu, Z; Xie, G. 2017. Change in Soil Microbial Community Compositions and Diversity Following the Conversion of Tropical Forest to Rubber Plantations in Xishuangbannan, Southwest China (en línea). *Tropical Conservation Science* 10:194008291773323. DOI: <https://doi.org/10.1177/1940082917733230>.

Liptzin, D; Silver, WL; Detto, M. 2011. Temporal Dynamics in Soil Oxygen and Greenhouse Gases in Two Humid Tropical Forests (en línea). *Ecosystems* 14(2):171-182. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9402-x>.

Maglianesi Sandoz, MA. 2013. Desarrollo de las Piñeras en Costa Rica y sus Impactos sobre Ecosistemas Naturales y Agro-Urbanos (en línea). *Biocenosis* 27(1-2):62-70. Consultado 1 may 2020. Disponible en <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/biocenosis/article/view/611/507>.

Mansfeldt, T. 2003. In situ long-term redox potential measurements in a dyked marsh soil (en línea). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166(2):210-219. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200390031>.

Mcbratney, AB; Odeh, IOA. (1997). Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions (en línea). 77. s.l., ELSEVIER. Consultado 15 jun. 2019. Disponible en <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.409.3691&rep=rep1&type=pdf>.

Méndez, J; Bertsch, F. 2012. Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos en Costa Rica. 1era ed. San José, ACCS. 108 p.

Méndez, JC. 2012. Estudio de la fertilidad de los suelos de Costa Rica con base en registros de los análisis del laboratorio de suelos y foliares del CIA/UCR durante el período 2006-2010. s.l., Universidad de Costa Rica. 162 p.

Miranda-Ortiz, RI. 2013. Evaluación de dosis y fuentes de enmiendas calcáreas en la fertilidad del suelo y el crecimiento de piña en Finca Tres Amigos, Pital, San Carlos. s.l., Instituto Tecnológico de Costa Rica. .

Montiel-Segura, MA. 2015. Use of agrochemicals in intensive pineapple production in Costa Rica. *Ciencias Naturales* 15(25):183-195.

Mukherjee, A; Lal, R. 2014. Comparison of Soil Quality Index Using Three Methods (en línea). *PLoS ONE* 9(8):e105981. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105981>.

Natural Resources Conservation Service. 2018. NRCS Soils (en línea). *Soils* 67(7):819-825. DOI: <https://doi.org/10.1001/archneurol.2010.144.Dietary>.

Porras, CM. 2006. Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba-Jiménez, Costa Rica (en línea). s.l., Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 131 p. Consultado

16 jun. 2021. Disponible en http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4881/Efecto_de_los_sistemas_agroforestales_de_cafe_organico.pdf;jsessionid=C3DE29B1033C0C4502C0FA08C605FACC?sequence=1.

Powers, JS. 2004. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in northeastern Costa Rica. *Ecosystems* 7(2):134-146. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0123-2>.

Powers, JS; Schlesinger, WH. 2002. Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forests of northeastern Costa Rica (en línea). *Geoderma* 109(3-4):165-190. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00147-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00147-7).

Quijandría, G; Berrocal, J; Pratt, L. (1997). *La industria de la piña en Costa Rica Análisis de Sostenibilidad*. s.l., s.e.

Raiche, G. 2013. *Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research* (en línea). s.l., s.e. p. 1-433. Consultado 20 jun. 2021. Disponible en <https://personality-project.org/r/psych/>.

Rangel-Peraza, JG; Padilla-Gasca, E; López-Corrales, R; Medina, JR; Bustos-Terrones, Y; Amabilis-Sosa, LE; Rodríguez-Mata, AE; Osuna-Enciso, T. 2017. Robust Soil Quality Index for Tropical Soils Influenced by Agricultural Activities (en línea). *Journal of Agricultural Chemistry and Environment* 06(04):199-221. DOI: <https://doi.org/10.4236/jacen.2017.64014>.

Reinhart, KO; Vermeire, LT. 2016. Soil Aggregate Stability and Grassland Productivity Associations in a Northern Mixed-Grass Prairie (en línea). *PLOS ONE* 11(7):e0160262. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160262>.

Rodríguez-Gómez, J. 2010. Efecto de fuentes de nitrógeno de origen orgánico a diferentes dosis en el cultivo de piña (*Ananas comosus* (L) Merr. híbrido MD-2 cultivado bajo técnicas orgánicas. s.l., Instituto Tecnológico de Costa Rica. 93 p.

Rojas-Ramírez, J. 2019. Efecto de la fertilización post forzamiento sobre la calidad y el rendimiento de la fruta de piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.) híbrido MD-2 Alajuela, Costa

Rica (en línea). s.l., Instituto Tecnológico de Costa Rica. . Disponible en https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9888/modelacion_hidrologica_cuenca_media_rio_abangares_guanacaste.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Rojas, L; Camacho, G. 2004. Piña(*Ananas comosus* L . MERR) sembrada en labranza mínima y convencional en San Carlos, Costa Rica (en línea). *Agronomía Mesoamericana* 15(2):161-172. Consultado 8 oct. 2018. Disponible en http://www.mag.go.cr/rev_meso/v15n02_161.pdf.

Rojas, L; Camacho, G. 2004. Piña (*Ananas comosus* L. MERR) sembrada en labranza mínima y labranza convencional en San Carlos, Costa Rica (en línea). *Agronomía mesoamericana* 15(2):161-172. Consultado 29 jun. 2019. Disponible en http://www.mag.go.cr/rev_meso/v15n02_161.pdf.

RStudio Team. 2020. *Integrated Development for R*. (en línea). Boston, MA, s.e. Disponible en <http://www.rstudio.com/>.

Samitha, KA; Sivalingam, R; Sandeep, S. 2018. Assessing Soil quality in Pineapple (*Ananas comosus*) cultivated areas of Ernakulam district. 6(4):321-326.

Schoenholtz, S.; Miegroet, HV; Burger, J. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities (en línea). *Forest Ecology and Management* 138(1-3):335-356. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0).

Schroth, G; D'Angelo, SA; Teixeira, WG; Haag, D; Lieberei, R. 2002. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years (en línea). *Forest Ecology and Management* 163(1-3):131-150. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00537-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00537-0).

Sexstone, AJ; Revsbech, NP; Parkin, TB; Tiedje, JM. 1985. Direct Measurement of Oxygen Profiles and Denitrification Rates in Soil Aggregates. *Soil Science Society of America Journal* 49(3):645-651. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900030024x>.

Sherman, LA; Brye, KR. 2019. Soil Chemical Property Changes in Response to Long-Term Pineapple Cultivation in Costa Rica (en línea). *Agrosystems, Geosciences & Environment*

2(1):1-9. DOI: <https://doi.org/10.2134/age2019.07.0052>.

Sibaja-Matarrita, R; Barboza-Chinchilla, L; Rojas, C. 2017. ¿Pueden los micetozoos ser usados como indicadores de salud del suelo en el contexto agrícola de Costa Rica? (en línea). *Revista de Ciencias Ambientales* 52(1):161. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.52-1.9>.

Silva, DM da; Fonte, NDS da; Souza, KRD de; Rodrigues-Brandão, I; Libeck, IT; Alves, JD. 2017. Relationship between manganese toxicity and waterlogging tolerance in *Zea mays* L. cv. Saracura (en línea). *Acta Scientiarum. Agronomy* 39(1):75-82. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i1.30997>.

Soil Survey Staff. (2014). Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. s.l., s.e.

Søndergaard, M. 2009. Redox Potential (en línea). *Encyclopedia of Inland Waters* :852-859. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00115-0>.

Stefanoski, DC; Figueiredo, CC de; Santos, GG; Marchão, RL. 2016. Selecting soil quality indicators for different soil management systems in the Brazilian Cerrado (en línea). *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51(9):1643-1651. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900064>.

Valerio-Valerio, J. 2013. Efecto de encalado en arroz (*Oryza sativa*) en un ultisol con problemas de acidez de la zona norte del país. s.l., Universidad de Costa Rica. 89 p.

Vance, ED; Brookes, PC; Jenkinson, DS. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C (en línea). *Soil Biology and Biochemistry* 19(6):703-707. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6).

Vashisht, BB; Maharjan, B; Sharma, S; Kaur, S. 2020. Soil Quality and Its Potential Indicators under Different Land Use Systems in the Shivaliks of Indian Punjab (en línea). *Sustainability* 12(8):3490. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12083490>.

Vasu, D; Singh, SK; Ray, SK; Duraisami, VP; Tiwary, P; Chandran, P; Nimkar, AM; Anantwar, SG. 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India (en línea). *Geoderma* 282:70-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010>.

Villareal-Nuñez, J; Plas-Sentis, L; Agudo-Martínez, L; Villaláz-Pérez, J; Rosales, F; Pocasangre, L. 2013. Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. *Agronomía mesoamericana* 24(2):301-315.

Waswa, BS; Vlek, PLG; Tamene, LD; Okoth, P; Mbakaya, D; Zingore, S. 2013. Evaluating indicators of land degradation in smallholder farming systems of western Kenya (en línea). *Geoderma* 195-196:192-200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.007>.

WingChing Jones, R; Uribe Lorío, L. 2016. Biomasa y actividad microbiana en suelos de uso ganadero y en regeneración de bosque. *Cuadernos de Investigación UNED* 8(1):107-113.

Yu, P; Liu, S; Zhang, L; Li, Q; Zhou, D. 2018. Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China (en línea). *Science of the Total Environment* 616:564-571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.301>.

Zhang, Z; Furman, A. 2021. Soil redox dynamics under dynamic hydrologic regimes - A review (en línea). *s.l., s.e., vol.763. p. 143026* DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143026>.

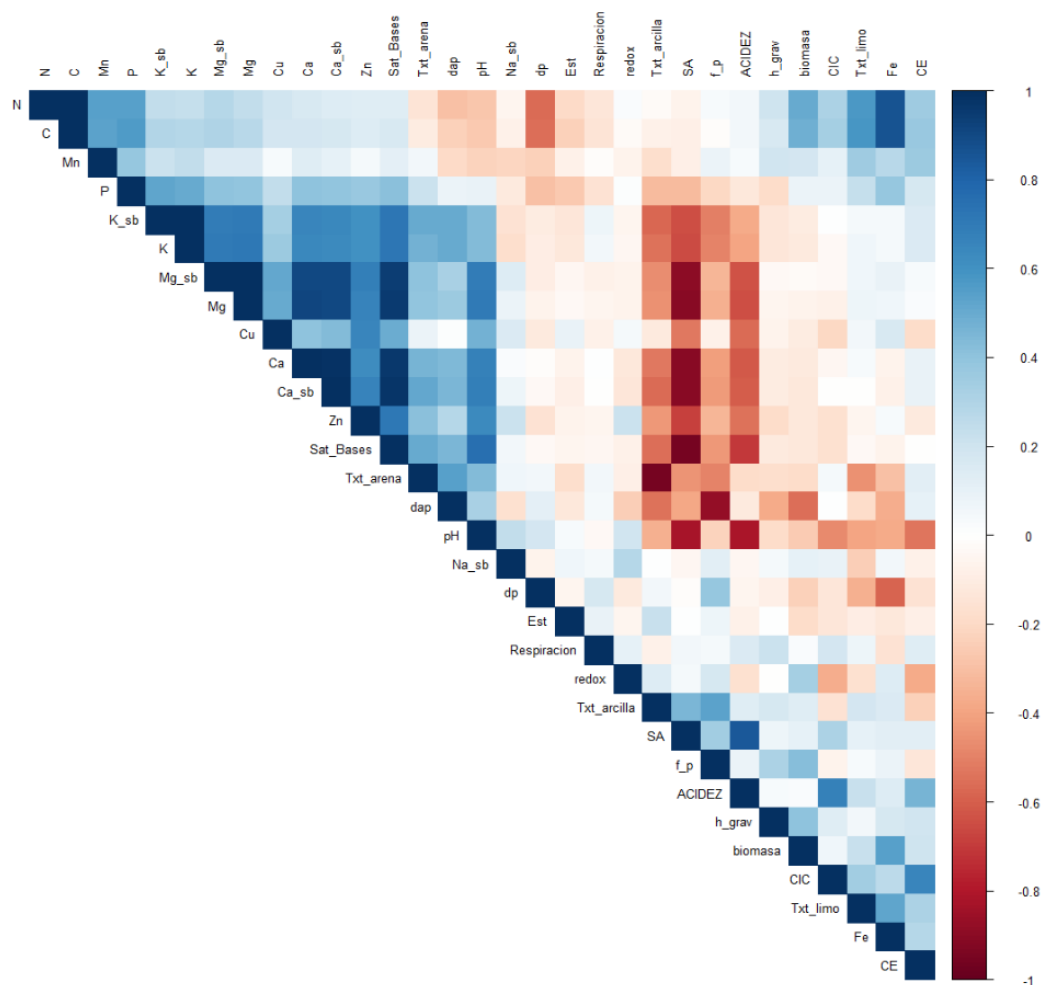
Anexos

Anexo 4.1. Descripción de los usos de suelo evaluados para la determinación de un índice de calidad en la zona norte de Costa Rica.

Uso de suelo	Historial de uso	Descripción general	Preparación del suelo	Prácticas de manejo
Piña orgánica	Lote bajo cultivo de piña desde hace 3 años	Lotes de producción se manejan de acuerdo a los criterios para producción de tipo orgánica, en donde se hace uso de plástico sobre las hileras.	Se utiliza la rastra, se da un tiempo sin cultivo de 6 meses y durante ese tiempo se pasa la rastra de 5 a 7 veces para que los residuos de las plantas se reincorporen al terreno y luego 1 mes más para preparar el terreno para la siembra.	Uso de enmiendas: microthiol, fosfomax y fitosan. No se realiza control de maleza o fertilizaciones a los lotes. Los ajustes de las recomendaciones se realizan a lo largo del ciclo. Durante el ciclo de cultivo, se fertiliza con harina de sangre, carbon activado, fosfomax, magnesio, potasio y sulfoamanical.
Bosque secundario	Suelo bajo este tipo de manejo alrededor de 15 años y poca intervención con excepción de cercado.	Las especies forestales que están presentes son principalmente gavilán (<i>Pentaclethra maculosa</i>), aunque también se presentan aceitunos (<i>Simarouba glauca</i> L), indio pelado (<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.), laurel (<i>Cordia alliodora</i>) y roble coral (<i>Terminalia amazonia</i>).	No presenta ninguna intervención en el suelo.	No recibe ningún tipo de mantenimiento o práctica.
Piña convencional	Sitio cultivado con piña desde hace 11 años. Anteriormente sembrado de yuca y caña brava,	Finca de piña convencional.	Preparación con 4 pases de rastra, subsolado, encalado y aplicación de herbicida. Se incorporan los residuos de cosecha triturados al suelo.	Para la fertilización se hace una 1era aplicación con fertilizante granular para posteriormente realizar aplicaciones con el spray boom. Para tratar enfermedades se utiliza cal líquida y cobre.

Anexo 4.2. Matriz de correlación de Pearson aplicada al conjunto inicial de datos utilizados en el proceso de la selección de modelos lineales.

Parámetros analizados fueron: N: nitrógeno, C: carbono, Mn: manganeso, P: fósforo, K_sb: saturación de potasio, K: potasio, Mg_sb: saturación de magnesio, Mg: magnesio, Cu: cobre, Ca: calcio, Ca_sb: saturación de calcio, Zn: zinc, Sat_Bases: saturación de bases, Text_arena: porcentaje de arena, dap: densidad aparente, pH: valor de pH en agua, Na_sb: saturación de sodio, dp: densidad de partícula, Est: estabilidad de agregados, Respiracion: respiración microbiana, redox: potencial redox, SA: saturación de acidez, f_p: porosidad, ACIDEZ: acidez intercambiable, h_grav: humedad gravimétrica, biomasa: biomasa microbiana, CIC: capacidad de intercambio catiónico, Text_limo: porcentaje de limo, Fe: hierro, CE: conductividad eléctrica.



5. **Capítulo 5:** Reservorios de carbono y nitrógeno en suelos ultisoles bajo dos tipos de cultivo de piña y un bosque secundario en la zona norte de Costa Rica.

Resumen

El objetivo de este estudio fue cuantificar los reservorios de carbono y nitrógeno en suelos ultisoles bajo dos usos de piña (orgánica y convencional) y un bosque secundario en la zona norte, además de establecer las propiedades físicas, químicas y biológicas que explican el contenido de carbono y nitrógeno presentes en el suelo, a través de un modelo lineal. El experimento se estableció en dos fincas localizadas en Bajos de Chilamate (piña orgánica y bosque secundario) y en San Isidro de La Virgen (piña convencional), en el cantón de Sarapiquí. Los reservorios de carbono y nitrógeno no fueron significativamente distintos entre los diferentes usos del suelo evaluados. El suelo bajo uso de bosque, piña convencional y piña orgánica, presentaron valores de $135,00 \pm 7,51 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$, $145,59 \pm 5,65 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$ y $143,87 \pm 9,70 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$, para el reservorio de carbono y $(16,01 \pm 0,88 \text{ Mg N. Ha}^{-1}$, $16,96 \pm 0,44 \text{ Mg N. Ha}^{-1}$ y $17,14 \pm 0,90 \text{ Mg N. Ha}^{-1}$, para el caso del reservorio de nitrógeno según el uso de suelo, respectivamente. Los modelos lineales para el carbono y nitrógeno, estuvieron conformados por: profundidad, contenido de hierro, contenido de limo y arcilla.

Introducción

La piña forma parte de la familia de las bromelias y las variedades cultivadas pertenecen al género *Ananas* que agrupa varias especies, entre ellas, la *Ananas comosus*, que es la que se explota con fines comerciales (Garita 2014). En Costa Rica, actualmente hay alrededor de 44.500 hectáreas netas dedicadas al cultivo de la piña. Las áreas de siembra están distribuidas en 16 cantones, divididos en los siguientes sectores: Zona Norte 24.653 hectáreas (56% del área cultivada); Atlántico 11.188 hectáreas (25%) y Pacífico 8.659 hectáreas (19% del área cultivada) y en manos de unos 250 productores en el país (CANAPEP 2019).

El carbono orgánico del suelo (COS) es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos (Martínez *et al.* 2008). Este carbono está compuesto por residuos de plantas, materia orgánica en partículas (MOP), humus y carbono orgánico recalcitrante (Trivedi *et al.* 2018). Según Banwart *et al.* (2014), el COS es crítico para la salud del suelo y se ha propuesto como nivel crítico entre un 1,5-2,0% dentro de los agroecosistemas, con el fin de mantener la estructura del suelo y agregados, mejorar la retención de agua y nutrientes, contribuir a la eficiencia en el uso del agua y brindar resistencia al estrés abiótico, a través de la promoción de diversidad microbiana.

El almacenamiento del carbono en el suelo depende del equilibrio entre adiciones y pérdidas de carbono (Sollins *et al.* 1996). Los factores bióticos como la abundancia de especies de fauna, microorganismos, especies vegetales y los controles ambientales como la temperatura, la humedad y la textura del suelo influyen en los procesos de estabilización y desestabilización del carbono (Batjes 1996).

En diversos estudios sobre el secuestro de carbono e inventarios de carbono y nitrógeno, se mencionan que no solamente se debe tomar en cuenta las prácticas agrícolas utilizadas y los resultados de las variables estudiadas; esto porque se ha determinado que parámetros como el clima (Alvarez y Lavado 1998), topografía (Burke *et al.* 1999), material parental (Spain 1990) y tiempo (Schlesinger 1990), explican de una forma más completa los resultados obtenidos. Sin embargo, no todos estos factores son igualmente importantes en todas las escalas espaciales, y su importancia relativa puede cambiar en diferentes entornos, además de variar en relación a la profundidad analizada (Luo *et al.* 2021).

La evaluación del COS se puede determinar mediante muestreo físico y su posterior análisis químico, o se puede estimar a partir de modelado o valores supuestos (Arrouays *et al.* 2018, FAO 2019). En cualquier método utilizado, uno de los aspectos más difíciles al momento de la estimación, es la alta variabilidad espacial en el contenido de COS y las propiedades biogeoquímicas del suelo, asociadas con las características intrínsecas del mismo, del cultivo o vegetación presente, clima, uso y manejo utilizado (Conant *et al.* 2011).

Para la determinación del COS cuyo objetivo principal es estimar cambios temporales en el reservorio de carbono, el muestreo físico es el enfoque requerido para cuantificar el reservorio presente (FAO 2019). El enfoque básico del muestreo físico consiste en la recolección de muestras de suelo dentro de un incremento específico de la profundidad, utilizando muestras tomadas a partir de cilindros de volumen conocido, que permita la determinación del carbono total y la densidad aparente (ajustada por el contenido de fracción mineral gruesa) o la masa del mismo. Dentro de las metodologías para la toma de muestras están la extracción vertical por medio de un muestreador o partir de fosas excavadas (Davis *et al.* 2017), ambas prácticas son aceptadas para el muestreo del suelo según la FAO (2019).

En Costa Rica, tanto en la zona norte como en sectores del sur del Caribe, se han hecho estudios en donde se ha determinado tanto el contenido de carbono como el reservorio del mismo (Cornwell 2014, Chacón *et al.* 2015, Fonseca-Vargas *et al.* 2019, Sherman y Brye 2019) en diversos sitios de producción agrícola, donde se incluyen parcelas de piña convencional y se han podido observar variaciones importantes, debido al clima, cultivo asociado y características de la génesis de los suelos muestreados. Otros estudios han evaluado el contenido de carbono y su comportamiento, además de evaluar este parámetro en diversas zonas como bosque de transición y lluvioso en la zona norte (Powers y Schlesinger 2002, Powers 2004), explicando los posibles mecanismos a través de los cuales, se da una acumulación y secuestro del carbono en los suelos meteorizados de la zona norte de Costa Rica.

En la literatura existe una cantidad importante de estudios sobre los reservorios de nitrógeno en diversas latitudes y cultivos (Sisti *et al.* 2004, Yimer *et al.* 2006, Zhang *et al.* 2013, Wang *et al.* 2016, Liu *et al.* 2019, Oliveira *et al.* 2019, Santana *et al.* 2019, Ngaba *et al.* 2020) y que se menciona que el secuestro de nitrógeno en estudios previos se ha relacionado estrechamente con el equilibrio entre las entradas de nitrógeno (como fertilización

nitrogenada, fijación biológica y deposición de nitrógeno atmosférico) y las salidas (como la descomposición de materia orgánica, la absorción de nitrógeno y la emisión y lixiviación a partir del suelo) (Post et al. 1985, Vitousek y Howarth 1991, Morris et al. 2007, Li et al. 2012). El estudio de los reservorios considerando los factores de variación mencionados anteriormente, puede dar información importante sobre la dinámica de nutrientes en el suelo, impacto de las diversas prácticas como la fertilización o aplicación de enmiendas, además de ayudar a comprender cómo el manejo sobre este reservorio afecta otros procesos en el suelo (Piñeiro et al. 2010, Bertrand et al. 2019, Ngaba et al. 2020, Udvardi et al. 2021).

En este capítulo se buscó cuantificar los reservorios de carbono y nitrógeno de suelos ultisoles bajo cultivo de piña (orgánica y convencional) y bosque en la zona norte de Costa Rica, además de determinar las propiedades físicas, químicas y biológicas que explican el contenido de carbono y nitrógeno presentes en el suelo.

Metodología

Sitio Experimental.

El estudio se realizó en el distrito de La Virgen, cantón de Sarapiquí, Provincia de Heredia, Costa Rica. Este sitio se encuentra en la zona de vida de Bosque muy húmedo tropical (bmh-T), según las zonas de vida de Holdridge (Holdridge 1987). Dentro de sus características climáticas, se puede decir que presenta un ámbito de precipitación que fluctúa entre 4000 y más de 6000 mm de precipitación media anual (Powers 2004).

Diseño experimental.

Se definió para cada sistema un área representativa aproximada de 1000 m². Para los muestreos en los manejos de piña orgánica y convencional, dentro de una parcela de producción, se establecieron cinco puntos de muestreo con una separación aproximada de 20 m y se evaluó a cinco profundidades (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-65 cm y 65-100 cm) y cada punto de muestreo, se contabilizó como una repetición dentro de cada parcela productiva. En relación al bosque, se siguió la misma metodología de muestreo que en los manejos de piña. El manejo de bosque, se utilizó como línea base para el estudio, a fin de comparar las modificaciones que ha sufrido el sistema bajo las diferentes formas de cultivo.

Variables analizadas.

Se realizó un análisis químico, para determinar el contenido de Ca, Mg, K, Fe, Mn, Cu, P y Zn, a través de la solución extractora Olsen modificado a pH 8,5 (Díaz-Romeu y Hunter 1978). El contenido de pH y conductividad eléctrica (CE) se determinaron en agua a una relación 1:2,5, acidez determinada por valoración con NaOH y Al con HCl, los contenidos de bases extraíbles (Ca, Mg, K, Na) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) con acetato de amonio 1 M (pH 7) se determinaron por absorción atómica (Soil Survey Staff 2014), el contenido de carbono y nitrógeno total se midieron a partir del método de combustión seca (Horneck y Miller 1998) y el potencial redox se evaluó usando un electrodo de platino con un electrodo de calomel saturado como referencia (Søndergaard 2009). El tamaño de partícula se determinó por el método de Bouyoucos modificado por Day (1965). La densidad aparente mediante el método de muestra de volumen conocido, la densidad de partículas con el método de volumen desplazado en un frasco volumétrico calibrado, estabilidad de agregados siguiendo el método estándar (Kemper y Rosenau 1986), de la forma descrita en Reinhart y Vermeire (2016) y la conductividad hidráulica saturada a través

del método de columna de agua constante (Klute 1986). Las propiedades biológicas que se midieron fueron biomasa microbiana a partir de la metodología de fumigación extracción de Vance *et al.* (1987), en la forma descrita por Durango *et al.* (2015) y la respiración microbiana según la metodología de Anderson (1982), tal y como se describe en Durango *et al.* (2015). En relación a la determinación del reservorio de carbono orgánico, se obtuvo a partir de la ecuación 1, mientras que, para el reservorio de nitrógeno, se utilizó la ecuación 2.

$$\text{Contenido COS (Mg C. ha}^{-1}\text{)} = \text{CO (mg C. g suelo}^{-1}\text{)} \times \rho_a \text{ (g. cm}^{-3}\text{)} \times t \text{ (cm)} \times 0.1 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Contenido CNT (Mg C. ha}^{-1}\text{)} = \text{CN (mg N. g suelo}^{-1}\text{)} \times \rho_a \text{ (g. cm}^{-3}\text{)} \times t \text{ (cm)} \times 0.1 \quad \text{Ecuación 2}$$

- ρ_a : densidad aparente (g.cm^{-3}).
- CO: contenido de carbono orgánico ($\text{mg C. g de suelo}^{-1}$).
- CN: contenido de nitrógeno ($\text{mg C. g de suelo}^{-1}$).
- t: espesor (profundidad, en cm) del horizonte en lugar del incremento en profundidad
- 0.1: factor de conversión para convertir mg C .cm^{-2} en Mg C ha^{-1} .

La densidad de carbono y nitrógeno, se calculó a partir de la multiplicación de la densidad aparente y el contenido de carbono y nitrógeno determinados por el método de combustión seca.

Los análisis químicos, físicos y biológicos se realizaron en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica.

Análisis estadístico.

Para evaluar el efecto del tipo de uso del suelo en el reservorio de carbono, inicialmente se determinó la normalidad y homogeneidad de varianzas en la variable de respuesta. Si se cumplían los supuestos, entonces se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de una vía, con la función aov del paquete Stats. Cuando existió un valor de P significativo, entonces se realizó un análisis posterior para determinar diferencias entre los usos de suelo, haciendo uso de las diferencias significativas honestas de Tukey (Tukey HSD) con la función TukeyHSD del paquete Stats.

Modelos lineales para estimar la densidad de carbono y nitrógeno del suelo

Para evaluar el efecto de las propiedades físicas, químicas y biológicas, se procedió a realizar un modelo lineal, que permitiera predecir el reservorio de carbono, pero debido a

que los cálculos de reservorios implican una multiplicación entre el espesor, densidad aparente y contenido de carbono/nitrógeno, esto provocó que no se cumpliera con los supuestos para los modelos lineales, por ende, se procedió a considerar la densidad de carbono en su lugar. Posteriormente a partir de este cambio, se realizó lo mismo para el modelo de reservorio de nitrógeno, en donde se sustituyó por la densidad de nitrógeno. La variable densidad es la expresión del carbono y nitrógeno en términos de volumen (g C. cm^{-3}) y permite expresar el contenido de las variables de respuesta a utilizar en los modelos estadísticos.

Con los cambios de las variables de respuesta ya realizados, se siguieron los pasos presentes en la figura 5.1 e inicialmente se evaluó la posible correlación entre las variables evaluadas del suelo con una matriz de correlación según el método de Pearson, utilizando la función `corrplot` del paquete `corrplot` (Wei *et al.* 2017) y se procedió a separarlas del conjunto de datos utilizado para la generación de modelos para densidad de carbono y nitrógeno. Posteriormente, a través de la función `Boruta` del paquete `Boruta` (Kursa y Rudnicki 2010), se determinó la importancia de las variables del conjunto anterior de datos para ambas densidades (carbono y nitrógeno) y a partir de dicha selección, se ajustó un modelo y realizó una verificación de la colinearidad existente entre las variables con el paquete `performance` (Lüdecke *et al.* 2021). Con base a lo obtenido del análisis anterior, se procedió con el ajuste de modelos con la función `glmulti` del paquete `glmulti` (Calcagno 2019) y luego se seleccionaron los modelos robustos, con base en los criterios de información de Akaike corregidos (AICc) y R^2 ajustado. Finalmente se comprobó el cumplimiento de los supuestos para modelos lineales con la función `gvlma` del paquete `gvlma` (Peña y Slate 2006). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa R (RStudio Team. 2020) en la interface R Studio versión 1.1.463.

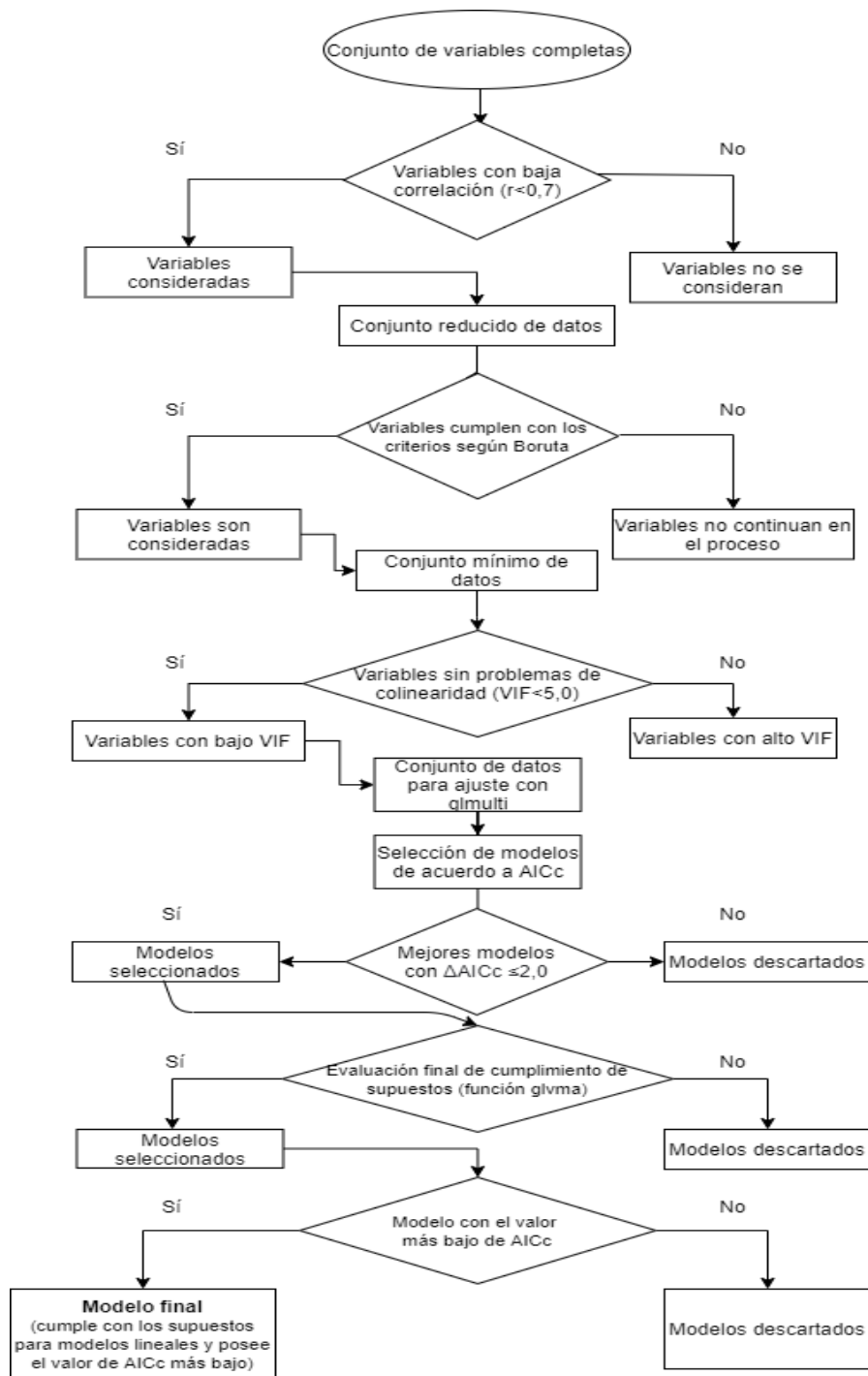


Figura 5.1. Diagrama de flujo del proceso de selección de modelos de carbono y nitrógeno.

Resultados

Contenido de carbono, nitrógeno y densidad aparente

El contenido de carbono en el suelo con piña convencional y orgánica, además del uso de bosque, presentaron una disminución gradual con la profundidad, presentándose diferencias estadísticas únicamente en el estrato de los 0-10 y 65-100 cm evaluados, entre el bosque y los usos de piña (Cuadro 5.1), además de darse diferencias entre el manejo orgánico y el convencional. Para el uso de bosque, en el primer estrato el carbono total fue de $4,23 \pm 0,20\%$, mientras que para la piña orgánica y convencional fue de $2,66 \pm 0,07\%$ y $2,08 \pm 0,33\%$ respectivamente. Para el uso de bosque, el valor mínimo de carbono se encontró en el último estrato del suelo, dando como resultado $1,04 \pm 0,10\%$, mientras que, para los usos de piña orgánica y convencional, los resultados fueron $0,76 \pm 0,02\%$ y $0,89 \pm 0,02\%$ respectivamente.

El contenido de nitrógeno en todos los usos de suelo evaluados presentó una disminución gradual con el incremento de la profundidad, mostrando diferencias estadísticas únicamente en los primeros dos estratos de profundidad evaluados y en el cual, solamente en los primeros 10 cm se dieron diferencias entre ambos manejos de piña (Cuadro 5.1). Bajo el uso de bosque, el nitrógeno total en el estrato de 0-10 cm fue casi el doble ($0,42 \pm 0,02\%$), que, en la piña orgánica y convencional, $0,28 \pm 0,01\%$ y $0,22 \pm 0,03\%$ respectivamente. Para el uso de bosque, el valor mínimo de nitrógeno obtenido fue de $0,14 \pm 0,019\%$, mientras que, para piña orgánica y convencional, el contenido de nitrógeno fue de $0,12 \pm 0,01\%$ y $0,13 \pm 0,01\%$.

Para la variable de densidad aparente, se puede ver el impacto que tiene el uso en las prácticas agrícolas tanto en piña orgánica como convencional, esto debido a que en todas las profundidades cuantificadas existió una diferencia estadísticamente significativa entre los usos de piña y el bosque secundario (Cuadro 5.1). Bajo el manejo de bosque se dieron los valores más bajos en los primeros 10 cm con una densidad de $0,69 \pm 0,02 \text{ g.cm}^{-3}$, que posteriormente fue incrementando hasta llegar a un máximo de $0,83 \pm 0,03 \text{ g.cm}^{-3}$ en el horizonte de 65-100 cm.

En el caso de los manejos de piña, ambos presentaron valores estadísticamente iguales en los primeros 10 cm con $1,03 \pm 0,02 \text{ g.cm}^{-3}$ y $0,96 \pm 0,05 \text{ g.cm}^{-3}$, aunque al incrementar la profundidad en la piña convencional se da un leve incremento en el 10-20 cm y disminuye

levemente con un valor mínimo de $0,94 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$ en 20-30 cm, mientras que, en la piña orgánica, se da una disminución gradual en los estratos inferiores muestreados, teniendo como valor mínimo $0,92 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$.

Cuadro 5.1. Resultados de carbono total, nitrógeno total y densidad aparente por profundidad bajo diferentes usos de suelo en la zona norte de Costa Rica.

Profundidad (cm)	Uso de suelo	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	Densidad aparente (g.cm^{-3})
0-10	Bosque	$4,23 \pm 0,20^a$	$0,42 \pm 0,02^a$	$0,69 \pm 0,02^a$
	Piña orgánica	$2,66 \pm 0,07^b$	$0,28 \pm 0,01^b$	$1,03 \pm 0,02^b$
	Piña convencional	$2,08 \pm 0,33^c$	$0,22 \pm 0,02^c$	$0,96 \pm 0,05^b$
10-20	Bosque	$2,65 \pm 0,20^a$	$0,29 \pm 0,02^a$	$0,75 \pm 0,03^a$
	Piña orgánica	$2,37 \pm 0,12^a$	$0,25 \pm 0,01^b$	$0,98 \pm 0,02^b$
	Piña convencional	$2,31 \pm 0,10^a$	$0,25 \pm 0,01^b$	$1,01 \pm 0,04^b$
20-30	Bosque	$1,92 \pm 0,19^a$	$0,22 \pm 0,02^a$	$0,81 \pm 0,02^a$
	Piña orgánica	$2,04 \pm 0,15^a$	$0,22 \pm 0,01^a$	$0,99 \pm 0,03^b$
	Piña convencional	$2,09 \pm 0,13^a$	$0,23 \pm 0,01^a$	$0,96 \pm 0,03^b$
30-65	Bosque	$1,49 \pm 0,16^a$	$0,18 \pm 0,02^a$	$0,78 \pm 0,03^a$
	Piña orgánica	$1,43 \pm 0,10^a$	$0,17 \pm 0,01^a$	$0,94 \pm 0,04^b$
	Piña convencional	$1,65 \pm 0,09^a$	$0,19 \pm 0,01^a$	$0,92 \pm 0,04^b$
65-100	Bosque	$1,04 \pm 0,11^a$	$0,14 \pm 0,01^a$	$0,83 \pm 0,03^a$
	Piña orgánica	$0,76 \pm 0,02^b$	$0,12 \pm 0,01^b$	$0,95 \pm 0,02^b$
	Piña convencional	$0,89 \pm 0,02^{ab}$	$0,13 \pm 0,01^b$	$0,94 \pm 0,04^b$

Los valores que se presentan son el promedio y el error estándar de la media (n=5).

Las cifras seguidas de la misma letra en la columna dentro de cada profundidad son estadísticamente similares ($P < 0,05$) según diferencias significativas honestas de Tukey.

Reservorio de carbono y nitrógeno por profundidad y total

El reservorio de carbono para el estrato de 0-10 cm bajo el suelo de bosque fue de $29,22 \pm 1,32 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$, luego al incrementar de profundidad se dio una disminución (con excepción del estrato de 30-65 cm con $40,37 \pm 4,07 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$) presentando un valor mínimo $15,51 \pm 1,58 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$ obtenido en la tercera profundidad de muestreo. Al analizar los usos de piña orgánica y convencional, estos tuvieron reservorios de carbono de $27,50 \pm 1,32 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$ y $20,15 \pm 3,49 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$ respectivamente en los primeros 10 cm, de igual forma, se dio

una disminución en los reservorios con excepción del estrato cuatro ($47,52 \pm 5,44$ Mg C. Ha^{-1} en piña orgánica y $53,01 \pm 3,34$ Mg C. Ha^{-1} en piña convencional), con valores mínimos de $20,30 \pm 2,02$ Mg C. Ha^{-1} y $20,06 \pm 1,39$ Mg C. Ha^{-1} respectivamente para el estrato de 20-30 cm (Cuadro 5.2).

El reservorio de nitrógeno para los primeros 10 cm en el suelo bajo bosque fue de $2,88 \pm 0,11$ Mg N. Ha^{-1} , luego al incrementar la profundidad se dio una disminución (con excepción del estrato de 30-65 cm con $4,93 \pm 0,45$ Mg N. Ha^{-1}) y un valor mínimo de $1,82 \pm 0,18$ Mg N. Ha^{-1} a los 20 cm de profundidad. Al observar los usos de piña orgánica y convencional, estos tuvieron reservorios de nitrógeno menores que al uso de bosque, con $2,85 \pm 0,02$ Mg N. Ha^{-1} y $2,08 \pm 0,04$ Mg N. Ha^{-1} respectivamente en los primeros 10 cm, siendo este último, el valor más bajo de la piña convencional. Con el aumento de la profundidad, se dio una disminución en los reservorios en ambos manejos con excepción del estrato 4 ($5,67 \pm 0,08$ Mg N. Ha^{-1} en piña orgánica y $6,06 \pm 0,04$ Mg N. Ha^{-1} en piña convencional) y como valor mínimo en piña orgánica, se obtuvo un reservorio de $2,22 \pm 0,03$ Mg N. Ha^{-1} en la tercera profundidad evaluada (Cuadro 5.2).

Cuadro 5.2. Reservorio de carbono y nitrógeno por profundidad bajo diferentes usos de suelo en la zona norte de Costa Rica.

Profundidad (cm)	Uso de suelo	Reservorio de carbono (Mg. Ha^{-1})	Reservorio de nitrógeno (Mg. Ha^{-1})
0-10	Bosque	$29,22 \pm 1,32^a$	$2,88 \pm 0,1^a$
	Piña orgánica	$27,50 \pm 1,32^{ab}$	$2,85 \pm 0,02^a$
	Piña convencional	$20,15 \pm 3,49^b$	$2,08 \pm 0,04^a$
10-20	Bosque	$19,95 \pm 2,01^a$	$2,20 \pm 0,23^a$
	Piña orgánica	$23,32 \pm 1,67^a$	$2,44 \pm 0,02^a$
	Piña convencional	$23,249 \pm 0,78^a$	$2,49 \pm 0,01^a$
20-30	Bosque	$15,51 \pm 1,58^a$	$1,82 \pm 0,18^a$
	Piña orgánica	$20,30 \pm 2,02^a$	$2,22 \pm 0,03^a$
	Piña convencional	$20,06 \pm 1,39^a$	$2,20 \pm 0,02^a$
30-65	Bosque	$40,37 \pm 4,07^a$	$4,93 \pm 0,45^a$
	Piña orgánica	$47,52 \pm 5,44^a$	$5,67 \pm 0,08^a$
	Piña convencional	$53,01 \pm 3,34^a$	$6,06 \pm 0,04^a$

65-100	Bosque	29,94±2,51 ^a	4,18±0,18 ^a
	Piña orgánica	25,24±0,42 ^a	3,96±0,01 ^a
	Piña convencional	29,13±0,77 ^a	4,13±0,01 ^a

Los valores que se presentan son el promedio y el error estándar de la media (n=5).

Las cifras seguidas de la misma letra en la columna dentro de cada profundidad son estadísticamente similares ($P < 0,05$) según diferencias significativas honestas de Tukey.

El reservorio total de carbono (sumatoria de la totalidad del carbono del perfil), fue muy similar para todos los sitios independientemente de su uso (Cuadro 5.1) y no hubo diferencia significativa entre el bosque ($135,00 \pm 7,51 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$), la piña orgánica ($143,87 \pm 9,70 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$) y la piña convencional ($145,59 \pm 5,65 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$) (Figura 5.2a). Una situación similar se observó en el reservorio total de nitrógeno (Figura 5.2b) ya que no se presentaron diferencias significativas entre el bosque ($16,01 \pm 0,88 \text{ Mg N. Ha}^{-1}$), la piña orgánica ($17,14 \pm 0,90 \text{ Mg N. Ha}^{-1}$) y la convencional ($16,96 \pm 0,44 \text{ Mg N. Ha}^{-1}$).

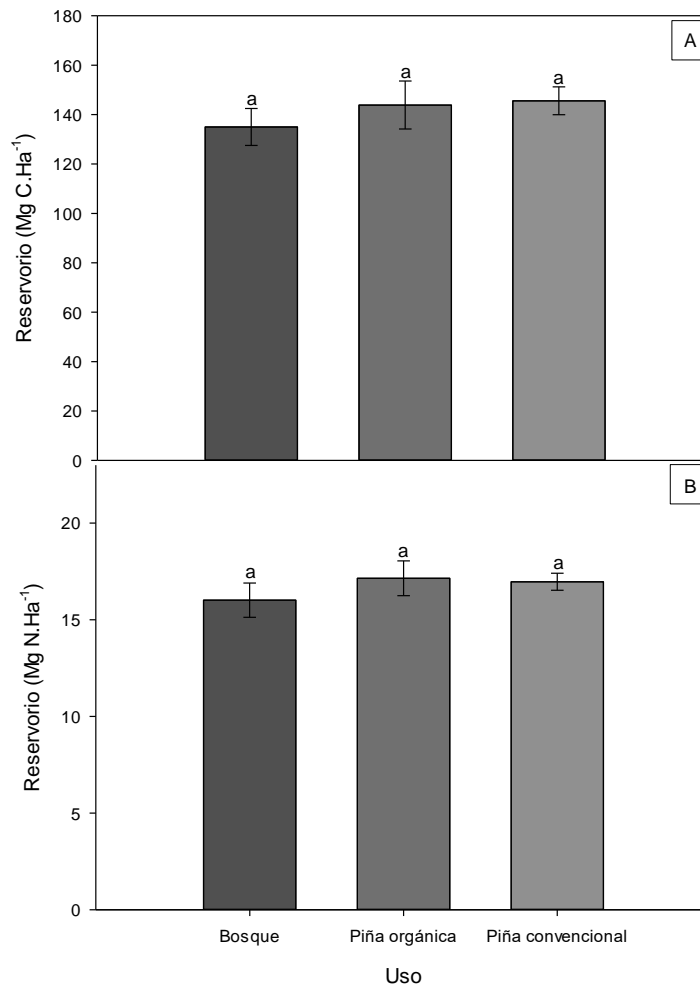


Figura 5.2. Reservorios de carbono (Mg C. Ha^{-1}) (A) y nitrógeno (Mg C. Ha^{-1}) (B) por uso de suelo evaluado en la zona norte de Costa Rica. Las barras de error representan el error estándar de la media ($n=5$). Las cifras seguidas de la misma letra en la columna dentro de cada profundidad son estadísticamente iguales, según diferencias significativas honestas de Tukey.

Modelos lineales para densidad de carbono y nitrógeno

A partir de la selección realizada con la matriz de correlación (material suplementario), análisis de importancia de la función boruta y prueba de colinearidad, el modelo para explicar el contenido de carbono y nitrógeno en el suelo, estuvo conformado por las variables hierro (Fe), profundidad de muestreo, contenidos de limo y arcilla. Para ambas variables de respuesta, los modelos se escogieron debido a que tuvieron los valores

más bajo de AICc (criterio de akaike corregido) y el número menor de variables, lo que ayuda a cumplir con el principio de parsimonia al momento de seleccionar modelos (Cuadro 5.3 y 5.4).

Cuadro 5.3. Determinación del mejor modelo para explicar la densidad de carbono según el criterio de información de akaike corregido (AICc) a partir de los datos de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo evaluadas en los tres usos evaluados en la zona norte de Costa Rica.

Modelo	AICc	ΔAICc	Model Wt
densidad_carbono ~ 1 + Profundidad + Fe + limo + arcilla	45,66	0	0,492
densidad_carbono ~ 1 + Profundidad + Zn + Fe + limo + arcilla	47,14	1,48	0,234
densidad_carbono ~ 1 + Profundidad + Fe + CIC + limo + arcilla	48,32	2,66	0,130

AICc: criterio de akaike corregido, **ΔAICc:** diferencia entre AICc, **Model Wt:** peso akaike.

Cuadro 5.4. Determinación del mejor modelo para explicar la densidad de nitrógeno según el criterio de información de akaike corregido (AICc) a partir de los datos de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo evaluadas en los tres usos evaluados en la zona norte de Costa Rica.

Modelo	AICc	ΔAICc	Model Wt
densidad_nitrógeno ~ 1 + Profundidad + Fe + limo + arcilla	-304,64	0,00	0,467
densidad_nitrógeno ~ 1 + Profundidad + Zn + Fe + limo + arcilla	-304,01	0,63	0,340
densidad_nitrógeno ~ 1 + Profundidad + Fe + arcilla	-301,97	2,67	0,123

AICc: criterio de akaike corregido, **ΔAICc:** diferencia entre AICc, **Model Wt:** peso akaike.

Con el modelo de carbono y nitrógeno, se realizó una comparación entre los valores calculados (observados), en contraste con los valores predichos a partir del modelo más robusto (Figura 5.3) y obtuvo un valor de R^2 de 0,84 para el modelo de carbono y un R^2 de 0,81 para el modelo de nitrógeno. Al analizar ambos modelos para el cumplimiento de supuestos, se demostró que cumplieron con los diferentes supuestos para modelos lineales a partir del análisis con la función `glm` (material suplementario) y, por ende, para cada variable de respuesta, son los modelos más robustos.

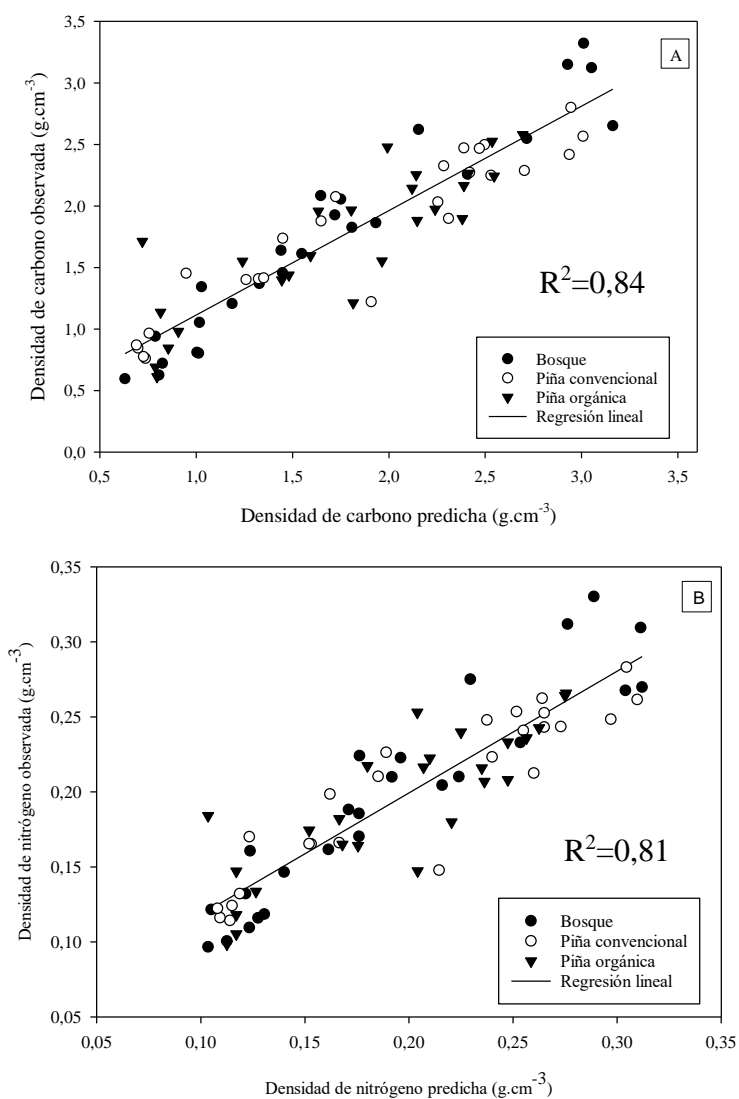


Figura 5.3. Valores observados y predichos obtenidos a partir de los modelos seleccionados para densidad de carbono (A) y densidad de nitrógeno (B) en suelos ultisoles de la zona norte de Costa Rica.

Discusión

Carbono total, nitrógeno total y densidad aparente

La variación que se presentó en los valores de contenido de carbono y nitrógeno, a través del perfil del suelo, muestra el impacto de las prácticas agrícolas y la perturbación de la mecanización (Álvarez Rojas y Peña 2013, Garita 2014), ya que se dio una diferencia importante en los primeros 10 cm de capa del suelo, a pesar de que uno de los manejos, fuera de tipo orgánico, esto no se reflejó en una diferencia para carbono y nitrógeno, con respecto al manejo convencional. Datos de carbono y nitrógeno presentados por Powers (2004), al comparar sitios de bosque y piña convencional en Sarapiquí, apoyan los resultados obtenidos aunque no se da mayor detalle sobre las características del suelo evaluado. Otra serie de estudios de diversos autores (Cornwell 2014, Chacón *et al.* 2015, Sherman y Brye 2019), también describen resultados marcados entre un suelo bajo un bosque y un suelo bajo el cultivo de piña, aunque se describen los primeros 30 cm únicamente. Al comparar otros resultados como los obtenidos por Fonseca-Vargas *et al.* (2019), se puede ver que los resultados para diversos manejos de piña no siguen la misma tendencia, sino que varían de acuerdo al tipo de labranza realizada, ya que en dicho estudio, se evaluó labranza convencional contra labranza mínima y en ambos tipos de mecanización, se obtuvieron resultados menores a los resultados determinados.

Para la variable de densidad aparente, se puede ver el impacto que tiene en el uso las prácticas agrícolas tanto en piña orgánica como convencional, esto porque en todas las profundidades cuantificadas existió una diferencia estadísticamente significativa entre los usos de piña y el bosque secundario, este último presentó los valores más bajos a lo largo del perfil, aunque cabe destacar que existió un leve incremento en la densidad al incrementar la profundidad de muestreo.

En diferentes estudios realizados en Costa Rica al comparar entre un manejo de piña y un bosque, queda evidencia del impacto e intensidad de la mecanización en el cultivo de piña convencional (Powers 2004, Cornwell 2014, Sherman y Brye 2019, Fonseca-Vargas *et al.* 2019). Suelos cultivados con piña presentan un alto grado de mecanización (Garita 2014) que provoca una perturbación en el suelo y pérdida de la materia orgánica (Gómez-Calderón *et al.* 2018), mientras que un suelo bajo un bosque, presenta otras condiciones que promueven el aumento de la materia orgánica, como lo son el aporte de residuos y la poca

intervención del hombre. Estos factores dan como resultado valores bajos de densidad aparente y por ello, mejores características físicas del suelo (Lal 2011).

Una situación particular en el estudio, es la comparación de piña orgánica con la piña convencional, esto a causa de que, al ser un manejo de tipo orgánico, se utilizan otra serie de prácticas agrícolas como el uso de plástico negro y este, a pesar de indicarse en diversos estudios sus múltiples beneficios en propiedades físicas como densidad aparente, estabilidad de agregados y porosidad (Lalitha *et al.* 2010, Toral 2013, Steinmetz *et al.* 2016, Ewere *et al.* 2017), no se vio reflejado en una diferencia estadística con respecto al manejo convencional para la densidad aparente. Es importante mencionar que los resultados obtenidos para la densidad aparente, tuvieron valores que se encontraron por debajo de los valores reportados por diversos autores para suelos ultisoles de Costa Rica (Alvarado y Forsythe 2005, Chinchilla *et al.* 2010), esto podría deberse a que el suelo en estudio es un ultisol con alto contenido de materia orgánica (humults) característica que le da al suelo una mejora en diversas propiedades físicas como la densidad aparente (Lal 2011).

Efecto del uso de suelo sobre el reservorio de carbono y nitrógeno

Al analizar los resultados presentados en el estudio para reservorios de carbono a 1 metro de profundidad, no se observó diferencia entre los valores para los suelos con uso de piña y bosque secundario, resultado que usualmente no se espera al comparar suelos cultivados con suelos bajo bosque secundario o en sistemas agroforestales, en donde la presencia de diferentes especies forestales, ya sea por contribución del mantillo o por biomasa radical, brindan un contenido importante de materia orgánica al suelo (Mayer *et al.* 2020). Al realizar las comparaciones del reservorio de carbono a 1 metro con respecto a los estudios realizados por Chacón *et al.* (2015), para el caso de la piña convencional y orgánica presente en el sitio de estudio (143,9 Mg C. Ha⁻¹ y 145,6 Mg C. Ha⁻¹), mostró valores mayores que los reportados por dicho autor (113,6 Mg C. Ha⁻¹), aunque fueron menores a los evaluados por el mismo estudio, para suelos cultivados con banano y palma aceitera en el Caribe Sur. Al realizar comparaciones, considerando el suelo bajo el bosque secundario, diversos estudios muestran resultados diferentes, por ejemplo, en un estudio de Vicente *et al.* (2016) para un suelo oxisol de bosque secundario, se presentaron valores mayores a los obtenidos (168 Mg C. Ha⁻¹), de igual manera, Oliveira *et al.* (2019) reportaron para un bosque secundario en un suelo ultisol, un reservorio de 255,5 Mg C. Ha⁻¹, valor mucho mayor al

observado en el estudio, cuya razón puede deberse a la composición del bosque y el historial del suelo evaluado (Scharlemann *et al.* 2014, Fujisaki *et al.* 2017, Mayer *et al.* 2020), ya que al haber mayor aporte de materia orgánica en forma de biomasa, así como la falta de labranza, facilitan altas concentraciones de COS en los usos del suelo menos manejados en comparación con sitios cultivados, en donde existió previamente intervención antropogénica (Juo y Franzluebbbers 2003, Powers 2004, Chacón *et al.* 2015).

Las tendencias actuales sugieren el estudio del reservorio de C suelos en los 30 primeros cm (Lefèvre *et al.* 2017), esto a causa de que los subsuelos generalmente tienen concentraciones de carbono más bajas en comparación con las capas superficiales del suelo (Lal 2008a, Lal 2008b); esto es una consecuencia de la mayor biomasa vegetal aérea que subterránea y su deposición en la superficie del suelo, donde se transfiere lentamente a capas más profundas. Otros estudios menos comunes (VandenBygaart *et al.* 2007, Parras-Alcántara *et al.* 2015, Gomes *et al.* 2018, Reyna-Bowen *et al.* 2018, 2019, Kome *et al.* 2021) sugieren que esta estimación se realice considerando los horizontes genéticos a partir de la clasificación de suelo, ya que podría ayudar a explicar mejor el comportamiento del reservorio de carbono y mostrar resultados más correctos, esto último fue mencionado por Parras-Alcántara *et al.* (2015) debido a que reportó una sobreestimación al utilizar una profundidad de muestreo en base a un espesor fijo (Anexo 5.3). Para este trabajo, se dieron resultados contrarios a los reportados por Parras-Alcántara *et al.* (2015), ya que las muestras evaluadas a profundidad fija dieron resultados menores que las obtenidas en las calicatas (muestras por horizonte genético); mientras que al comparar los resultados observados con otros reportados en el mapa digital de suelos de Costa Rica para calicatas cercanas a los sitios de estudio, se denota una clara variación entre los resultados y una influencia importante del tipo de suelo sobre los reservorios de carbono. No obstante, la estimación de reservorios de carbono por profundidad de muestreo (no horizonte genético) tiene sus ventajas debido a que no está sujeta a los criterios de los diversos sistemas de taxonomía de suelos (por ej. USDA, FAO, Sistema Brasileño, Ruso entre otros), lo que permite las comparaciones globales y no requiere un conocimiento experto como el que se requiere para elaborar una clasificación taxonómica. Como desventaja se señalaría que estimaciones por profundidad se vuelven locales y no transferibles a otras áreas de forma directa.

Los datos de reservorio obtenidos en los primeros 30 cm para el bosque secundario fueron mayores ($64,27 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$) a los reportados por Chacón *et al.* (2015), para un bosque lluvioso en la zona del atlántico de Costa Rica ($59,6 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$) pero menores a los reportados por Powers (2004) y Powers y Veldkamp (2005), en estos últimos dos estudios, suelos bajo bosque presentaron reservorios de carbono de $85,3 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$ y $87,1 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$ respectivamente y cuyos suelos presentan características similares al de la zona de estudio. Con respecto a los reservorios de los diferentes usos de piña, al comparar ambos con los resultados presentados en Chacón *et al.* (2015) para suelos bajo piña convencional, se encuentra que en ambos casos, los valores observados fueron mayores (piña orgánica $71,42 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$ y piña convencional $63,45 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$) a los presentados en dicho estudio ($39,5 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$), aunque en este último, el tipo de suelo en que se desarrolló la piña es diferente (Andic Dystropepts) al suelo de la zona de estudio (Typic humult) y por ende, la influencia de la génesis del suelo impactó la capacidad de almacenar carbono; mientras que al comparar los resultados con los de Powers (2004), bajo la misma zona de estudio (La Virgen de Sarapiquí), tanto la piña orgánica como convencional presentaron menores valores que los reportados en dicho estudio ($73,8 \text{ Mg C. Ha}^{-1}$).

En la actualidad no existen datos de referencia calculados para el reservorio de nitrógeno en suelos de Costa Rica, a pesar de tener una alta correlación con el reservorio de carbono y su impacto sobre la calidad del suelo, de hecho, la disponibilidad de nitrógeno a menudo determina la producción de biomasa y las tasas de descomposición del COS (Piñeiro *et al.* 2010, FAO 2019). A pesar de lo anterior, a diferencia del reservorio de carbono, la dificultad para explicar la falta de diferencias significativas en el reservorio de nitrógeno, radica en el uso de fertilizantes, tanto inorgánico como orgánico, además de la posibilidad de que exista fijación simbiótica de nitrógeno de la atmósfera (Santana *et al.* 2019) y otra serie de interacciones que impiden un dato consistente.

Al examinar los resultados obtenidos, en ambos manejos de piña se contó con un mayor valor de reservorio total de carbono y nitrógeno que el observado en el bosque, dicho resultado no es congruente con observaciones previas, debido al aporte de materia orgánica y la no intervención del hombre; pero según un meta-análisis de Don *et al.* (2011), alrededor del 13% de los suelos cultivados en zonas tropicales muestran mayores valores de reservorio de carbono, que un suelo bajo bosque. Lo anterior podría ser explicado, debido a que el

aumento del carbono en el suelo luego de un abandono o establecimiento de un bosque, puede ser fluctuante (Guo y Gifford 2002, Lal 2005) debido a que las alteraciones en el equilibrio de los nutrientes del suelo y las características de la vegetación en regeneración (por ejemplo, diversidad de especies y composición de especies), podrían ser determinantes importantes del cambio de la materia orgánica a lo largo del tiempo (Davidson y Janssens 2006, Jeyanny *et al.* 2014).

Factores relacionados con los reservorios de carbono y nitrógeno

En la determinación de los parámetros más importantes que influyen en el reservorio de carbono mediante modelos matemáticos tanto para la densidad de carbono como de nitrógeno, se observó que los parámetros de profundidad, contenido de hierro, contenido de limo y arcilla, fueron los que dieron el mejor resultado de ajuste.

La importancia de la profundidad para explicar la densidad de carbono y nitrógeno, se encuentra con base al comportamiento que existe en la acumulación de materia orgánica, ya que esta se da principalmente en los estratos más superficiales del suelo (Fujisaki *et al.* 2018) y por el hecho, de que, al incrementarse la profundidad, diversas condiciones como el contenido de humedad, porosidad y aporte de nutrientes, cambian drásticamente el proceso de incorporación de la materia orgánica (Lorenz y Lal 2005).

La interacción del hierro con la materia orgánica se ha estudiado con mayor atención recientemente, debido a que diversas fracciones como los óxidos de hierro tienen interacciones positivas en la acumulación de carbono en el suelo (Wagai *et al.* 2020), además de otros mecanismos de interacción con partículas finas del suelo (arcillas y limos) que promueven la agregación (Duiker *et al.* 2003).

En el contexto de este trabajo, el contenido de hierro obtenido a partir de la solución Olsen es complejo de interpretar, esto porque dicha metodología de extracción fue diseñada originalmente para medir PO_4 en el suelo (Bertsch *et al.* 2005), y luego se modificó para extender su uso como análisis de rutina para otros elementos. Si bien el contenido de Fe obtenido en este análisis, da una correlación positiva con la densidad de carbono y nitrógeno, esto no necesariamente significa causalidad en todo caso. Ahora bien, se podría suponer que la fracción mineral de óxidos de Fe, es la fase que controla la cantidad de Fe que solubiliza en una extracción de Olsen, y que por la tanto, a mayor contenido de Fe solubilizado mayor

podría ser el contenido de óxidos metálicos y esto a su vez contribuirá a una mayor capacidad de retención de carbono y de nitrógeno.

La asociación de las fracciones de arcilla y limo con el contenido de carbono y nitrógeno se ha estudiado bajo diversos usos de suelo y condiciones climáticas (Matus 2021) con un ajuste alrededor de 0,95 para las capas superiores del suelo. En general, la importancia de ambas fracciones para el acumulo de carbono y nitrógeno, es debido a su importancia en el proceso de agregación y estabilidad del suelo (Six *et al.* 2000). Dicha interacción puede darse a través de una interacción directa, al asociarse con la materia orgánica y esto va a depender de la carga que posean las arcillas (Curtin *et al.* 2016), como también a través de la formación de agregados que atrapan y retienen la materia orgánica incorporada (Blanco-Canqui y Lal 2004, Pulido-Moncada *et al.* 2009, Razafimbelo *et al.* 2013). La promoción de agregados, conforman barreras físicas, entre las enzimas microbianas y sus sustratos, controlando la difusión de O₂ e influyen en las interacciones de la red alimentaria y, en consecuencia, en el recambio microbiano (Six *et al.* 2002).

La interacción del contenido de limo y la materia orgánica en el suelo ha sido estudiada, ya sea considerando el limo como parte de la fracción fina (limo + arcilla) o al considerarlo únicamente, en donde se han presentado diversos resultados.

Según Augustin y Cihacek (2016) en un estudio en suelos molisoles, el contenido de limo correlacionó de mejor forma, que la arcilla para explicar el contenido de carbono presente en diferentes suelos en China, mientras que Iwasaki *et al.* (2017) en suelos andisoles, también mostraron los mismos resultados de un mejor ajuste entre el contenido de limo y el contenido de carbono, que la fracción de arcilla; sin embargo, Matus *et al.* (2016), al estudiar la relación en suelos con características ándicas y suelos meteorizados, encontraron que la fracción de arcilla no presentó un comportamiento consistente en su relación con la materia orgánica del suelo, en donde la arcilla fue la que mostró correlaciones positivas. En general, Ingram y Fernandes (2001) indican la importancia de ambos factores en la acumulación y secuestro de carbono, aunque la cantidad de materia orgánica asociada a estas fracciones es limitada.

Para el estudio, se vio que un aumento de la cantidad de limo está asociado a un mayor contenido de carbono y nitrógeno, aunque sucede lo contrario para la arcilla. Usualmente los contenidos de arcilla decrecen al incrementarse la profundidad, aunque en el caso de los ultisoles, se puede dar un comportamiento contrario a través de la iluviación de arcillas

(Calabrese *et al.* 2018). El fenómeno anterior junto con una disminución de la materia orgánica al incrementar la profundidad (VandenBygaart *et al.* 2007, Lawrence *et al.* 2015, Tifafi *et al.* 2018), da como resultado que los datos de arcilla y carbono no correlacionen positivamente.

Conclusiones

El efecto de los usos de suelo sobre los reservorios de carbono y nitrógeno, no generó diferencias estadísticas significativas entre los manejos de piña orgánica y convencional, en contraste con el uso de bosque. Los contenidos de carbono y nitrógeno fueron mayores en la profundidad de muestreo 0-10 cm bajo el uso de bosque, en comparación con los usos de piña evaluados y al incrementar la profundidad, se dio una disminución gradual de los contenidos de ambas variables. La densidad aparente bajo el bosque fue la que dio diferencias estadísticas bajo todas las profundidades evaluadas y dio los resultados más bajos a lo largo del perfil de suelo, aunque todas las muestras evaluadas, presentaron valores por debajo del nivel crítico para ultisoles de Costa Rica. Los modelos para explicar tanto el contenido de carbono y nitrógeno, presentaron altos valores de R^2 y estuvieron conformados por la profundidad, contenido de hierro, limo y arcilla. Los resultados anteriores, nos dan indicios de las variables más importantes, que explican los resultados de carbono y nitrógeno encontrados en los suelos ultisoles estudiados.

A partir de los resultados obtenidos, sería ideal considerar un análisis más detallado de los contenidos de carbono y nitrógeno en dichas fracciones, en conjunto, con un estudio sobre las diversas formas de hierro que pueden interactuar con la materia orgánica.

Literatura citada

Alvarado, A; Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(1):85-94.

Alvarez, R; Lavado, RS. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* 83(1-2):127-141. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00141-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00141-9).

Álvarez Rojas, M; Peña, W. 2013. Estimación de niveles erosivos en suelos con cultivo de piña en Sarapiquí. *Repertorio Científico* 16(1). DOI: <https://doi.org/10.22458/rc.v16i1.594>.

Anderson, J. 1982. Measurement of CO₂ evolution rates. *In Alef, K; Nannipieri, P (eds.)*. s.l., s.e. p. 831-871.

Arrouays, D; Saby, NPA; Boukir, H; Jolivet, C; Ratié, C; Schrumpf, M; Merbold, L; Gielen, B; Gogo, S; Delpierre, N; Vincent, G; Klumpp, K; Loustau, D. 2018. Soil sampling and preparation for monitoring soil carbon (en línea). *International Agrophysics* 32(4):633-643. DOI: <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0047>.

Augustin, C; Cihacek, LJ. 2016. Relationships Between Soil Carbon and Soil Texture in the Northern Great Plains (en línea). *Soil Science* 181(8):386-392. DOI: <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000173>.

Banwart, S; Black, H; Cai, Z; Gicheru, P; Joosten, H; Victoria, R; Milne, E; Noellemeyer, E; Pascual, U; Nziguheba, G; Vargas, R; Bationo, A; Buschiazzi, D; De-Brogniez, D; Melillo, J; Richter, D; Termansen, M; van Noordwijk, M; Goverse, T; Ballabio, C; Bhattacharyya, T; Goldhaber, M; Nikolaidis, N; Zhao, Y; Funk, R; Duffy, C; Pan, G; la Scala, N; Gottschalk, P; Batjes, N; Six, J; van Wesemael, B; Stocking, M; Bampa, F; Bernoux, M; Feller, C; Lemanceau, P; Montanarella, L. 2014. Benefits of soil carbon: report on the outcomes of an international scientific committee on problems of the environment rapid assessment workshop (en línea). *Carbon Management* 5(2):185-192. DOI: <https://doi.org/10.1080/17583004.2014.913380>.

Batjes, NH. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47:151-163. DOI: https://doi.org/10.1111/ejss.12114_2.

Bertrand, I; Viaud, V; Daufresne, T; Pellerin, S; Recous, S. 2019. Stoichiometry constraints challenge the potential of agroecological practices for the soil C storage. A review (en línea). *s.l., s.e.*, vol.39. p. 54 DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0599-6>.

Bertsch, F; Bejarano, J; Corrales, M. 2005. Correlación entre las soluciones extractoras KCl-Olsen modificado y Mehlich 3, usadas en los laboratorios de suelos de Costa Rica (en línea). *Agronomía Costarricense* 29(3):137-142. Consultado 8 jun. 2021. Disponible en <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6787/6474>.

Blanco-Canqui, H; Lal, R. 2004. Mechanisms of Carbon Sequestration in Soil Aggregates (en línea). *Critical Reviews in Plant Sciences* 23(6):481-504. DOI: <https://doi.org/10.1080/07352680490886842>.

Burke, IC; Lauenroth, WK; Riggle, R; Brannen, P; Madigan, B; Beard, S. 1999. Spatial variability of soil properties in the shortgrass steppe: The relative importance of topography, grazing, microsite, and plant species in controlling spatial patterns. *Ecosystems* 2(5):422-438. DOI: <https://doi.org/10.1007/s100219900091>.

Calabrese, S; Richter, DD; Porporato, A. 2018. The Formation of Clay-Enriched Horizons by Lessivage (en línea). *Geophysical Research Letters* 45(15):7588-7595. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL078778>.

Calcagno, V. 2019. Package glmulti: Model Selection and Multimodel Inference Made Easy (en línea). CRAN . Consultado 11 may 2021. Disponible en <https://cran.r-project.org/web/packages/glmulti/glmulti.pdf>.

CANAPEP. 2019. Historia | CANAPEP (en línea, sitio web). Consultado 23 jun. 2019. Disponible en <https://canapep.com/historia/>.

Chacón, P; Lorenz, K; Lal, R; Calhoun, FG; Fausey, N. 2015. Soil organic carbon in some land uses of Costa Rica. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science* 65(4):310-320. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1008563>.

Chinchilla, M; Mata, R; Alvarado, A. 2010. Caracterización y clasificación de algunos ultisoles de la región de Los Santos, Talamanca, Costa Rica (en línea). *Agronomía Costarricense* . DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v35i1.6687>.

Conant, RT; Ogle, SM; Paul, EA; Paustian, K; Conant, RT; Ogle, SM; Paul, EA; Paustian, K. 2011. soil organic Measuring and monitoring lands for carbon stocks in agricultural climate mitigation online (en línea). Source: *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(3):169-173. Consultado 6 jul. 2019. Disponible en <https://www-jstor-org.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/stable/pdf/41149747.pdf?refreqid=excelsior%3A1fea89e46a42d95b92d546e4042682da>.

Cornwell, E. 2014. Effects of different agricultural systems on soil quality in northern Limón province, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 62(3):887. DOI: <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i3.14062>.

Curtin, D; Beare, MH; Qiu, W. 2016. Texture effects on carbon stabilisation and storage in New Zealand soils containing predominantly 2 : 1 clays (en línea). *Soil Research* 54(1):30. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR14292>.

Davidson, EA; Janssens, IA. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change (en línea). *Nature* 440(7081):165-173. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04514>.

Davis, M; Alves, B; Karlen, D; Kline, K; Galdos, M; Abulebdeh, D. 2017. Review of Soil Organic Carbon Measurement Protocols: A US and Brazil Comparison and Recommendation (en línea). *Sustainability* 10(2):53. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10010053>.

Day, P. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. *In Black, C (ed.)*. Madison, WI, American Society of Agronomy. p. 545–567.

Díaz-Romeu, R; Hunter, A. 1978. Metodología de muestreo de suelo, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero. Turrialba, CATIE. p. 61.

Don, A; Schumacher, J; Freibauer, A. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis (en línea). *Global Change Biology* 17(4):1658-1670. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>.

Duiker, SW; Rhoton, FE; Torrent, J; Smeck, NE; Lal, R. 2003. Iron (Hydr)Oxide Crystallinity Effects on Soil Aggregation. *Soil Science Society of America Journal* 67(2):606-611. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.6060>.

Durango, W; Uribe, L; Henríquez, C; Mata, R. 2015. Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. (en línea). *Agronomía Costarricense* 39(1):37-46. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/436/43638524003.pdf>.

Ewere, C.; Iseghohi, I.; Gold, EJ. 2017. Effects of different mulch materials on soil properties, weed control, growth and yield of pineapple in Akure, Nigeria. *Fuoye Journal of Agriculture and Human Ecology* 1(2):62-74.

FAO. 2019. Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership (en línea). Roma, s.e. 170 p. Consultado 30 may 2021. Disponible en <http://www.fao.org/partnerships/leap/publications/en/>.

_____. 2019. Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems – A scoping analysis for the LEAP work stream on soil carbon stock changes. (en línea). s.l., s.e. Consultado 6 sep. 2020. Disponible en <http://www.fao.org/partnerships/leap/publications/en/>.

Fonseca-Vargas, R; Furcal-Beriguete, P; Campos-Rodríguez, R; Esquivel-Segura, E. 2019. Retención de carbono en un suelo dedicado al cultivo de piña (*Ananas comosus* (L.) bajo un manejo convencional y de mínima labranza (en línea). *Revista Tecnología en Marcha* 32(4):116-132. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i4.4797>.

Fujisaki, K; Chevallier, T; Chapuis-Lardy, L; Albrecht, A; Razafimbelo, T; Masse, D; Ndour, YB; Chotte, J-L. 2018. Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis A R T I C L E I N F O (en línea). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 259:147-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.008>.

Fujisaki, K; Perrin, AS; Garric, B; Balesdent, J; Brossard, M. 2017. Soil organic carbon changes after deforestation and agrosystem establishment in Amazonia: An assessment by diachronic approach. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 245(November 2016):63-73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.011>.

Garita, R. 2014. *La Piña*. 1 ed. Cartago, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 568 p.

Gomes, JBV; Silva, CA; Ferreira, TL de A; Ferreira, MM; Inda, AV; Curi, N. 2018. Carbon Stocks and Pools in Relation to the Texture of Kaolinitic Soils from the Brazilian East Coast (en línea). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 42:170260. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170260>.

Gómez-Calderón, N; Villagra-Mendoza, K; Solórzano-Quintana, M. 2018. La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria) (en línea). *Revista Tecnología en Marcha* 31(1):170. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>.

Guo, LB; Gifford, RM. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis (en línea). *Global Change Biology* 8(4):345-360. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>.

Holdridge, LR. 1987. Ecología basada en zonas de vida (Ecology based on life zones) (en línea). s.l., Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 216 p. Consultado 15 jun. 2019. Disponible en <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DO2003100523>.

Horneck, D; Miller, R. 1998. Determination of total nitrogen in plant tissue. *In Kalra, Y (ed.)*. s.l., Analysis Council Inc. and CRC Press. p. 75-83.

Ingram, JSI; Fernandes, ECM. 2001. Managing carbon sequestration in soils: Concepts and terminology (en línea). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 87(1):111-117. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00145-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00145-1).

Iwasaki, S; Endo, Y; Hatano, R. 2017. The effect of organic matter application on carbon sequestration and soil fertility in upland fields of different types of Andosols (en línea). *Soil Science and Plant Nutrition* 63(2):200-220. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.2017.1309255>.

Jeyanny, V; Husni, MHA; Rasidah, KW; Kumar, BS; Arifin, A; Hisham, MK. 2014. Carbon stocks in different carbon pools of a tropical lowland forest and a montane forest with varying topography. *Journal of Tropical Forest Science* 26(4):560-571.

Juo, A; Franzluebbers, K. 2003. Tropical Soils - Properties and Management for Sustainable Agriculture. (en línea). s.l., Oxford University Press. 280 p. Disponible en

<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpTSPMSA01/tropical-soils-properties/tropical-soils-properties>.

Kemper, WD; Rosenau, RC. 1986. Aggregate Stability and Size Distribution' (en línea). *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods* 9(9):425-442. Disponible en <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/732/3/585.pdf>.

Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. *In Klute, A (ed.)*. Madison, WI, Elsevier. p. 635–662.

Kome, GK; Enang, RK; Yerima, BPK. 2021. Soil Organic Carbon Distribution in a Humid Tropical Plain of Cameroon: Interrelationships with Soil Properties (en línea). *Applied and Environmental Soil Science* 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6052513>.

Kursa, MB; Rudnicki, WR. 2010. Feature Selection with the Boruta Package (en línea). *Journal of Statistical Software* 36(11):1-13. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i11>.

Lal, R. 2005. Forest soils and carbon sequestration (en línea). *Forest Ecology and Management* 220(1-3):242-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>.

Lal, R. 2008. Carbon sequestration (en línea). *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363(1492):815-830. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>.

Lal, R. 2008. Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools (en línea). *Energy & Environmental Science* 1(1):86. DOI: <https://doi.org/10.1039/b809492f>.

Lal, R. 2011. Organic Matter, Effects on Soil Physical Properties and Processes (en línea). *In Gliński, J; Horabik, J; Lipiec, J (eds.)*. Dordrecht, Springer Netherlands. p. 528-534 DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_102.

Lalitha, M; Thilagam, V; Balakrishnan, N; Mansour, M. 2010. Effect of Plastic Mulch on Soil Properties and Crop Growth - A Review. *Agricultural Reviews* 31(2):145-149.

Lawrence, CR; Harden, JW; Xu, X; Schulz, MS; Trumbore, SE. 2015. Long-term controls on soil organic carbon with depth and time: A case study from the Cowlitz River Chronosequence, WA USA (en línea). *Geoderma* 247-248:73-87. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.02.005>.

Lefèvre, C; Rezik, F; Alcantara, V; Wiese, L. (2017). Soil organic carbon: the hidden potential. Roma, s.e.

Li, D; Niu, S; Luo, Y. 2012. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis (en línea). *New Phytologist* 195(1):172-181. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04150.x>.

Liu, X; Zhang, W; Wu, M; Ye, Y; Wang, K; Li, D. 2019. Changes in soil nitrogen stocks following vegetation restoration in a typical karst catchment (en línea). *Land Degradation & Development* 30(1):60-72. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3204>.

Lorenz, K; Lal, R. 2005. The Depth Distribution of Soil Organic Carbon in Relation to Land Use and Management and the Potential of Carbon Sequestration in Subsoil Horizons (en línea). s.l., s.e., vol.88. p. 35-66 DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88002-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88002-2).

Lüdecke, D; Ben-Shachar, M; Patil, I; Waggoner, P; Makowski, D. 2021. performance: An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical Models (en línea). *Journal of Open Source Software* 6(60):3139. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.03139>.

Luo, Z; Viscarra-Rossel, RA; Qian, T. 2021. Similar importance of edaphic and climatic factors for controlling soil organic carbon stocks of the world (en línea). *Biogeosciences* 18(6):2063-2073. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-18-2063-2021>.

Martínez, EH; Fuentes, JP; Acevedo, EH. 2008. Carbono Orgánico Y Propiedades Del Suelo (en línea). *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 8(1):68-96. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>.

Mata, R; Rosales, A; Vásquez, A; Sandoval, D. 2013. Mapa de Subórdenes de Suelos de Costa Rica. San José, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo 2 ed. San José, Costa Rica. Escala 1:200,000. Color.

Matus, F; Garrido, E; Hidalgo, C; Paz, F; Etchevers, J; Merino, C; Báez, A. 2016. Carbon saturation in the silt and clay particles in soils with contrasting mineralogy. *Terra Latinoamericana* 34(3):311-319.

Matus, FJ. 2021. Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta-analysis (en línea). *Scientific Reports* 11(1):6438. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84821-6>.

Mayer, M; Prescott, CE; Abaker, WEA; Augusto, L; Cécillon, L; Ferreira, GWD; James, J; Jandl, R; Katzensteiner, K; Laclau, J-P; Laganière, J; Nouvellon, Y; Paré, D; Stanturf, JA; Vanguelova, EI; Vesterdal, L. 2020. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis (en línea). *Forest Ecology and Management* 466:118127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>.

Morris, SJ; Bohm, S; Haile-mariam, S; Paul, EA. 2007. Evaluation of carbon accrual in afforested agricultural soils (en línea). *Global Change Biology* 13(6):1145-1156. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01359.x>.

Ngaba, MJY; Ma, X-Q; Hu, Y-L. 2020. Variability of soil carbon and nitrogen stocks after conversion of natural forest to plantations in Eastern China (en línea). *PeerJ* 8(1):e8377. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.8377>.

Oliveira, C V.; Vicente, LC; Gama-Rodrigues, EF; Gama-Rodrigues, AC; Marques, JRB; Barreto-Garcia, PAB. 2019. Carbon and nitrogen stock of Acrisols and Nitisols in South Bahia, Brazil (en línea). *Geoderma Regional* 16(April 2020):e00218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00218>.

Parras-Alcántara, L; Lozano-García, B; Brevik, EC; Cerdá, A. 2015. Soil organic carbon stocks assessment in Mediterranean natural areas: A comparison of entire soil profiles and soil control sections (en línea). *Journal of Environmental Management* 155:219-228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.039>.

Peña, EA; Slate, EH. 2006. Global Validation of Linear Model Assumptions (en línea). *Journal of the American Statistical Association* 101(473):341-354. DOI: <https://doi.org/10.1198/016214505000000637>.

Piñeiro, G; Paruelo, JM; Oesterheld, M; Jobbágy, EG. 2010. Pathways of Grazing Effects on Soil Organic Carbon and Nitrogen (en línea). *Rangeland Ecology & Management* 63(1):109-119. DOI: <https://doi.org/10.2111/08-255.1>.

Post, WM; Pastor, J; Zinke, PJ; Stangenberger, AG. 1985. Global patterns of soil nitrogen storage (en línea). *Nature* 317(6038):613-616. DOI: <https://doi.org/10.1038/317613a0>.

Powers, JS. 2004. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in northeastern Costa Rica. *Ecosystems* 7(2):134-146. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0123-2>.

Powers, JS. 2004. Changes in Soil Carbon and Nitrogen after Contrasting Land-use Transitions in Northeastern Costa Rica (en línea). *Ecosystems* 7(2):134-146. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0123-2>.

Powers, JS; Schlesinger, WH. 2002. Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forests of northeastern Costa Rica (en línea). *Geoderma* 109(3-4):165-190. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00147-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00147-7).

Powers, JS; Veldkamp, E. 2005. Regional variation in soil carbon and $\delta^{13}\text{C}$ in forests and pastures of northeastern Costa Rica (en línea). *Biogeochemistry* 72(3):315-336. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0368-7>.

Pulido-Moncada, MA; Lobo-Lujan, D; Lozano-Perez, Z. 2009. Association Between Soil Structure Stability Indicators and Organic Matter in Venezuelan Agricultural Soils. *Agrociencia* 43(3):221-230.

Razafimbelo, T; Chevallier, T; Albrecht, A; Chapuis-Lardy, L; Rakotondrasolo, FN; Michellon, R; Rabeharisoa, L; Bernoux, M. 2013. Texture and organic carbon contents do not impact amount of carbon protected in Malagasy soils (en línea). *Scientia Agricola* 70(3):204-208. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000300009>.

Reinhart, KO; Vermeire, LT. 2016. Soil Aggregate Stability and Grassland Productivity Associations in a Northern Mixed-Grass Prairie (en línea). *PLOS ONE* 11(7):e0160262. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160262>.

Reyna-Bowen, L; Lasota, J; Vera-Montenegro, L; Vera-Montenegro, B; Błońska, E. 2019. Distribution and Factors Influencing Organic Carbon Stock in Mountain Soils in Babia Góra National Park, Poland (en línea). *Applied Sciences* 9(15):3070. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9153070>.

Reyna-Bowen, L; Vera-Montenegro, L; Reyna, L. 2018. Soil-Organic-Carbon Concentration and Storage under Different Land Uses in the Carrizal-Chone Valley in Ecuador (en línea). *Applied Sciences* 9(1):45. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9010045>.

RStudio Team. 2020. Integrated Development for R. (en línea). Boston, MA, s.e. Disponible en <http://www.rstudio.com/>.

Santana, M da S; Sampaio, EV de SB; Giongo, V; Menezes, RSC; Jesus, KN de; Albuquerque, ERGM de; Nascimento, DM do; Pareyn, FGC; Cunha, TJF; Sampaio, RMB; Primo, DC. 2019. Carbon and nitrogen stocks of soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil (en línea). *Geoderma Regional* 16:e00205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00205>.

Scharlemann, JPW; Tanner, EVJ; Hiederer, R; Kapos, V. 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool (en línea). *Carbon Management* 5(1):81-91. DOI: <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>.

Schlesinger, WH. 1990. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils (en línea). *Nature* 348(6298):232-234. DOI: <https://doi.org/10.1038/348232a0>.

Sherman, LA; Brye, KR. 2019. Soil Chemical Property Changes in Response to Long-Term Pineapple Cultivation in Costa Rica (en línea). *Agrosystems, Geosciences & Environment* 2(1):1-9. DOI: <https://doi.org/10.2134/age2019.07.0052>.

Sisti, CPJ; dos Santos, HP; Kohhann, R; Alves, BJR; Urquiaga, S; Boddey, RM. 2004. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil (en línea). *Soil and Tillage Research* 76(1):39-58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.08.007>.

Six, J; Conant, RT; Paul, EA; Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils (en línea). s.l., s.e., vol.241. p. 155-176 DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

Six, J; Paustian, K; Elliott, ET; Combrink, C. 2000. Soil Structure and Organic Matter (en línea). *Soil Science Society of America Journal* 64(2):681. DOI:

<https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642681x>.

Soil Survey Staff. (2014). Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. s.l., s.e.

_____. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. Washington, USDA-Natural Resources Conservation Service, vol.12. p. 327-328.

Sollins, P; Homann, P; Caldwell, BA. 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls (en línea). *Geoderma* 74(1-2):65-105. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00036-5).

Søndergaard, M. 2009. Redox Potential (en línea). *Encyclopedia of Inland Waters* :852-859. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00115-0>.

Spain, A. 1990. Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on the carbon and nitrogen contents of some tropical Australian rainforest soils (en línea). *Soil Research* 28(6):825. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR9900825>.

Steinmetz, Z; Wollmann, C; Schaefer, M; Buchmann, C; David, J; Tröger, J; Muñoz, K; Frör, O; Schaumann, GE. 2016. Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? (en línea). *Science of The Total Environment* 550:690-705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.153>.

Tifafi, M; Guenet, B; Hatté, C. 2018. Large Differences in Global and Regional Total Soil Carbon Stock Estimates Based on SoilGrids, HWSD, and NCSCD: Intercomparison and Evaluation Based on Field Data From USA, England, Wales, and France Large Differences in Global and Regional Total Soil Carbon Stock Estimates Based on SoilGrids, HWSD, and NCSCD: Intercomparison and Evaluation Based on Field Data From USA, England, Wales, and France. *Global Biogeochemical Cycles* (en línea). 32(1). DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GB005678i>.

Toral, M. 2013. Acolchado plástico como práctica para reducir la erosión hídrica en cambisoles cultivados con piña (*Ananas comosus* var. *comosus*) en México. s.l., s.e.

Trivedi, P; Singh, BP; Singh, BK. 2018. Soil Carbon (en línea). s.l., Elsevier. p. 1-28 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812766-7.00001-9>.

Udvardi, M; Below, FE; Castellano, MJ; Eagle, AJ; Giller, KE; Ladha, JK; Liu, X; Maaz, TMC; Nova-Franco, B; Raghuram, N; Robertson, GP; Roy, S; Saha, M; Schmidt, S; Tegeeder, M; York, LM; Peters, JW. 2021. A Research Road Map for Responsible Use of Agricultural Nitrogen. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5(May):1-18. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.660155>.

Vance, ED; Brookes, PC; Jenkinson, DS. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C (en línea). *Soil Biology and Biochemistry* 19(6):703-707. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6).

VandenBygaart, A; Janzen, H; Bremer, E; Ellert, B. 2007. Measuring Change in Soil Organic Carbon Storage (en línea). s.l., CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420005271.ch3>.

VandenBygaart, AJ; Gregorich, EG; Angers, DA; McConkey, BG. 2007. Assessment of the lateral and vertical variability of soil organic carbon (en línea). *Canadian Journal of Soil Science* 87(4):433-444. DOI: <https://doi.org/10.4141/CJSS06025>.

Vitousek, P; Howarth, R. 1991. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? (en línea). *Biogeochemistry* 13(2):87-115. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00002772>.

Wagai, R; Kajiura, M; Asano, M. 2020. Iron and aluminum association with microbially processed organic matter via meso-density aggregate formation across soils: organo-metallic glue hypothesis (en línea). DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-2020-32>.

Wang, T; Kang, F; Cheng, X; Han, H; Ji, W. 2016. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a hilly ecological restoration area of North China (en línea). *Soil and Tillage Research* 163:176-184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.015>.

Wei, T; Simko, V; Levy, M; Xie, Y; Jin, Y; Zemla, J. 2017. R package «corrplot»: Visualization of a Correlation Matrix (en línea). *Statistician* 56:316-324. Consultado 4 feb. 2021. Disponible en <https://github.com/taiyun/corrplot> <https://github.com/taiyun/corrplot/issues>.

Yimer, F; Ledin, S; Abdelkadir, A. 2006. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as

affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia (en línea).
Geoderma 135:335-344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.01.005>.

Zhang, C; Liu, G; Xue, S; Sun, C. 2013. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China. *European Journal of Soil Biology* 54:16-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EJSOBI.2012.10.007>.

Anexos

Anexo 5.1. Determinación de los cumplimientos de supuestos para el modelo lineal seleccionado para la variable de respuesta densidad de carbono.

Criterio	Valor	Valor P	Decisión
Estadística global	6,034	0,197	Suposición aceptable
Simetría	0,499	0,480	Suposición aceptable
Curtosis	2,976	0,084	Suposición aceptable
Función de enlace	0,071	0,789	Suposición aceptable
Heteroscedasticidad	2,488	0,115	Suposición aceptable

Anexo 5.2. Determinación de los cumplimientos de supuestos para el modelo lineal seleccionado para la variable de respuesta densidad de nitrógeno.

Criterio	Valor	Valor P	Decisión
Estadística global	0,636	0,958	Suposición aceptable
Simetría	0,149	0,698	Suposición aceptable
Curtosis	0,042	0,836	Suposición aceptable
Función de enlace	0,036	0,847	Suposición aceptable
Heteroscedasticidad	0,407	0,523	Suposición aceptable

Anexo 5.3. Datos de reservorios de carbono a 30 cm de profundidad para suelos bajo dos enfoques de muestreo en la zona norte de Costa Rica.

Fuente de información	Enfoque de muestreo	Uso/clasificación del suelo	Reservorio de carbono (Mg. Ha⁻¹)
Mapa de suelos de Costa Rica*	Horizontes genéticos	Typic Haplohumults	95,49
		Typic Haplohumults	77,92
		Typic Haplohumults	88,47
		Typic Hapludults	51,62
Este estudio**	Profundidad fija	Bosque	64,68
		Piña orgánica	71,12
		Piña convencional	63,71
	Horizontes genéticos	Piña orgánica	75,79
		Piña convencional	71,60
		Bosque	103,32

*Datos obtenidos a partir de la base de datos asociada al mapa digital de suelos de Costa Rica (Mata et al. 2013).

**Todos los suelos evaluados en este estudio se clasificaron como Typic Palehumults de acuerdo al sistema de clasificación de USDA (Soil Survey Staff 2014).

6. Capítulo 6: Discusión general

El objetivo general de esta tesis fue determinar la calidad de suelo y los reservorios de carbono y nitrógeno del suelo, asociados a dos tipos de manejo de piña (orgánico y convencional) y bajo una zona de bosque secundario (como referencia) en la Zona Norte de Costa Rica. Para lograr cumplir con este objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos: generar un índice de calidad de suelo a partir de diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas en suelos cuantificar el reservorio de carbono y establecer las propiedades físicas, químicas y biológicas que definen el comportamiento del reservorio de carbono, todos los objetivos para los dos tipos manejos de piña y bosque secundario.

El establecimiento del índice de calidad de suelo, se realizó a través de dos estrategias (método estadístico y criterio experto), a través de un proceso de selección de indicadores, interpretación de puntajes e integración, se genera un valor de índice de calidad. Para la determinación de los reservorios de carbono y nitrógeno total en los usos evaluados, se siguió con la metodología recomendada por la FAO (2019) que consiste principalmente en un muestreo a 30 cm/100 cm de profundidad, en el cual se determina el contenido de carbono y densidad aparente, a partir de estos datos, junto con el espesor de la profundidad de las muestras y la pedregosidad presente, se calcula el contenido de reservorio por cada espesor analizado y posteriormente, se realiza una sumatoria de los valores de reservorio para cada espesor para obtener un dato total; mientras que, para la determinación de las propiedades del suelo que explicaran los reservorios de carbono y nitrógeno, se generó un modelo lineal para el cual se utilizó un procedimiento de selección de parámetros con análisis de correlación en donde se determinó la relación entre todas las variables analizadas, luego a través de algoritmo llamado boruta (random forest) se evaluaron las propiedades resultantes del proceso anterior y esto da como resultado un conjunto de variables que la función llamada boruta dictamina como importantes, posterior a este paso, se hizo un ajuste en un modelo con todas las variables obtenidas por boruta y se hizo un análisis de colinealidad a las variables predictivas, en seguida, las variables derivadas a partir del resultado anterior, se usaron para efectuar un ajuste de los posibles modelos con glmulti y con esto, se procedió a evaluar los modelos para determinar si cumplían con los supuestos para modelos lineales y si los modelos cumplían con los supuestos, se procedió a elegir el que tuviera el menor valor de AICc.

Índice de calidad por método estadístico

El índice obtenido a partir del manejo de piña orgánica fue el más alto en los usos de suelo evaluados para todas las profundidades cuantificadas (capítulo 4), dándose diferencias estadísticas significativas con los otros dos usos de suelo en todos los estratos cuantificados. Este resultado se pudo presentar debido a que, al analizar los indicadores bajo esta estrategia, los valores de saturación de acidez como el contenido de magnesio y zinc, fueron muy superiores a los obtenidos bajo los otros usos de suelo (capítulo 4), mientras que, al comparar los otros indicadores como el contenido de carbono, biomasa microbiana y la densidad aparente, sus comportamientos fueron similares entre todos los usos de suelo.

Esta estrategia de generación resulta ventajosa porque no se está aplicando ningún tipo de sesgo y en teoría, este proceso da como resultado una selección de variables que logran explicar la variación presente en el conjunto total de datos, no obstante, también se ha señalado que, al analizar sistemas, esta metodología puede ser desventajosa al destacar variables poco analizadas comúnmente o cuya sensibilidad es menor al momento de evaluar el manejo de un cultivo. Según Arifin (2012), en su propuesta de un indicador de calidad de suelo para bosques tropicales en Malasia, hacia la acotación de que no se puede considerar de la misma forma un uso agrícola como la palma aceitera y un bosque secundario, esto por la necesidad de fertilizar en un cultivo agrícola. Debido a lo anterior, esta estrategia no puede hacer distinción de dicha condición y no la considera dentro de sus resultados.

Índice de calidad por criterio experto

Al estudiar el impacto del uso de suelo sobre la calidad del mismo haciendo uso del criterio expertos (literatura o de expertos en el campo), se puede observar que no se dieron diferencias marcadas entre los suelos con bosque y piña orgánica, dando a entender que, considerando los parámetros seleccionados y sus resultados, son sistemas con una calidad similar. Al comparar los índices conseguidos, se diferencia el manejo de piña orgánica de los otros dos usos de suelo, esto porque presenta serios problemas de acidez y saturación de acidez, además de contar con bajos valores de nutrientes.

El criterio con base en la literatura, tiene la ventaja de que existe una diversa cantidad de estudios sobre las variables seleccionadas, sin embargo puede ocurrir que las variables seleccionadas no respondan de la misma forma en todas las condiciones evaluadas (Karlen et al. 2003). En la zona norte de Costa Rica, se han realizado diversos trabajos en los suelos

ultisoles con fertilidad baja. En dichos suelos, normalmente predominan pH bajos, bajos contenidos de bases y una alta acidez intercambiable (Rodríguez-Gómez 2010, Méndez 2012, Miranda-Ortiz 2013, Cornwell 2014, Sibaja-Matarrita et al. 2017, Rojas-Ramírez 2019, Sherman y Brye 2019), bajos contenidos de carbono como los reportados por Sherman y Brye (2019) y Fonseca-Vargas et al. (2019). Mientras para los indicadores físicos, la densidad aparente para ultisoles ha sido analizada por Alvarado y Forsythe (2005) y otra serie de estudios (Powers y Schlesinger 2002, Powers 2004, Camacho et al. 2015, Fonseca-Vargas et al. 2019) y es una de las variables ampliamente utilizadas en la literatura para estudios de calidad de suelos.

Comparación de índices de calidad

Al analizar los valores de los índices de calidad obtenidos a partir de las diferentes estrategias, se pudo determinar que existe un impacto debido a la estrategia de selección de parámetros (Figura 3 y 4). En la literatura se menciona que en ocasiones, el enfoque estadístico tiende a ser poco sensible a las variaciones existentes entre usos de suelo o métodos de labranza (Mukherjee y Lal 2014, Stefanoski et al. 2016), mientras que en otras ocasiones, se menciona su utilidad para generar un índice conformado por pocos indicadores (Askari y Holden 2014, Vasu et al. 2016, Vashisht et al. 2020).

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es el proceso de generación de puntaje, ya que en este trabajo se utilizó una puntuación lineal (Andrews et al. 2002). Con referencia a esta metodología, Andrews et al. (2002) indicó que los resultados del método de puntuación lineal dependen mucho de la varianza de cada indicador y hay que tener cuidado de algún valor atípico, por ello, se requiere de un conocimiento del conjunto de datos utilizado, para saber que debe descartarse; ya que de lo contrario, todos los puntajes posteriores se sesgarán injustamente.

Para Costa Rica existe una escasa literatura sobre estudios en donde se desarrolle un índice de calidad de suelo, ya sea a través del enfoque recomendado por Karlen et al. (2003), en la cual, se da una combinación de métodos estadísticos para selección de indicadores y generación de índices, con métodos en base a literatura pero con metodologías diversas para calcular índices de calidad o por el contrario, con un marco de trabajo como el generado por el departamento de agricultura de los Estados Unidos que considera el aporte de

conocimiento (Andrews et al. 2004) y otra serie de enfoques desarrollados a partir de base de datos existentes.

Villareal-Nuñez et al. (2013) en una investigación sobre calidad de suelos en banano, utilizaron una amplia cantidad de indicadores de calidad de suelo, en el cual, incluían parámetros químicos, físicos y biológicos; sin embargo, se usaron variables relacionadas a la productividad del cultivo (circunferencia de la madre, altura del hijo (cm) y número de manos de banano) y se aplicaron diversos métodos estadísticos para lograr la generación de un valor de índice. El detalle que se puede observar en este estudio, es que la calidad de los suelos se asocia de forma directa con la productividad de los sitios, sin embargo, no se considera que cada uno de los sitios de las fincas evaluadas puede tener particularidades.

Mientras que los trabajos realizados en café por George (2007) y Chavarría-Bolaños et al. (2012), utilizaron un enfoque más cercano a lo presentado en este estudio, esto porque se inicia con la selección de indicadores físicos, químicos y biológicos para asociarlos a una condición de calidad del suelo, aunque hay que destacar que esta selección se puede ver influenciada por el objetivo para el cual se está realizando el índice.

Reservorios de carbono y nitrógeno

En este trabajo, no se observaron diferencias entre los valores para los suelos con uso de piña y bosque secundario, resultado que usualmente no se espera al comparar suelos cultivados con suelos bajo bosque secundario o en sistemas agroforestales, en donde la presencia de diferentes especies forestales, ya sea por aportación del mantillo o por biomasa radical, brindan un contenido importante de materia orgánica al suelo (Mayer *et al.* 2020). Al realizar las comparaciones del reservorio de carbono a 1 metro con respecto a los estudios realizados por Chacón *et al.* (2015), para el caso de la piña convencional y orgánica presente en el sitio de estudio, mostró valores mayores que los reportados por dicho autor, aunque fueron menores a los evaluados por el mismo estudio, para suelos cultivados con banano y palma aceitera en el Caribe Sur. Al realizar comparaciones, considerando el suelo bajo el bosque secundario, diversos estudios muestran resultados diferentes, por ejemplo, en un estudio de Vicente *et al.* (2016) para un suelo oxisol de bosque secundario, se presentaron valores mayores a los obtenidos, de igual manera, Oliveira *et al.* (2019) reportaron para un bosque secundario en un suelo ultisol, un reservorio de carbono mucho mayor al observado en el estudio, cuya razón puede deberse a la composición del bosque y el historial del suelo

evaluado (Scharlemann *et al.* 2014, Fujisaki *et al.* 2017, Mayer *et al.* 2020), ya que al haber mayor aporte de materia orgánica en forma de biomasa, así como la falta de labranza, facilitan altas concentraciones de carbono orgánico en el suelo en los usos de la tierra menos manejados en comparación con sitios cultivados, en los cuales existió previamente intervención antropogénica (Juo y Franzluebbers 2003, Powers 2004, Chacón *et al.* 2015).

En la actualidad no existen datos de referencia calculados para el reservorio de nitrógeno en suelos de Costa Rica, a pesar de tener una alta correlación con el reservorio de carbono y su impacto sobre la calidad del suelo (Piñeiro *et al.* 2010, FAO 2019). A pesar de lo anterior, a diferencia del reservorio de carbono, la dificultad para explicar la falta de diferencias significativas en el reservorio de nitrógeno, radica en el uso de fertilizantes, tanto inorgánico como orgánico, además de la posibilidad de que exista fijación simbiótica de nitrógeno de la atmósfera (Santana *et al.* 2019) y otra serie de interacciones que impiden un dato consistente.

En ambos manejos de piña se contó con un mayor valor de reservorio total de carbono y nitrógeno que en el bosque, dicho resultado no es congruente con observaciones reportadas en la literatura, debido al aporte de materia orgánica y la no intervención del hombre, pero según un meta-análisis de Don *et al.* (2011), alrededor del 13% de los suelos cultivados en zonas tropicales muestran mayores valores de reservorio de carbono, que un suelo bajo bosque. Lo anterior podría ser explicado, a causa del aumento del carbono en el suelo luego de un abandono o establecimiento de un bosque, puede ser fluctuante (Guo y Gifford 2002, Lal 2005), esto por las alteraciones en el equilibrio de los nutrientes del suelo y la vegetación en regeneración (por ejemplo, diversidad de especies y composición de especies), pueden ser factores significativos para el cambio de la materia orgánica a lo largo del tiempo (Davidson y Janssens 2006, Jeyanny *et al.* 2014).

Factores que determinan el reservorio de carbono

En este trabajo se exploraron múltiples aproximaciones estadísticas para determinar los parámetros del suelo que mejor explicaban los datos de carbono acumulados en el perfil. En la determinación de modelos, tanto para la densidad de carbono como de nitrógeno, se observó que la profundidad, contenido de hierro, contenido de limo y arcilla, fueron los mejores parámetros para explicar dichas variables de respuesta.

La validez de la profundidad para explicar la densidad de carbono y nitrógeno, se relaciona con el comportamiento de la acumulación de materia orgánica, ya que esta se da en los primeros 30 cm del suelo (Fujisaki *et al.* 2018), mientras que al aumentar la profundidad, entran a regir otros factores como el contenido de humedad, porosidad y aporte de nutrientes, que modifican el proceso de deposición de la materia orgánica (Lorenz y Lal 2005).

Para el caso de este trabajo, si bien el contenido de Fe obtenido, da una correlación positiva con la densidad de carbono y nitrógeno, esto no necesariamente significa causalidad en todo caso, debido a la metodología utilizada para la extracción y a que la fracción determinada no se puede identificar totalmente. Ahora bien, se podría suponer que la fracción mineral de óxidos de Fe extraída es la más activa y que tiene mayor interacción con la materia orgánica del suelo, esto contribuiría a explicar la capacidad de retención de carbono y de nitrógeno que se está presentando en este estudio.

La interacción de las fracciones de arcilla y limo con el contenido de carbono y nitrógeno se ha observado en diferentes usos de suelo y climas (Matus 2021). En general, la importancia del limo y las arcillas para el acumulo de carbono y nitrógeno, es por su importancia en la agregación y estabilidad del suelo (Six *et al.* 2000). Dicho proceso puede darse a través de una interacción directa, al asociarse con la materia orgánica (Curtin *et al.* 2016), como también a través de la formación de agregados que atrapan e inmovilizan la materia orgánica incorporada (Blanco-Canqui y Lal 2004, Pulido-Moncada *et al.* 2009, Razafimbelo *et al.* 2013).

Según Augustin y Cihacek (2016) en suelos molisoles, el limo correlacionó de mejor forma, que la arcilla para explicar el carbono presente en diferentes suelos en China, mientras que Iwasaki *et al.* (2017) en suelos andisoles, mostraron los mismos resultados; sin embargo, Matus *et al.* (2016), al estudiar la relación en suelos con características ándicas y suelos meteorizados, hallaron que la fracción de arcilla no mostró un comportamiento consistente en su relación con la materia orgánica del suelo, esto a causa de que la arcilla fue la que dio correlaciones positivas. En general, Ingram y Fernandes (2001) destacan la importancia de ambos factores en la acumulación y secuestro de carbono, aunque la cantidad de materia orgánica asociada a estas fracciones es limitada.

7. **Capítulo 7:** Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

1. El índice de calidad de suelo obtenido a partir del suelo bajo piña orgánica tuvo el mayor valor bajo las dos estrategias analizadas, seguido del manejo de bosque y la piña convencional.
2. La estrategia de generación del índice de calidad de suelos con base en el criterio estadístico tiene ventajas como: selección de indicadores representativos y reducción del conjunto total de variables por analizar; mientras que el enfoque del criterio experto, ofrece una mejor alternativa al analizar características del suelo estudiadas previamente en diversos estudios.
3. El comportamiento de los índices generados fue muy similar en las tres profundidades evaluadas (0, 10 y 30 cm), excepto bajo el uso de piña convencional y esta tendencia se vio en ambos enfoques realizados.
4. El manejo de piña orgánica tuvo resultados superiores para la mayoría de variables físicas, químicas y microbiológicas evaluadas en este estudio, en comparación con el suelo con bosque y piña convencional.
5. El efecto de los usos de suelo sobre los reservorios de carbono y nitrógeno, no generó diferencias estadísticas significativas entre los manejos de piña orgánica y convencional, en contraste con el uso de bosque.
6. Los contenidos de carbono y nitrógeno fueron mayores en la profundidad de muestreo 0-10 cm bajo el uso de bosque, en comparación con los usos de piña evaluados, al incrementar la profundidad, se dio una disminución gradual de los contenidos de ambas variables.
7. Los modelos para explicar tanto el contenido de carbono y nitrógeno, presentaron altos valores de R^2 y estuvieron conformados por la profundidad, contenido de hierro, limo y arcilla. Los resultados anteriores, nos dan indicios de las variables más importantes, que explican los resultados de carbono y nitrógeno encontrados en los suelos ultisoles estudiados.
8. Este trabajo generó información de referencia para analizar el impacto del cultivo de la piña sobre la calidad del suelo, con un enfoque más completo al analizar el impacto

del manejo de paja orgánica o convencional sobre el suelo, además de determinar de forma cuantificable la calidad de los suelos evaluados.

Recomendaciones

1. Para aprovechar al máximo los resultados de los índices de calidad, es recomendable buscar cómo aplicar la metodología del criterio experto a diferentes sitios de producción de paja, esto con el fin de evaluar la eficacia del índice para caracterizar la calidad de los suelos bajo este cultivo.
2. Selección de un mayor número de parámetros de tipo biológico para buscar una mayor representatividad en el desarrollo de un índice de calidad. Los indicadores de tipo biológico además de poder relacionarse con diferentes parámetros, son sumamente sensibles y ayudarían a determinar diferencia entre sitios de producción.
3. Buscar mayor información relacionada al historial de uso del suelo, esto porque se puede conseguir una mejor interpretación de los resultados del índice de calidad al conocer los diferentes cambios de manejo del sitio.
4. Realizar determinaciones de reservorios de carbono y nitrógeno a 30 cm en lugar de 1 m de profundidad para tener una mayor cantidad de repeticiones, esto con el fin de representar de manera más adecuada cualquier variación que se pueda presentar al sólo considerar una cantidad reducida de repeticiones.
5. Evaluar las diferentes fracciones presentes del carbono en el suelo, idealmente un fraccionamiento de tipo químico con el objetivo de determinar la permanencia de las formas presentes en estos suelos y poder tener mayor conocimiento sobre su posible almacenamiento.
6. Determinar las diferentes fracciones de hierro presentes en estos suelos a través de metodologías de extracción adecuadas, ya que, la metodología de extracción usada en este trabajo no logra establecer una fracción de hierro responsable por la interacción con la materia orgánica.
7. Utilizar como referencia lo obtenido en el desarrollo de los modelos que explicaron los contenidos de carbono y nitrógeno, para aplicarlos en otros sitios de producción de paja y de esta manera, entender el potencial de estos suelos para el secuestro de carbono y nitrógeno.

8. Capítulo 8: Literatura general citada

Acuña, G. 2006. Producción de piña en Caribe y Pacífico Sur de Costa Rica (en línea). *Ambientico* (158):2-8. Disponible en

<http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/ambientico/158.pdf>.

Alfaro, R; Rodríguez, J. (1992). Impacto Ambiental de los Desechos Agroindustriales (Café, Piña y Palma Africana) Informe Anual 1992. Heredia, s.e.

Almajmaie, A; Hardie, M; Acuna, T; Birch, C. 2017. Evaluation of methods for determining soil aggregate stability (en línea). *Soil and Tillage Research* 167:39-45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.003>.

Alvarado, A; Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(1):85-94.

Alvarado, A; Mata, R; Chinchilla, M. 2014. Arcillas identificada en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931-2014: II. Mineralogía de arcillas en suelos con características vérticas y oxídico caolínificas. *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas* 38(1):107-131.

Alvarado, J; Andrade, HJ; Segura, M. 2013. Storage of soil organic carbon in coffee (*Coffea arabica* L.) production systems in the municipality of Líbano, Tolima, Colombia (en línea). *Colombia Forestal* 16(1):21-31. Consultado 11 dic. 2018. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v16n1/v16n1a02.pdf>.

Alvarez, R; Lavado, RS. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* 83(1-2):127-141. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00141-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00141-9).

Álvarez Rojas, M; Peña, W. 2013. Estimación de niveles erosivos en suelos con cultivo de piña en Sarapiquí. *Repertorio Científico* 16(1). DOI: <https://doi.org/10.22458/rc.v16i1.594>.

Amacher, MC; O'Neil, KP; Perry, CH. (2007). Soil vital signs: A new Soil Quality Index (SQI) for assessing forest soil health (en línea). s.l., s.e. DOI:

<https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-65>.

Anaya-Gómez, ML; Jaramillo Jaramillo, DF. 2017. Determinación de dos índices de la calidad del suelo en la calidad de la taza de café (en línea). *Revista de la Facultad de Ciencias* 6(2):102-123. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v6n2.65667>.

Anderson, DW; Doran, JW; Janzen, HH; Pierce, FJ. 1997. Chapter 1 Concepts of soil quality and their significance (en línea). *Developments in Soil Science* 25:1-19. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(97\)80028-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(97)80028-1).

Anderson, J. 1982. Measurement of CO₂ evolution rates. In *Alef, K; Nannipieri, P (eds.)*. s.l., s.e. p. 831-871.

Andrews, SS; Carroll, CR. 2001. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. *Ecological Applications* 11(6):1573-1585. DOI: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[1573:DASQAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1573:DASQAT]2.0.CO;2).

Andrews, SS; Karlen, DL; Cambardella, CA. 2004. The Soil Management Assessment Framework : A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. *Soil Science Society of America Journal* 68(6):1945-1962. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>.

Andrews, SS; Karlen, DL; Mitchell, JP. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90:25-45.

Andrews, SS; Karlen, DL; Mitchell, JP. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California (en línea). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 90(1):25-45. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8).

Arifin, A. 2012. Proposing a suitable soil quality index for natural, secondary and rehabilitated tropical forests in Malaysia (en línea). *African Journal of Biotechnology* 11(14):3297-3309. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJB11.2903>.

Armenise, E; Redmile-Gordon, MA; Stellacci, AM; Ciccacese, A; Rubino, P. 2013.

Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment (en línea). *Soil and Tillage Research* 130:91-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.02.013>.

Arrouays, D; Saby, N; Walter, C; Lemerrier, B; Schvartz, C. 2006. Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use and Management* 22(1):48-51. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00020.x>.

Arrouays, D; Saby, NPA; Boukir, H; Jolivet, C; Ratié, C; Schrumpf, M; Merbold, L; Gielen, B; Gogo, S; Delpierre, N; Vincent, G; Klumpp, K; Loustau, D. 2018. Soil sampling and preparation for monitoring soil carbon (en línea). *International Agrophysics* 32(4):633-643. DOI: <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0047>.

Arshad, MA; Martin, S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture Ecosystem & Environment* 88:153-160.

Askari, MS; Holden, NM. 2014. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management (en línea). *Geoderma* 230-231:131-142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.019>.

Astier-Calderon, M; Maass-Moreno, M; Etchevers-Barra, J. 2002. Derivation of soil quality indicators in the context of sustainable agriculture. *Agrociencia (Montecillo)* 36(5):605-620.

Augustin, C; Cihacek, LJ. 2016. Relationships Between Soil Carbon and Soil Texture in the Northern Great Plains (en línea). *Soil Science* 181(8):386-392. DOI: <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000173>.

Bachmann, G; Kinzel, H. 1992. Physiological and ecological aspects of the interactions between plant roots and rhizosphere soil (en línea). *Soil Biology and Biochemistry* 24(6):543-552. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90079-D](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90079-D).

Balesdent, J; Chenu, C; Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage (en línea). *Soil and Tillage Research* 53:215-230.

Consultado 6 oct. 2018. Disponible en

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.7739&rep=rep1&type=pdf>.

Banwart, S; Black, H; Cai, Z; Gicheru, P; Joosten, H; Victoria, R; Milne, E; Noellemeyer, E; Pascual, U; Nziguheba, G; Vargas, R; Bationo, A; Buschiazzi, D; De-Brogniez, D; Melillo, J; Richter, D; Termansen, M; van Noordwijk, M; Goverse, T; Ballabio, C; Bhattacharyya, T; Goldhaber, M; Nikolaidis, N; Zhao, Y; Funk, R; Duffy, C; Pan, G; la Scala, N; Gottschalk, P; Batjes, N; Six, J; van Wesemael, B; Stocking, M; Bampa, F; Bernoux, M; Feller, C; Lemanceau, P; Montanarella, L. 2014. Benefits of soil carbon: report on the outcomes of an international scientific committee on problems of the environment rapid assessment workshop (en línea). *Carbon Management* 5(2):185-192. DOI: <https://doi.org/10.1080/17583004.2014.913380>.

Bartholomew, DP; Rohrbach, KG; Evans, DO. 2002. Pineapple Cultivation in Hawaii (en línea). *Fruits and Nuts* . Consultado 30 jun. 2019. Disponible en <http://www2.ctahr.hawaii.edu>.

Bastida, F; Zsolnay, A; Hernández, T; García, C. 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective (en línea). *Geoderma* 147(3-4):159-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>.

Batjes, NH. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47:151-163. DOI: https://doi.org/10.1111/ejss.12114_2.

Bautista-Cruz, A; del Castillo, RF; Etchevers-Barra, JD; Gutiérrez-Castorena, M del C; Baez, A. 2012. Selection and interpretation of soil quality indicators for forest recovery after clearing of a tropical montane cloud forest in Mexico (en línea). *Forest Ecology and Management* 277:74-80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.013>.

Beard, JS; Allen, PH. 1958. Rain Forests of Golfo Dulce (en línea). *Ecology* 39(3):564. DOI: <https://doi.org/10.2307/1931785>.

Bergoeing, JP. 2017. The Central Volcanic Mountain Range (en línea). s.l., Elsevier. p. 81-105 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812067-5.00004-6>.

Bertrand, I; Viaud, V; Daufresne, T; Pellerin, S; Recous, S. 2019. Stoichiometry constraints

challenge the potential of agroecological practices for the soil C storage. A review (en línea). s.l., s.e., vol.39. p. 54 DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0599-6>.

Bertsch, F; Bejarano, J; Corrales, M. 2005. Correlación entre las soluciones extractoras KCl-Olsen modificado y Mehlich 3, usadas en los laboratorios de suelos de Costa Rica (en línea). *Agronomía Costarricense* 29(3):137-142. Consultado 8 jun. 2021. Disponible en <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6787/6474>.

Blakemore, L; Searle, P; Daly, B. 1987. *Methods for chemical analysis of soils*. Lower Hutt, NZ, New Zealand Soil Bureau. 43 p. DOI: <https://doi.org/10.7931/DL1-SBSR-10A>.

Blakemore, LC.; Searle, PL.; Daly, BK. 1981. *Methods for chemical analysis of soils - New Zealand Soil Bureau Scientific Reports - Manaaki Whenua Landcare Research Digital Library* (en línea). s.l., s.e. 102 p. DOI: <https://doi.org/10.7931/DL1-SBSR-10A>.

Blanco-Canqui, H; Lal, R. 2004. Mechanisms of Carbon Sequestration in Soil Aggregates (en línea). *Critical Reviews in Plant Sciences* 23(6):481-504. DOI: <https://doi.org/10.1080/07352680490886842>.

Bronick, CJ; Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review (en línea). *Geoderma* 124(1-2):3-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.

Brussaard, L; van Faassen, HG. 1994. Effects of Compaction on Soil Biota and Soil Biological Processes (en línea). *Developments in Agricultural Engineering* 11(C):215-235. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50018-0>.

Buol, S; Southard, R; Graham, R; McDaniel, P. 2008. *Soil Genesis and Classification*. Sexta. Iowa, Wiley-Blackwell. 557 p.

Burke, IC; Lauenroth, WK; Riggle, R; Brannen, P; Madigan, B; Beard, S. 1999. Spatial variability of soil properties in the shortgrass steppe: The relative importance of topography, grazing, microsite, and plant species in controlling spatial patterns. *Ecosystems* 2(5):422-438. DOI: <https://doi.org/10.1007/s100219900091>.

Burrough, PA. 1989. *Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation* (en

línea). *Journal of Soil Science* 40(3):477-492. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01290.x>.

Buyanovsky, GA; Aslam, M; Wagner, GH. 2004. Carbon Turnover in Soil Physical Fractions. *Soil Sci .Soc.Am.J.* 58(1994):1167-1173. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800040023x>.

Calabrese, S; Richter, DD; Porporato, A. 2018. The Formation of Clay-Enriched Horizons by Lessivage (en línea). *Geophysical Research Letters* 45(15):7588-7595. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL078778>.

Calcagno, V. 2019. Package glmulti: Model Selection and Multimodel Inference Made Easy (en línea). CRAN . Consultado 11 may 2021. Disponible en <https://cran.r-project.org/web/packages/glmulti/glmulti.pdf>.

Camacho, G. 2002. Análisis comparativo del desarrollo de un cultivo de Piña (*Ananas comosus* (L.) Merr) sembrado en labranza mínima y en labranza convencional en finca FRUTEX S.A., Pital, San Carlos. s.l., Instituto Tecnológico de Costa Rica. 92 p.

Camacho, ME; Mata, R; Forsythe, W. 2015. Labranza mecanizada de pasturas mediante tres implementos en un ultisol y sus implicaciones físicas e hidropedológicas (en línea). *Agronomía Costarricense* 39:101-115. Disponible en http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242015000300101&nrm=iso.

Camacho, ME; Quesada-Román, A; Mata, R; Alvarado, A. 2020. Soil-geomorphology relationships of alluvial fans in Costa Rica (en línea). *Geoderma Regional* 21(May):e00258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00258>.

CANAPEP. 2019. Historia | CANAPEP (en línea, sitio web). Consultado 23 jun. 2019. Disponible en <https://canapep.com/historia/>.

Caravaca, F; Lax, A; Albaladejo, J. 1999. Organic matter, nutrient contents and cation exchange capacity in fine fractions from semiarid calcareous soils (en línea). *Geoderma* 93(3-4):161-176. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00045-2).

Carter, MR. 2002. Soil Quality for Sustainable Land Management (en línea). *Agronomy Journal* 94:38-47. Disponible en [http://dzumervis.nic.in/pdf/Soil Quality for Sustainable Land Management.pdf](http://dzumervis.nic.in/pdf/Soil%20Quality%20for%20Sustainable%20Land%20Management.pdf).

Chacón, P; Lorenz, K; Lal, R; Calhoun, FG; Fausey, N. 2015. Soil organic carbon in some land uses of Costa Rica. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science* 65(4):310-320. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1008563>.

Chavarría-Bolaños, N; Tapia-Fernández, A; Soto, G; Virginio-Filho, E. 2012. Efecto de diferentes sistemas de manejo sobre la calidad del suelo, en fincas cafetaleras de la zona de Turrialba y Orosi (en línea). *Revista Intersedes XIV(26):85-105*. Disponible en <http://www.scielo.sa.cr/pdf/is/v14n28/a05v14n28.pdf>.

Cherubin, MR; Karlen, DL; Cerri, CEP; Franco, ALC; Tormena, CA; Davies, CA; Cerri, CC. 2016. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS ONE* 11(3):1-26. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>.

Chinchilla, M; Mata, R; Alvarado, A. 2010. Caracterización y clasificación de algunos ultisoles de la región de Los Santos, Talamanca, Costa Rica (en línea). *Agronomía Costarricense* . DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v35i1.6687>.

Conant, RT; Ogle, SM; Paul, EA; Paustian, K; Conant, RT; Ogle, SM; Paul, EA; Paustian, K. 2011. soil organic Measuring and monitoring lands for carbon stocks in agricultural climate mitigation online (en línea). Source: *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(3):169-173. Consultado 6 jul. 2019. Disponible en <https://www-jstor-org.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/stable/pdf/41149747.pdf?refreqid=excelsior%3A1fea89e46a42d95b92d546e4042682da>.

Cornwell, E. 2014. Effects of different agricultural systems on soil quality in northern Limón province, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 62(3):887. DOI: <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i3.14062>.

Cubero, D; Sandí, V. (2013). *Técnicas agroambientales para el manejo del cultivo de piña*. San José, s.e.

Curtin, D; Beare, MH; Qiu, W. 2016. Texture effects on carbon stabilisation and storage in New Zealand soils containing predominantly 2 : 1 clays (en línea). *Soil Research* 54(1):30. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR14292>.

Davidson, EA; Janssens, IA. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change (en línea). *Nature* 440(7081):165-173. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04514>.

Davis, M; Alves, B; Karlen, D; Kline, K; Galdos, M; Abulebdeh, D. 2017. Review of Soil Organic Carbon Measurement Protocols: A US and Brazil Comparison and Recommendation (en línea). *Sustainability* 10(2):53. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10010053>.

Day, P. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. *In Black, C (ed.)*. Madison, WI, American Society of Agronomy. p. 545–567.

Dengo, G; Dondoli, C; Malavassi, E. (1968). Mapa geológico de Costa Rica. San José, s.e.

Dexter, ARR. 2004. Soil physical quality: Part III (en línea). *Geoderma* 120(3-4):201-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodermaa.2003.09.005>.

Díaz-Romeu, R; Hunter, A. 1978. Metodología de muestreo de suelo, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero. Turrialba, CATIE. p. 61.

Don, A; Schumacher, J; Freibauer, A. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis (en línea). *Global Change Biology* 17(4):1658-1670. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>.

Dopazo, AR; Armenteros, EF; Gafas, J; Peña, O; Fornaris, LM. 2009. Manejo del cultivo de la piña (*Ananas comosus* (L .) Merr .) cv . Española Roja , en Cuba. *Revista CitriFrut* 26(2):71-75.

Doran, JW; Coleman, DC; Bezdicek, DF; Stewart, BA. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. American Society of Agronomy, SSSA Special Publication (en línea). American Society of Agronomy 35. Consultado 4 nov. 2018. Disponible en

<http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015008223>.

Doran, JW; Coleman, DC; Bezdicek, DF; Stewart, BA; Larson, WE; Pierce, FJ. 1994. The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management (en línea). s.l., s.e.

DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c3>.

Doran, JW; Sarrantonio, M; Liebig, M. 1996. Soil health and sustainability. *In Sparks, D. (ed.)*. New York, NY, Academic Press, vol.56. p. 1-54.

Duiker, SW; Rhoton, FE; Torrent, J; Smeck, NE; Lal, R. 2003. Iron (Hydr)Oxide Crystallinity Effects on Soil Aggregation. *Soil Science Society of America Journal* 67(2):606-611. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.6060>.

Dumanski, J; Pieri, C. 2000. Land quality indicators: research plan (en línea). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 81(2):93-102. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00183-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00183-3).

Durango-Cabanilla, WD. 2014. Efecto de dosis crecientes de enmiendas orgánicas en un andisol y un ultisol sobre la biomasa microbiana, respiración y actividad enzimática, en condiciones de invernadero (en línea). s.l., Universidad de Costa Rica. 136 p. Disponible en <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1355/1/T-SENESCYT-00506.pdf>.

Durango, W; Uribe, L; Henríquez, C; Mata, R. 2015. Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. (en línea). *Agronomía Costarricense* 39(1):37-46. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/436/43638524003.pdf>.

Van Eerd, LL; DeBruyn, AH; Ouellette, L; Hooker, DC; Robinson, DE. 2018. Quantitative and qualitative comparison of three wet aggregate stability methods using a long-term tillage system and crop rotation experiment (en línea). *Canadian Journal of Soil Science* 98(4):738-742. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2018-0101>.

Ewere, C.; Iseghohi, I.; Gold, EJ. 2017. Effects of different mulch materials on soil properties, weed control, growth and yield of pineapple in Akure, Nigeria. *Fuoye Journal of*

Agriculture and Human Ecology 1(2):62-74.

FAO. 2019. Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership (en línea). Roma, s.e. 170 p. Consultado 30 may 2021. Disponible en <http://www.fao.org/partnerships/leap/publications/en/>.

_____. 2019. Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems – A scoping analysis for the LEAP work stream on soil carbon stock changes. (en línea). s.l., s.e. Consultado 6 sep. 2020. Disponible en <http://www.fao.org/partnerships/leap/publications/en/>.

Fonseca-Vargas, R; Furcal-Beriguete, P; Campos-Rodríguez, R; Esquivel-Segura, E. 2019. Retención de carbono en un suelo dedicado al cultivo de piña (*Ananas comosus* (L.) bajo un manejo convencional y de mínima labranza (en línea). Revista Tecnología en Marcha 32(4):116-132. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i4.4797>.

Forsythe, W. 1985. Física de suelos: Manual de laboratorio. 2 edición. San José, IICA. 236 p.

Fujii, K. 2014. Soil acidification and adaptations of plants and microorganisms in Bornean tropical forests (en línea). Ecological Research 29(3):371-381. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11284-014-1144-3>.

Fujisaki, K; Chevallier, T; Chapuis-Lardy, L; Albrecht, A; Razafimbelo, T; Masse, D; Ndour, YB; Chotte, J-L. 2018. Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis A R T I C L E I N F O (en línea). Agriculture, Ecosystems and Environment 259:147-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.008>.

Fujisaki, K; Perrin, AS; Garric, B; Balesdent, J; Brossard, M. 2017. Soil organic carbon changes after deforestation and agrosystem establishment in Amazonia: An assessment by diachronic approach. Agriculture, Ecosystems and Environment 245(November 2016):63-73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.011>.

Furcal-Beriguete, P. (2018). Fertilización del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L) en un cantón de la Región Huetar Norte de Costa Rica. San Carlos, s.e.

García, J. 2000. Introducción a los plaguicidas. San José, EUNED.

Garita, R. 2014. La Piña. 1 ed. Cartago, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 568 p.

George, A. 2007. Estudio comparativo de indicadores de calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica. s.l., Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 121 p.

Gnanavelrajah, N; Shrestha, RP; Schmidt-Vogt, D; Samarakoon, L. 2008. Carbon stock assessment and soil carbon management in agricultural land-uses in Thailand. *Land Degradation and Development* 19(3):242-256. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.838>.

Gomes, JBV; Silva, CA; Ferreira, TL de A; Ferreira, MM; Inda, AV; Curi, N. 2018. Carbon Stocks and Pools in Relation to the Texture of Kaolinitic Soils from the Brazilian East Coast (en línea). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 42:170260. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170260>.

Gómez-Calderón, N; Villagra-Mendoza, K; Solórzano-Quintana, M. 2018. La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria) (en línea). *Revista Tecnología en Marcha* 31(1):170. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>.

Gómez, O; Chinchilla, R. (2005). Estudio taxonómico y mineralógico de los suelos de la cuenca del río Térraba a escala 1:50.000, provincias de Puntarenas y San José. San José, s.e.

González-Minero, FJ; Candau, J. 1997. The influence of tree roots on soil (en línea). *Lagascalia* 19(1-2):513-520. DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.237.6.389>.

Granados-Cordero, A. 2018. Efecto de la aplicación de enmiendas líquidas en la fertilidad del suelo y el crecimiento de piña (*Ananas comosus* (L) Merr. híbrido MD-2 en Venecia de San Carlos, Alajuela. s.l., Universidad de Costa Rica. 73 p.

Gregorich, EG; Carter, MR. 1997. Soil quality for crop production and ecosystem health. s.l., Elsevier. 465 p.

Guido, M. (1983). La piña. Managua, s.e.

Guinto, DF; Inciong, MM. 2012. Soil quality, management practices and sustainability of pineapple farms in Cavite, Philippines: Part 1. Soil quality. *Journal of South Pacific Agriculture* 16(1):30-41.

Guo, LB; Gifford, RM. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis (en línea). *Global Change Biology* 8(4):345-360. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>.

Hassink, J. (1997). The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles (en línea). 191. s.l., Kluwer Academic Publishers. Consultado 3 dic. 2018. Disponible en <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FA%3A1004213929699.pdf>.

Hepton, A. 2003. Cultural System. *In Bartholomew, D; Paull, R; Rohrbach, R (ed.)*. New York, NY, CABI Publishing. p. 109-142.

Hermawan, B; Bomke, AA. 1997. Effects of winter cover crops and successive spring tillage on soil aggregation (en línea). *Soil and Tillage Research* 44(1-2):109-120. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00043-3).

Holdridge, LR. 1987. Ecología basada en zonas de vida (Ecology based on life zones) (en línea). s.l., Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 216 p. Consultado 15 jun. 2019. Disponible en <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DO2003100523>.

Holdridge, LR; Grenke, W.; Hatheway, W.; Liang, T; Tosi, JA. 1971. Forest environments in tropical life zones, a pilot study. Oxford, Pergamon Press. 747 p.

Horneck, D; Miller, R. 1998. Determination of total nitrogen in plant tissue. *In Kalra, Y (ed.)*. s.l., Analysis Council Inc. and CRC Press. p. 75-83.

Huang, W; Zong, M; Fan, Z; Feng, Y; Li, S; Duan, C; Li, H. 2021. Determining the impacts of deforestation and corn cultivation on soil quality in tropical acidic red soils using a soil quality index (en línea). *Ecological Indicators* 125:107580. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107580>.

Husson, O. 2013. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy (en línea). *Plant and Soil* 362(1-2):389-417. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7>.

Ingram, JSI; Fernandes, ECM. 2001. Managing carbon sequestration in soils: Concepts and terminology (en línea). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 87(1):111-117. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00145-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00145-1).

Iwasaki, S; Endo, Y; Hatano, R. 2017. The effect of organic matter application on carbon sequestration and soil fertility in upland fields of different types of Andosols (en línea). *Soil Science and Plant Nutrition* 63(2):200-220. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.2017.1309255>.

J. W., D; A. J., J. (1996). *Methods for Assessing Soil Quality*. s.l., s.e.

Jeyanny, V; Husni, MHA; Rasidah, KW; Kumar, BS; Arifin, A; Hisham, MK. 2014. Carbon stocks in different carbon pools of a tropical lowland forest and a montane forest with varying topography. *Journal of Tropical Forest Science* 26(4):560-571.

Jimenez, J. 1999. *Manual práctico para el cultivo de piña de exportación*. 1 ed. Cartago, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 222 p.

Juo, A; Franzluebbers, K. 2003. *Tropical Soils - Properties and Management for Sustainable Agriculture*. (en línea). s.l., Oxford University Press. 280 p. Disponible en <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpTSPMSA01/tropical-soils-properties/tropical-soils-properties>.

Kaiser, HF. 1960. The Application of Electronic Computers to Factor Analysis (en línea). *Educational and Psychological Measurement* 20(1):141-151. DOI:

<https://doi.org/10.1177/001316446002000116>.

Karlen, D; Gardner, J; Rosek, M. 1998. A soil quality framework for evaluating the impact of CRP. *Journal of Production Agriculture* 11:56-60.

Karlen, DL; Andrews, SS; Doran, JW. 2004. Soil quality: Current concepts and applications (en línea). s.l., Academic Press, vol.74. p. 1-40 DOI: [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(01\)74029-1](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(01)74029-1).

Karlen, DL; Andrews, SS; Wienhold, BJ; Zobeck, TM. 2008. Soil Quality Assessment: Past, Present and Future (en línea). *J. Integr. Biosci.* 6(1):3-14. Consultado 23 jun. 2019. Disponible en <http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub><http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1203>.

Karlen, DL; Ditzler, CA; Andrews, SS. 2003. Soil quality: Why and how? (en línea). *Geoderma* 114(3-4):145-156. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9).

Karlen, DL; Mausbach, MJ; Doran, JW; Cline, RG; Harris, RF; Schuman, GE. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial) (en línea). *Soil Science Society of America Journal* 61(1):4. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>.

Kemper, WD; Rosenau, RC. 1986. Aggregate Stability and Size Distribution' (en línea). *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods* 9(9):425-442. Disponible en <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/732/3/585.pdf>.

Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. *In Klute, A (ed.)*. Madison, WI, Elsevier. p. 635–662.

Kome, GK; Enang, RK; Yerima, BPK. 2021. Soil Organic Carbon Distribution in a Humid Tropical Plain of Cameroon: Interrelationships with Soil Properties (en línea). *Applied and Environmental Soil Science* 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6052513>.

Kursa, MB; Rudnicki, WR. 2010. Feature Selection with the Boruta Package (en línea).

Journal of Statistical Software 36(11):1-13. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i11>.

Laishram, J; Saxena, K.; Maikhuri, RK; Rao, KS. 2012. Soil quality and soil health : A review . Soil Quality and Soil Health : A Review. International Journal of Ecology and Environmental Sciences 38(1):19-37.

Laishram, J; Saxena, KG; Maikhuri, RK; Rao, KS. 2012. Soil Quality and Soil Health : A Review. International Journal of Ecology and Environmental Sciences 38(1):19-37.

Lal, R. 2005. Forest soils and carbon sequestration (en línea). Forest Ecology and Management 220(1-3):242-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>.

Lal, R. 2008. Carbon sequestration (en línea). Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 363(1492):815-830. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>.

Lal, R. 2008. Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools (en línea). Energy & Environmental Science 1(1):86. DOI: <https://doi.org/10.1039/b809492f>.

Lal, R. 2011. Organic Matter, Effects on Soil Physical Properties and Processes (en línea). In *Gliński, J; Horabik, J; Lipiec, J (eds.)*. Dordrecht, Springer Netherlands. p. 528-534
DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_102.

Lal, R. 2014. Societal value of soil carbon (en línea). Journal of Soil and Water Conservation 69(6):186A-192A. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.69.6.186A>.

Lal, R. 2016. Soil health and carbon management. Food and Energy Security 5(4):212-222. DOI: <https://doi.org/10.1002/fes3.96>.

Lalitha, M; Thilagam, V; Balakrishnan, N; Mansour, M. 2010. Effect of Plastic Mulch on Soil Properties and Crop Growth - A Review. Agricultural Reviews 31(2):145-149.

Lan, G; Li, Y; Jatoi, MT; Tan, Z; Wu, Z; Xie, G. 2017. Change in Soil Microbial Community Compositions and Diversity Following the Conversion of Tropical Forest to Rubber Plantations in Xishuangbanna, Southwest China (en línea). Tropical Conservation

Science 10:194008291773323. DOI: <https://doi.org/10.1177/1940082917733230>.

Lawrence, CR; Harden, JW; Xu, X; Schulz, MS; Trumbore, SE. 2015. Long-term controls on soil organic carbon with depth and time: A case study from the Cowlitz River Chronosequence, WA USA (en línea). *Geoderma* 247-248:73-87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.02.005>.

Lefèvre, C; Rekik, F; Alcantara, V; Wiese, L. (2017). *Soil organic carbon: the hidden potential*. Roma, s.e.

Li, D; Niu, S; Luo, Y. 2012. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis (en línea). *New Phytologist* 195(1):172-181. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04150.x>.

Liptzin, D; Silver, WL; Detto, M. 2011. Temporal Dynamics in Soil Oxygen and Greenhouse Gases in Two Humid Tropical Forests (en línea). *Ecosystems* 14(2):171-182. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9402-x>.

Liu, X; Zhang, W; Wu, M; Ye, Y; Wang, K; Li, D. 2019. Changes in soil nitrogen stocks following vegetation restoration in a typical karst catchment (en línea). *Land Degradation & Development* 30(1):60-72. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3204>.

Lorenz, K; Lal, R. 2005. The Depth Distribution of Soil Organic Carbon in Relation to Land Use and Management and the Potential of Carbon Sequestration in Subsoil Horizons (en línea). s.l., s.e., vol.88. p. 35-66 DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88002-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88002-2).

Lüdecke, D; Ben-Shachar, M; Patil, I; Waggoner, P; Makowski, D. 2021. performance: An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical Models (en línea). *Journal of Open Source Software* 6(60):3139. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.03139>.

Luo, Z; Viscarra-Rossel, RA; Qian, T. 2021. Similar importance of edaphic and climatic factors for controlling soil organic carbon stocks of the world (en línea). *Biogeosciences* 18(6):2063-2073. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-18-2063-2021>.

MAG. 2010. *Manual de buenas prácticas agrícolas para la producción de Piña*. Manual de

Buenas Prácticas Agrícolas para la Producción de Piña (*Ananas comosus* L.). s.l., s.e. 136 p.

Maglianesi Sandoz, MA. 2013. Desarrollo de las Piñeras en Costa Rica y sus Impactos sobre Ecosistemas Naturales y Agro-Urbanos (en línea). *Biocenosis* 27(1-2):62-70.

Disponible en

<https://investiga.uned.ac.cr/revistas/index.php/biocenosis/article/view/611/507>.

_____. 2013. Desarrollo de las Piñeras en Costa Rica y sus Impactos sobre Ecosistemas Naturales y Agro-Urbanos (en línea). *Biocenosis* 27(1-2):62-70. Consultado 1 may 2020. Disponible en <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/biocenosis/article/view/611/507>.

Mansfeldt, T. 2003. In situ long-term redox potential measurements in a dyked marsh soil (en línea). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166(2):210-219. DOI:

<https://doi.org/10.1002/jpln.200390031>.

Marshall, JS. 2007. The Geomorphology and Physiographic Provinces of Central America. *In Bundschuh, J; Alvarado, G (eds.)*. Boca Raton, Fla, CRC Press. p. 51.

Martínez, EH; Fuentes, JP; Acevedo, EH. 2008. Carbono Orgánico Y Propiedades Del Suelo (en línea). *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 8(1):68-96. DOI:

<https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>.

Mata, R; Rosales, A; Vásquez, A; Sandoval, D. 2013. Mapa de Subórdenes de Suelos de Costa Rica. San José, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.

Matus, F; Garrido, E; Hidalgo, C; Paz, F; Etchevers, J; Merino, C; Báez, A. 2016. Carbon saturation in the silt and clay particles in soils with contrasting mineralogy. *Terra Latinoamericana* 34(3):311-319.

Matus, FJ. 2021. Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta-analysis (en línea). *Scientific Reports* 11(1):6438. DOI:

<https://doi.org/10.1038/s41598-021-84821-6>.

Mayer, M; Prescott, CE; Abaker, WEA; Augusto, L; Cécillon, L; Ferreira, GWD; James, J;

Jandl, R; Katzensteiner, K; Laclau, J-P; Laganière, J; Nouvellon, Y; Paré, D; Stanturf, JA; Vanguelova, EI; Vesterdal, L. 2020. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis (en línea). *Forest Ecology and Management* 466:118127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>.

Mcbratney, AB; Odeh, IOA. (1997). Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions (en línea). 77. s.l., ELSEVIER. Consultado 15 jun. 2019. Disponible en <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.409.3691&rep=rep1&type=pdf>.

Méndez, J; Bertsch, F. 2012. Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos en Costa Rica. 1era ed. San José, ACCS. 108 p.

Méndez, JC. 2012. Estudio de la fertilidad de los suelos de Costa Rica con base en registros de los análisis del laboratorio de suelos y foliares del CIA/UCR durante el período 2006-2010. s.l., Universidad de Costa Rica. 162 p.

Miranda-Ortiz, RI. 2013. Evaluación de dosis y fuentes de enmiendas calcáreas en la fertilidad del suelo y el crecimiento de piña en Finca Tres Amigos, Pital, San Carlos. s.l., Instituto Tecnológico de Costa Rica. .

Mirsal, IA. 2004. The Origin of Soil (en línea). Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg. p. 2-9 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-05400-0_1.

Montiel-Segura, MA. 2015. Use of agrochemicals in intensive pineapple production in Costa Rica. *Ciencias Naturales* 15(25):183-195.

Morris, SJ; Bohm, S; Haile-mariam, S; Paul, EA. 2007. Evaluation of carbon accrual in afforested agricultural soils (en línea). *Global Change Biology* 13(6):1145-1156. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01359.x>.

Mukherjee, A; Lal, R. 2014. Comparison of Soil Quality Index Using Three Methods (en línea). *PLoS ONE* 9(8):e105981. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105981>.

Natural Resources Conservation Service. 2018. NRCS Soils (en línea). *Soils* 67(7):819-

825. DOI: <https://doi.org/10.1001/archneurol.2010.144>.Dietary.

Ngaba, MJY; Ma, X-Q; Hu, Y-L. 2020. Variability of soil carbon and nitrogen stocks after conversion of natural forest to plantations in Eastern China (en línea). *PeerJ* 8(1):e8377.

DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.8377>.

Oliveira, C V.; Vicente, LC; Gama-Rodrigues, EF; Gama-Rodrigues, AC; Marques, JRB; Barreto-Garcia, PAB. 2019. Carbon and nitrogen stock of Acrisols and Nitisols in South Bahia, Brazil (en línea). *Geoderma Regional* 16(April 2020):e00218. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00218>.

Palm, C; Blanco-Canqui, H; DeClerck, F; Gatere, L; Grace, P. 2014. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview (en línea). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 187:87-105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>.

Parisi, V; Menta, C; Gardi, C; Jacomini, C; Mozzanica, E. 2005. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy (en línea). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 105(1-2):323-333. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.02.002>.

Parras-Alcántara, L; Lozano-García, B; Brevik, EC; Cerdá, A. 2015. Soil organic carbon stocks assessment in Mediterranean natural areas: A comparison of entire soil profiles and soil control sections (en línea). *Journal of Environmental Management* 155:219-228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.039>.

Paustian, K; Andrén, O; Janzen, HH; Lal, R; Smith, P; Tian, G; Tiessen, H; Noordwijk, M; Wooster, PL. 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions (en línea). *Soil Use and Management* 13(s4):230-244. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1997.tb00594.x>.

Peña, EA; Slate, EH. 2006. Global Validation of Linear Model Assumptions (en línea).

Journal of the American Statistical Association 101(473):341-354. DOI:

<https://doi.org/10.1198/016214505000000637>.

Périeré, C; Ouimet, R. 2008. Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in

- boreal forest soils (en línea). *Canadian Journal of Soil Science* 88(3):315-325. DOI: <https://doi.org/10.4141/CJSS06008>.
- Piñeiro, G; Paruelo, JM; Oesterheld, M; Jobbágy, EG. 2010. Pathways of Grazing Effects on Soil Organic Carbon and Nitrogen (en línea). *Rangeland Ecology & Management* 63(1):109-119. DOI: <https://doi.org/10.2111/08-255.1>.
- Porras, CM. 2006. Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba-Jiménez, Costa Rica (en línea). s.l., Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 131 p. Consultado 16 jun. 2021. Disponible en http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4881/Efecto_de_los_sistemas_agroforestales_de_cafe_organico.pdf;jsessionid=C3DE29B1033C0C4502C0FA08C605FACC?sequence=1.
- Post, WM; Pastor, J; Zinke, PJ; Stangenberger, AG. 1985. Global patterns of soil nitrogen storage (en línea). *Nature* 317(6038):613-616. DOI: <https://doi.org/10.1038/317613a0>.
- Powers, JS. 2004. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in northeastern Costa Rica. *Ecosystems* 7(2):134-146. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0123-2>.
- Powers, JS. 2004. Changes in Soil Carbon and Nitrogen after Contrasting Land-use Transitions in Northeastern Costa Rica (en línea). *Ecosystems* 7(2):134-146. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0123-2>.
- Powers, JS; Schlesinger, WH. 2002. Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forests of northeastern Costa Rica (en línea). *Geoderma* 109(3-4):165-190. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00147-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00147-7).
- Powers, JS; Veldkamp, E. 2005. Regional variation in soil carbon and $\delta^{13}\text{C}$ in forests and pastures of northeastern Costa Rica (en línea). *Biogeochemistry* 72(3):315-336. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0368-7>.
- Pulido-Moncada, MA; Lobo-Lujan, D; Lozano-Perez, Z. 2009. Association Between Soil

Structure Stability Indicators and Organic Matter in Venezuelan Agricultural Soils.

Agrociencia 43(3):221-230.

Quijandría, G; Berrocal, J; Pratt, L. (1997). La industria de la piña en Costa Rica Análisis de Sostenibilidad. s.l., s.e.

Raiche, G. 2013. Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research (en línea). s.l., s.e. p. 1-433. Consultado 20 jun. 2021. Disponible en <https://personality-project.org/r/psych/>.

Rangel-Peraza, JG; Padilla-Gasca, E; López-Corrales, R; Medina, JR; Bustos-Terrones, Y; Amabilis-Sosa, LE; Rodríguez-Mata, AE; Osuna-Enciso, T. 2017. Robust Soil Quality Index for Tropical Soils Influenced by Agricultural Activities (en línea). Journal of Agricultural Chemistry and Environment 06(04):199-221. DOI: <https://doi.org/10.4236/jacen.2017.64014>.

Razafimbelo, T; Chevallier, T; Albrecht, A; Chapuis-Lardy, L; Rakotondrasolo, FN; Michellon, R; Rabeharisoa, L; Bernoux, M. 2013. Texture and organic carbon contents do not impact amount of carbon protected in Malagasy soils (en línea). Scientia Agricola 70(3):204-208. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000300009>.

Reinhart, KO; Vermeire, LT. 2016. Soil Aggregate Stability and Grassland Productivity Associations in a Northern Mixed-Grass Prairie (en línea). PLOS ONE 11(7):e0160262. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160262>.

Reyna-Bowen, L; Lasota, J; Vera-Montenegro, L; Vera-Montenegro, B; Błońska, E. 2019. Distribution and Factors Influencing Organic Carbon Stock in Mountain Soils in Babia Góra National Park, Poland (en línea). Applied Sciences 9(15):3070. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9153070>.

Reyna-Bowen, L; Vera-Montenegro, L; Reyna, L. 2018. Soil-Organic-Carbon Concentration and Storage under Different Land Uses in the Carrizal-Chone Valley in Ecuador (en línea). Applied Sciences 9(1):45. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9010045>.

Robert, M. (2001). Soil carbon sequestration for improved land management (en línea). s.l.,

s.e. Consultado 2 dic. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-bl001e.pdf>.

Rodríguez-Gómez, J. 2010. Efecto de fuentes de nitrógeno de origen orgánico a diferentes dosis en el cultivo de piña (*Ananas comosus* (L.) Merr. híbrido MD-2 cultivado bajo técnicas orgánicas. s.l., Instituto Tecnológico de Costa Rica. 93 p.

Rojas-Ramírez, J. 2019. Efecto de la fertilización post forzamiento sobre la calidad y el rendimiento de la fruta de piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.) híbrido MD-2 Alajuela, Costa Rica (en línea). s.l., Instituto Tecnológico de Costa Rica. . Disponible en https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9888/modelacion_hidrologica_cuenca_medio_rio_abangares_guanacaste.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Rojas, L; Camacho, G. 2004. Piña(*Ananas comosus* L . MERR) sembrada en labranza mínima y convencional en San Carlos, Costa Rica (en línea). *Agronomía Mesoamericana* 15(2):161-172. Consultado 8 oct. 2018. Disponible en http://www.mag.go.cr/rev_meso/v15n02_161.pdf.

Rojas, L; Camacho, G. 2004. Piña (*Ananas comosus* L. MERR) sembrada en labranza mínima y labranza convencional en San Carlos, Costa Rica (en línea). *Agronomía mesoamericana* 15(2):161-172. Consultado 29 jun. 2019. Disponible en http://www.mag.go.cr/rev_meso/v15n02_161.pdf.

RStudio Team. 2020. Integrated Development for R. (en línea). Boston, MA, s.e. Disponible en <http://www.rstudio.com/>.

Salazar, O. 2008. Plantaciones de piña en Costa Rica contra la sostenibilidad ecológica y social. *Ambientico* 177(149-214):13-14. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

Samitha, KA; Sivalingam, R; Sandeep, S. 2018. Assessing Soil quality in Pineapple (*Ananas comosus*) cultivated areas of Ernakulam district. 6(4):321-326.

Sánchez-Marañón, M; Soriano, M; Delgado, G; Delgado, R. 2002. Soil Quality in Mediterranean Mountain Environments (en línea). *Soil Science Society of America Journal* 66(3):948. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.9480>.

Santana, M da S; Sampaio, EV de SB; Giongo, V; Menezes, RSC; Jesus, KN de; Albuquerque, ERGM de; Nascimento, DM do; Pareyn, FGC; Cunha, TJJ; Sampaio, RMB; Primo, DC. 2019. Carbon and nitrogen stocks of soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil (en línea). *Geoderma Regional* 16:e00205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00205>.

Scharlemann, JPW; Tanner, EVJ; Hiederer, R; Kapos, V. 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool (en línea). *Carbon Management* 5(1):81-91. DOI: <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>.

Schlesinger, WH. 1990. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils (en línea). *Nature* 348(6298):232-234. DOI: <https://doi.org/10.1038/348232a0>.

Schlesinger, WH; Bernhardt, ES. (2013). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change* (en línea). s.l., s.e. Consultado 2 dic. 2018. Disponible en <https://sites.duke.edu/biogeochemistry2015/files/2015/08/3rd-edition-BGC-through-Ch-2.pdf>.

Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC; Soil Survey Staff. 2012. *Field Book for Describing and Sampling Soils, Version 3.0*. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center, Lincoln, NE. (en línea). Natl. Soil Surv. Ctr., Lincoln, NE (September). Disponible en <https://books.google.com/books?hl=it&lr=&id=nmfK6wJuIs8C&pgis=1>.

Schoenholtz, S.; Miegroet, HV; Burger, J. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities (en línea). *Forest Ecology and Management* 138(1-3):335-356. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0).

Schroth, G; D'Angelo, SA; Teixeira, WG; Haag, D; Lieberei, R. 2002. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years (en línea). *Forest Ecology and Management* 163(1-3):131-150. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00537-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00537-0).

Schwartz, R. 1998. Reactive transport of tracers in a fines textured Ultisol. s.l., Texas A&M University. 183 p.

Scott, NA; Cole, CV; Elliott, ET; Huffman, SA. 1996. Soil Textural Control on Decomposition and Soil Organic Matter Dynamics (en línea). Soil Science Society of America Journal 60(4):1102-1109. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000040020x>.

Sexstone, AJ; Revsbech, NP; Parkin, TB; Tiedje, JM. 1985. Direct Measurement of Oxygen Profiles and Denitrification Rates in Soil Aggregates. Soil Science Society of America Journal 49(3):645-651. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900030024x>.

Shepherd, TG; Saggar, S; Newman, RH; Ross, CW; Dando, JL. 2001. Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils (en línea). Soil Research 39(3):465. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR00018>.

Sherman, LA; Brye, KR. 2019. Soil Chemical Property Changes in Response to Long-Term Pineapple Cultivation in Costa Rica (en línea). Agrosystems, Geosciences & Environment 2(1):1-9. DOI: <https://doi.org/10.2134/age2019.07.0052>.

Sibaja-Matarrita, R; Barboza-Chinchilla, L; Rojas, C. 2017. ¿Pueden los micetozoos ser usados como indicadores de salud del suelo en el contexto agrícola de Costa Rica? (en línea). Revista de Ciencias Ambientales 52(1):161. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.52-1.9>.

Silva, DM da; Fonte, NDS da; Souza, KRD de; Rodrigues-Brandão, I; Libeck, IT; Alves, JD. 2017. Relationship between manganese toxicity and waterlogging tolerance in *Zea mays* L. cv. Saracura (en línea). Acta Scientiarum. Agronomy 39(1):75-82. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i1.30997>.

Sisti, CPJ; dos Santos, HP; Kohhann, R; Alves, BJR; Urquiaga, S; Boddey, RM. 2004. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil (en línea). Soil and Tillage Research 76(1):39-58. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.still.2003.08.007>.

Six, J; Bossuyt, H; Degryze, S; Denef, K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics (en línea). *Soil and Tillage Research* 79(1):7-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>.

Six, J; Conant, RT; Paul, EA; Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils (en línea). s.l., s.e., vol.241. p. 155-176 DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

Six, J; Paustian, K; Elliott, ET; Combrink, C. 2000. Soil Structure and Organic Matter (en línea). *Soil Science Society of America Journal* 64(2):681. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642681x>.

Soil Survey Staff. (2014). *Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. s.l., s.e.

_____. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. Washington, USDA-Natural Resources Conservation Service, vol.12. p. 327-328.

Solano, J; Villalobos, R. (2012). *Regiones y sub-regiones climáticas de Costa Rica* (en línea). s.l., s.e. Consultado 12 jul. 2019. Disponible en <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalización+climática+de+Costa+Rica>.

Sollins, P; Homann, P; Caldwell, BA. 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls (en línea). *Geoderma* 74(1-2):65-105. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00036-5).

Søndergaard, M. 2009. Redox Potential (en línea). *Encyclopedia of Inland Waters* :852-859. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00115-0>.

Spain, A. 1990. Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on the carbon and nitrogen contents of some tropical Australian rainforest soils (en línea). *Soil Research* 28(6):825. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR9900825>.

Stefanoski, DC; Figueiredo, CC de; Santos, GG; Marchão, RL. 2016. Selecting soil quality indicators for different soil management systems in the Brazilian Cerrado (en línea). *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51(9):1643-1651. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900064>.

Steinmetz, Z; Wollmann, C; Schaefer, M; Buchmann, C; David, J; Tröger, J; Muñoz, K; Frör, O; Schaumann, GE. 2016. Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? (en línea). *Science of The Total Environment* 550:690-705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.153>.

Tifafi, M; Guenet, B; Hatté, C. 2018. Large Differences in Global and Regional Total Soil Carbon Stock Estimates Based on SoilGrids, HWSD, and NCSCD: Intercomparison and Evaluation Based on Field Data From USA, England, Wales, and France Large Differences in Global and Regional Total Soil Carbon Stock Estimates Based on SoilGrids, HWSD, and NCSCD: Intercomparison and Evaluation Based on Field Data From USA, England, Wales, and France. *Global Biogeochemical Cycles* (en línea). 32(1). DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GB005678i>.

Toral, M. 2013. Acolchado plástico como práctica para reducir la erosión hídrica en cambisoles cultivados con piña (*Ananas comosus* var. *comosus*) en México. s.l., s.e.

Trivedi, P; Singh, BP; Singh, BK. 2018. Soil Carbon (en línea). s.l., Elsevier. p. 1-28 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812766-7.00001-9>.

Udvardi, M; Below, FE; Castellano, MJ; Eagle, AJ; Giller, KE; Ladha, JK; Liu, X; Maaz, TMC; Nova-Franco, B; Raghuram, N; Robertson, GP; Roy, S; Saha, M; Schmidt, S; Tegeder, M; York, LM; Peters, JW. 2021. A Research Road Map for Responsible Use of Agricultural Nitrogen. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5(May):1-18. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.660155>.

Valerio-Valerio, J. 2013. Efecto de encalado en arroz (*Oryza sativa*) en un ultisol con problemas de acidez de la zona norte del país. s.l., Universidad de Costa Rica. 89 p.

Vallejo, V. 2013. Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante

el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles (en línea). Colombia forestal 16(1):83-99. Consultado 7 jul. 2019. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v16n1/v16n1a06.pdf>.

Vance, ED; Brookes, PC; Jenkinson, DS. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C (en línea). Soil Biology and Biochemistry 19(6):703-707. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6).

VandenBygaart, A; Janzen, H; Bremer, E; Ellert, B. 2007. Measuring Change in Soil Organic Carbon Storage (en línea). s.l., CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420005271.ch3>.

VandenBygaart, AJ; Gregorich, EG; Angers, DA; McConkey, BG. 2007. Assessment of the lateral and vertical variability of soil organic carbon (en línea). Canadian Journal of Soil Science 87(4):433-444. DOI: <https://doi.org/10.4141/CJSS06025>.

Vargas, G. 1992. Las Formaciones vegetales de Costa Rica: un Estudio Ecológico Regional. Revista Geográfica (116):113-136.

Vashisht, BB; Maharjan, B; Sharma, S; Kaur, S. 2020. Soil Quality and Its Potential Indicators under Different Land Use Systems in the Shivaliks of Indian Punjab (en línea). Sustainability 12(8):3490. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12083490>.

Vásquez-Jiménez, J Bartholomew, D. 2018. The pineapple: botany, production and uses (en línea). Sanewski, GM; Bartholomew, DP; Paull, RE (eds.). Wallingford, CABI. DOI: <https://doi.org/10.1079/9781786393302.0000>.

Vasu, D; Singh, SK; Ray, SK; Duraisami, VP; Tiwary, P; Chandran, P; Nimkar, AM; Anantwar, SG. 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India (en línea). Geoderma 282:70-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010>.

Villareal-Nuñez, J; Plas-Sentis, L; Agudo-Martínez, L; Villaláz-Pérez, J; Rosales, F; Pocasangre, L. 2013. Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. Agronomía mesoamericana 24(2):301-315.

- Vitousek, P; Howarth, R. 1991. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? (en línea). *Biogeochemistry* 13(2):87-115. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00002772>.
- Wagai, R; Kajiura, M; Asano, M. 2020. Iron and aluminum association with microbially processed organic matter via meso-density aggregate formation across soils: organo-metallic glue hypothesis (en línea). DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-2020-32>.
- Wang, T; Kang, F; Cheng, X; Han, H; Ji, W. 2016. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a hilly ecological restoration area of North China (en línea). *Soil and Tillage Research* 163:176-184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.015>.
- Waswa, BS; Vlek, PLG; Tamene, LD; Okoth, P; Mbakaya, D; Zingore, S. 2013. Evaluating indicators of land degradation in smallholder farming systems of western Kenya (en línea). *Geoderma* 195-196:192-200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.007>.
- Wei, T; Simko, V; Levy, M; Xie, Y; Jin, Y; Zemla, J. 2017. R package «corrplot»: Visualization of a Correlation Matrix (en línea). *Statistician* 56:316-324. Consultado 4 feb. 2021. Disponible en <https://github.com/taiyun/corrplot> <https://github.com/taiyun/corrplot/issues>.
- Whitbread, AM. 1995. Soil Organic Matter : Its Fractionation and Role in Soil Structure (en línea). *In Soil organic matter management for sustainable agriculture: A workshop held in Ubon, Thailand, 24-26 August 1994*. s.l., s.e. p. 124-130 DOI: <https://doi.org/1-86320-139-4>.
- WingChing Jones, R; Uribe Lorío, L. 2016. Biomasa y actividad microbiana en suelos de uso ganadero y en regeneración de bosque. *Cuadernos de Investigación UNED* 8(1):107-113.
- Yimer, F; Ledin, S; Abdelkadir, A. 2006. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia (en línea). *Geoderma* 135:335-344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.01.005>.

Yu, P; Liu, S; Zhang, L; Li, Q; Zhou, D. 2018. Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China (en línea). *Science of the Total Environment* 616:564-571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.301>.

Zhang, C; Liu, G; Xue, S; Sun, C. 2013. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China. *European Journal of Soil Biology* 54:16-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EJSOBI.2012.10.007>.

Zhang, Z; Furman, A. 2021. Soil redox dynamics under dynamic hydrologic regimes - A review (en línea). *s.l., s.e., vol.763. p. 143026* DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143026>.