

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES

**ALMACENAMIENTO DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO
BAJO COBERTURA DE PASTOS Y PLANTACIONES FORESTALES
JÓVENES DE *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Robx. EN LA
REGIÓN HUETAR NORTE, COSTA RICA**

Tesis con formato de artículo científico para optar por el grado de Licenciatura en
Ingeniería en Ciencias Forestales con énfasis en Manejo Forestal

Presentado por
Mónica Lizbeth Cortés Cortés

Campus Omar Dengo
Heredia, Costa Rica
Febrero, 2024

Almacenamiento de carbono orgánico del suelo bajo cobertura de pastos y plantaciones forestales jóvenes de *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Robx. en la Región Huetar Norte, Costa Rica.

Tesis con formato de artículo científico para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Ciencias Forestales con énfasis en Manejo Forestal

Miembros del tribunal examinador:

Ph. D. Martha Orozco Aceves
Representante de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

M.Sc. Melissa Blandón Naranjo
Representante de la Dirección de la EDECA

M. Sc. Rafael Murillo Cruz
Director del trabajo

Ph. D. Federico Alice Guier
Lector del trabajo

M. Sc. José Felix Rojas Marin
Lector del trabajo

Bach. Mónica Lizbeth Cortés Cortés
Postulante del trabajo

Dedicatoria

A quien ha estado desde mi primer respiro, tomó mi mano en mis primeros pasos y desde entonces ha guiado mi caminar. A vos, mami, quien con desvelos y trabajo duro me ha sacado adelante. A vos Luisa Cortés, quien me ha enseñado a servirle a los demás, darle la mejor cara a los momentos difíciles y a seguir luchando por mis sueños. Sos mi mayor ejemplo y motivación. Te dedico este trabajo con mucho amor.

A Dios que ha estado presente en cada etapa, buena o mala, trayendo paz y esperanza al corazón. Por sostener de diversas maneras y a través de distintas personas el ánimo constante de servirle y estudiar.

A mis sobrinos: Zoe Emilia, Matías Alejandro y José Tobías Cortés Parrales. Han estado desde el primer año de la universidad, trayendo mucho amor, abrazos y preguntas a esta tía que los ama.

A todos mis familiares que desde niña han creído en mí, espero haber trazado bien el camino para que sus hijos, nietos y sobrinos tengan pronto un título universitario. Con amor, a mi abuela Concha hasta el cielo; a mi papi (abuelo) Edwin y a mi tía Justina: gracias por darme herramientas para estudiar; a mi hermano José Cortés y mi cuñada Adriana Parrales: quienes a la distancia han estado presentes; a mi tía Cristina y tíos Gilberto, Heriberto y Rigoberto por su apoyo y preguntas constantes de mí que hacer.

A ustedes, queridos míos, les dedico este trabajo como un símbolo de mi agradecimiento por todo lo que han aportado a mi vida.

Les amo.

Agradecimiento

En el cierre de esta etapa de capacitación universitaria y de vida quiero extender mi agradecimiento:

A Rafael Ángel Murillo Cruz, gracias por confiar en mis habilidades, por acompañarme tan de cerca en este proceso universitario y traer en cada espacio diversas conversaciones que abrazan, cuestionan, animan y motivan a cambiar la realidad para subir de nivel.

Al equipo Pocosoleño formado por Ana Salazar, David Carvajal, Paula Poveda, Felipe Herrera, Fernando Ramírez y Johny Rodríguez: quienes se han mostrado amigos serviciales en todo el desarrollo de este trabajo. Les agradezco por abrazarlo como si fuera propio, por las historias compartidas en campo y por sus aportes acertados en pro de mejorarlo.

A mis amigas y amigos de la universidad y vida, especialmente a Karol Carrillo, Sileny Umaña, Allison Centeno y Jeison Rodríguez: son un regalo de Dios. Les agradezco por estar presentes con sus risas, preguntas, motivaciones y anuencia a celebrar o animar en estos años compartidos.

Al movimiento de Estudiantes Cristianos Unidos (ECU) y todos los amigos que forje ahí. Gracias por abrazar mis debilidades y abrir espacios para el servicio a Dios.

A las familias Gallegos, Blanco, Corrales y Carvajal que fueron hogar durante mi peregrinaje en este tiempo de tesis. Gracias por abrazar y creer en esta cruceña llena de sueños.

A los académicos Gustavo Vargas, Orlando Chinchilla y Pablo Villegas por abrir las puertas de sus proyectos y vidas, siendo claves en mi formación.

A mis lectores Federico Alice y José Rojas por sus aportes y preguntas acertadas en el proceso de esta investigación.

Al proyecto D-TREE por su apoyo técnico, económico y logístico brindado en la elaboración de esta investigación.

A la Universidad Nacional de Costa Rica, quien fue pilar en mis estudios por medio de todas las oportunidades y herramientas puestas a disposición de la población costarricense.

Índice general

Dedicatoria.....	1
Agradecimiento	2
Índice general	3
Índice de cuadros	4
Índice de figuras	4
Índice de apéndices.....	5
Lista de acrónimos.....	5
Resumen	6
Abstract.....	7
1. Introducción.....	8
2. Metodología.....	10
2.1 Área de estudio	10
2.2 Muestreo en plantaciones forestales	11
2.3 Muestreo en pastos adyacentes	12
2.4 Muestreo de densidad aparente y carbono en el suelo.....	12
2.5 Análisis de laboratorio	13
2.5.1 Densidad aparente	13
2.5.2 Pedregosidad	13
2.5.3 Carbono orgánico del suelo.....	14
2.6 Análisis de la información	14
2.6.1 Descripción dasométrica	14
2.6.2 Descripción de pastos y su cobertura	15
2.6.3 Determinación del carbono orgánico del suelo	16
2.6.4 Comparación del almacenamiento de carbono en los tres sistemas productivos. 16	
3. Resultados y discusión	17
3.1 Caracterización de la cobertura en plantaciones de teca y melina.....	17
3.2 Caracterización de la cobertura en pastos.....	19
3.3 COS en plantaciones de teca, melina y pastos adyacentes	22
3.4 Carbono orgánico, densidad aparente y profundidad del suelo	26
4. Conclusiones.....	30
5. Recomendaciones	30

6. Referencias	30
Apéndice.....	42

Índice de cuadros

Cuadro 1. Caracterización dasométrica de <i>Tectona grandis</i> L.f y <i>Gmelina arborea</i> Roxb. en plantaciones de tres y treinta y seis meses de edad en la región Huetar Norte, Costa Rica.	18
Cuadro 2. Abundancia, frecuencia, dominancia e índice de valor de importancia de las especies vegetales en pastos adyacentes a plantaciones forestales de <i>Tectona grandis</i> L.f.	20
Cuadro 3. Abundancia, frecuencia, dominancia e IVI de las especies vegetales en pastos adyacentes a plantaciones forestales de <i>Gmelina arborea</i> Roxb.	21
Cuadro 4. Comparación del carbono orgánico del suelo ($Mg*ha^{-1}$) en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> L.f y <i>Gmelina arborea</i> Roxb. de tres meses de edad contra pastos adyacentes según profundidad en la Región Huetar Norte de Costa Rica.....	24
Cuadro 5. Comparación del carbono orgánico del suelo ($Mg*ha^{-1}$) en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> L.f. y <i>Gmelina arborea</i> Roxb. de tres años de edad contra pastos adyacentes según profundidad, Región Huetar Norte de Costa Rica.....	25
Cuadro 6. Probabilidad estadística de diferencias en el carbono orgánico total del suelo (0-100 cm) entre <i>Tectona grandis</i> L.f y <i>Gmelina arborea</i> Roxb. de tres meses y tres años de edad en la Región Huetar Norte, Costa Rica.....	26
Cuadro 7. Densidad aparente para teca, melina y pasto según profundidad en la Región Huetar Norte, Costa Rica.....	29

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de las fincas de <i>Tectona grandis</i> L.f, <i>Gmelina arborea</i> Roxb. y pastos adyacentes muestreadas para carbono orgánico del suelo en la Región Huetar Norte de Costa Rica.	11
Figura 2. Muestreo de la densidad aparente y del carbono orgánico del suelo en cada punto de muestreo.....	13

Figura 3. Cobertura vegetal sobre el suelo (%) en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> L.f y <i>Gmelina arborea</i> Roxb. de tres meses y tres años de edad.	17
Figura 4. Cobertura (%) en fincas adyacentes a las plantaciones forestales de <i>Tectona grandis</i> L.f y <i>Gmelina arborea</i> Roxb. de tres meses y tres años de edad.	20
Figura 5. Relación del carbono orgánico del suelo (%) y la densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) según profundidad del suelo.	27
Figura 6. Carbono orgánico del suelo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en los sistemas productivos según profundidad, usando como referencia el valor de 10 cm de profundidad en cada rango estudiado.	28

Índice de apéndices

Apéndice 1. Abundancia, frecuencia, dominancia e IVI de las especies vegetales en pastos adyacentes a plantaciones de <i>Tectona grandis</i> L. de tres meses.	42
Apéndice 2. Abundancia, frecuencia, dominancia e IVI de las especies vegetales en pastos adyacentes a plantaciones de <i>Tectona grandis</i> L. de tres años.	42
Apéndice 3. Abundancia, frecuencia, dominancia e IVI de las especies vegetales en pastos adyacentes a plantaciones de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. de tres meses.	43
Apéndice 4. Abundancia, frecuencia, dominancia e IVI de las especies vegetales en pastos adyacentes a plantaciones de <i>Gmelina arborea</i> Roxb. de tres años.	44

Lista de acrónimos

COS: carbono orgánico del suelo

DA: densidad aparente

DAP: diámetro a la altura del pecho

GEI: gases de efecto invernadero

Almacenamiento de carbono orgánico del suelo bajo cobertura de pastos y plantaciones forestales jóvenes de *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Robx. en la Región Huetar Norte, Costa Rica

Soil organic carbon storage under pasture cover and young forest plantations of *Tectona grandis* L.f and *Gmelina arborea* Robx. in the Huetar Norte Región, Costa Rica

Mónica Lizbeth Cortés-Cortés

Resumen

[Introducción]: El carbono del suelo representa el 73.8 % de lo encontrado en ecosistemas terrestres, así el uso de la tierra afecta el equilibrio entre la entrada y la salida, mostrando pérdidas o ganancias. **[Objetivo]:** En el estudio se evaluó el carbono orgánico del suelo (COS) hasta una profundidad de 100 cm en pastos y plantaciones forestales jóvenes de *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Roxb. **[Metodología]:** Se obtuvo 144 muestras provenientes de ocho fincas de pasto, cuatro de teca y cuatro de melina, con edad de tres meses y tres años. La evaluación se realizó a tres profundidades. Se implementaron pruebas *t* de student para determinar diferencias estadísticas. En cada finca, se describió la vegetación sobre el suelo. **[Resultados]:** Las principales especies en pastos fueron *Hemarthria altissima*, *Ischaemum indicum* y *Homolepis aturensis*. A los tres meses, la teca y melina obtuvieron un COS de 270 y 278 Mg*ha⁻¹ que se redujo a 258 y 261 Mg*ha⁻¹ a los tres años. El carbono orgánico de los pastos adyacentes a las plantaciones forestales fue de 244, 245, 240 y 269 Mg*ha⁻¹, para teca y melina a tres meses y tres años, respectivamente. La profundidad de 0 a 30 cm presentó mayor contenido de carbono que la de 30-60 y 60-100 cm. Finalmente, el porcentaje de carbono orgánico tiende a disminuir conforme aumenta la densidad aparente. **[Conclusiones]:** No se encontraron diferencias entre los sistemas en la primera profundidad, donde la cobertura vegetal tiene un aporte inmediato al suelo.

Palabras claves: COS; melina; profundidad; sumidero; teca

Abstract

[Introduction]: Soil carbon represents 73.8 % of that found in terrestrial ecosystems and land use affects the balance between input and output, showing losses or gains. **[Objective]:** This study evaluated soil organic carbon (SOC) to a depth of 100 cm in pastures and young forest plantations of *Tectona grandis* L.f and *Gmelina arborea* Roxb. **[Methodology]:** A total of 144 samples were obtained from eight pasture, four teaks and four Gmelina farms aged 3 months and 3 years. The evaluation was carried out at three depths. Student's *t*-tests were used to determine statistical differences. On each farm, the above ground vegetation was described. **[Results]:** The main species in grasses were *Hemarthria altissima*, *Ischaemum indicum* and *Homolepis aturensis*. At three months' teak and melina obtained a SOC of 270 and 278 Mg*ha⁻¹ which was reduced to 258 and 261 Mg*ha⁻¹ at three years. The organic carbon of the pastures adjacent to the forest plantations was 244, 245, 240 and 269 Mg*ha⁻¹, for teak and melina at three months and three years, respectively. The depth from 0 to 30 cm presented higher carbon content than those from 30-60 and 60-100 cm. Finally, the percentage of organic carbon tends to decrease as the bulk density increases. **[Conclusions]:** No differences were found between the systems at the first depth, where the vegetation cover has an immediate contribution to the soil.

Keyword: Depths; melina; teak; SOC; sump

1. Introducción

El dióxido de carbono (CO₂) representa el 70 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en donde el 50 % emitido permanece en la atmósfera por treinta años, el 30 % por siglos y el 20 % por miles de años (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2014; Steinfeld *et al.* 2009). El carbono presente en la biosfera terrestre (biomasa) es de 550 petagramos (Pg); mientras que, en la parte subterránea (suelo), es de 1 550 Pg (Burbano, 2018; Martínez *et al.* 2008). Este último representa, aproximadamente, el 73.8 % de lo encontrado en ecosistemas terrestres.

El balance de carbono en el suelo se relaciona a las actividades biológicas, tasas de entrada del carbono orgánico (vegetal y animal) y a las salidas por descomposición y respiración de la actividad microbiana, lo que da como resultado que el carbono de sus tejidos se oxide en anhídrido carbónico (Burbano, 2018; Orellana *et al.* 2012). Ambas tasas de entrada actúan como fuente o sumidero de carbono (C) y determinan la capacidad de almacenamiento del carbono orgánico del suelo (COS) (Burbano, 2018; Clara *et al.* 2017). Estos procesos están influenciados por la temperatura del suelo y el contenido de agua, los cuales pueden generar la ruptura u oxidación de la materia orgánica (Burbano, 2018; Clara *et al.* 2017). El COS permite el mantenimiento y aumento de la fertilidad, del recurso hídrico, la conservación de biodiversidad, la producción de alimento, la mitigación del cambio climático y la resiliencia de los ecosistemas ante un clima cambiante, los cuales contribuyen a los objetivos de desarrollo sostenibles (Clara *et al.* 2017).

La acumulación del COS varía según el uso, el tipo de suelo y las condiciones climáticas (Clara *et al.* 2017); por lo tanto, el cambio en el uso de la tierra afecta el equilibrio entre la entrada y salida de C, mostrando pérdidas del COS en la capa superior (0-20 cm) y en el subsuelo (20-100 cm) (Sheng *et al.* 2015). Si en el proceso se realizan prácticas de manejo, la dinámica en el suelo se incrementa, generando variaciones en el almacenamiento (Amores, 2020) y provocando una disminución o acumulación de COS en el tiempo según la actividad (Martínez *et al.* 2008). El uso de fertilizantes inorgánicos, la quema de los restos de la cosecha y la labranza generan degradación física, química y biológica que provoca inestabilidad en la dinámica del carbono en el suelo (Amores, 2020; Lupi *et al.* 2007; Zamora *et al.* 2018). Por su parte, la labranza de conservación, el manejo de la biomasa residual, el

cultivo de cobertura y la rotación de cultivos benefician el incremento de la materia orgánica y el COS (Amores, 2020; Guo *et al.* 2020; Luan *et al.* 2019; Martínez *et al.* 2008).

De acuerdo con Guo y Gifford (2002), en un meta análisis se demostró que el COS disminuyó en un 12 % al pasar de pastos a plantaciones de coníferas, especialmente *Pinus radiata*. Asimismo, en Australia, para *Pinus radiata*, se mostró una reducción del 20 % del COS con respecto a un pasto natural adyacente (Guo *et al.* 2007); mientras que, en el suroeste de Costa Rica, al considerarse un bosque primario, plantación mixta nativa de teca (diez y doce años) y pasto, no se encontró diferencias estadísticamente significativas (Boley, 2005). Las zonas boreales, subtropicales y tropicales al cambiar de pastos a especies forestales de maderas duras, incluido el eucalipto, mostraron un aumento en las reservas totales de COS (Li *et al.* 2012). Los resultados de estos estudios muestran que el COS posterior al cambio de uso del suelo varía según los sistemas; por lo tanto, al pasar de pasto a plantaciones forestales, se registraron disminuciones, constancias y aumentos según la especie forestal, ubicación y condiciones biofísicas.

En cuanto a las plantaciones de *Tectona grandis* (teca) y *Gmelina arborea* (melina), así como los pastizales, se consideran actividades que tienen un impacto directo en el ciclo del carbono (Patiño *et al.* 2018; Pezo, 2018; López, 2017; Steinfeld *et al.* 2009). En Costa Rica, dichas especies forestales son las de mayor proporción e importancia comercial (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2015). En el 2019, inclusive, se reportó un área plantada de 48 929 y 14 966 ha para teca y melina, respectivamente (INEC, 2022), donde la Región Huetar Norte presenta la mayor área reforestada a nivel nacional (25 370 ha), y se resaltan los cantones de San Carlos y Los Chiles (Meza *et al.* 2019). Por su parte, en el país, los pastos abarcan el 43.4 % (1 044 909 ha) del área de las fincas y se distribuyen en pastos naturales (53.3 %), mejorados (44.6 %) y de corte (2.1 %) (INEC, 2015). La Región Huetar Norte representa la cuarta parte (280 778 ha) de los pastos reportados en el país (Ortiz, 2014).

No obstante, y a pesar de que el contenido del COS tiende a disminuir con la profundidad (Burbano, 2018), se debe tener en cuenta que los pastos desarrollan su sistema radicular en las primeras capas de la tierra, mientras que los árboles lo hacen en capas más profundas; debido a esto, es posible obtener ganancia en COS a mayor profundidad en

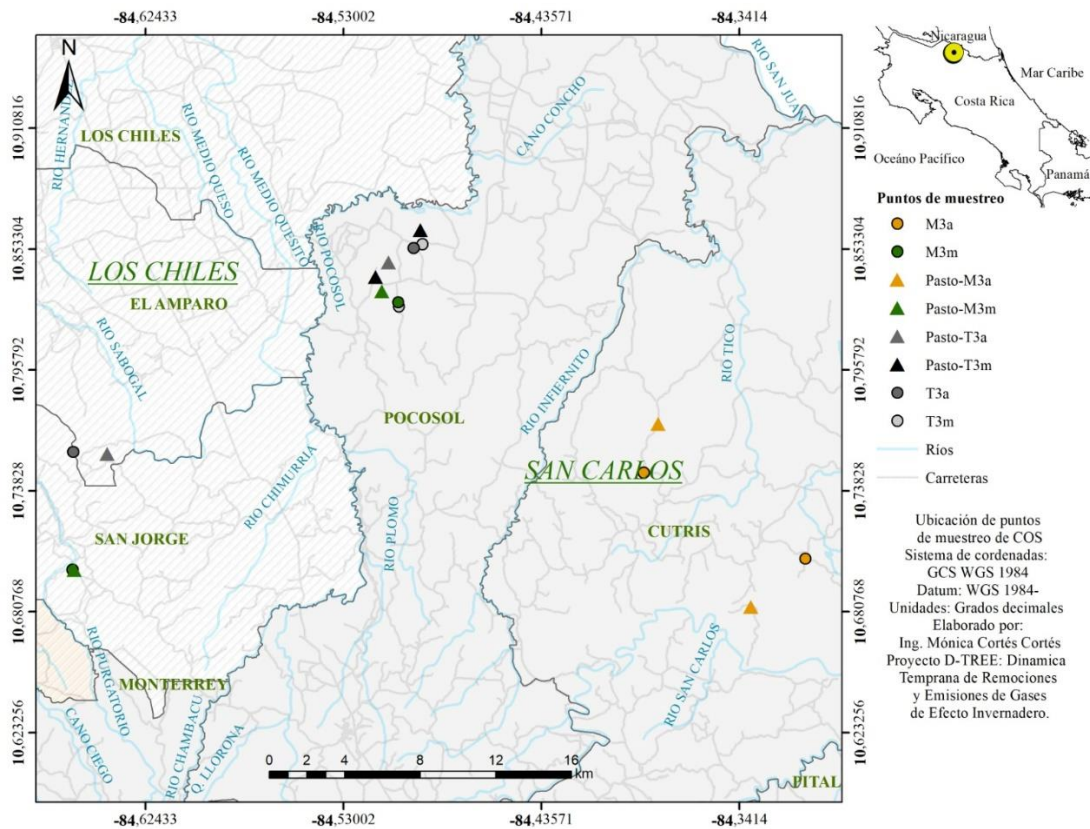
plantaciones forestales (Laganière *et al.* 2010). Los estudios realizados para determinar las diferencias del COS en el cambio de uso de suelo no deben ser extrapolados si las condiciones biofísicas son distintas (Powers *et al.* 2011); por lo tanto, en el presente estudio se evaluó el carbono orgánico del suelo hasta una profundidad de 100 cm en coberturas de pastos y plantaciones forestales jóvenes de *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Roxb. en la Región Huetar Norte de Costa Rica para determinar las diferencias entre estos sistemas productivos.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El muestreo se desarrolló en la Región Huetar Norte de Costa Rica, la cual representa el 19.2 % del territorio nacional. Las precipitaciones en esta zona oscilan entre los 2 000 y 5 000 mm anuales (MIDEPLAN, 2014) con una temperatura promedio entre 20 y 25° C (Valverde y Acuña, 2011) y una humedad relativa entre 80-90 % (Barrientos y Chaves, 2008). Predomina una vegetación compuesta por pastos, bosques, reforestación, charrales, tacotales, cultivos anuales y perennes (Comité Sectorial Regional Agropecuario [CSRA], 2015). Los suelos son del tipo inceptisol, andisol y, en mayor proporción, ultisol, cuyo uso se caracteriza en actividades agrícolas y ganaderas (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria [INTA], 2014).

Se seleccionaron 16 fincas ubicadas en los distritos de Cutris y Pocosol del cantón de San Carlos, así como San Jorge y El Amparo de Los Chiles (**Figura 1**). El muestreo se realizó en ocho fincas de plantaciones forestales distribuidas en dos de *Tectona grandis* L.f y de *Gmelina arborea* Roxb. para las edades de tres meses y tres años, así como en los pastos adyacentes (ocho fincas) a cada una de ellas. La plantación, y su pasto adyacente, presentaban características topográficas similares, a efecto de disponer de fincas apareadas (16 fincas) con el objetivo de hacer un análisis comparativo en el COS.



P: pasto; M: melina; T: teca; m: meses; a: años

Figura 1. Ubicación de las fincas de *Tectona grandis* L.f, *Gmelina arborea* Roxb. y pastos adyacentes muestreadas para carbono orgánico del suelo en la Región Huetar Norte de Costa Rica.

Figure 1. Location of *Tectona grandis* L.f, *Gmelina arborea* Roxb. and adjacent pastures sampled for soil organic carbon in the Northern Huetar Region of Costa Rica.

2.2 Muestreo en plantaciones forestales

En cada una de las fincas forestales, se instalaron tres parcelas circulares y temporales de 500 m². En las plantaciones de tres meses se midió la altura total (m) de los árboles con vara telescópica; mientras que en las de tres años se determinó la altura total y el diámetro (cm) a 1.3 metros del suelo (DAP) con cinta diamétrica. Además, se instalaron 10 parcelas cuadradas de 0.25 m² (0.5 x 0.5 m) en el interior y alrededor de cada parcela de 500 m² para evaluar el porcentaje de cobertura vegetal (arvenses y pastos) sobre el suelo, para un total de 240 parcelas (0.25 m²).

2.3 Muestreo en pastos adyacentes

En las fincas de pastos, se instalaron 12 parcelas cuadradas y temporales de 0.25 m² con un marco de 0.5 x 0.5 m y seleccionadas de forma aleatoria. La ubicación geográfica de la parcela se tomó con GPS. Dentro de las parcelas, se evaluó el porcentaje de cobertura total de pastos (especies consumidas por el ganado) y arvenses; por lo que se identificaron las especies, se anotó el número de individuos y el porcentaje de cobertura de cada una.

2.4 Muestreo de densidad aparente y carbono en el suelo

Por finca se realizaron tres muestreos de suelo y densidad aparente (DA) a profundidades de 0-30, 30-60 y 60-100 cm. La DA se obtuvo por medio del método del cilindro con volumen conocido (Almeida, 2019; Cepeda, 2019; Alvarado *et al.* 2013) y la extracción del cilindro se realizó en el punto medio (15, 45, 80 cm) de cada rango de profundidad. A cada sitio se le quitó el mantillo superior y la cubierta vegetal para dejar el suelo descubierto. Utilizando un taladro a motor con un barreno de 15 cm de diámetro, se llegó hasta una profundidad de 45 cm (punto medio de 30-60 cm), desde la que se extrajo la muestra de DA y la de suelo utilizando un palín doble. Posterior a ello, al costado del hueco, se hizo un corte con palín hasta los 15 cm (punto medio de 0-30 cm) para obtener las muestras. Finalmente, con el taladro se llegó a la profundidad de 80 cm (punto medio de 60-100 cm) con el objetivo de obtener las muestras respectivas (**Figura 2**).

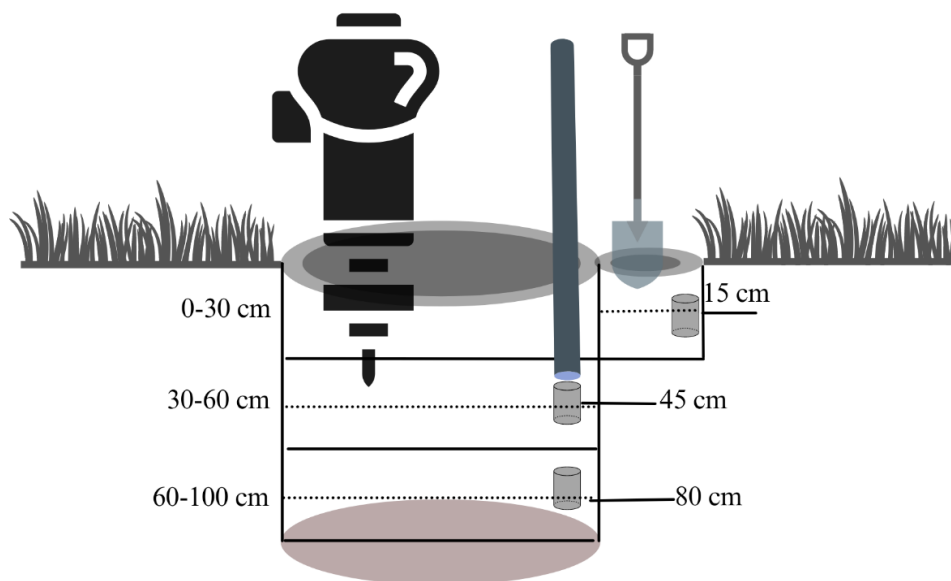


Figura 2. Muestreo de la densidad aparente y del carbono orgánico del suelo en cada punto de muestreo.

Figure 2. Sampling of bulk density and soil organic carbon at each sampling point.

Por finca se extrajeron nueve muestras, tres para cada rango de profundidad. Los cilindros y las muestras de suelo fueron colocados dentro de una bolsa identificada con la especie, finca, punto de muestreo y profundidad. Se obtuvo un total de 144 muestras para su análisis en el Laboratorio de Análisis de Suelo y Foliar de la Universidad Nacional de Costa Rica.

2.5 Análisis de laboratorio

2.5.1 Densidad aparente

Los cilindros de DA fueron llevados al horno a 105°C hasta alcanzar un peso constante. Una vez que se obtuvo el peso total, se le restó el del cilindro posterior a lavarlo y secarlo. Se determinó, entonces, el volumen de cada cilindro con la medición del diámetro y la altura interna con un pie de rey electrónico. Asimismo, la DA se determinó por medio de la **Ecuación 1** (Barrezueta *et al.* 2020; Almeida, 2019; Cepeda, 2019) expresándose en g*cm⁻³.

$$DA: \frac{PS}{VC} \quad (\text{E. 1})$$

donde:

DA: densidad aparente (g * cm⁻³)

PS: peso seco (g)

VC: Volumen del cilindro (cm⁻³)

2.5.2 Pedregosidad

El contenido de fragmentos gruesos, o pedregosidad, se determinó tomando las muestras secas de suelo obtenidas en los cilindros de DA. Las partículas se desprendieron por medio de un mortero para tamizarlas y extraer el material > 0.2 mm, dejando únicamente la tierra fina (<0.2 mm) (Clara et al., 2017). Finalmente, se pesaron los fragmentos gruesos para conocer el porcentaje de pedregosidad según el peso total (**Ecuación 2**).

$$Pd: \left(\frac{PF \times 100}{PT} \right) \quad (\text{E. 2})$$

donde:

Pd: pedregosidad (%)

PF: peso seco de fragmentos gruesos (g)

PT: peso seco total (g)

2.5.3 Carbono orgánico del suelo

Las muestras de suelo fueron secadas a temperatura ambiente y se extrajeron las raíces que podrían alterar los datos de contenido de carbono. Posteriormente, se molieron y tamizaron en una malla de 0.2 mm con el fin de excluir diversos componentes físicos (rocas). El contenido de materia orgánica se obtuvo con el procedimiento *Walkley y Black*, mediante la metodología colorimétrica según el procedimiento operativo estándar de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (2019).

2.6 Análisis de la información

2.6.1 Descripción dasométrica

Se realizó una descripción de la altura de las plantaciones de tres meses, así como el DAP y volumen (**Ecuación 3**) en la de tres años. Asimismo, para comparar la cobertura vegetal sobre el suelo (%) de los cuatro sistemas productivos, se realizaron pruebas *t-student* a un 95 % de probabilidad.

$$Vol: DAP^2 \times \frac{\pi}{4} \times Ht \times ff \quad (\text{E. 3})$$

donde:

Vol: Volumen por árbol (m³)

DAP: diámetro a 1.3 m del suelo (m)

Ht: altura total (m)

ff: factor de forma (0.5 en teca (Molina, 2017) y 0.45 en melina (Mejía, 2013))

2.6.2 Descripción de pastos y su cobertura

Con respecto a la descripción de pastos, se obtuvo la cobertura de pastos, arvenses y suelo a partir de las parcelas instaladas. Para los pastos y arvenses, se determinó la abundancia (**Ecuación 4**; Aguirre *et al.* 2017), frecuencia (**Ecuación 5**; Aguirre *et al.* 2017), dominancia (**Ecuación 6**; González *et al.* 2017) relativa y el índice de valor de importancia (IVI) de las especies presentes en cada finca. Se unificaron los datos de cobertura de los dos pastos adyacentes a cada plantación con el fin de comparar ambos sistemas. Asimismo, se realizó un promedio de la abundancia, frecuencia y dominancia de las especies encontradas.

$$Ar \% : \left(\frac{ni}{N} \right) \times 100 \quad (\text{E. 4})$$

donde:

Ar%: abundancia relativa

ni: número de individuos de la enésima especie

N: número de individuos totales en la muestra

$$Fr \% : \left(\frac{FrAn}{FrAt} \right) \times 100 \quad (\text{E. 5})$$

donde:

Fr %: frecuencia relativa

FrAn: frecuencia absoluta de la enésima especie

FrAt: frecuencia absoluta total

$$Do \% : \left(\frac{DomAS}{DomAT} \right) \times 100 \quad (\text{E. 6})$$

donde:

Do %: dominancia relativa

DomAS: dominancia absoluta de una especie

DomAT: dominancia absoluta de todas las especies

2.6.3 Determinación del carbono orgánico del suelo

El almacenamiento del COS se determinó por sistema productivo, edad y profundidad mediante el uso de la **Ecuación 7** (Ruíz *et al.* 2019; Solís *et al.* 2014; Clara *et al.* 2017).

$$COS: (\% COS) * p * DA * \left(1 - \left(\frac{Pd}{100}\right)\right) * 10 \quad (\text{E.7})$$

donde:

COS: carbono orgánico del suelo ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$)

% COS: porcentaje de carbono orgánico en el suelo (%)

p: profundidad (m)

DA: densidad aparente ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Pd: pedregosidad (%)

2.6.4 Comparación del almacenamiento de carbono en los tres sistemas productivos

Se utilizó el programa estadístico *Minitab* para comparar el contenido del COS entre los sistemas productivos de plantaciones y pastos adyacentes, así como entre las plantaciones de teca y melina. Para comparar según la profundidad, se procedió a identificar el carbono orgánico del suelo almacenado en el promedio de 10 cm según rango evaluado, lo cual se realizó por medio de la división del COS de cada rango entre tres, para las dos primeras profundidades, y cuatro para la última.

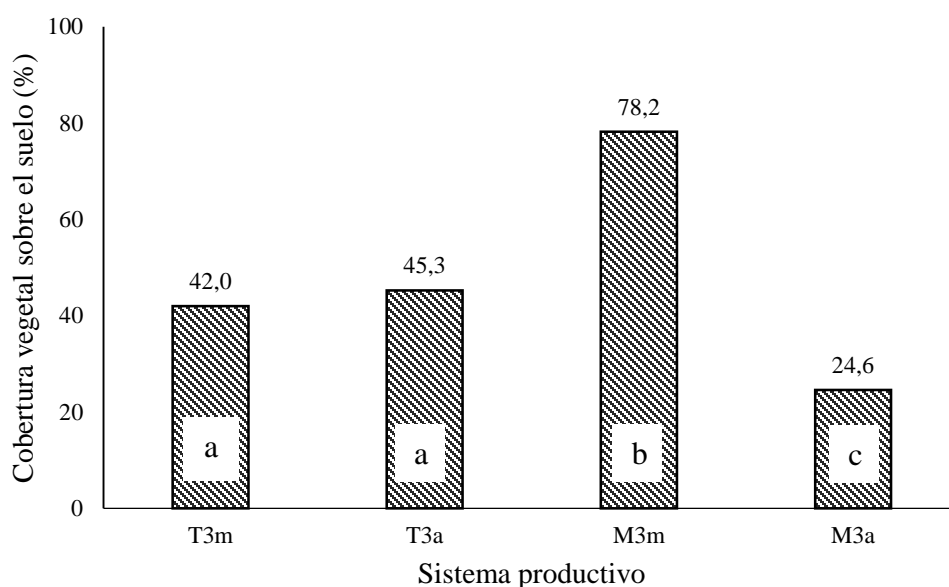
De esta manera, en cada sistema productivo se determinó si existían diferencias estadísticas en la densidad aparente según profundidad. En todas las evaluaciones se utilizó la prueba *t-student* a un nivel de confianza de 0.05 para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los grupos evaluados. Finalmente, se relacionó el COS (%) con la DA según profundidad y se realizaron pruebas *t-student* a un nivel de confianza de 0.01 en dichas variables.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de la cobertura en plantaciones de teca y melina

El porcentaje de cobertura vegetal sobre el suelo (arvenses y pastos) en las fincas con melina de tres meses (78.2 %) y de tres años (24.6 %) fueron altamente significativas con respecto a la cobertura de los cuatro sistemas forestales. En teca se encontró 42 y 45.3 % a los tres meses y tres años, respectivamente (**Figura 3**) (p-value: 0.603).

La cobertura en las plantaciones forestales está vinculada al mantenimiento manual y químico de las plantas arvenses de hoja ancha y angosta para reducir la competencia por recursos como luz, agua y nutrientes. Conforme los árboles aumentan de edad, estos cierran la copa, controlando las arvenses y facilitando el manejo (Jiménez, 2021; Meza, 2021). Cabe resaltar que el cultivo de cobertura, natural o plantado, aporta constantemente materia orgánica al suelo permitiendo un aumento en el carbono del mismo (Amores, 2020).



M: melina; T: teca; m: meses; a: años. Distintas letras en los sistemas productivos de plantación forestal significan diferencias estadísticamente significativas con probabilidad del 95%.

Figura 3. Cobertura vegetal sobre el suelo (%) en plantaciones de *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Roxb. de tres meses y tres años de edad.

Figure 3. Vegetation cover on the ground (%) in plantations of *Tectona grandis* L.f and *Gmelina arborea* Roxb. of three months and three years old.

El promedio de altura total de los árboles de teca y melina a los tres meses fue de 0.63 y 1.32 m, respectivamente (**Cuadro 1**). En Nicoya, Costa Rica, un ensayo de clones de teca en suelos vertisoles, caracterizados por inundarse en época lluviosa, presentó a los ocho meses una altura de 0.68 m (Molina *et al.* 2019). Por otro lado, en Perú, a los seis meses en suelos ácidos (pH < 5) y con baja fertilidad química, se reportó una altura de 0.18 m para los que se sometieron únicamente a fertilización inorgánica; asimismo, se reportó una altura de 0.62 m a los que se les realizó encalado y fertilización inorgánica y finalmente una altura de 1.14 m en sitios donde se les añadió abono orgánico y encalado (Vásquez, 2020). Por su parte, para melina de tres meses, en Ecuador, se encontró altura de 0.7 m en sitios donde el manejo de arvenses se realizó por medio de control manual y 0.98 m con el uso de productos químicos (Tercero, 2015). En dichos estudios, las condiciones edáficas y silviculturales condicionaron el crecimiento de los árboles.

A la edad de tres años, la teca presentó un DAP promedio de 7.53 cm con una altura de 6.52 m, mostrando un volumen por hectárea de 14.3 m³*ha⁻¹. Por su parte, melina a la misma edad, mostró un DAP promedio de 11.8 cm con altura de 10.6 m y un volumen de 54.77 m³*ha⁻¹ (**Cuadro 1**). Para teca, en la cuenca de Panamá con una pendiente media de 15-30 % y pH de 5.5, a los tres años se determinó un DAP de 8.31 cm con una altura total de 8.19 m y un volumen de 21.18 m³*ha⁻¹ (Mollinedo *et al.* 2005). Por otro lado, en Brasil, para clones de teca con edades de 2.6 y 3.6 años, se reportaron DAP de 7.6 y 10.4 cm, con alturas de 7.7 y 11.1 m, respectivamente (Baretta, 2016); mientras que, para clones de tres años, se reportaron 12.1 cm y 9.24 m (Cunha de Miranda, 2013). En México, para melina de tres años en suelos francos, se reportó un DAP de 8.66 cm y una altura de 6.18 m (Telles *et al.* 2021); mientras que en Ecuador se identifican valores superiores (21.6 cm y 20.5 m) (Mejía, 2013) a los del presente estudio.

Cuadro 1. Caracterización dasométrica de *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Roxb. en plantaciones de tres y treinta y seis meses de edad en la región Huetar Norte, Costa Rica.

Table 1. Dasometric characterization of *Tectona grandis* L.f and *Gmelina arborea* Roxb. in plantations of three and thirty-six months of age in the Huetar Norte region, Costa Rica.

Especie	Edad (meses)	Arb*ha ⁻¹	H (m)				DAP (cm)				Vol m ³ *ha ⁻¹
			Min	Prom	Máx	DE	Min	Prom	Máx	DE	
Teca	3	733	0.08	0.63	1.48	0.36	-	-	-	-	-
	36	800	1.70	6.52	11.70	1.93	0.32	7.53	16.23	2.30	14.30
Melina	3	847	0.05	1.32	2.10	0.42	-	-	-	-	-
	36	910	4.95	10.59	16.20	2.04	4.14	11.81	18.62	2.71	54.77

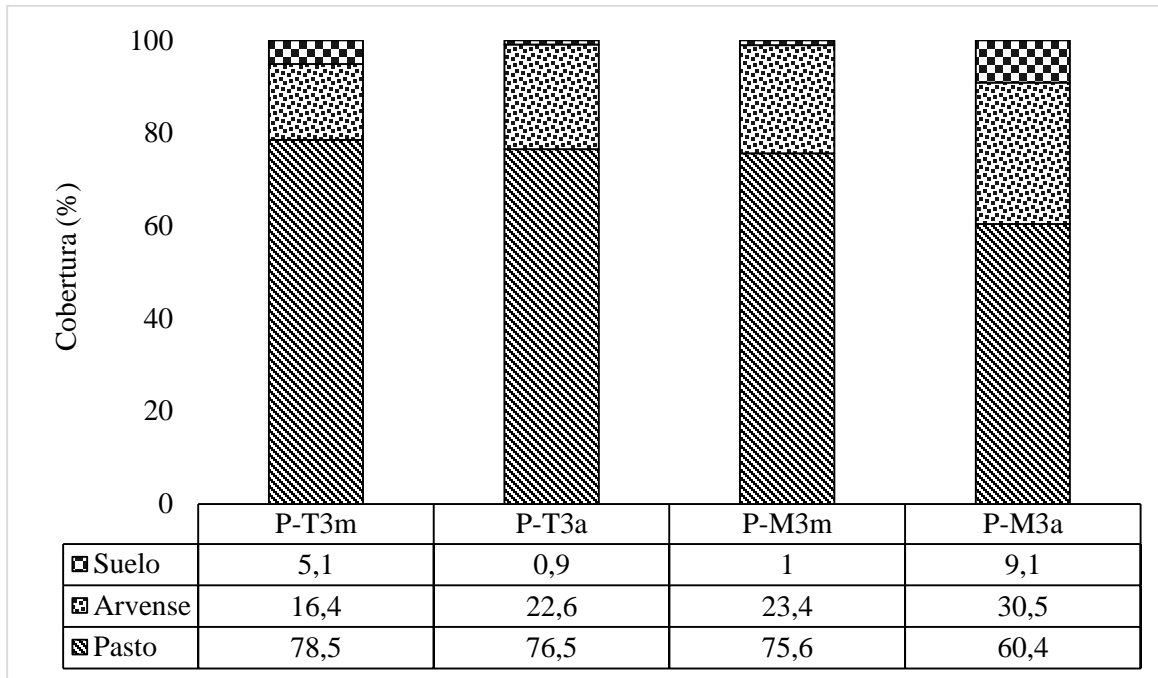
H: altura total; DAP: diámetro a la altura de pecho; Min: mínimo; Prom: promedio; Máx: máximo; DE: desviación estándar; ha: hectárea; Vol: volumen

3.2 Caracterización de la cobertura en pastos

En cuando a los pastos adyacentes a las plantaciones forestales, estos mostraron un área de cobertura total promedio de 96 %, de los cuales el 72.8 % (DE: 8.3) eran pastos y el 23.2 % (DE: 5.8) fueron plantas arvenses (competidoras). La mayor presencia de plantas arvenses fue en pasto adyacente a melina de tres años con 30.5 % y la menor presencia se dio en pastos adyacente a teca de tres meses con 16.4 %. Finalmente, el porcentaje de suelo descubierto de vegetación varió entre 0.9 % (P-T3a) y 9.1 % (P-M3a) (**Figura 4**).

En Colombia encontraron pastos con 15 % de suelo descubierto y un 40 % de plantas arvenses, por lo que se categorizaron como pastizales degradados debido a que se limita la oferta de forraje para el ganado (Ramírez *et al.* 2009). Canizales *et al.* (2010) determinaron que un pastizal productivo presenta hasta un 10 % de suelo descubierto y hasta un 20 % de plantas arvenses. Según Ramírez *et al.* (2009) y Canizales *et al.* (2010), tres de las fincas del presente estudio están en la categoría de productivas (P-T3m, P-T3a y P-M3m) y una es apenas (10 % más de arvenses y 10 % menos de pasto) no productiva (P-M3a) debido al porcentaje de pasto (<65 %) y de arvenses (>22.5 %) encontrados.

A pesar de que en este sistema de producción los pastos son el principal objetivo, se debe considerar que las plantas arvenses conjuntamente aportan carbono orgánico al suelo. Los aportes de estas coberturas provienen de la descomposición de raíces, donde la biomasa subterránea puede ser igual o hasta 90 % mayor que la biomasa aérea, y los exudados de las raíces aportan carbono lixiviado (Ramos y Martínez, 2020; Hannula y Morrien, 2022).



P: pasto; M: melina; T: teca; m: meses; a: años

Figura 4. Cobertura (%) en fincas adyacentes a las plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Roxb. de tres meses y tres años de edad.

Figure 4. Coverage (%) in farms adjacent to forest plantations of *Tectona grandis* L.f and *Gmelina arborea* Roxb. of three months and three years old.

Las principales especies reportadas en pastos adyacentes a teca de tres meses fueron *Hemarthria altissima* (limpgrass) e *Ischaemum indicum* (ratana), pertenecientes a la familia Poaceae. Ambas especies presentan un índice de valor de importancia (IVI) de 186, siendo las de mayor abundancia, frecuencia y dominancia del grupo de 20 especies totales reportadas. Por su parte, en pastos adyacentes a teca de tres años, las especies de mayor presencia fueron *Ischaemum indicum* (ratana) y *Homolepis aturensis* (zacate burro), con un IVI de 156. En total, se obtuvo un promedio de 22 especies distribuidas en tres pastos y 19 arvenses, donde *Rhynchospora nervosa* (yerba de estrella) fue la principal (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Abundancia, frecuencia, dominancia e índice de valor de importancia de las especies vegetales en pastos adyacentes a plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f.

Table 2. Abundance, frequency, dominance and index value of importance of plant species in grasslands adjacent to *Tectona grandis* L.f. forest plantations.

Especie	Familia	Tipo	Abu(%)	Fre (%)	Dom (%)	IVI
Pasto adyacente a teca tres meses (P-T3m)						
<i>Hemarthria altissima</i> Poir	Poaceae	Pasto	42	24	42	108
<i>Ischaemum indicum</i> Kunth	Poaceae	Pasto	36	09	33	78
<i>Homolepis aturensis</i> (Kunth) Chase	Poaceae	Pasto	07	08	07	22
<i>Paspalum conjugatum</i> P.J. Bergius	Poaceae	Arvense	05	11	05	21
Otros (16)	10	Arvense	10	48	13	71
Pasto adyacente a teca tres años (P-T3a)						
<i>Ischaemum indicum</i> Kunth	Poaceae	Pasto	45	10	37	93
<i>Homolepis aturensis</i> (Kunth) Chase	Poaceae	Pasto	30	13	20	63
<i>Megathyrsus maximus</i> (Jacq.) B. K. Simon & S. W. L. Jacobs	Poaceae	Pasto	08	07	20	35
<i>Rhynchospora nervosa</i> (Vahl) Boeck.	Cyperaceae	Arvense	04	12	05	21
Otros (18)	10	Arvense	13	57	17	87

Por otro lado, en pastos adyacente a melina de tres meses, las Poáceas de mayor importancia fueron las *Homolepis aturensis* (zacate burro) e *Ischaemum indicum* (ratana), con un IVI de 193. Se obtuvo un total de 18 especies, dentro de las cuales 15 no son consumidas por el ganado, siendo *Scleria pterota* (navajuela) la de mayor presencia. Estas mismas especies fueron las principales en pasto adyacente a melina de tres años, en las que ratana y zacate de burro reportan un IVI de 189. En total, se encontraron 17 especies en las que 3 son consumidas por el ganado (**Cuadro 3**).

Cuadro 3. Abundancia, frecuencia, dominancia e IVI de las especies vegetales en pastos adyacentes a plantaciones forestales de *Gmelina arborea* Roxb.

Table 3. Abundance, frequency, dominance and index value of importance estoliferea of plant species in grasslands adjacent to forest plantations of *Gmelina arborea* Roxb.

Especie	Familia	Tipo	Abun (%)	Fre (%)	Dom (%)	IVI
Pasto adyacente a melina tres meses (P-M3m)						
<i>Homolepis aturensis</i> (Kunth) Chase	Poaceae	Pasto	43	16	44	103
<i>Ischaemum indicum</i> Kunth	Poaceae	Pasto	45	15	30	90
<i>Scleria pterota</i> C. Presl	Cyperaceae	Arvense	03	11	07	21
Otro (1)	Poaceae	Pasto	01	01	03	05
Otro (14)	9	Arvense	08	57	17	82
Pasto adyacente a melina tres años (P-M3a)						

<i>Ischaemum indicum</i> Kunth	Poaceae	Pasto	69	21	50	140
<i>Homolepis aturensis</i> (Kunth) Chase	Poaceae	Pasto	14	19	16	49
<i>Scleria pterota</i> C. Presl	Cyperaceae	Arvense	02	16	13	31
<i>Axonopus compressus</i> (Sw.) P. Beauv.	Poaceae	Arvense	08	09	10	27
Otros (13)	7	Arvense	06	35	11	53

Para los cuatro sistemas, los pastos de mayor importancia fueron *limpograss*, ratana y zacate burro. El primero se caracteriza por ser una hierba perenne, estolonífera y nativa de Sudáfrica (Wallau *et al.* 2013). Por su parte, la ratana es actualmente uno de los pastos más utilizados para la alimentación de bovinos en Costa Rica (Monge *et al.* 2020). Finalmente, el zacate burro es una planta estolonífera con tallos de erectos a ascendentes entre 20-45 cm, lo que le permite desarrollar una gran cantidad de biomasa radicular (Zamora, 2010; Ramírez *et al.* 2009).

3.3 COS en plantaciones de teca, melina y pastos adyacentes

El carbono orgánico total del suelo en las plantaciones forestales (Med: 267.1 Mg*ha⁻¹; DE: 14.8 Mg*ha⁻¹) fue estadísticamente significativo con respecto a los pastos (Med: 249.9 Mg*ha⁻¹; DE: 27.5 Mg*ha⁻¹) (p-value: 0.01). En la profundidad de 0 a 30 cm ningún sistema forestal (Prom: 85.2 Mg*ha⁻¹; DE: 17 Mg*ha⁻¹) mostró diferencias estadísticamente significativas en COS con respecto a su pasto adyacente (Prom: 88.3 Mg*ha⁻¹; DE: 13.8 Mg*ha⁻¹) (**Cuadro 4 y 5**). Un estudio en Australia mostró que el COS de pasto nativo (*Themeda triandra*) fue mayor al de una plantación de *Pinus radiata* (dieciséis años) adyacente, aludiendo esto a la producción y mortalidad de raíces finas bajo suelos que fue hasta cinco veces mayor que en pino, especialmente a profundidades entre 0-10 cm (Guo *et al.* 2007). Por otro lado, el COS en México fue de entre 0.15 y 0.38 Mg*ha⁻¹*año para bosques de pino, y de 2.65 Mg*ha⁻¹*año para pastizales, lo cual responde a que el tipo de hoja del pino (acucifolia) es rica en lignina y forma una hojarasca poco degradable en comparación con el sistema radical de los pastos (Bojórquez *et al.* 2015). Ahora bien, en siete de las ocho fincas forestales evaluadas en este estudio, el material de podas, raleos o afectación de huracanes han quedado en campo, contribuyendo con materia orgánica al suelo. El retener los residuos es un método eficaz para reducir la pérdida de C y conservar los nutrientes del suelo (Hong *et al.* 2020).

El carbono orgánico total del suelo almacenado en teca de tres meses y el pasto adyacente fue de 270 y 245 Mg*ha⁻¹, respectivamente (p-value < 0.05). Según la profundidad, las diferencias se dieron en un rango de 60 a 100 cm, donde se obtuvo 100.6 y 84.6 Mg*ha⁻¹ de COS para teca de tres meses y el pasto adyacente. Por otro lado, el COS total de la melina de tres meses y el pasto adyacente fue de 278 y 240 Mg*ha⁻¹, respectivamente, mostrando diferencias estadísticamente significativas. Al distinguir los rangos de profundidad, se obtuvo que la melina presentó un COS de 75 y 100 Mg*ha⁻¹ a los 30-60 y 60-100 cm, respectivamente, siendo estos mayores a los de su pasto adyacente (**Cuadro 4**).

Los resultados del estudio muestran que las diferencias se dieron a mayor profundidad (30-100 cm); sin embargo, estas no deben vincularse específicamente a teca o melina de tres meses debido a que los cambios en el carbono del suelo se generan inicialmente en la primera profundidad (0-30 cm). El COS ubicado a mayor profundidad se caracteriza por ser estable y con menores tasas de descomposición; no obstante, las actividades antropogénicas pueden revertir dicha estabilidad por medio de la activación del proceso microbiano por ingreso de carbono fresco, el incremento en temperatura, las perturbaciones físicas, la fertilización con nitrógeno y la retención de materia orgánica post cosecha en rodales con manejo maderable intensivo (Paz y Etchevers, 2016). Se ha demostrado que en los primeros 15 cm de profundidad, el % de CO aumenta cuando se mantienen los restos de cosecha y no se realiza laboreo para preparar el terreno debido al aporte de MO (Lupi *et al.* 2007).

En sitios con *T. grandis* en Osa, Costa Rica, de seis y doce meses de edad, se reportó un promedio en carbono del suelo de 52.85 y 57.44 Mg*ha⁻¹ de hasta 20 cm y 48.4 y 47.82 Mg*ha⁻¹ entre 20-40 cm de profundidad, respectivamente, para sitios con ensayos de manejo de plantas arvenses con cobertura viva y manejo convencional (Hernández, 2017). El COS total en teca registrados en el presente estudio es superior al reportado por Almeida *et al* (2010) en Brasil, donde a una profundidad de 0 a 90 cm se obtuvo a la edad de 0.5 años un total de 117 Mg*ha⁻¹ y con edades de 1.5; 2.5 y 3.5 años, se reportaron 97; 165 y 274 Mg*ha⁻¹, respectivamente, aludiendo las diferencias en los primeros años al manejo de la tierra que afecta la pérdida de materia orgánica.

Otro aspecto a considerar es la historia de la plantación forestal, debido a que este rasgo influye en el carbono almacenado. Aquellas plantaciones establecidas sobre terrenos explotados en agricultura pueden tener menos carbono que las establecidas sobre pastos aprovechados por el ganado o por bosques relativamente recientes (Fonseca *et al.* 2009).

Cuadro 4. Comparación del carbono orgánico del suelo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en plantaciones de *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Roxb. de tres meses de edad contra pastos adyacentes según profundidad en la Región Huetar Norte de Costa Rica.

Table 4. Comparison of soil organic carbon ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) in three-month-old plantations of *Tectona grandis* L.f and *Gmelina arborea* Roxb. to adjacent pastures according to depth in the Northern Huetar Region of Costa Rica.

Sistema productivo	Variable ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Profundidad (cm)			
		0-30	30-60	60-100	0-100
T3m	Media	95.07 (a)	74.49 (a)	100.6 (a)	270.1 (a)
	DE	3.03	9.56	11.3	11.6
P-T3m	Media	92.06 (a)	68.15 (a)	84.56 (b)	244.8 (b)
	DE	8.62	6.89	4.5	12.1
M3m	Media	102.99 (a)	75.24 (a)	99.8 (a)	278 (a)
	DE	2.32	6.64	14.9	13.7
P-M3m	Media	100 (a)	61.34 (b)	78.71 (b)	240.1 (b)
	DE	17.2	6.53	9.85	21.2

P: pasto; T: teca; m: meses; DE: desviación estándar. Distintas letras entre sistema de plantación forestal y pasto significan diferencias estadísticamente significativas con probabilidad del 95%.

La teca y melina de tres años no mostraron diferencias estadísticas con el pasto adyacente. El COS total reportado para teca y su pasto adyacente fue de 259 y 246 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente; mientras que para melina y su pasto adyacente fue de 262 y 269 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente (**Cuadro 5**). Guo y Gifford (2002), en un análisis mundial, no encontraron diferencias estadísticas en la transformación de pastos a plantaciones cuando los árboles eran del grupo de las leguminosas (*Casuarina*, *Eucalyptus* y *Populus*); mientras que el grupo

formado únicamente por coníferas mostraron pérdida del COS. En México, por su parte, para plantaciones de melina y teca (quince años) con manejo, se reportó una profundidad de 0 a 30 cm un carbono total de 49.7 y 55.7 Mg*ha⁻¹, respectivamente (González *et al.* 2018); mientras que, a los veintiséis años, se encontró 45.95 y 42.57 Mg*ha⁻¹, respectivamente (Acosta *et al.* 2020), lo cual da como resultado datos inferiores a los obtenidos en el presente estudio para la misma profundidad.

En plantaciones de teca de seis años en México, se registró un COS de 27, 21 y 43 Mg*ha⁻¹ a 30 cm de profundidad para árboles con DAP de 6.4, 11.9 y 13.9 cm, respectivamente (Ruiz *et al.* 2019), los cuales son datos inferiores a los 98.2 Mg*ha⁻¹ reportados en las plantaciones de tres años con DAP de 7.53 cm del presente estudio. En Esparza, Costa Rica, para teca (diez y quince años), se encontró a 100 cm de profundidad un COS de 95.06 Mg*ha⁻¹ (Ibrahim *et al.* 2007). Por su parte, en Ecuador para *Gmelina arborea* de seis años a profundidades de 0-30 y de 30-60 cm, el COS fue de 247.9 y 223.59 Mg*ha⁻¹ (Almeida, 2019), siendo estas superiores a las del presente estudio (91.6 y 76.3 Mg*ha⁻¹); no obstante, a los siete años en profundidades de 0-30 cm, el COS fue de 58.32 Mg*ha⁻¹ (Cepeda, 2019). Por su parte, en Guácimo y Pococí de Costa Rica para *Brachiaria brizantha* e *Ischaemun indicum* a profundidades de 0 a 25 cm, se obtuvo un COS 66.2 y 84.2 Mg*ha⁻¹, respectivamente (Ávila *et al.* 2001).

Cuadro 5. Comparación del carbono orgánico del suelo (Mg*ha⁻¹) en plantaciones de *Tectona grandis* L.f. y *Gmelina arborea* Roxb. de tres años de edad contra pastos adyacentes según profundidad, Región Huetar Norte de Costa Rica.

Table 5. Comparison of soil organic carbon (Mg*ha⁻¹) in three-year-old plantations of *Tectona grandis* L.f. and *Gmelina arborea* Roxb. to adjacent pastures according to depth, Northern Huetar Region, Costa Rica.

Sistema productivo	Variable (Mg*ha ⁻¹)	Profundidad (cm)			
		0-30	30-60	60-100	0-100
T3a	Media	98.2 (a)	71.74 (a)	88.6 (a)	258.6 (a)
	DE	10.4	8.35	10.4	13
P-T3a	Media	97 (a)	66.55 (a)	82.16 (a)	245.7 (a)

	DE	12.7	6.14	5.76	20.6
M3a	Media	91.6 (a)	76.3 (a)	93.92 (a)	261.8 (a)
	DE	12.9	5.55	6.36	15.6
P-M3a	Media	107.4 (a)	70.6 (a)	91 (a)	269 (a)
	DE	14.6	17.3	19	43

P: pasto; M: melina; a: años; DE: desviación estándar. Distintas letras entre sistema de plantación forestal y pasto significan diferencias estadísticamente significativas con probabilidad del 95%.

Por su parte, las plantaciones forestales no mostraron diferencias estadísticamente significativas en el COS total entre las especies de teca y melina a la misma edad (**Cuadro 6**).

Cuadro 6. Probabilidad estadística de diferencias en el carbono orgánico total del suelo (0-100 cm) entre *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Roxb. de tres meses y tres años de edad en la Región Huetar Norte, Costa Rica.

Table 6. Statistical probability of differences in total soil organic carbon (0-100 cm) between *Tectona grandis* L.f and *Gmelina arborea* Roxb. three months and three years old in the Northern Huetar Region, Costa Rica.

Sistema productivo	p-value			
	M3a	M3m	T3a	T3m
M3a	-	0.085	0.704	0.322
M3m		-	0.030	0.305
T3a			-	0.137
T3m				-

M: melina; T: teca; m: meses; a: años

3.4 Carbono orgánico, densidad aparente y profundidad del suelo

El porcentaje de carbono orgánico del suelo fue en promedio de 2.3 %, registrando 2.2, 2.2 y 2.5 % para teca, pasto y melina, respectivamente. El COS (%) tendió a disminuir conforme aumentó la densidad aparente en el suelo. Asimismo, se observó que el COS (2.9 %) a una profundidad de 0-30 cm con una probabilidad del 99 %, es mayor y significativo (p-value: 0.000) que las otras dos profundidades, cuyos valores fueron de 2 % (30-60 cm) y 1.9 % (60-100 cm), respectivamente, sin distinción de cobertura (**Figura 5**).

Dado que los tres rangos de profundidad evaluados no eran de la misma magnitud, y con el fin de poder compararlos, se calculó el valor absoluto ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de COS en 10 cm de cada uno de los rangos de profundidad considerados. Se determinó una cantidad de 32.7; 23.5 y 22.5 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, para las profundidades de 0-30, 30-60 y 60-100 cm, sin considerar el tipo de cobertura. Se encontró diferencias significativas (p -value: 0.000) entre la profundidad 0-30 cm con respecto a las de 30-60 y 60-100 cm. Al evaluar cada sistema productivo (melina, teca y pasto, según edad), se encontraron diferencias significativas en los mismos rangos de profundidad (**Figura 6**).

En los suelos tropicales, los aportes de carbono (antropogénico y natural) de la materia orgánica pueden generar variaciones en la densidad aparente y el almacenamiento de carbono del suelo (Arguedas *et al.* 2021). El comportamiento opuesto entre la DA y el porcentaje de COS, ya se ha documentado (Abarca *et al.* 2018a; Arguedas *et al.* 2021; Rojas *et al.* 2022; Singh, *et al.* 2020) y se atribuye a un mayor aporte de la materia orgánica de raíces en las capas superficiales, mayor actividad microbiana y a suelos más suelto y porosos (Acosta *et al.* 2020; Rojas *et al.* 2022; Singh, 2020).

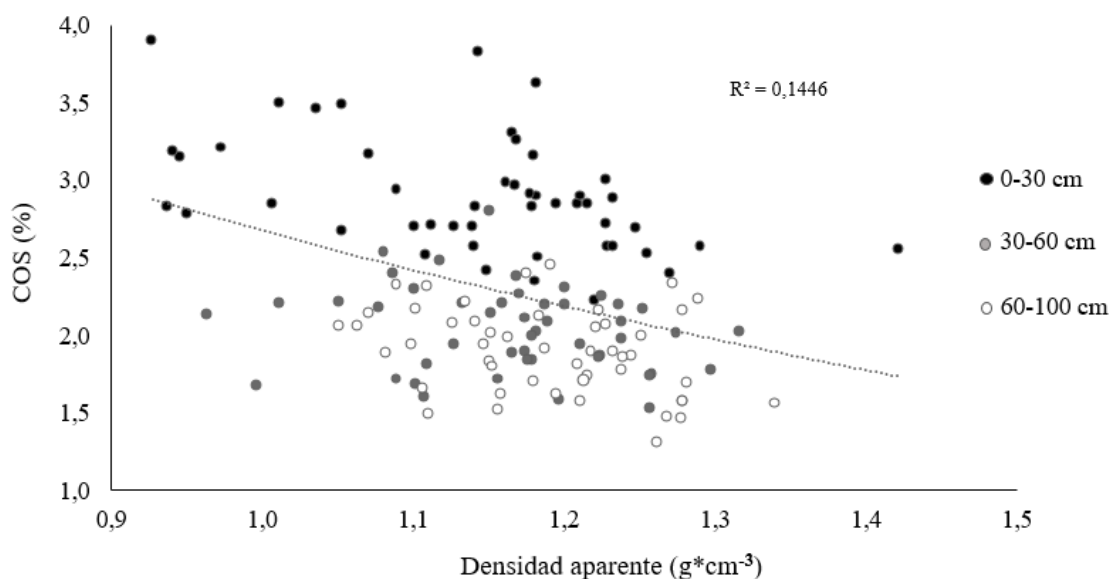
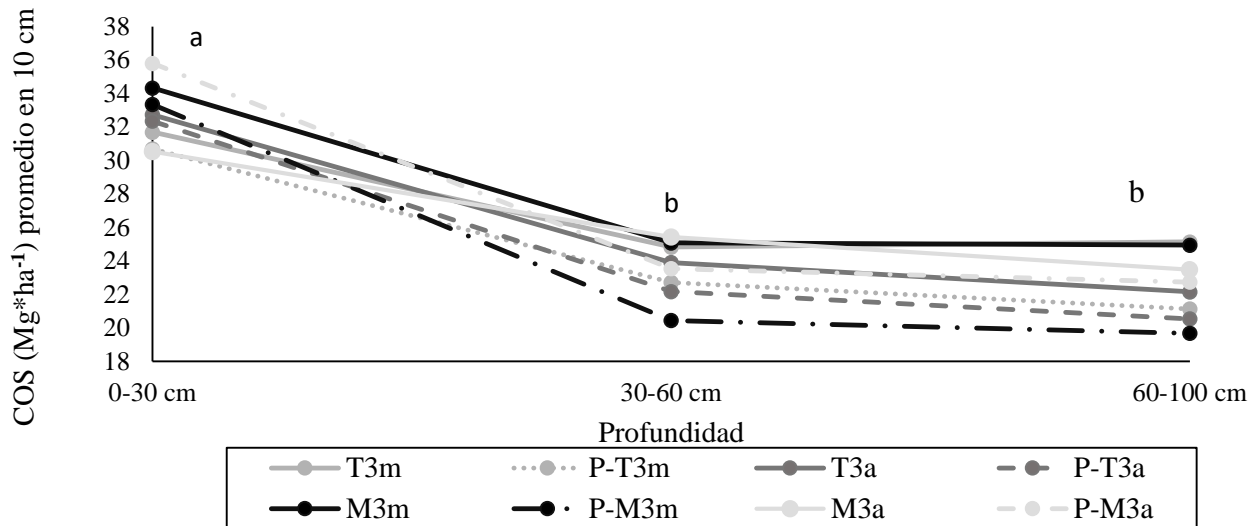


Figura 5. Relación del carbono orgánico del suelo (%) y la densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) según profundidad del suelo.

Figure 5. Ratio of soil organic carbon (%) and bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) according to soil depth.



P: pasto; M: melina; T: teca; m: meses; a: años; Distintas letras entre profundidades significan diferencias estadísticamente significativas con probabilidad del 95%.

Figura 6. Carbono orgánico del suelo ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) en los sistemas productivos según profundidad, usando como referencia el valor de 10 cm de profundidad en cada rango estudiado.

Figure 6. Soil organic carbon ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) in the productive systems according to depth using as reference the value of 10 cm depth in each range studied.

La DA promedio general del estudio fue de $1.17 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ($\text{CV} = 7.5 \%$). Este valor general (DA), tendió a aumentar según la profundidad y presentó valores de 1.14; 1.17 y 1.19 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a los 0-30, 30-60 y 60-100 cm. Por sistema productivo, se registró un promedio de 1.12 ($\text{CV} = 8.3 \%$), 1.16 ($\text{CV} = 6 \%$) y 1.22 ($\text{CV} = 7.1 \%$) $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ para melina, pasto y teca, respectivamente. Asimismo, al comparar la DA entre los sistemas productivos, se encontraron diferencias significativas en teca con pasto ($p\text{-value} = 0.001$), teca con melina ($p\text{-value} = 0.000$) y melina con pasto ($p\text{-value} = 0.007$). Finalmente, dentro de cada sistema productivo, y según la profundidad, no se registraron diferencias en DA del suelo en los cultivos de teca y melina, mientras en pastos si se encontraron diferencias ($\alpha = 0.05$) en la primera profundidad (0-30 cm) con respecto a la última (60-100 cm) ($p\text{-value} = 0.045$) (**Cuadro 7**).

Los resultados de DA varían por factores como la textura y estructura; por lo tanto, se presentan datos más bajos en DA en los suelos de textura fina, bien estructurados y con

altos contenidos de materia orgánica (Marín, 2017; Salamanca y Sadeghian, 2005; Alvarado *et al.* 2013). Además, en la mayoría de los suelos, la DA aumenta según la profundidad del perfil debido al peso del material superficial y al manejo que se le brinda a la parte superficial (Salazar *et al.* 2020; Abarca *et al.* 2018a).

En Turrialba, Costa Rica, para los pastos de *Brachiaria decumbens* (pasto amargo) y *Cynodon nlemfuensis* (pasto estrella) se registró una DA de 1.15 y 1.12 g*cm⁻³ con COS de 0.63 y 0.75 %, respectivamente, a una profundidad de 0-100 cm (Rojas *et al.* 2022). En la India, para teca de veinte años (2 000 árb*ha⁻¹), se encontró un DA de 1.23 g*cm⁻³ y COS de 0.6 % en 0-30 cm (Singh *et al.* 2020). En melina de seis años en Ecuador, se presentó una DA de 1.14 y 1.28 g*cm⁻³ para 0-30 y 30-60 cm de profundidad, respectivamente (Almeida, 2019). Dichos estudios presentan valores de DA similares a los encontrados en teca, melina y pastos de la Región Huetar Norte de Costa Rica. Sin embargo, los datos promedios de COS en pasto (0.7 %) y en teca (0.6 %) reportados por Rojas *et al.* (2022) y Singh *et al.* (2020) son inferiores a los del presente estudio (2.2 %).

Cuadro 7. Densidad aparente para teca, melina y pasto según profundidad en la Región Huetar Norte, Costa Rica.

Table 7. Bulk density for teak, melina and grass according to depth in the Northern Huetar Region, Costa Rica.

Prof (cm)	DA Prom (g*cm ⁻³)	CV (%)
Teca		
0-30	1.21 a	8.2
30-60	1.19 a	8.7
60-100	1.25 a	2.7
Melina		
0-30	1.08 a	12.3
30-60	1.14 a	5.7
60-100	1.14 a	4.5
Pasto		
0-30	1.14 a	6.2
30-60	1.17 ab	5.7
60-100	1.18 b	5.9

Prof: profundidad; DA: densidad aparente; Prom: promedio; CV: coeficiente de variación; Distintas letras en los sistemas significan diferencias estadísticamente significativas con probabilidad del 95%.

4. Conclusiones

La cobertura de las arvenses en los tres sistemas evaluados fue diferente. En el sistema de pastos la cobertura fue mayor, le sigue el sistema de melina y finalmente el sistema con tecla posee la menor cobertura.

El carbono orgánico total de las plantaciones forestales sin distinguir la especie, es superior al contenido de carbono orgánico total de los pastos.

El contenido de carbono orgánico total de las plantaciones de tecla y melina no es diferente cuando tienen la misma edad.

El porcentaje de carbono orgánico total del suelo sin distinguir el sistema de cobertura (pastos, melina, tecla) fue superior en la capa superficial evaluada (0-30 cm) respecto de las capas inferiores (30-60 y 60-100 cm).

5. Recomendaciones

Realizar estudios considerando edades avanzadas en las plantaciones forestales para determinar si existen diferencias entre edades jóvenes y edades cercanas al aprovechamiento forestal.

Ampliar el estudio a otras zonas del país para determinar si existen diferencias según las condiciones climáticas.

6. Referencias

- Abarca-Monge, S., Arguedas-Acuña, F., y Soto-Blanco, R. (2018). Carbono orgánico del suelo y variación del nitrógeno en fincas ganaderas de cría. *Alcances tecnológicos*, 12(2), 5-13. <https://doi.org/10.35486/at.v12i2.86>
- Acosta Mireles, M., Carrillo Anzures, F., Buendía Rodríguez, E., Benavides Solorio, J. D., Flores Ayala, E. y González Molina, L. (2020). Carbono en suelo, hierbas y arbustos en una plantación forestal en Jalisco, México. *Revista Mexicana de ciencias agrícolas*. 11(2). <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2427>

- Aguirre-Mendoza, Z., Reyes-Jiménez, B., Quizhpe-Coronel, W. y Cabrera, A. (2017). Composición florística, estructura y endemismo del componente leñoso de un bosque montano en el sur del Ecuador. *Arnaldoa*, 24(2), 543–556. <http://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.242.24207>
- Almeida, E. M., Campelo-Júnior, J. H. y Finger, Z. (2010). Determinação do estoque de carbono em teca (*Tectona grandis* L. f.) em diferentes idades. *Ciência Florestal Santa Maria*, 20(4), 559-568. <https://doi.org/10.5902/198050982414>
- Almeida-Collaguazo, S. M. (2019). *Dinámica de almacenamiento de carbono en plantaciones forestales de melina (Gmelina arborea Roxb), cantón Pedro Vicente Maldonado, periodo 2012 – 2018* [Tesis de maestría, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6015>
- Alvarado, J., Jair-Andrade, H. y Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 16(1), 21 – 31. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a02>
- Amores-Meza, M. M. (2020). *Efecto de prácticas de manejo del suelo y sus interacciones en la dinámica del carbono orgánico del suelo: Revisión de Literatura* [Tesis de grado para optar por el título de Ingeniera, Escuela Agrícola Panamericana]. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6738>
- Arguedas-Acuña, F., Hernández-Chaves, M., Abarca-Monge, S. y Soto-Blanco, R. (2021). *Adicionalidad de carbono orgánico del suelo en pasto cayman bajo pastoreo racional voisin*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, Costa Rica. [Nota técnica]. http://revista.inta.go.cr/index.php/alcances_tecnologicos/article/view/180/16

- Ávila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M. e Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 8(30), 32-35.
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5765>
- Baretta, M. C. (2016). Crescimento e caracterização morfológica de clones de teca no sudoeste de mato grosso. [Tesis de posgrado, Universidade Federal De Mato Grosso].
https://ri.ufmt.br/bitstream/1/2826/1/DISS_2016_Maisa%20Caroline%20Barretta.pdf
- Barrezueta-Unda, S., Velepucha-Cuenca, K., Solano, M. y Hurtado-Flores, L. (2020). Secuestro de carbono orgánico del suelo en pastizales de la provincia El Oro, Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 13(32), 14-26.
<https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol13iss32.2020pp14-26p>
- Barrientos, O. y Chaves, G. (2008). *Región Huetar Norte: Oferta Exportadora actual y oferta potencial de productos agropecuarios alternativos*. Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica.
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E71-10543.pdf>
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo, Washington D.C). (2014). *Fundamentos del cambio climático*. <http://es.scribd.com/doc/248552756/Fundamentos-del-Cambio-Climatico-pdf#scribd>
- Bojórquez-Serrano, J. I., Castillo-Pacheco, L. A., Hernández-Jiménez, A., García-Paredes, J. D. y Madueño-Molina, A. (2015). Cambios en las reservas de carbono orgánico del suelo bajo diferentes coberturas. *Cultivos Tropicales*, 36(4), 63-69.
<http://web.b.ebscohost.com/una/remotexs.co/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=fc5f6e99-1cb6-4e57-88d6-6fb264afed0d%40sessionmgr103>
- Boley, J. D. (2005). *Soil chemistry under a chronosequence of primary forest, active pasture, teak (Tectona grandis) and mixed native plantations in Costa Rica*

[Tesis de Maestría, Universidad Estatal de Nueva York].
<http://www.proquest.com.una.remotexs.co/docview/305393839?pq-origsite=primo>

Burbano-Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de ciencias agrícolas*, 35(1): 82-96. doi: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>

Canizales, S. A.; Celemin, J. S. y Mora-Delgado, J. (2010). Diversidad y uso de arvenses en pasturas de fincas ganaderas del Alto Magdalena (Tolima, Colombia). *Zootecnia Trop*, 28(3): 227-237. <http://www.bioline.org.br/pdf?zt10043>

Cepeda-Granja, R. A. (2019). *Determinación del contenido de carbono en el suelo en una plantación de melina (Gmelina arborea) en la parroquia Pucayacu del cantón la Maná, provincia de Cotopaxi* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6279>

Clara, L., Fatma, R., Viridiana, A. y Liesl, W. (2017). *Carbono orgánico del suelo el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. <http://www.fao.org/3/i6937s/i6937s.pdf>

CSRA (Comité Sectorial Regional Agropecuario). (2015). *Plan Regional de Desarrollo Agropecuario y Rural 2015-2018*. Región Huetar Norte. http://www.infoagro.go.cr/InfoRegiones/Documents/PRDAR_2015-2018_HuetarNorte.pdf

Cunha de Miranda, M. (2013). Caracterização morfológica e avaliação do desenvolvimento inicial de clones de teca (*Tectona grandis* L.f.). [Tesis de posgrado, Universidade Federal De Mato Grosso]. https://ri.ufmt.br/bitstream/1/1837/1/DISS_2013_Mariele%20Cunha%20de%20Miranda.pdf

- Fonseca, W., Alice, F. y Rey Benayas, J. M. (2009). *Acumulación de biomasa y carbono en plantaciones forestales de dos especies nativas*. [Tesis de doctorado]. Universidad de Alcalá.
- González-Delgado, M., Foroughbakhch-Pournavab, R., Rocha-Domínguez, L., Guzmán-Lucio, M. A. y González-Rodríguez, H. (2017). Composición florística y caracterización estructural del matorral desértico micrófilo en Galeana, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(39), 83-98. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i39.45>
- González-Molina, L., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F. y Rueda-Sánchez, A. (2018). Simulación de los cambios de carbono orgánico del suelo en especies tropicales arbóreas con el modelo rothc 26.3. *Interciencia*, 43(4), 269-274. <http://www.proquest.com.una.remotexs.co/docview/2058577269/abstract/E05CD562F73641DDPQ/1?accountid=37045>
- Guo, L. B. y Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stock and land use change: a meta-analysis. *Global change biology*, 8, 345-360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
- Guo, L. B., Wang, M. y Gifford, R. M. (2007). The change of soil carbon stocks and fine root dynamics after land use change from a native pasture to a pine plantation. *Plant & Soil*, 299(1), 251-262. [10.1007/s11104-007-9381-7](https://doi.org/10.1007/s11104-007-9381-7)
- Guo, Y., Fan, R., Zhang, X., Zhang, Y., Wu, D., McLaughlin, N., Zhang, S., Chen, X., Jia, S. y Liang, A. (2020). Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure. *Science of the Total Environment*, 703(4888), 1-9. [10.1016/j.scitotenv.2019.134617](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134617)
- Hannula, S. E. y Morrien, E. (2022). Will fungi solve the carbon dilemma? *Geoderma*, 413. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.11576>
- Hernández-Rodríguez, P. (2017). *Efecto de diferentes métodos de control de arvenses en las propiedades del suelo, en plantaciones de teca, Tectona grandis (L.f.)*.

[Tesis de grado, Instituto Tecnológico De Costa Rica].
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9398/efecto_diferentes_metodos_control_arvenses_propiedades_sielo_plantaciones_teca_tectona_grandis.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hong, S., Yin, G., Piao, S., Dybzinski, R., Cong, N., Li, X., Wang, K., Peñuelas, J., Zeng, H. y Chen, A. (2020). Divergent responses of soil organic carbon to afforestation. *Nature sustainability*. 3(9). <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0557-y>

Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F. y Rojas, J. (2007). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 45, 27-36.
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7934>

INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario. RESULTADOS GENERALES*. San José, Costa Rica.
<https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/U40-10581.pdf>

INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2022). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2021 Resultados generales de la actividad agrícola y forestal. San José, Costa Rica*. <https://admin.inec.cr/sites/default/files/2022-09/reagropecENAAGR%C3%8DCOLA2021-01.pdf>

INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria). (2014). *Suelos de costa rica: orden ultisol*. [Ficha técnica 1].
<http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/07/00517-boletin-suelos-de-cr.pdf>

Jiménez-Ordoñez, N. E. (2021). *Diversidad y similitud de arvenses en plantaciones forestales de Gmelina arborea Roxb. (melina) en la zona central del Litoral Ecuatoriano*. [Tesis de grado, Universidad Técnica Estatal de

Quevedo]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/6324/1/T-UTEQ-170.pdf>

Laganière, J., Angersz, D. A. y Paré, D. (2010). Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 16, 439-453. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01930.x>

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

López-Guzmán, H. G. (2017). *Estimación de carbono aéreo en plantaciones de teca (Tectona grandis L.f.) de catorce y quince años de edad; Chahal, Alta Verapaz*. [Tesis de grado, Universidad Rafael Landívar] <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2017/06/22/Lopez-Huberth.pdf>

Luan, H., Gao, W., Huang, S., Tang, J., Lic, M., Zhang, H. y Chen, X. (2019). Partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments affects soil organic carbon composition and stability in a greenhouse vegetable production system. *Soil & Tillage Research*, 191, 185-196. [10.1016/j.still.2019.04.009](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.009)

Lupi, A. M., Conti, M., Fernández, R., Cosentino, D. y López, G. (2007). Efecto de las prácticas de repoblación forestal sobre el carbono orgánico del suelo y la estabilidad de los agregados en el noreste de Argentina. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 16(3), 230-240. <https://hdl.handle.net/20.500.12219/4117>

Marín-Romero, R. L. (2017). *Diagnóstico de la Densidad aparente en relación con otras propiedades físicas del suelo en tres sistemas productivos y bosque nativo, en terrazas altas del piedemonte llanero*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. <https://core.ac.uk/reader/344723950>

- Martínez, E., Fuentes, J. P. y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Mejía-Bayas, M. M. (2013) *Determinación del factor de forma en Gmelina (Gmelina arborea Roxb.) en plantaciones de uno, dos y tres años de edad en la hacienda El Vergel cantón Valencia provincia de Los Ríos* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/2993/1/33T0121%20.pdf>
- Meza-Ortega, H. D. (2021). *Diversidad y similaridad de arvenses en plantaciones forestales de Tectona grandis L.f. (teca) en la zona central del Litoral ecuatoriano*. [Tesis de grado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/6330/1/T-UTEQ-176.pdf>
- Meza-Picado, V., Alfaro-Jiménez, K., Bedoya-Arrieta, R., Romero-Mora, M., Valerio-Madrigal, A. y Montenegro-Salas, P. (2019). *Reforestación comercial en costa rica, Regiones Huetar Atlántica, Huetar Norte y Chorotega*. Heredia, Costa Rica: 1a. ed. UNA/INSEFOR. https://www.fonafifo.go.cr/media/2976/reforestacion_comercial.pdf
- MIDEPLAN (Ministerio de Planificación Nacional Política y Económica). (2014). *Región Huetar Norte: Plan de Desarrollo 2030*. San José, Costa Rica. <https://documentos.mideplan.go.cr/share/s/NOU4cm0sShK72vT8xZ3WQQ>
- Molina-Quesada, S., Alfaro, C., Murillo, O., Badilla, Y. y Luján, R. (2019). Evaluación del comportamiento de clones de *Tectona grandis* L.f. en suelos vertisoles de la Península de Nicoya, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 16(38), 24-34. <http://dx.doi.org/10.18845/rfmk.v16i38.3993>
- Molina-Segura, F. U. (2017). *Comportamiento de clones de teca (Tectona grandis Linn.) a los 4,5 años en Upala, Zona Norte de Costa Rica* [Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Costa Rica].

https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9394/comportamiento_clones_teca_tectona_grandis.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Mollinedo, M., Ugalde, L., Alvarado, A., Verjans, J. M. y Rudy, L. C. (2005). Relación suelo-árbol y factores de sitio, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis*), en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 67-75. <https://www.redalyc.org/pdf/436/43629107.pdf>

Monge-Solís, J., Sevilla-Benavides, F., Aragonés-Vargas, P. y Mata-Granados, X. (2020). Problemas fitosanitarios asociados a pasturas en la Región Huetar Norte, Costa Rica. *Revista AgroInnovación en el Trópico Húmedo*, 2(2), 8-18. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/agroinn/article/view/5193>

Orellana-Rivadeneira, G., Sandoval-Solís, M. L., Linares-Fleites, G., García-Calderón, N. E. y Tamariz-Flores, J. V. (2012). Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorios. *Avances en ciencias e ingeniería*, 3(1), 123-135. <https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Orellana-et-al-2012.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación [FAO]. (2019). *Procedimiento operativo estándar para el análisis de carbono orgánico del suelo: Walkley-Black métodos de titulación y colorimétrico*. Red mundial de laboratorios de suelos, Roma. <http://www.fao.org/3/ca7471es/ca7471es.pdf>

Ortiz-Malavasi, E. (2014). *Atlas digital de Costa Rica: Inventario Nacional Forestal*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6749?show=full>

Patiño, S., Suárez, L. N., Andrade, H. J. y Segura, M. A. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), 121-134. <https://doi.org/10.22490/21456453.2312>

- Paz, F. y Etchevers, J. (2016). Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra latinoamericana*. 34(3). <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00339.pdf>
- Pezo, D. A. (2018). *Los pastos mejorados: su rol, usos y contribuciones a los sistemas ganaderos frente al cambio climático*. Serie técnica 91. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/8753>
- Powers, J. S., Corre, M. D., Twine, T. E. y Veldkamp. E. (2011). Geographic bias of field observations of soil carbon stocks with tropical land-use changes precludes spatial extrapolation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 108(15), 6318-6322. <https://doi.org/10.1073/pnas.1016774108>
- Ramírez, B. L., Ramírez, H. F. y Suárez, J. C. (2009). Captura de carbono y desarrollo radicular de sistemas de uso del suelo en la Amazonia Colombiana. *Livestock Research for Rural Development*, 21(6), 1-5. <http://www.lrrd.org/lrrd21/6/rami21091.htm>
- Ramos-Hernández, E. y Martínez-Sánchez, J. L. (2020). Almacenes de biomasa y carbono aéreo y radicular en pastizales de *Urochloa decumbens* y *Paspalum notatum* (Poaceae) en el sureste de México. *Revista de biología tropical*. 68(2): 440-451. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68i2.37395>
- Rojas Solano, J., Brenes Gamboa, S. y Abarca Monge, S. (2022). Carbono en el suelo: comparación entre un área de pastos y un bosque. *Intersedes*. 13(47). <http://dx.doi.org/10.15517/isucr.v23i47.47695>
- Ruiz-Blandon, B.A., Hernández-Álvarez, E., Salcedo-Pérez, E., Rodríguez-Macías, R., Gallegos-Rodríguez, A., Valdés-Velarde, E. y Sánchez-Hernández, R. (2019). Almacenamiento de carbono y caracterización lignocelulósica de plantaciones comerciales de *Tectona grandis* L.f. en México. *Colombia Forestal*, 22(2), 15-29. <https://doi.org/10.14483/2256201X.13874>

- Salamanca-Jiménez, A. y Sadeghian-Khalajabadi, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*, 56(4), 381-397. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056%2804%29381-397.pdf>
- Salazar-Calvo, C., González-Venegas, J. P., Corrales-Valverde, D., Lacayo-Vega, J., Carrillo-Montoya, K. y Montero-González, H. (2020). Comparación de dos métodos para la determinación de la densidad aparente del suelo. *Alcances tecnológicos*, 13(1), 5-12. <https://doi.org/10.35486/at.v13i1.164>
- Sheng, H., Zhou, P., Zhang, Y., Kuzyakov, Y., Zhou, Q., Ge, T. y Wang, C. (2015). Loss of labile organic carbon from subsoil due to land-use changes in subtropical China. *Soil Biology & Biochemistry*, 88, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.05.015>
- Singh, A. K., Sahu, C. y Sahu, S. K. (2020). Carbon sequestration potential of a teak plantation forest in the Eastern Ghats of India. *Journal of Environmental Biology*. 41. <http://doi.org/10.22438/jeb/41/4/MRN-1230>
- Solís-Hernández, A., Nájera-Luna, J. A., Méndez-González, J., Vargas-Larreta, B y Álvarez-Gallegos, M. (2014). Carbono orgánico del suelo en rodales silvícolas del ejido La Victoria, Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia*, 63, 5-11. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2014633605>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. y de Haan, C. (2009). *La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. <http://www.fao.org/3/a0701s/a0701s03.pdf>
- Telles-Antonio, R., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J. y Posadas, H. M. S. (2021). Características edáficas y topográficas asociadas con el crecimiento en volumen de *Gmelina arborea* Roxb, en Tlatlaya, Estado de México. *Madera y Bosques*, 27(1), 1-19. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2711987>

- Tercero-Tercero, H. R. (2015). *Evaluación de los métodos manual y químico para el control de maleza en el crecimiento inicial de Melina (Gmelina arborea Roxb) en la hacienda Pizará, cantón Pedro Vicente Maldonado, provincia de Pichincha*. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica De Chimborazo]. <https://1library.co/document/q2n6kmjq-evaluacion-quimico-crecimiento-gmelina-pizarra-maldonado-provincia-pichincha.html>
- Valverde, J. y Acuña, K. (2011). *Desarrollo local en la Región Hueta Norte Norte*. Universidad Estatal a Distancia (UNED). https://www.uned.ac.cr/extension/images/ifcmdl/CONTENIDO_2.pdf
- Vázquez-Gózales, M. M. (2020). *Efecto de enmiendas cálcicas, inorgánicas y orgánicas en el crecimiento del cultivo de teca (Tectona grandis L.f) en condiciones de campo en la región San Martín*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria De La Selva]. http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1872/TS_MMVG_20_20.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Wallau, M. O., Sollenberger, L. E., Quesenberry, K. H., Vendramini, J. M. y Mullenix, M. K. (2013). Evaluation of limpgrass (*Hemarthria altissima*) breeding lines under different grazing managements. XXII International Grassland Congress. Australis. <https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1225&context=igc>
- Zamora, N. (2010). Poacea. Eds: Hammel, B., Grayum, M., Herrera, C. & Zamora, N. Manual de plantas de Costa Rica. Volumen III. Missouri, USA. Missouri Botanical Garden-INBio.
- Zamora-Morales, B. P., Mendoza-Cariño, M., Sangerman-Jarquín, D. M., Quevedo-Nolasco, A. y Navarro-Bravo, A. (2018). El manejo del suelo en la conservación de carbono orgánico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9 (8), 1787-1799. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.1723>

Apéndice

Apéndice 1. Abundancia, frecuencia, dominancia e IVI de las especies vegetales en pastos adyacentes a plantaciones de *Tectona grandis* L. de tres meses.

Pasto adyacente a teca de tres meses (P-T3m)						
Especie	Especie	Tipo	Abun (%)	Frec (%)	Dom (%)	IVI
<i>Hemarthria altissima</i> Poir	Poaceae	Pasto	41.9	24.0	41.9	107.7
<i>Ischaemum indicum</i> Kunth	Poaceae	Pasto	35.9	8.8	32.8	77.5
<i>Homolepis aturensis</i> (Kunth) Chase	Poaceae	Pasto	6.9	8.1	7.4	22.4
<i>Paspalum conjugatum</i> P.J. Bergius	Poaceae	Arvense	5.1	11.0	5.1	21.3
<i>Axonopus compressus</i> (Sw.) P. Beauv.	Poaceae	Arvense	3.6	8.9	4.3	16.7
<i>Rhynchospora nervosa</i> (Vahl) Boeck.	Cyperaceae	Arvense	4.4	7.1	3.8	15.3
<i>Desmodium incanum</i> (Sw.) DC.	Fabaceae	Arvense	0.4	5.5	1.4	7.4
<i>Mimosa pudica</i> L.	Fabaceae	Arvense	0.1	3.6	0.9	4.6
<i>Spermacoce ocyimifolia</i> Willd.	Rubiaceae	Arvense	0.1	3.9	0.5	4.6
<i>Desmodium adscendens</i> (Sw.) DC.	Fabaceae	Arvense	0.1	3.2	0.3	3.7
<i>Phyllanthus urinaria</i> L.	Phyllanthaceae	Arvense	0.1	3.2	0.2	3.5
<i>Scleria pterota</i> C. Presl	Cyperaceae	Arvense	0.1	2.9	0.3	3.3
<i>Blechum pyramidatum</i> (Lamb.) Urb.	Acanthaceae	Arvense	0.2	2.6	0.2	3.0
<i>Panicum pilosum</i> Sw.	Poaceae	Arvense	0.9	1.3	0.7	2.9
<i>Croton trinitatis</i> Millsp.	Euphorbiaceae	Arvense	0.0	1.3	0.1	1.4
<i>Stachytarpheta mutabilis</i> (Jacq.) Vahl	Verbenaceae	Arvense	0.1	1.0	0.1	1.1
<i>Spermacoce viridiflora</i> (Chodat & Hassl.) Govaerts	Rubiaceae	Arvense	0.0	1.0	0.0	1.0
<i>Cyperus ferax</i> Rich.	Cyperaceae	Arvense	0.0	1.0	0.0	1.0
<i>Hyptis capitata</i> Jacq.	Lamiaceae	Arvense	0.0	0.6	0.0	0.7
<i>Hyptis brevipes</i> Poit.	Lamiaceae	Arvense	0.0	0.6	0.0	0.7

Apéndice 2. Abundancia, frecuencia, dominancia e IVI de las especies vegetales en pastos adyacentes a plantaciones de *Tectona grandis* L. de tres años.

Pasto adyacente a teca de tres años (P-T3a)						
Especie	Especie	Tipo	Abun (%)	Frec (%)	Dom (%)	IVI
<i>Ischaemum indicum</i> Kunth	Poaceae	Pasto	45.5	10.4	37.1	93.0
<i>Homolepis aturensis</i> (Kunth) Chase	Poaceae	Pasto	30.0	13.1	20.2	63.3
<i>Megathyrsus maximus</i> (Jacq.) B. K. Simon & S. W. L. Jacobs	Poaceae	Pasto	8.0	7.1	19.9	35.0
<i>Rhynchospora nervosa</i> (Vahl) Boeck.	Cyperaceae	Arvense	3.8	12.0	5.5	21.3
<i>Scleria pterota</i> C. Presl	Cyperaceae	Arvense	2.2	7.3	5.9	15.3
<i>Desmodium adscendens</i> (Sw.) DC.	Fabaceae	Arvense	2.7	7.4	1.3	11.4

<i>Axonopus compressus</i> (Sw.) P. Beauv.	Poaceae	Arvense	1.3	7.3	1.8	10.4
<i>Paspalum conjugatum</i> P.J. Bergius	Poaceae	Arvense	3.7	4.5	1.8	10.1
<i>Phyllanthus urinaria</i> L.	Phyllanthaceae	Arvense	0.6	8.2	0.9	9.7
<i>Spermacoce ocyimifolia</i> Willd.	Rubiaceae	Arvense	0.7	4.3	0.5	5.5
<i>Stizolobium</i> sp	Fabaceae	Arvense	0.2	2.4	2.3	4.9
<i>Cyperus luzulae</i> (L.) Rottb. ex Retz.	Cyperaceae	Arvense	0.2	2.6	0.6	3.4
<i>Mimosa pudica</i> L.	Fabaceae	Arvense	0.2	2.4	0.4	3.0
<i>Panicum pilosum</i> Sw.	Poaceae	Arvense	0.1	2.4	0.3	2.8
<i>Desmodium incanum</i> (Sw.) DC.	Fabaceae	Arvense	0.1	2.4	0.3	2.8
Especimen 1		Arvense	0.4	1.3	0.2	2.0
<i>Hyptis capitata</i> Jacq.	Lamiaceae	Arvense	0.1	1.2	0.6	1.9
<i>Lindernia crustacea</i> (L.) F. Muell.	Liderniaceae	Arvense	0.1	1.3	0.1	1.5
Especimen 2		Arvense	0.0	0.6	0.0	0.7
<i>Blechum pyramidatum</i> (Lamb.) Urb.	Acanthaceae	Arvense	0.0	0.6	0.0	0.7
<i>Cuphea</i> sp	Lythraceae	Arvense	0.0	0.6	0.0	0.7
<i>Desmodium axillare</i> (Sw.) DC.	Fabaceae	Arvense	0.0	0.6	0.0	0.7

Apéndice 3. Abundancia, frecuencia, dominancia e IVI de las especies vegetales en pastos adyacentes a plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb. de tres meses.

Pasto adyacente a melina de tres meses (P-M3m)						
Especie	Especie	Tipo	Abun (%)	Frec (%)	Dom (%)	IVI
<i>Homolepis aturensis</i> (Kunth) Chase	Poaceae	Pasto	42.7	16.0	44.0	102.7
<i>Ischaemum indicum</i> Kunth	Poaceae	Pasto	45.3	14.8	29.7	89.8
<i>Scleria pterota</i> C. Presl	Cyperaceae	Arvense	3.1	10.6	6.9	20.6
<i>Desmodium adscendens</i> (Sw.) DC.	Fabaceae	Arvense	2.5	10.9	3.9	17.3
<i>Desmodium incanum</i> (Sw.) DC.	Fabaceae	Arvense	1.1	9.8	2.9	13.7
<i>Rhynchospora nervosa</i> (Vahl) Boeck.	Cyperaceae	Arvense	1.2	7.3	1.5	10.0
<i>Phyllanthus urinaria</i> L.	Phyllanthaceae	Arvense	0.8	5.9	1.4	8.1
<i>Spermacoce ocyimifolia</i> Willd.	Rubiaceae	Arvense	0.5	5.3	1.7	7.5
<i>Blechum pyramidatum</i> (Lamb.) Urb.	Acanthaceae	Arvense	0.4	5.5	1.1	6.9
<i>Paspalum virgatum</i> L.	Poaceae	Arvense	0.6	2.2	2.7	5.6
<i>Axonopus compressus</i> (Sw.) P. Beauv.	Poaceae	Arvense	0.7	3.7	0.5	4.9
<i>Hyparrhenia rufa</i> (Nees) Stapf	Poaceae	Pasto	0.7	1.5	2.6	4.8
<i>Melothria pendula</i> L.	Cucurbitaceae	Arvense	0.1	2.2	0.4	2.7
<i>Mimosa pudica</i> L.	Fabaceae	Arvense	0.0	1.4	0.1	1.5
<i>Paspalum conjugatum</i> P.J. Bergius	Poaceae	Arvense	0.3	0.7	0.4	1.4
Especimen 1		Arvense	0.1	0.7	0.1	0.9
<i>Paspalum</i> sp	Poaceae	Arvense	0.1	0.6	0.1	0.8
<i>Hyptis capitata</i> Jacq.	Lamiaceae	Arvense	0.1	0.6	0.0	0.7

Apéndice 4. Abundancia, frecuencia, dominancia e IVI de las especies vegetales en pastos adyacentes a plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb. de tres años.

Pasto adyacente a melina de tres años (P-M3a)						
Especie	Especie	Tipo	Abun (%)	Frec (%)	Dom (%)	IVI
<i>Ischaemum indicum</i> Kunth	Poaceae	Pasto	69.5	21.2	49.7	140.4
<i>Homolepis aturensis</i> (Kunth) Chase	Poaceae	Pasto	14.4	18.6	16.3	49.2
<i>Scleria pterota</i> C. Presl	Cyperaceae	Arvense	2.1	16.2	12.6	31.0
<i>Axonopus compressus</i> (Sw.) P. Beauv.	Poaceae	Arvense	8.2	8.6	10.1	26.8
<i>Desmodium adscendens</i> (Sw.) DC.	Fabaceae	Arvense	3.3	9.8	6.0	19.1
<i>Spermacoce ocyimifolia</i> Willd.	Rubiaceae	Arvense	0.2	4.3	1.4	6.0
<i>Mimosa pudica</i> L.	Fabaceae	Arvense	0.2	4.6	1.1	5.9
<i>Fimbristylis dichotoma</i> (L.) Vahl	Cyperaceae	Arvense	0.1	3.3	0.3	3.7
<i>Rhynchospora nervosa</i> (Vahl) Boeck.	Cyperaceae	Arvense	0.1	3.3	0.2	3.6
<i>Kyllinga brevifolia</i> Rottb.	Cyperaceae	Arvense	1.5	1.6	0.4	3.5
<i>Phyllanthus urinaria</i> L.	Phyllanthaceae	Arvense	0.1	2.5	0.3	2.9
<i>Desmodium axillare</i> (Sw.) DC.	Fabaceae	Arvense	0.2	1.6	0.7	2.6
<i>Stizolobium</i> sp	Fabaceae	Arvense	0.0	0.9	0.3	1.2
Especimen 1		Arvense	0.0	0.9	0.1	1.1
<i>Lindernia diffusa</i> (L.) Wettst.	Linderniaceae	Arvense	0.1	0.8	0.2	1.0
<i>Desmodium incanum</i> (Sw.) DC.	Fabaceae	Arvense	0.0	0.8	0.2	1.0
<i>Solanum</i> sp	Solanaceae	Arvense	0.0	0.9	0.1	1.0