

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad de plantaciones clonales de teca y melina

Mario Guevara Bonilla (Coordinador)

Olman Murillo Gamboa

Yorleny Badilla Valverde

Edwin Esquivel Segura

Vicerrectoría de Investigación y Extensión

Junio 2024

TABLA DE CONTENIDOS

Datos generales	3
RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	5
Marco teórico	7
MATERIALES Y MÉTODOS	9
Introducción	44
Resultados y discusión	48
Conclusiones	54
Discusión	82
Referencias	87
ANEXOS	90

DATOS GENERALES

1.1. Código del proyecto

1401066

1.2. Nombre del proyecto

Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad de plantaciones clonales de teca y melina.

1.3. Escuela responsable

Escuela de Ingeniería Forestal

1.4. Otras escuelas participantes

NA

1.5. Instituciones o empresas participantes externas al TEC

NovelTeak

1.6. Investigador coordinador

Mario Guevara Bonilla, M.Sc.

1.7. Investigadores colaboradores

Olman Murillo Gamboa, PhD.

Yorleny Badilla, Dra.

Edwin Esquivel Segura, Dr.

1.8. Período de ejecución

Enero 2020 – diciembre 2022.

RESUMEN

La ausencia de paquetes tecnológicos actualizados referentes a técnicas de silvicultura intensiva en plantaciones clonales de teca y melina es una de las serias deficiencias que presenta el sector reforestador costarricense. Con la finalidad de revertir esta situación esta propuesta de investigación generó protocolos de silvicultura intensiva para el incremento de la productividad, calidad y valor económico de plantaciones clonales de teca y melina tanto para producción de madera para aserrío como para producción de tarimas. A través del método de análisis de casos se evaluaron cuatro plantaciones de teca y melina con baja productividad. De manera simultánea se establecieron dos plantaciones piloto con ambas especies, donde se aplicaron todas las técnicas desarrolladas que permitan eliminar todas las barreras o limitantes de producción previamente identificadas. Adicionalmente, se estableció un ensayo en donde se evaluaron tres espaciamientos diferentes para la producción de melina en ciclo corto. Con base en información de campo más información recopilada de costos de las distintas empresas y organizaciones relacionadas con la reforestación se elaboró una estructura de costos para ambas especies y para dos sistemas de producción.

Con base en estas experiencias de campo, se generaron dos manuales que mejoran los paquetes tecnológicos existentes en plantaciones clonales de teca y melina. Estos manuales incorporan elementos del manejo y monitoreo de la fertilidad de suelo, así como las mejores técnicas para el establecimiento y manejo de plantaciones de teca y melina con el propósito de aumentar la productividad. Además, se generó un nuevo modelo de costos de silvicultura intensiva para ambas especies.

Palabras clave: Silvicultura intensiva, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, manejo de plantaciones.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de árboles con fines productivos es imprescindible para el abastecimiento de madera del país, la Estrategia REDD+, la mitigación del cambio climático y la contribución con la meta de carbono neutralidad del país. Además, el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) ha establecido rendimientos mínimos para poder obtener los desembolsos anuales de los proyectos que actualmente tienen pago por servicios ambientales (PSA).

De acuerdo con estadísticas de la Oficina Nacional Forestal (2016) la tasa anual de reforestación en el país ha disminuido considerablemente. FONAFIFO, en concordancia con el PNFD 2011-2020, asignó recursos para reforestar 7.000 ha por año, de las cuales 2000 son para plantaciones de turnos cortos (tarimas) y plantar 750,000 árboles por año en sistemas agroforestales, sin embargo, solo se ha podido alcanzar en algunos años un 50% de esta meta. Esta disminución en el área plantada en los últimos años ha generado un desabastecimiento de materia prima de buena calidad.

Entre las causas de la disminución de la reforestación en Costa Rica se mencionan problemas de financiamiento, problemas de mercado y principalmente la baja productividad de las plantaciones forestales (Comisión de reforestación 2013, Martínez, 2014). La escogencia de sitios con serias limitaciones físicas (compactación) y químicas (altos porcentajes de saturación de acidez), el desconocimiento de técnicas correctas y eficientes de preparación de suelos, manejo de la fertilidad y manejo de nutricional de las plantaciones y la falta de paquetes tecnológicos adecuados son factores que han incidido en la baja productividad de las plantaciones. Adicionalmente la información disponible para las especies *Tectona grandis L.f* y *Gmelina arborea Roxb* en las guías silviculturales existentes para los productores es desactualizada (20 y 21 años respectivamente) (Fonseca 2003, Rojas et al. 2004), no diferencia en el manejo entre plantaciones para producción de madera para aserrío y para producción de tarimas y no existe un modelo de costos establecido para estos dos tipos de plantaciones

Para resolver estos problemas se necesitan paquetes tecnológicos de manejo intensivo. Como primer paso, el país apostó por el mejoramiento genético de los individuos como una primera estrategia, sin embargo, paralelamente a un buen programa de mejoramiento genético es necesario implementar paquetes tecnológicos modernos y adecuados que permitan a los árboles aprovechar su máximo potencial de crecimiento. A pesar de los esfuerzos generados por proyectos de investigación de la Escuela de Ingeniería Forestal y de expertos como Alvarado (2012) y Fernández Moya (2014) por hacer recomendaciones acerca de técnicas correctas de silvicultura y manejo de la fertilidad en plantaciones forestales, actualmente no existe en Costa Rica una guía o manual para manejar una plantación que incorpore material genético de alta calidad y un adecuado manejo de la nutrición y fertilidad. Adicionalmente no existen estudios que relacionen la respuesta individual de clones específicos al encalado y fertilización

Mediante los grupos de investigación GENFORES y de Silvicultura Intensiva del TEC se busca incrementar la productividad de plantaciones forestales clonales de teca y melina a través del manejo de la fertilidad del suelo y nutrición de los árboles y mediante la elaboración de paquetes tecnológicos que utilicen técnicas de silvicultura intensiva. Esta propuesta contribuye a llenar los vacíos de conocimiento existentes en el tema de silvicultura intensiva de plantaciones clonales, unificando el conocimiento científico generado en los últimos años en manejo de suelos, nutrición, mejoramiento genético, espaciamientos, manejo de la densidad, control de malezas, utilización de genotipos tolerantes a enfermedades, entre otros, convirtiéndola en una propuesta innovadora.

Con este proyecto el TEC contribuye a mejorar las condiciones para la reactivación de la inversión en el cultivo de la madera, generación de empleo rural asociado, en la siembra de árboles en general. La integración de este conocimiento en un sólo paquete tecnológico de silvicultura intensiva se traducirá en un aumento inmediato en productividad ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$), disminución de costos, reducción del ciclo de cosecha, que estimularán el cultivo de madera y aumentará el empleo rural asociado.

MARCO TEÓRICO

La productividad de un sitio se relaciona con la capacidad productiva de un bosque o una plantación en un ambiente dado en términos de volumen de madera (m^3) producida por unidad de superficie (ha^{-1}). Por otra parte, la silvicultura se basa en la teoría y la práctica de controlar el establecimiento, la composición, la calidad y la productividad de un rodal forestal para cumplir determinados objetivos de manejo (Espinosa y García, 2017).

A nivel mundial la silvicultura tanto de bosques como de plantaciones ha evolucionado de una silvicultura “generalista” a una silvicultura más intensiva, sitio específico y de acuerdo con el producto a obtener. El objetivo de la silvicultura intensiva es maximizar la producción volumétrica y el valor de los productos de la plantación, para lo cual se controla el espaciamiento, la preparación del sitio y se realizan prácticas frecuentes de control de malezas y manejo de la fertilidad del suelo (Rubilar et al 2018).

En Costa Rica el aporte de GENFORES y sus proyectos de investigación en el campo del mejoramiento genético han causado un aumento en el rendimiento de las plantaciones, sin embargo, este aumento en el rendimiento no ha estado acompañado con una silvicultura intensiva y adecuada a los nuevos requerimientos de las plantaciones. El entendimiento de como el ambiente y las distintas prácticas silviculturales (preparación de sitio, control de arvenses y fertilización) afectan los distintos genotipos (clones) es importante para desarrollar nuevos paquetes tecnológicos que aumenten la productividad y mantengan la sustentabilidad del sitio (Mead, 2005).

Un paquete tecnológico o plan silvicultural es un conjunto de herramientas tecnológicas o herramientas técnicas que buscan optimizar la producción de un cultivo. Para desarrollar paquetes tecnológicos adecuados se debe tener un proceso de planificación, investigación e innovación. Con un apropiado entendimiento de los recursos limitantes de un sitio, se pueden desarrollar planes silviculturales que busquen la mayor productividad posible en una forma financieramente viable (Rubilar et al. 2018). Entre esas prácticas silviculturales se encuentran el manejo de la densidad, la reducción de los factores limitantes de un sitio (e.g compactación del suelo, control de arvenses, entre otros) y la adición de recursos limitantes mediante los procesos de encalado y fertilización.

Silvicultura intensiva y manejo nutricional

En sistemas silviculturales intensivos, el manejo nutricional es un tema clave en donde la aplicación de enmiendas y la fertilización juegan un doble rol; a) aumentar la productividad, b) compensar la extracción de nutrientes por parte de los árboles para así lograr mantener la sustentabilidad del sistema en el tiempo (Fernández-Moya et al, 2017).

Adekunle et al. (2011) encontraron que hay una relación alta y positiva entre algunas propiedades químicas del suelo y las variables de crecimiento de los árboles de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*. El coeficiente de correlación mayor encontrado es entre la concentración de fósforo y el área basal para ambas especies. Los valores r son 0,98 y 0,96 para melina y teca, respectivamente, también se obtuvieron un valor r alto y positivo entre el potasio y el área basal para la teca.

Sin embargo, el pH podría afectar también la disponibilidad nutricional, tal y como lo presenta Alvarado y Raigosa (2012) por un lado las plantaciones forestales son susceptibles a valores inferiores en el pH de 5,5 y por otra parte las plantaciones forestales continúan acumulando nutrientes en su biomasa toda la vida, por lo que de una manera se podría entender que el disminuir la disponibilidad nutricional de las plantaciones forestales disminuirá lógicamente su rendimiento o alargará el turno.

En plantaciones forestales establecidas en proyectos previamente ejecutados en el CIF se han observado valores de pH de hasta a 4,5 y valores de Saturación de Acidez mayores a 45 %, lo que limitó posiblemente el rendimiento de las plantaciones forestales que se realizaron en investigaciones asociadas al Centro.

Por otra parte, existe la preocupación de que su alta tasa de crecimiento y una silvicultura intensiva podrían conducir al agotamiento de los nutrientes del suelo. Algunos resultados muestran que las plantaciones deberían tener rotaciones de 25 años ya que una rotación inferior conducirá muy probablemente a la disminución constante de nutrientes (Onyekwelu et al., 2006), para nuestro caso las rotaciones de Melina son inferiores a los 12 años. Onyekwelu et al. (2006) encontraron acumulaciones de hasta el 80% de los nutrientes en el fuste por lo que solamente queda un 20% de los nutrientes en estructuras no sujetas a extracción en un sitio. Algunos de los nutrientes acumulados principalmente en el fuste y en la corteza son Ca y Mg.

Finalmente, a pesar de la importancia internacional de especies como teca y melina para en satisfacer la creciente demanda mundial de productos de madera (Onyekwelu et al., 2006), existen pocos estudios en América Latina que traten sobre el manejo de la nutrición y aplicación de fertilizantes. Al igual que en especies como el eucalipto, los resultados encontrados para ambas especies han sido inconsistentes, principalmente cuando los rodales han alcanzado el cierre de copas (Albaugh et al 2015). Algunas de las razones para esta falta de respuesta incluyen sitios con fertilidad natural alta (Stape et al. 2010) o que otros recursos (principalmente la disponibilidad de agua) es el recurso limitante.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las metodologías para el cumplimiento de cada objetivo específico se muestran a continuación

OE1. Mejorar el paquete silvicultural de plantaciones clonales de teca y melina para la producción de madera para aserrío.

Este objetivo se desarrolló mediante una serie de actividades que se ejecutaron en secuencia.

I enfoque: Plantaciones establecidas (estudio de casos)

Con base en cuatro casos reales de plantaciones clonales existentes se determinaron los factores limitantes de cada sitio. Las plantaciones seleccionadas fueron:

- a)** Plantación clonal de teca de 4 años de muy baja productividad, en sitio de baja precipitación parte de la empresa Novelteak, Santa Cecilia de La Cruz de Guanacaste.
- b)** Plantación clonal de teca de baja productividad de 3 años de edad, sitio húmedo Colegio Agropecuario de San Carlos, Santa Clara.
- c)** Plantación clonal de melina de seis meses de edad, en sitio de alta precipitación pequeño propietario.
- d)** Plantación clonal de melina, sitio con niveles bajos de precipitación, Orotina.

En cada una de las plantaciones seleccionadas se realizaron evaluaciones de las propiedades del suelo, así como de la presencia de otros factores (malezas, plagas y enfermedades, entre otros) que afecten la productividad del cultivo.

Con base en los análisis efectuados, se realizaron las siguientes acciones:

1. Para todos los casos, se recomendaron posibles soluciones a las limitantes encontradas para el aumento de la productividad de las plantaciones.
2. Para un sitio en particular se estableció un ensayo con un diseño de bloques completos al azar con al menos tres repeticiones, donde se evaluó la respuesta de los árboles a distintos tratamientos (plan de remediación de las limitantes encontradas) que podrían variar de acuerdo con las limitantes de cada sitio.

El diseño experimental correspondió a un diseño de bloques completos al azar con cuatro tratamientos y seis repeticiones. Cada unidad experimental fue conformada por 30 árboles. Los tratamientos aplicados fueron: (i) carbonato de calcio, (ii) fertilizante granulado, fórmula completa 10-30-10, (iii) combinación de carbonato de calcio + fertilizante y (iv) tratamiento testigo.

Para este ensayo las variables evaluadas fueron:

Diámetro y su incremento: se midió el diámetro (d) a 1,30 m sobre el suelo de los árboles en cada tratamiento para estimar el incremento de esta variable. Se realizó una medición al momento de establecer los tratamientos y a los 3 meses de aplicado el tratamiento.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante un Análisis de varianza (ANDEVA). Se analizaron los supuestos del ANDEVA mediante la prueba de Shapiro Wilks (normalidad) y la prueba de Leven para la homocedasticidad. Para determinar si existieron diferencias significativas entre los tratamientos se aplicó una prueba de Tukey ($p < 0,05$).

II enfoque: establecimiento de nuevas plantaciones monoclonales con la integración del mejor paquete tecnológico del mercado

Con base en la información generada en el primer enfoque se establecieron dos plantaciones monoclonales integrando las mejores técnicas de silvicultura intensiva empezando por un análisis previo de los suelos (químico, físico); mejor preparación del suelo (rastreado, subsolado, lomillado); mejor control de malezas a lo largo del cultivo; aplicación de enmiendas (encalado, tipos de cal, enmiendas orgánicas, acorde con análisis del suelo) y fertilización (acorde con análisis de suelo).

A continuación, se presenta una descripción de los sitios seleccionados:

Sitio 1: El establecimiento de la plantación clonal de melina se llevó a cabo en la finca propiedad de Xiomara Murillo Phillips, ubicada en las coordenadas 84°27'09" O 10°26'42" N, del distrito Pital, cantón San Carlos. El área de plantación correspondió a 12 000 m². La precipitación media anual varía entre 3000 y 4000 mm (Tapia, 2014a), la temperatura media anual entre 24 y 26 °C (Tapia, 2014b), altitud promedio de 170 msnm, con pendiente moderada y suelo de orden Inceptisol (CR Suelos, Universidad de Costa Rica, V 1.0, 2015). El espaciamiento seleccionado fue de 4x3 metros.

VARIABLES EVALUADAS

- a) Crecimiento en diámetro y altura: Se medirán las variables altura (h) y diámetro a la altura del pecho (dap) de los árboles en cada tratamiento para estimar el crecimiento en cada una de estas variables. Se realizará una medición al momento de establecer los tratamientos y posteriormente se medirán a los 3, 6 y 12 meses.
- b) Medición de nutrientes en el suelo, materia orgánica y contenido de carbono: En cada una de las unidades experimentales en los meses que se realizará la medición de los árboles, se tomará una muestra compuesta (8 puntos de muestreo) a dos profundidades diferentes (de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm.)

Sitio 2.

La plantación monoclonal de teca se estableció en la Finca Santa Cecilia propiedad de la empresa Novelteak Costa Rica S.A. y localizada en el cantón de LaCruz, provincia de Guanacaste, coordenadas geográficas X: -85.431103000 Y:11.1153788000. El área de plantación correspondió a 10 000 m². El espaciamiento seleccionado fue de 4x5 metros.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizó un diseño completamente al azar con seis tratamientos y seis repeticiones. Cada unidad experimental estuvo conformada de 25 árboles con una parcela útil de 16 individuos. Los tratamientos utilizados se muestran en el cuadro uno.

Cuadro 1. Lista de Tratamientos y repeticiones por utilizar en plantaciones de teca recién establecidas.

Tratamiento	Tratamiento	Kg/Ha	kg / árbol
Dolomita + DAP 50%	1	250	0,6
Dolomita	2	400	1,0
Carbonato de calcio	3	200	0,5
Zeolita 50% + 10-30-10	4	250	0,6
DAP	5	200	0,5
Testigo	6	0	0,0

Variables evaluadas:

- c) Crecimiento en diámetro y altura: Se midieron las variables altura (h) y diámetro a la altura del pecho (dap) de los árboles en cada tratamiento para estimar el crecimiento en cada una de estas variables. Adicionalmente, con las variables evaluadas se calculó el volumen en pie de los árboles. Se realizó una medición al momento de establecer los tratamientos y posteriormente se medirán a los 3, 6 y 12 meses.
- d) Medición de nutrientes en el suelo, materia orgánica y contenido de carbono: En cada una de las unidades experimentales en los meses que se realizó la medición de los árboles, se tomó una muestra compuesta (8 puntos de muestreo) a dos profundidades diferentes (de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm.)

Análisis estadístico

Se realizaron varios ANOVA para analizar el efecto de los tratamientos sobre los valores de diámetro, altura y volumen comercial. Cuando las pruebas de ANOVA fueron significativas, se realizó una prueba de diferencias de medias y diferencias de Tukey-LSD para determinar el mejor tratamiento de fertilización en cada edad. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa R (versión 4.1.3), con un valor significativo de $\alpha = 0,05$.

OE 2. Determinar el mejor régimen de enmiendas, fertilización y manejo de densidad en plantaciones monoclonales de melina para la producción de tarimas.

La investigación se realizó en una plantación clonal de melina ubicada en Orotina, Pacífico Central de Costa Rica. El sitio se localiza a 220 msnm, donde en el período lluvioso registra aproximadamente 2250 mm/año, de abril/mayo hasta diciembre, con temperaturas cálidas que oscilan entre 24 y 34 oC. Durante el periodo seco (enero a marzo) se produce de una a dos lluvias al mes, que no superan los 30 mm. El sitio corresponde con la zona de vida Bosque Húmedo Tropical de Holdridge.

El sitio fue barrido al inicio con un tractor de oruga, para remover la sucesión de bosque secundario de alrededor de 4 años. El terreno se preparó luego con una rastra y subsolador, en fajas de 1m de ancho y cada 4m entre fajas, en dirección perpendicular a la pendiente (10%). Se aplicó un herbicida pre emergente y 15 días después se procedió a plantar. El hoyado se realizó con palín y las plantas de 6 semanas de edad se produjeron en ambiente protegido en Jiffy de 36mm. El sitio se plantó en octubre del 2019 y recibió lluvia hasta finales del mes de diciembre. Se aplicó 50g de cal dolomita al fondo del hoyo, y luego 100g de MAP (11-52-0) al hoyo (ver cuadro 1, donde se observa ausencia total de fósforo). Se incorporó Hidroretenedor al fondo del hoyo (0,5 litros por planta). A los dos meses se aplicó una rodajea de 1m alrededor de cada árbol y 100 g de sulfato de amonio (NH₄NO₃), con dos hoyos con espeque, a 15 cm de cada planta. La hormiga cortadora se controló con insecticida repelente (Fipronil), una vez cada 1 o 2 mes, durante los primeros 18 meses.

Cuadro 2. Análisis químico completo del suelo al momento de la siembra del ensayo clonal de espaciamientos de melina, Orotina, Pacífico central de Costa Rica.

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS															
Solución Extractora:		pH	cmol(+)/L						%	mg/L					m S/cm
KCl-Olsen Modificado		H ₂ O	ACIDEZ	Al	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn	CE
USUARIO	ID LAB	5.5	0.5	0,3	4	1	0,2	5		10	3	1	10	5	1,5
0-20 cm	S-19-04687	5.8	0.16	<0,16	7.46	2.28	0.50	10.40	2	ND	3.1	15	124	18	0,1
20-40 cm	S-19-04688	5.7	0.12	<0,12	5.95	1.55	0.34	7.96	2	ND	2.9	16	106	15	0,1

El sitio registró una textura arcillosa (15% arena, 13% limo y 72% arcilla).

Diseño experimental

Se establecerá un ensayo bajo el diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. De cada tratamiento se establecerán dos repeticiones en lotes de 200 árboles cada uno de ellos como unidad experimental. Las 200 plantas estarán compuestas por 50 clones en mezcla del programa de mejoramiento genético de melina de GENFORES (Cooperativa de mejoramiento genético forestal, Hernández et al., 2021a).

Cuadro 3. Espaciamientos utilizados en el desarrollo del ensayo en plantación clonal de melina, Orotina, Alajuela.

<u>Espaciamiento</u>	<u>N</u>	<u>n</u>
4 x 3	833	200
4 x 2,5	1000	200
4 x 3,5	715	200

Se evaluaron las siguientes variables:

- Altura
- Diámetro a la base
- Diámetro a 1,30m
- Diámetro de copa
- Cantidad de ramas por metro
- Altura de primera rama gruesa

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con base en el lenguaje de programación “R”, donde previo al análisis de varianza, se evaluó para cada variable, el cumplimiento de normalidad (prueba de Shapiro) y de homocedasticidad (prueba de Bartlett de homogeneidad de varianzas). La comparación múltiple entre espaciamientos se realizó mediante la prueba de Tukey. En aquellas variables que no cumplieron con los postulados de la regresión, se les analizó mediante la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis.

OE 3 Desarrollar un modelo de costos para plantaciones de teca y melina para dos modelos intensivos de producción.

Para poder compilar y sistematizar la información, se trabajó con una base de datos creada en Excel sobre costos generales de producción de plantaciones forestales en Costa Rica. Este archivo fue creado por la cooperativa de mejoramiento genético GENFORES.

Los datos de costos y rendimientos, de todas las labores de manejo de plantaciones, fueron compilados durante más de 10 años a partir de datos reales registrados en empresas reforestadoras costarricenses. La información fue sistematizada, unificada y promediada en un mismo orden para cada actividad y año de trabajo en plantaciones forestales. Con base en información obtenida se elaboró una estructura de costos para un ciclo de producción de tarimas y para un ciclo de producción de madera con la especie teca.

La estructura de costos consideró los siguientes aspectos:

- a)** Asistencia técnica
- b)** Mano de obra: El costo del jornal se determinó mediante el valor oficial actual del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. Al costo del jornal se le agregó el pago del seguro de salud del trabajador independiente de la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS).
- c)** Insumos
- d)** Herramientas

RESULTADOS

I enfoque: Plantaciones establecidas (estudio de casos)

Se realizaron cuatro estudios de caso para las distintas plantaciones seleccionadas. Se realizó una selección de los sitios de acuerdo con la especie y régimen de precipitación.

Sitio 1. Plantación clonal de 4 años en sitio de baja precipitación, Santa Cecilia, La Cruz.

Limitantes encontradas

Con la textura arcillosa presente en este sitio no existe mayor problema pues también tiene una buena cantidad relativa de arena. Por los orígenes de estos suelos las lomas suelen ser muy erosionadas y con niveles nutricionales más pobres que los valles, en estos casos deberá además del manejo de arvenses con coberturas que se realiza acompañarlos de muestreos de suelo y foliares que garanticen un buen desempeño de la plantación al implementar las medidas correctivas necesarias según la necesidad de cada lugar, al ser esta una finca grande debe recordar que una muestra de suelos cubre un área homogénea de hasta 20 ha y que en caso de las lomas deben muestrearse por separado hasta no comprobar que tienen condiciones similares.



Figura 1. Lote de plantación en la finca evaluada en Santa Cecilia, La Cruz.

Propiedades químicas del suelo

Esta plantación está en un suelo que presenta deficiencias de potasio que provoca desbalances en las bases (figura 2), adicionalmente presenta deficiencias de calcio en la profundidad 20 – 40 cm. Con base en estas dos deficiencias deben suplirse el potasio con un fertilizante rico en ese elemento como puede ser sulfato de potasio y por otra parte el calcio se debe suplementar mediante carbonato de calcio. Con esto se logrará balancear las bases. Adicionalmente se debe prestar atención al fósforo, que dicho sea de paso mostró efectos inmediatos a la aplicación con aumentos dramáticos en un periodo menor a 1 mes.

INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DE SUELOS												RELACIÓN ENTRE BASES							
Muestra	pH	cmol(+) / L				%		mg/L					BAJO MEDIO ÓPTIMO ALTO	Muestra	Relación				RELACIÓN ENTRE BASES:
		ACIDEZ	Ca	Mg	K	Sat. Al	P	Zn	Cu	Fe	Mn	Ca/Mg			Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	Ca/Mg	
S-20-02747	5,10	0,33	4,68	2,16	0,13	4,50	ND	10,80	17,00	153,00	117,00		S-20-02747	2,17	36,00	16,62	52,62	Ca/Mg	2-5
S-20-02748	5,10	0,31	3,91	1,99	0,11	4,90	ND	8,20	16,00	103,00	142,00		S-20-02748	1,96	35,55	18,99	53,64	Ca/K	5-25
																		Mg/K	2,5-15
																		(Ca+Mg)/K	10-40

Figura 2. Hoja de interpretación de los análisis de suelos realizados en el sitio de estudio.

Plagas y enfermedades

Las principales plagas encontradas en el sitio fue la hormiga zompopa y la roya de la teca (cuadro 4).

Cuadro 4. Principales plagas y enfermedades encontradas durante el diagnóstico fitosanitario inicial en plantación evaluada, Santa Cecilia, Guanacaste.

Especie	Fecha	Tipo de daño	Agente causal	Valoración
Teca		Defoliador/follaje	Atta sp	
Las hormigas conocidas como zompopas cortan el follaje de los árboles de teca, generando un daño en forma de "U" El follaje es transportado hasta los nidos para el cultivo del hongo de cual se alimentan. En algunos sitios se observó una defoliación bastante alta lo que afecta considerablemente la productividad de la plantación.				
Teca		Roya/Follaje	<i>Olivea tectonae</i>	
Afecta el follaje de árboles adultos. Las hojas afectadas son las más viejas, especialmente las de las partes bajas. Estas hojas presentan inicialmente manchas necróticas de tamaño y forma variable, de color verdoso que cambia a tonos claros y luego a café y grises. Las hojas severamente afectadas pueden caer. En el envés se forman estructuras llamadas uredinios, los cuales son eruptivos, cilíndricos y curvados; su abundancia es tan grande que las esporas o urediniosporas que liberan cubren toda la superficie inferior de la hoja, dándole un color anaranjado y una apariencia polvosa;				

Recomendaciones de manejo

1. Aumentar los aportes de calcio, para ello la aplicación intercalada de Carbonato de Calcio y Cal Dolomita ayudará. Se recomienda realizar una aplicación de 1 tonelada por hectárea por año.
2. Se recomienda una aplicación de 100 g por árbol de fertilizante rico en potasio al inicio de las lluvias, seguido de una aplicación de 1 tonelada por hectárea de carbonato de calcio. Posteriormente debe aplicarse MAP o DAP o un fertilizante rico en fósforo como 10 - 30 - 10 a una dosis de 100 g por árbol por año.
3. Se recomienda repetir los análisis de suelo 1 vez cada 2 años por lo menos.

Sitio 2. Plantación clonal de teca de baja productividad de 3 años de edad, sitio húmedo Colegio Agropecuario de San Carlos, Santa Clara.

Limitantes encontradas en el sitio

En algunos sitios de la plantación se encontraron empozamientos que reflejan un nivel freático alto. Esto afecta el desarrollo radicular de la especie y causa una disminución de la productividad y en algunos casos la mortalidad de los individuos.

En una sección de la plantación se presentó una cantidad de rocas mayor a lo usual lo que impidió que la plantación pudiera ser mecanizada. Adicionalmente, en este sitio se los controles de arvenses fueron menos frecuentes o intensos de lo necesario por lo que podría haber sido responsable de un atraso en la plantación.

Propiedades químicas del suelo

INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DE SUELOS												RELACIÓN ENTRE BASES							
Muestra	pH	cmol(+) / L				%		mg/L					BAJO MEDIO ÓPTIMO ALTO	Muestra	Relación				RELACIÓN ENTRE BASES Ca/Mg 2-5 Ca/K 5-25 Mg/K 2.5-15 (Ca+Mg)/K 10-40
		ACIDEZ	Ca	Mg	K	Sat.Al	P	Zn	Cu	Fe	Mn	Ca/Mg			Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K		
S-20-01708	5,10	1,17	8,80	4,23	0,27	8,10	2,00	4,80	14,00	187,00	153,00	BAJO MEDIO ÓPTIMO ALTO	S-20-01708	2,08	32,59	15,67	48,26	RELACIÓN ENTRE BASES Ca/Mg 2-5 Ca/K 5-25 Mg/K 2.5-15 (Ca+Mg)/K 10-40	
S-20-01709	5,20	1,06	10,09	4,69	0,25	6,60	1,00	4,10	12,00	140,00	115,00		S-20-01709	2,15	48,36	18,76	59,12		

Figura 3. Hoja de interpretación de los análisis de suelos realizados en el sitio de estudio.

Por otra parte, el intercalado con una plantación de plátano también podría haber aumentado la extracción de nutrientes que si no fue acompañada de una fertilización podría haber causado el desbalance en las bases observado en los cálculos producto de una falta de potasio relativo.

La acidez debe ser controlada con la aplicación de carbonato de calcio a razón de 1 tonelada por hectárea, posteriormente y distanciado al menos 1 mes debe aplicarse un fertilizante rico en fósforo como puede ser MAP, DAP o 10 – 30 – 10 para mejorar estos elementos y la acidez del sitio

Análisis foliar

Cuadro 5. Análisis foliar de plantación de teca evaluada en sitio de alta precipitación, Santa Clara, San Carlos.

ANÁLISIS QUÍMICO FOLIAR													
ID USUARIO	IDLAB	% masa						mg/kg					
		N*	P*	Ca*	Mg*	K*	S*	Fe*	Cu*	Zn*	Mn*	B*	Al**
SANTA CLARA 1	P-20-01929	2,24	0,15	0,98	0,40	1,29	0,12	173	18	26	61	15	174

-----ÚLTIMA LÍNEA-----

El análisis foliar demostró que la teca presentó niveles nutricionales adecuados, sin embargo, para los elementos fósforo, calcio y azufre presentaron valores muy cercanos los límites inferiores. Esto podría ocasionar que en un futuro la plantación pueda llegar a tener niveles nutricionales marginales.

Plagas y enfermedades

Cuadro 6. Principales plagas y enfermedades encontradas durante el diagnóstico fitosanitario inicial

Especie	Fecha	Tipo de daño	Agente causal	Valoración
Teca		Defoliador/follaje	Rabdobterus sp	
Los adultos se alimentan de follaje de la Teca, y producen perforaciones características de forma elongada y curva de aproximadamente 1,3 de largo y 0,16 cm de ancho.				
Teca		Cancro/fuste	Dothiorella sp.	
Resquebrajamiento longitudinal de la corteza que puede profundizar hasta el xilema. En algunos casos, se desarrolla en forma extensiva y cubre áreas en promedio de 12 x 6 cm; cuando se corta la corteza superficial es posible observar los tejidos internos totalmente necrosados (coloración parda oscura). En otros casos aparentemente los canchros más viejos el resquebrajamiento se prolonga a lo largo del fuste (hasta 60 cm) y el árbol forma callos en los bordes, lo cual delimita la extensión perimetral de los mismos. Es el cancro más común en la región centroamericana.				
Teca		Roya/Follaje	Olivea tectonae	
Afecta el follaje de árboles adultos. Las hojas afectadas son las más viejas, especialmente las de las partes bajas. Estas hojas presentan inicialmente manchas necróticas de tamaño y forma variable, de color verdoso que cambia a				

tonos claros y luego a café y grises. Las hojas severamente afectadas pueden caer. En el envés se forman estructuras llamadas uredinios, los cuales son eruptivos, cilíndricos y curvados; su abundancia es tan grande que las esporas o urediniosporas que liberan cubren toda la superficie inferior de la hoja, dándole un color anaranjado y una apariencia polvosa;

Recomendaciones de manejo

1. Aplicar Carbonato de Calcio para mejorar el pH y la acidez, así mismo minimizar los efectos de acidificación de los posibles fertilizantes a utilizar. La dosis recomendada de aplicación debe ser de 1 ton por hectárea por año y una aplicación de 100 g por árbol de un fertilizante rico en fósforo, podría ser una MAP, DAP o 10-30-30, que a su vez elevará los niveles de potasio.
2. Elaborar drenajes en las zonas con niveles freáticos altos para mejorar el flujo del agua y prevenir la muerte de raíces por hipoxia.
3. Mejorar el control de la vegetación acompañante, principalmente la eliminación de gramíneas.

Sitio 3. Plantación clonal de melina de seis meses de edad, en sitio de alta precipitación pequeño propietario

Limitantes encontradas en el sitio

Esta plantación fue establecida a finales de la época lluviosa (mes de noviembre) por lo que tuvo poca disponibilidad de agua en sus primeros seis meses después del establecimiento y sus meses efectivos de crecimiento se vieron reducidos.

En este sitio la principal limitante encontrada fue la presencia de malezas compitiendo por recursos con la melina. Esta vegetación impidió el crecimiento adecuado de la plantación. Adicionalmente se encontraron otros problemas como alta presencia de árboles remanentes el sitio, causando niveles de sombra inadecuados para el desarrollo óptimo de la melina.

Por otra parte, los niveles de fósforo no detectables indican que una aplicación de este elemento se obtendrá una respuesta tal cual se realizó anteriormente donde se recomendó y aplicó 10 – 30 – 10 con muy buenos resultados.



Figura 4. Melina de seis meses de edad en Finca de don Gerardo Martínez.

Propiedades químicas del suelo

Muestra	pH	cmol(+)L				%		mg/L				BAJO MEDIO ÓPTIMO ALTO	Relación				RELACIÓN ENTRE BASES Ca/Mg 2-5 Ca/K 5-25 Mg/K 2.5-15 (Ca+Mg)/K 10-40
		ACIDEZ	Ca	Mg	K	Sat.Al	P	Zn	Cu	Fe	Mn		Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	
S-17-08563	5,40	0,19	5,41	1,75	0,09	3,00	nd	1,30	10,00	168,00	35,00	ÓPTIMO	3,09	60,11	19,44	79,56	
S-17-08564	5,60	0,11	5,68	2,12	0,09	1,00	nd	1,60	9,00	138,00	39,00	ÓPTIMO	2,68	63,11	23,56	86,67	

Figura 5. Hoja de interpretación de los análisis de suelos realizados en el sitio de estudio.

Recomendaciones de manejo

1. Eliminar las gramíneas y otra vegetación existente en el sitio que esté afectando el crecimiento de la melina. Aplicar un producto químico sistémico de amplio espectro en la rodaja.
2. Realizar una fertilización NPK 10-30-10, con una dosis recomendada de 100 gramos por árbol.
3. A partir de las excretas de los animales presentes en la propiedad, elaborar abonos orgánicos que permitan una liberación lenta de nutrimentos y a su vez aportar algunos elementos menores.

En el momento de la realización de las podas, disponer las ramas cortadas siguiendo la curva de nivel correspondiente para disminuir l

Sitio 4. Plantación clonal de melina, sitio con niveles bajos de precipitación, Orotina.

Limitantes encontradas en el sitio

Este sitio es manejado con la aplicación de abonos orgánicos que mejorarán las capacidades de retención de humedad ya que por el régimen de lluvias que se presenta en el sitio se tiene un periodo prolongado de déficit hídrico. Mejorar la infiltración de suelo deberá ser una labor que se realice mediante zanjas de infiltración que a su vez disminuye la cantidad de erosión del sitio que a pesar de que no es un problema podría suceder por la pendiente presente.

Propiedades químicas del suelo

Para este sitio se observaron problemas leves de acidez que aunados a los niveles de calcio (3,85 cmol(+)/L en la profundidad de 0-20 cm es menor al valor óptimo. Definitivamente los niveles de fósforo no detectables limitan seriamente el crecimiento. Los niveles de zinc son bajos los que podrían causar problemas en la plantación. La aplicación de ½ tonelada de carbonato de calcio mejorará los niveles de este elemento y al igual que en los sitios anteriores se espera una respuesta fuerte a las aplicaciones de MAP, DAP o 10 – 30 – 10 como fuentes de fósforo.

INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DE SUELOS														RELACION ENTRE BASES								
Muestra	pH	cmol(+)/L					%				mg/L				BAJO MEDIO ÓPTIMO ALTO	Muestra	Relación				RELACION ENTRE BASES	
		ACIDEZ	Ca	Mg	K	Sat.Al	P	Zn	Cu	Fe	Mn	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K			(Ca+Mg)/K	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	
S-17-08563	5,30	0,60	3,85	1,86	0,24	9,00	nd	0,70	12,00	100,00	20,00	ÓPTIMO	S-17-08563	2,07	16,04	7,75	23,79	Ca/Mg	2 - 5			
S-17-08564	5,40	0,44	4,69	2,14	0,29	6,00	nd	1,10	13,00	104,00	29,00	ALTO	S-17-08564	2,19	16,17	7,38	23,55	Ca/K	5 - 25			
																		Mg/K	2,5 - 15			
																		(Ca+Mg)/K	10 - 40			

Figura 6. Hoja de interpretación de los análisis de suelos realizados en el sitio de estudio.

Análisis foliar

Del análisis foliar realizado en Orotina (cuadro 5), la melina presenta niveles adecuados en la mayoría de los nutrimentos analizados, sin embargo, y en concordancia con el análisis de suelo se encuentra bajo el potasio y zinc, adicionalmente se encuentra bajo el elemento boro. Estos otros elementos pueden ser aportados mediante fertilización foliar en caso de presentar deficiencias y ser pequeños los árboles, en caso contrario aportarlo mediante fertilización ya sea química u orgánica.

Cuadro 7. Análisis foliar de plantación de teca evaluada en sitio de alta precipitación, Santa Clara, San Carlos.

ANÁLISIS QUÍMICO FOLIAR												
ID USUARIO	IDLAB	% masa						mg/kg				
		N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
OROTINA 1	P-20-01700	2,64	0,13	1,13	0,47	0,54	0,13	51	7	17	215	15
OROTINA 2	P-20-01701	2,86	0,17	0,98	0,42	0,68	0,12	85	6	9	194	16

Plagas y enfermedades

Cuadro 8. Principales plagas y enfermedades encontradas durante el diagnóstico fitosanitario inicial

Especie	Fecha	Tipo de daño	Agente causal	Valoración
Teca		Defoliador/follaje	Atta sp	

Las hormigas conocidas como zompopas cortan el follaje de los árboles de teca, generando un daño en forma de "U" El follaje es transportado hasta los nidos para el cultivo del hongo de cual se alimentan. En algunos sitios se observó una defoliación bastante alta lo que afecta considerablemente la productividad de la plantación.

Recomendaciones de manejo

1. Como primera opción se recomendó encalar. Para este caso debe iniciarse con 0,5 Ton por hectárea de carbonato de calcio anual, esto mejorará los niveles en el suelo y mejorará la nutrición de la Melina.

2. Aportarse fósforo con alguna fórmula disponible que bien pudiera ser MAP o fosfato diamónico (DAP) o mediante fertilizante granulado NPK (10-30-10) para mejorar a la vez los problemas con el potasio, en todos los casos iniciar con una dosis de 100 g por árbol.
3. Continuar aportando abonos orgánicos con el fin de mejorar los microelementos. En este caso la dosis debe ser de al menos 1 Kg por árbol.
4. Monitorear el desarrollo de la plantación y aplicar los raleos a tiempo, cabe destacar que en este sitio el agua en el suelo puede resultar ser un factor limitante y que un raleo podría ayudar a disminuir la presión por este recurso.
5. Para disminuir la escorrentía realizar zanjas de infiltración

Resultado general

Con base en las evaluaciones realizadas se encontró que los principales factores limitantes en los sitios de baja precipitación fueron:

1. Niveles de fósforo disponible muy bajos
2. Disponibilidad de agua en el suelo
3. Vegetación competitiva, especialmente pastos y bejucos que pueden afectar la productividad y calidad de los árboles.

Mientras que para los sitios de alta precipitación se encontraron limitantes con respecto a:

1. Acidez del suelo
2. Malezas
3. Niveles freáticos altos.
4. Problemas de relaciones entre bases.

Manual de buenas prácticas para el diagnóstico y manejo de la fertilidad de suelo en plantaciones de teca y melina.

Como resultado del proyecto y con base en la ejecución del objetivo específico 1, se elaboró un manual que presenta aspectos básicos acerca de cómo determinar los factores limitantes de un sitio, del muestreo de suelos, así como el uso de herramientas como el análisis de suelo y análisis foliar, y la interpretación de estos.

Este documento es único en el sector reforestador costarricense ya que documentos similares son enfocados en cultivos agrícolas y no poseen ejemplos específicos para plantaciones forestales. Además, está escrito en un lenguaje que tanto técnicos como productores forestales lo pueden interpretar sin problemas. Este documento pretende actualizar el conocimiento sobre el manejo de la fertilidad en plantaciones forestales y mejorar los paquetes tecnológicos ya existentes.

Respuesta de los árboles a la aplicación de distintos tratamientos

Con base en la determinación de los factores limitantes, se estableció un ensayo en una plantación de teca en la finca de la Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI) en Santa Clara, San Carlos. No se encontraron diferencias ($p > 0,05$) en los diámetros de los árboles tres meses después de aplicado los tratamientos (cuadro 9).

Cuadro 9. Efecto de la aplicación de distintos tratamientos en una plantación de teca de 4 años de edad, Santa Clara, San Carlos.

Tratamiento	Diámetro(cm)	
	Al momento de aplicación	3 MDA
Carbonato de calcio	14,0	14,3
Carbonato de calcio + fertilizante	13,4	13,7
Fertilizante	14,0	14,4
Testigo	14,0	14,4

El incremento en diámetro para todos los tratamientos fue menor a 0,5 cm. por lo que la respuesta a los tratamientos no fue positiva. Estos valores de incrementos tampoco presentaron diferencias significativas.

II enfoque: establecimiento de nuevas plantaciones monoclonales con la integración del mejor paquete tecnológico del mercado

En este enfoque se presentan los resultados de una plantación de melina clonal establecida en Pital de San Carlos y de una plantación de teca, propiedad de NovelTeak, establecida en Santa Cecilia, Guanacaste. Los resultados de ambas plantaciones se presentan en los documentos:

1. Sistema agroforestal con melina-yuca en la Zona Norte, Costa Rica. La decisión de combinar los árboles con un cultivo agronómico residió en utilizar el cultivo principalmente como controlador de malezas y así evitar la aplicación de chapeas y aplicación de herbicidas.
2. Efecto de la aplicación de enmiendas y fertilizantes en el crecimiento inicial de una plantación de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Santa Cecilia, La Cruz, Guanacaste.

Evaluación inicial del sitio

Como primer paso se determinaron los factores limitantes del sitio mediante la metodología de clasificación de uso de las Tierras agroecológicas (Decreto Ejecutivo No. 41960 MAG- MINAE). Esta metodología abarca la evaluación de 14 parámetros entre los que destacan, variables del clima suelo y fertilidad.

Con base en dicha evaluación se determinó que el factor limitante principal del sitio fue la fertilidad, clasificando el Lote 1 como clase IV y el Lote 2 como clase VI. De acuerdo con

esta clasificación el uso correcto de la tierra para ambos lotes debe limitarse a cultivos perennes. Adicionalmente se evaluó la resistencia a la penetración mediante el uso de un penetrómetro digital, en donde se determinó una compactación de los primeros 60 cm de suelo, esta información es utilizada para determinar a qué profundidad se debe mecanizar el suelo.

Cuadro 10. Análisis químico del suelo en el sitio dividido en 2 lotes por uso anterior

Lote	Prof. (cm)	pH H ₂ O	ACIDEZ cmol(+)/L	Ca cmol(+)/L	Mg cmol(+)/L	K cmol(+)/L	CICE cmol(+)/L	SA %	P mg/L	Zn mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L
1	0-20	5,0	1,56	2,87	1,60	0,22	6,25	25	1	2,9	11	187	154
1	20-40	5,1	2,21	1,87	0,97	0,12	5,17	43	1	1,5	7	140	77
2	0-20.	4,7	2,78	1,43	0,31	0,23	4,75	59	3	4,0	16	117	96
2	20-40	4,6	3,16	1,16	0,23	0,12	4,67	68	1	3,8	18	138	106
Mínimo recomendado		5.5	0.5	4	1	0,2	5		10	3	1	10	5

Nota: la solución extractora corresponde a KCl-Olsen Modificado

Preparación del terreno

Como primera actividad se eliminaron dos árboles que se encontraban en el sitio. Posteriormente, la mecanización del terreno se realizó con un tractor agrícola de 120 caballos de fuerza a la cual se le agregaron implementos como una rastra de 16 discos y un subsolador para actividades agrícolas.

Actividades realizadas:

- 3 pases de rastra.
- 1 pasada de subsolador a 60 cm de profundidad, en este caso se realizan 2 pasadas en el área que anteriormente se encontraba plantada con piña por la compactación presente en el sitio.
- Elaboración de camellones con una encamadora de piña. Las dimensiones de los camellones fueron 40 cm de alto y distanciados a un metro.
- Construcción de dos drenajes manuales en la parte que presentó mayor nivel freático (humedad).



Figura 7. Sitio mecanizado y listo para el establecimiento del SAF.

Establecimiento del sistema agroforestal

El sistema agroforestal se estableció en dos fases, siendo la melina el componente principal y el primer cultivo en ser establecido. La melina se plantó al inicio de la época lluviosa (mes de mayo) y se utilizó un distanciamiento de siembra 3 metros entre árboles y 4 metros entre calles. Se utilizaron clones de alta productividad procedentes de GENFORES⁵.

La siembra de la yuca se realizó un mes después del establecimiento de la melina con un distanciamiento de 1 x 0,60 m. La siembra se realizó a una profundidad de 10 cm sobre el camellón. Es importante mencionar que la época de siembra tradicional en la zona abarca los meses entre agosto y febrero.

Manejo de la fertilidad del suelo

Como primer paso se realizó un análisis de suelo 6 meses antes del establecimiento del SAF. Con base en este análisis se calcularon las necesidades de encalado y fertilización, obteniendo como resultado la aplicación de una dosis de 4 ton/ha de cal. Esta dosis se fragmentó de la siguiente manera:

Primer encalado (1 ton/Ha): se realizó 6 meses antes del establecimiento del sistema.

⁵ Olman Murillo G., director de la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES), omurillo@tec.ac.cr, <https://www.tec.ac.cr/genfores>

- Segundo al cuarto encalado (1 ton/Ha): se realiza una vez cada cuatro meses, consisten una tonelada por vez en manera alternada, usando carbonato de calcio y cal dolomita.

Fertilización de la melina y la yuca

Las labores de fertilización durante el primer año fueron:

- Aplicación de 70 g de fertilizante granulado 10-30-10 a la melina en el momento de plantar.
- Aplicación de fertilizante foliar a la melina al mes de plantado y a los 2 meses de edad.
- Aplicación de 5 g de fertilizante granulado 10-30-10 por planta a los 2 meses de edad de la yuca con el fin de minimizar la competencia intraespecífica.
- Aplicación foliar de K para mejorar el rendimiento de la yuca a los 7 meses de edad de la yuca.

No se fertilizó la melina durante el segundo año.

Control de arvenses

El control de malezas se hizo mediante la incorporación de la especie leguminosa *Canavalia ensiformis* (canavalia) y mediante métodos manuales como deshierbas manuales y chapeas con machete. Se minimizó el uso de productos químicos dentro del sistema. La canavalia se plantó alrededor del árbol para que cumpliera el rol de cobertura viva e impidiera el crecimiento de gramíneas alrededor del árbol.



Figura 8. Planta de *Canavalia ensiformis*

Podas

Se realizó una deshija a los 4 meses de edad con el objetivo de eliminar brotes basales y corregir la forma de algunos árboles. Posteriormente se realizaron dos podas, una a los seis meses de establecida la plantación y otra a los 11 meses de edad posterior a la cosecha de layuca. Los instrumentos de poda fueron el rabo de zorro y un tijerón de tipo neozelandés.

Manejo de plagas y enfermedades

El manejo integrado de plagas en sistemas agroforestales es importante para el desarrollo adecuado del sistema y se relaciona con el uso de prácticas adecuadas como controles mecánicos, biológicos y aplicación de insecticidas solo cuando sea necesario. La principal plaga encontrada fue la hormiga zompopa y su control fue realizado mediante la eliminación de reinas en nidos (hormigueros) jóvenes.



Figura 9. Control mecánico de hormigueros

En cuanto al manejo de la enfermedad de la melina (*Ceratocystis* sp) se realizaron las siguientes acciones preventivas:

- Aplicación de enmiendas para reducir los niveles de saturación de acidez del suelo
- Control de malezas intensivo con coberturas vivas y cultivo agrícolas
- Realización de podas oportunas y solo a ramas menores a los 3 cm de grosor
- Definición de un nivel crítico de acción. Solo se realizarán acciones de manejo cuando los niveles de incidencia de la plantación igualen o superen al 10%.

La incidencia de la enfermedad a los 30 meses de edad fue de un 4,75% (38 árboles

de 800)

Productividad

En esta sección se muestran las principales variables dasométricas y la productividad del sitioplantado con melina a partir del incremento medio anual tanto en volumen total como volumen comercial. (Cuadro 2)

Cuadro 11. Productividad expresada en incremento medio anual en volumen total y volumen comercial para el SAF melina-yuca. Pital, San Carlos. Costa Rica.

Edad (meses)	Edad (años)	N (arb/Ha)	DAP (cm)	Altura Total (m)	Vol. total (m ³ /Ha)	IMA Vol. total (m ³ ha/año)	Vol. com. (m ³ /Ha)	IMA Vol. com. (m ³ ha/año)
12	1	833	8,6	5,3	12,8	12,8	6,4	6,4
24	2	800	15,5	13	98,1	49,1	49,05	24,5
30	2,5	800	17,0	15	136,2	54,5	68,1	27,2

El Cuadro 9 muestra que la densidad pasa de 833 a 800 árboles por hectárea de 1 a 2,5 años de edad. Durante el ciclo de cosecha el IMA en altura total fluctuó entre 5,3 m/año a la edad de un año a 6,5 m/año, lo cual es sobresaliente. De igual forma el IMA en DAP que transcurrió entre 8,6 cm/año en el año 1, así como 6,8 cm/año a la edad de 2,5 años. Todo lo anterior a pesar de la alta densidad. (Figura 5)

El volumen total a la edad de 2,5 años correspondió a 136 m³/ha, es decir 54,5 m³/ha/año siendo este incremento medio anual un indicador de altísimo potencial forestal a pesar de las limitaciones que representan las condiciones edáficas del sitio del ensayo.

El volumen comercial correspondió a 68,1 m³/ha, es decir 24.652 pmt/Ha (3 camiones tipo tándem-9 a la edad de 2,5 años. Este volumen se considera comercial ya que el nicho de mercado de la fabricación de material de embalaje recibe materia prima que consiste en trozas con largos desde 1,2 m y con diámetros a partir de 11,4 cm.

Análisis financiero

Se resumen a continuación las variables con mayor incidencia en la rentabilidad del caso analizado y los valores reales obtenidos con la ejecución del ensayo:

- Tasa de descuento: 9%
- Costo de los clones: ₡250/plántula
- Cantidad de árboles plantados: 900 plántulas

- Volumen comercial de madera: 24.518 pmt/Ha
- Precio de venta de madera en pie: ¢65/pmt.
- Precio de venta de yuca: ¢280/kg
- Precio de venta canavalia: ¢3000/kg
- Costo de semilla de canavalia: ¢4500/kg
- Cantidad de canavalia para cultivo: 2 kg

Cuadro 12. Flujo de caja para el primer ciclo de cosecha a los 30 meses de edad del SAF melina-yuca. Pital, San Carlos, Costa Rica

Rubro	0 meses	12 meses	24 meses	30 meses	Total
Ingresos					
Yuca	0	1 219 000	0	0	¢1 219 000
Venta semilla de Canavalia	0	487 500	0	0	¢487 500
Ingreso venta de madera	0	0	0	1 593 670	¢1 593 670
Ingresos totales	¢0	¢1 706 500	¢0	¢1 593 670	¢3 300 170
Inversiones					
Árboles a plantar (incluye 5% mortalidad)	225 000	0	0	0	¢225 000
Semilla Canavalia (4500/k)	9 000	0	0	0	¢9 000
Preparación de sitio		0			
Mecanización del terreno	120 000	0	0	0	¢120 000
Establecimiento del sistema					
Costo establecimiento melina	145 600	0	0	0	¢145 600
Costo establecimiento yuca	83 200	0	0	0	¢83 200
Costo de establecimiento	582 800	0	0	0	¢582 800
Mantenimiento de la plantación					
Manejo cultivo melina	0	485 364	88400	0	¢573 764
Manejo cultivo yuca	0	353 500	0	0	¢353 500
Costo de mantenimiento	0	838 864	88 400	0	¢927 264
Aprovechamiento yuca					
Aprovechamiento cultivo de yuca	0	60 360	0	0	¢60 360
Regencia Forestal	0	0	80 000	0	¢80 000
Costo de aprovechamiento	0	60 360	80 000	0	¢140 360
COSTO TOTAL SAF	582 800	899 224	168 400	0	1 650 424
Flujo de caja neto	(¢582 800)	¢807 276	(¢168 400)	¢1 593 670	¢1 649 746

Cuadro 13. Resumen de indicadores financieros obtenidos del flujo de caja

Indicador Financiero	Valor obtenido
Valor actual neto (VAN)	¢598 881
Tasa interna de retorno (TIR)	13 %
Relación beneficio-costo (B/C)	2,0 0

Bajo este escenario se obtuvo como resultado una TIR del 13% y el VAN en 30 meses corresponde a ¢598.881 por hectárea y calculado anualmente corresponde a ¢49.907 por hectárea. Mientras que el ingreso neto anual por la ganadería de carne en suelos marginales con desarrollo por siete meses (210 días) con 0,8 cabezas por hectárea (200 kg a la compra y 250 kg a la venta) dio como resultado ¢31.592 por hectárea (Sage, 2017). Es decir, resulta más rentable producir madera de melina para tarimas en un turno reducido de 30 meses que optar por la ganadería de engorde en las condiciones antes descritas.

Efecto de la aplicación de enmiendas y fertilizantes en el crecimiento inicial de una plantación de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Santa Cecilia, La Cruz, Guanacaste.

El análisis de suelos realizado a los cuatro meses de establecida la plantación hace ver una mejoría en las condiciones de pH, acidez y saturación de aluminio en especial con el uso de enmiendas que aportan calcio (CaCO_3 y cal dolomita). Se encontraron mejorías en los niveles de fósforo, aunque en aquellos tratamientos en los que se aplica el fósforo sin una enmienda que aporte calcio (DAP y zeolita 50%+10-30-10), los niveles registrados permanecen muy altos.

A los 30 meses los niveles de algunos elementos como el fósforo se aproximan al valor previo al establecimiento del ensayo, así mismo los niveles de Ca, Mg y K son mayores que los iniciales. Así mismo el testigo presenta mejores valores de suelo atribuidos al manejo de arvenses con coberturas. Sin embargo, esto no impactó la altura de los árboles a los 6 meses

Con respecto a la respuesta en el crecimiento en altura en los primeros seis meses existieron diferencias significativas entre todos los tratamientos y el tratamiento control (cuadro 14). Destaca el tratamiento de zeolita más fertilizante con un crecimiento en promedio de 141 cm. A los 12 meses de establecido el ensayo se mantuvieron las diferencias entre los tratamientos y el control. A pesar de que el tratamiento de zeolita más fertilizante sigue presentando el

mayor promedio de altura, no existen diferencias con los tratamientos de cal dolomita más DAP y de DAP solo.

Cuadro 14. Altura promedio de árboles de teca a los seis y 12 meses de aplicados los distintos tratamientos.

Tratamiento	Altura (cm) 6 meses	Altura (cm) 12 meses
Testigo	62,9 ^a	130,0 ^a
Dolomita	87,0 ^b	193,2 ^b
Carbonato de calcio	93,7 ^b	207,3 ^{bc}
Dolomita + DAP 50%	120,4 ^c	237,7 ^{cd}
DAP	122,0 ^c	255,2 ^d
Zeolita 50% + 10-30-10	141,1 ^d	260,8 ^d

En relación con el volumen métrico estimado a los 30 meses de establecida la plantación, el uso de dolomita con DAP al 50% presentó el mayor volumen promedio, sin embargo, no existe diferencias significativas de este comparado con el uso de zeolita al 50% con 10-30-10, así como con el uso de dolomita sola o de carbonato de calcio (cuadro 15).

Cuadro 15. Volumen en metros cúbicos calculado a 30 meses según tratamiento

Tratamiento	Vol métrico
Testigo	0,024 ^a
DAP	0,046 ^b
Carbonato de calcio	0,050 ^{bc}
Dolomita	0,052 ^{bc}
Zeolita 50% + 10-30-10	0,054 ^{bc}
Dolomita + DAP 50%	0,063 ^c

Resultados objetivo específico 2

En el cuadro 16 se muestra la relación entre el espaciamiento y la calidad potencial de los árboles para aserrío a los 3,3 años. De manera general puede observarse que no hay diferencias significativas en la calidad general entre los tres espaciamientos (Cal100). Sin embargo, si se observa diferencias en cuanto al índice de calidad de cosecha (N1+N2), se observa un leve gradiente de mayor proporción y cantidad de árboles de calidad 1 + 2 a medida que aumenta la densidad de plantación. En los tres espaciamientos se obtuvo una cantidad superior a los 500 individuos ha-1 de muy alta calidad, que superan el umbral de 300 a 400 individuos propuesto para este índice (Murillo, 2000). En los tres espaciamientos, menos de un 17% de los árboles son de baja calidad comercial (N3 y N4).

Con el criterio de calidad de Trozas 1 y 2, los resultados muestran un patrón similar, con más del doble de la cantidad de trozas de alta calidad, con respecto al valor propuesto de 1600 trozas ha-1 en la primera versión de los índices de calidad a finales de los años 90 (Murillo, 2000). En esta investigación se registró que más del 70% de las trozas son de alta calidad para aserrío y no se observó un patrón asociado a la densidad de plantación.

La calidad máxima posible se definió como una plantación ideal, donde todos los árboles de cosecha o 250 individuos ha-1, se registran con la máxima calidad de "1" (Murillo, 2000). Los resultados muestran un claro gradiente de a mayor densidad de plantación, mayor cantidad y proporción de árboles de calidad 1.

Cuadro 16. Índices de calidad y crecimiento diamétrico para cada densidad inicial del ensayo de melina clonal a los 3,3 años, Orotina, Pacífico central de Costa Rica.

Espaciamiento (m)	Cal100	N1+N2 (%)	T1+T2 (%)	Calidad Máxima N1	Dap (cm) Prom	Dap (cm) Máx	Dap (cm) Mín	Homogeneidad
4 x 2,5 (N = 1000)	79,21	645 (83)	3961 (73)	399 (160%)	14,90	23,5	7,8	59,94
4 x 3 (N = 833)	81,72	610 (90)	5121 (77)	282 (113%)	15,64	22,3	8,9	60,73
4 x 3,5 (N = 714)	81,29	513 (93)	4291 (85)	142 (57%)	19,80	28,0	15,0	67,63

N1+N2= Cantidad de individuos ha-1 calidad 1 y 2; Amount of tres quality 1 and 2ha-1; T1+T2 = Cantidad de trozas/ha calidad 1 y 2; Amount of logs quality 1 and 2ha-1; Cal100 = Calidad expresada en una escala de 1 a 100; Quality expressed at a scale from 1 to 100

En relación con la variación diamétrica, se observa un fuerte gradiente que establece un mayor diámetro promedio a menor densidad de plantación, que supera en un 27% y en un 33% a los otros dos espaciamientos. Estos valores de diámetro promedio corresponden con un IMA (Incremento Medio Anual) de 6cm año-1 para la menor densidad, 4,7cm año-1 y 4,57cm año-1 respectivamente para las otras dos densidades. El diámetro máximo muestra resultados no lineales, sin diferencias entre las dos densidades mayores, pero con un cambio abrupto en favor de la menor densidad, con un valor que supera en más de un 20% a los otros dos espaciamientos.

La homogeneidad de plantación es un parámetro que estima cuan semejantes son los árboles en la plantación. Por tanto, el índice va a registrar valores más altos en aquella plantación con menor cantidad de clases diamétricas (intervalo entre el árbol de dap mayor y menor) y mejor distribución de la cantidad de árboles en cada clase. Su utilidad práctica se puede encontrar en determinar la posibilidad de realizar raleos y podas sistemáticas. En el cuadro 2 se observa un gradiente evidente de mayor homogeneidad, a medida en que disminuye la densidad de plantación.

Con respecto al volumen comercial (cuadro 17), se observa un fuerte gradiente de mayor volumen por ha y por árbol conforme disminuye la densidad de plantación. Donde el 4x3,5m supera en un 29% y 54% a los espaciamientos 4x3m y 4x2,5m respectivamente. El patrón es aún más fuerte si se comparan por el volumen comercial promedio por árbol, donde el

4x3,5m supera en un 62% y 117% a los espaciamientos 4x3m y 4x2,5m respectivamente. En términos de productividad se observa el mismo patrón, donde la menor densidad (N = 714, 4x3,5m) registró un IMA de 43 m³ha⁻¹año⁻¹, que supera ampliamente al IMA de 33,6 m³ha⁻¹año⁻¹ y al IMA de 28 m³ha⁻¹año⁻¹ de los otros dos espaciamientos respectivamente. Si se resta el volumen para leña, el IMA del volumen comercial aserrable es entonces de 41,5m³ha⁻¹año⁻¹ (N = 714), 23,5 m³ha⁻¹año⁻¹ (N = 833) y de 20,5 m³ha⁻¹año⁻¹ (N = 1000) para los tres espaciamientos investigados respectivamente, donde las diferencias son aún mayores.

Cuadro 17. Efecto de la densidad de siembra en la producción y el valor económico de la madera, del ensayo clonal de espaciamientos de melina a los 3,3 años, Orotina, Pacífico central, Costa Rica.

Criterios	Espaciamientos		
	4 x 2,5	4 x 3	4 x 3,5
Vol. Total Comercial Redondo (m ³ ha ⁻¹)	93	111	143
Volumen para leña (diámetro <12cm)	25,18	33,45	6
Vol. comercial redondo en troza para tarima (m ³ ha ⁻¹)	60,75	69,70	77
Vol. comercial redondo para aserrío delgado (m ³ ha ⁻¹) >18cm	7,30	7,52	56
Vol. comercial redondo para aserrío grueso (m ³ ha ⁻¹) > 25 cm	0,00	0,00	4
Volumen comercial promedio por árbol (m ³)	0,12	0,16	0,26
No árboles efectivos ha ⁻¹ (sin raleo)	773	679	550
No de trozas comerciales ha ⁻¹ (sin raleo)	5444	6658	5018
Valor Real en pie de leña (US \$ ha ⁻¹)	133	173	31
Valor Real en pie madera para tarima (US \$ ha ⁻¹)	1703	2006	1751
Valor Real en pie madera para aserrío (US \$ ha ⁻¹)	316	295	2995
Valor Total (US \$ ha ⁻¹)	2151	2474	4777
Valor promedio US\$ por árbol	2,78	3,64	8,68

El otro elemento importante de observar es el patrón de distribución del volumen total en volumen para aserrío, para tarima y para leña. Donde de nuevo, a menor densidad de siembra se registra una mejor distribución del volumen en las tres categorías, y una menor proporción en el volumen de leña (4%). Los otros dos espaciamientos registran un patrón inverso, con muy poco volumen comercial para aserrío (6,7% para N = 833 y 7,8% para N = 1000) y más del 93% restante en

volumen para tarima o leña, que son productos de mucho menor valor comercia.

Los resultados del objetivo específico mostrados en esta sección se muestran en el artículo **titulado “Efecto del espaciamiento en la productividad y valor económico de melina clonal (*Gmelina arborea* Roxb), Pacífico central de Costa Rica”**. Este artículo fue sometido a la revista Agronomía Mesoamericana (ver Anexo 3). Además, se presenta el manual sobre cultivo de la melina en ciclo corto que actualiza el conocimiento y paquete tecnológico de esta especie (ver documento aparte).

Resultados objetivo específico 3

Se logró recopilar información referente a la productividad y costos de las distintas labores de establecimiento, mantenimiento y manejo de plantaciones de teca y melina. Para ambas especies se determinó que las distintas actividades y costos se pueden agrupar en los siguientes grupos:

1. Formulación y gestión del proyecto de reforestación.
2. Preparación y establecimiento de la plantación.
3. Mantenimiento y manejo de la plantación.
4. Administración técnica y regencia

Con base en esta información se desarrollaron los modelos de costos para producción de tarimas y para madera de aserrío.

Modelo de producción de tarimas con la especie *Gmelina arborea*

Los costos de producción de una hectárea de melina varían entre regiones del país. En zonas muy lluviosas como en el caribe y partes del Pacífico sur, el control de malezas aumenta y requiere de intervenciones cada 2 meses durante el primer año y parte del segundo año. Debe recordarse que el control de malezas es sin duda la actividad más costosa y representa casi un 30% (₡587 946 o poco más de \$1100) del total de costos.

En cuanto al costo de las plantas, estas tienen un valor que varía entre ₡250 y ₡325 por unidad, que significan aproximadamente un 9,5% del costo global. Pero el productor debe considerar no solo el costo, sino también el origen genético, ya que plantas clonadas provenientes de programas de mejoramiento genético, son materiales certificados, más seguros y estables en producción, altamente tolerantes a la marchitez de la melina y pueden adelantar la cosecha hasta en 6 meses con un 25% más de madera comercial. Por lo que invertir en plantas de una mejor calidad genética, significarán un beneficio en la producción mucho mayor.

La asistencia técnica representa un costo muy bajo en el total de la inversión (aproximadamente ₡ 75000 o poco menos de un 4%), pero con un impacto muy alto en el éxito del cultivo. El técnico podrá aportar información y guía de gran valor para el buen desarrollo de la plantación. Por tanto, para el productor la relación costo beneficio será sin duda muy beneficiosa con la inversión en asistencia técnica. De preferencia, el tema del apoyo técnico deberá ser canalizado a través de organizaciones locales.

Cuadro 18: Costos de producción de melina en un ciclo de 5 años, zona norte de Costa Rica. No incluye gastos administrativos

Año	Actividad	Monto (colones)
Año 1	Formulación y gestión del proyecto	¢18 918.69
Año 1	Preparación del terreno y establecimiento	¢654 252
Año 1	Mantenimiento y manejo: despunta (3ero y 6to mes), poda de formación (mes 2 o 3), poda baja hasta 2,5 m al 5-6 mes.	¢524 592
Año 2	Mantenimiento y manejo, poda hasta 5, (10-12 mes), l raleo a los 2,5 o 3 años (30-36 meses)	¢456 000
Año 3	Mantenimiento y manejo	¢49 336
Año 4	Cosecha o II raleo (4 o 4,5 años)	¢104 171
Año 5	Cosecha al final del período lluvioso	¢107 979
Asistencia Técnica		¢74 696
		¢1 989 945
Total		

En términos globales, el costo en US dólares es aproximadamente de \$3782 (1 \$ = ¢525) en zonas donde se requiere de un alto control de malezas, que es el rubro más caro. Un pequeño o mediano productor podría también reducir un poco costos de algunas actividades, hasta lograr un costo mínimo de US \$ 3000/ha. Esto es también especialmente válido en regiones con un periodo seco más prolongado, como el Pacífico norte y central del país, donde el control de malezas es un tanto menor.

Puede observarse que la inversión en el año 1 puede alcanzar ¢1,2 millones o poco más de los \$2000, que representa alrededor del 60% de los costos globales. El año 2 requiere de aproximadamente ¢470 mil colones que corresponde a un 23% de los costos. Es decir, el año 1 y 2 juntos representan más del 83% de todos los costos de la plantación clonal de melina.

Cuadro 19: Distribución de costos de una hectárea clonal de melina en las actividades principales.

Actividad	Costo	Proporción
Asistencia técnica	¢74 696	3,8 %
Mano de Obra	¢1 010 128	50,8 %
Insumos	¢828 955	41,7 %
Herramientas	¢71 880	3,6 %

Las actividades costo de plantas (9,5%) y control de malezas (29,5%) forma parte de los insumos.

En cuanto a la distribución de los costos, puede observarse que la mano de obra representa el 50 de los costos totales. Este valor ya incluye el 40% de las cargas sociales (menos la cesantía) y el 4,6% de la póliza de riesgos del INS: Costa Rica es el país en la región con la mano de obra más cara (¢353 000 o \$672 salario mensual líquido), por lo que las investigaciones buscan como simplificar procedimientos de campo, incluir nuevas tecnologías y la posibilidad de mecanización. Finalmente, estos costos se basan en experiencias con pequeños y medianos finqueros con proyectos menores a 50ha. En plantaciones de inversionistas más grandes, se deberá incluir un 10% de gastos administrativos.

Modelo de costos para madera de aserrío con la especie *Tectona grandis*

Al igual que con la melina, los costos de producción de una hectárea de teca varían entre regiones del país. En zonas lluviosas como en el caribe y el distrito de Pocosol en San Carlos, es necesario crear una red de drenajes y adicionalmente el control de malezas aumenta y requiere de intervenciones cada 2 meses durante el primer año y parte del segundo año. Debe recordarse que el control de malezas es sin duda la actividad más costosa y representa casi un 22,5% (¢656 220) del total de costos.

El costo de las plántulas de teca no varía con relación al costo de producción de una planta de melina. Este valor representa alrededor de un 7,6% del costo global del proyecto. Para la teca la asistencia técnica representa un costo muy bajo en el total de la inversión (aproximadamente ¢ 123 377 o un 4,23%), pero con un impacto muy alto en el éxito del cultivo.

Cuadro 20: Costos de producción de teca en un ciclo de 18 años, zona norte de Costa Rica. No incluye gastos administrativos, si incluye gastos de la supervisión técnica o regencia.

Año/Actividad	Monto (colones)
Año 1 Formulación	¢18 919.00
Año 1 Preparación de terreno	¢654 252.00
Año 1 Mantenimiento inicial, deshija, poda baja	¢524 592.00
Año 2 Mantenimiento, Poda media	¢456 000.00
Año 3 Mantenimiento, Poda alta	¢49 336.00
Año 4 I Raleo , Mantenimiento	¢104 171.00
Año 5 al Año 7 Mantenimiento	¢178 135.11
Año 8 II Raleo	¢164 600.83
Año 9 a Año 11 Mantenimiento	¢67 776.85
Año 12 III Raleo	¢123 784.59
Año 13 al Año 17 Mantenimiento	¢90 337.47
Año 18 Cosecha	¢79 909.60
Total	¢2 511 814.45

En términos globales, el costo de un proyecto de reforestación en US dólares es aproximadamente de \$ 5000 (1 \$ = ¢502) en zonas donde se requiere de un alto control de malezas, que es el rubro más caro. Un pequeño o mediano productor podría también reducir un poco costos de algunas actividades, hasta lograr un costo mínimo de US \$4500/ha. Esto es también especialmente válido en regiones con un periodo seco más prolongado, como el Pacífico norte y central del país, donde el control de malezas es un tanto menor.

Puede observarse que la inversión en el año 1 puede alcanzar ¢1,2 millones o casi \$2400, que representa alrededor del 50% de los costos globales. El año 2 requiere de aproximadamente ¢470 mil colones adicionales que corresponde a un 18% de los costos. Es decir, el año 1 y 2 juntos representan más del 68% de todos los costos de la plantación clonal de teca.

Cuadro 21: Distribución de costos de una hectárea clonal de teca en las actividades principales.

Actividad	Costo	Proporción
Asistencia técnica	₡123 377	4,9 %
Mano de Obra	₡1 557 125	62%
Insumos	₡878 525	35 %
Herramientas	₡71 880	3 %

Las actividades costo de plantas (7,6%) y control de malezas (26%) forma parte de los insumos.

En cuanto a la distribución de los costos, puede observarse que la mano de obra representa el 62 de los costos totales. Este valor ya incluye el 40% de las cargas sociales (menos la cesantía) y el 4,6% de la póliza de riesgos del INS: Costa Rica es el país en la región con la mano de obra más cara (₡353 000 o \$700 salario mensual líquido), por lo que las investigaciones buscan como simplificar procedimientos de campo, incluir nuevas tecnologías y la posibilidad de mecanización. Finalmente, estos costos se basan en experiencias con pequeños y medianos finqueros con proyectos menores a 50ha. En plantaciones de inversionistas más grandes, se deberá incluir un 10% de gastos administrativos.

DISCUSIÓN

Productividad forestal y factores limitantes del crecimiento

La productividad de una plantación forestal se define como la capacidad de un rodal en términos de volumen de madera (m^3) o biomasa producida por unidad de superficie (ha^{-1}). La productividad de un sitio está determinada por la disponibilidad de recursos y la eficiencia de una especie, procedencia o genotipo forestal en hacer el uso apropiado de los recursos disponibles.

La productividad forestal está limitada por el suministro de uno o más nutrientes en casi todas las plantaciones forestales, y la gestión de la nutrición forestal es un aspecto clave en la gestión de plantaciones comerciales. Adicionalmente, muchas plantaciones también tienen una limitación en su crecimiento por el suministro de agua. Las principales limitantes a la productividad encontradas en este proyecto coinciden con los factores limitantes expuestos por autores como Fonseca, 2003; Alvarado y Raigosa, 2012; Méndez y Bertsch, 2012 y Martínez, 2015.

Una correcta selección de sitios sigue siendo un aspecto fundamental para el éxito de proyectos de reforestación comercial. Técnicas como el muestreo de suelos, muestreo foliar y la aplicación de metodologías para la evaluación de sitios potenciales para la reforestación pueden ser herramientas útiles para la identificación de los factores limitantes, sin embargo, deben ser utilizadas con precaución y conocimiento. Metodologías como la clasificación de uso de las tierras agroecológicas deben de ir acompañadas por un proceso de capacitación y acompañamiento por parte de profesionales forestales y por parte de la academia.

Respuesta de los árboles a tratamientos silviculturales

La magnitud y duración de la respuesta del crecimiento a la aplicación de tratamientos silviculturales puede ser influenciada por varios factores y de acuerdo con Nilsson y Allen (2003) pueden existir cuatro tipos de respuestas diferentes: una respuesta tipo A ocurre cuando las ganancias en crecimiento luego de la aplicación de un tratamiento silvicultural se mantienen e incrementan durante todo el período de rotación. Una respuesta tipo B que es donde las ganancias luego de la aplicación de los tratamientos se mantienen, pero no incrementan luego del período inicial de respuesta. una respuesta tipo C donde las ganancias en crecimiento luego de la aplicación del tratamiento se pierden en el tiempo y finalmente una respuesta tipo D donde más bien se dan efectos negativos en la productividad de la plantación luego de la aplicación de un determinado tratamiento silvicultural.

Esos patrones de respuesta, que son relativos a un control no tratado y refleja una modificación en la disponibilidad de recursos del sitio, se puede observar al analizar las respuestas de crecimiento a largo plazo. Para este proyecto se encontraron respuestas tipo A y B para la plantación de teca recién establecida en Santa Cecilia, la Cruz y para la plantación de melina establecida en Pital de San Carlos.

Por otra parte, no se encontró ningún efecto en el incremento en el diámetro de la plantación de teca de cuatro años ubicada en Santa Clara, San Carlos. La respuesta a la aplicación de fertilizantes en plantaciones que ya han cerrado copas es bastante variable. Los mecanismos para explicar esta falta de respuesta a las adiciones de nutrientes después del cierre del dosel incluyen la alta fertilidad del sitio nativo (Stape *et al.*, 2010), otros recursos (agua) son principalmente limitantes (Campion *et al.*, 2006), los nutrientes que quedan disponibles a través de la mineralización o la descomposición de la tala y la hojarasca son suficientes para satisfacer la demanda de las plantas (Goncalves *et al.*, 2004; Nzila *et al.*, 2004),

Efecto del espaciamiento en la productividad y en la calidad de los árboles

Los resultados obtenidos son esperados y apegados a la premisa universal de la silvicultura, donde el diámetro promedio crecerá a una mayor tasa en la medida en que la competencia disminuya (Tenorio & Moya, 2019; Tenorio *et al.*, 2019; Tenorio *et al.*, 2024). La diferencia en crecimiento diamétrico de un 27% y un 33% respectivamente, entre el diámetro promedio de la plantación de menor densidad con respecto a los otros dos espaciamientos (4 x 3 y 4 x 2,5 m.), es un reflejo del estado de la alta competencia que ocurre a la edad de 3,3 años en melina si no se efectúa un primer raleo. Es un claro indicador de la pérdida en crecimiento que está ocurriendo en los dos espaciamientos de mayor densidad a tan temprana edad, donde el IMA desciende desde 6cm año⁻¹ hasta alrededor de 4,7 cm año⁻¹.

Definitivamente la densidad inicial de plantación con melina clonal no debe superar el umbral de los 800 individuos ha⁻¹, dado el extraordinario vigor y su tasa de crecimiento observada. Sería interesante evaluar comparativamente otras densidades de plantación alternativas, como un 4 x 4m (N = 625) o también 5 x 3m (N=667), o sistemas en distribución espacial en tresbolillo (Stape, Silva & Blinkey, 2022), con el propósito de observar su respuesta en crecimiento, calidad del árbol, calidad de plantación y valor económico.

En esta investigación no se incluyó el efecto del espaciamiento en la forma, conicidad y proporción diámetro/altura, que se ha reportado tener repercusión en el volumen comercial por árbol (Lega, 1988; Quirós, 2015). Lo cual genera una discusión de cómo se lograría el mayor volumen comercial por árbol, ¿con la promoción de una mayor altura comercial producto de mayor densidad de plantación o, con la promoción de un mayor diámetro que ocurrirá como resultado de una menor densidad?

Paquetes tecnológicos

Un paquete tecnológico o plan silvicultural es un conjunto de herramientas tecnológicas o herramientas técnicas que buscan optimizar la producción de un cultivo. Para desarrollar paquetes tecnológicos adecuados se debe tener un proceso de planificación, investigación e innovación. Con un apropiado entendimiento de los recursos limitantes de un sitio, se pueden desarrollar planes silviculturales que busquen la mayor productividad posible en una forma financieramente viable (Rubilar et al. 2018).

Los manuales técnicos existentes para el cultivo de teca y melina en Costa Rica tiene 20 años o más y no contemplan los avances en la silvicultura que se han efectuado en la última década. La realización de este proyecto logró una mejora en los paquetes tecnológicos existentes. Estas mejoras se pueden agrupar en los siguientes cuatro puntos.

1. Optimización del espaciamiento inicial para producción de madera en turno corto.
2. Determinación de factores limitantes a partir de metodologías de fácil uso como lo son la Clasificación de Uso de las Tierras Agroecológicas y con un adecuado muestreo de suelos.
3. Interpretación correcta de los análisis de suelos y
4. Creación de modelos de costos actualizados y acordes con modelos de producción de tarimas y madera para aserrío.

Costos

Entre las fuentes de variación del rendimiento de actividades y su costo asociado se encuentran aspectos inherentes a la plantación (especie, densidad manejo), factores biofísicos (forma del terreno) y la planificación y capacitación del personal.

En actividades de alto costo como la preparación inicial del terreno, el control de malezas y las podas es necesario disponer de información sobre productividad y costos para poder comparar entre métodos y optimizar las labores. En un futuro se deberá investigar sobre investigar opciones para reducir el costo de estas actividades mejores técnicas de preparación del terreno, introducción de posibilidades de mecanización y la incorporación de equipos de fumigación más eficientes. Adicionalmente, esta información será de gran utilidad para planificar la duración de las labores dentro de un período de producción y determinar si es viable tener maquinaria propia o utilizar los servicios de un contratista (Ladrach 2010).

CONCLUSIONES

1. Los principales factores limitantes para la productividad de plantaciones de teca y melina varían de acuerdo con el régimen de precipitación de la región. En sitios de baja precipitación la disponibilidad de agua en el suelo, los bajos niveles de fósforo y algunas arvenses como pastos y bejucos son los principales factores que afectan la productividad de las plantaciones comerciales. Por otra parte, los problemas de acidez, problemas de relaciones entre bases (calcio, magnesio y potasio), altos niveles freáticos y la presencia de gramíneas son los factores limitantes para el aumento de la productividad en sitios de alta precipitación.
2. Una correcta mecanización del terreno más la aplicación de la dosis correcta de cal aumentó la productividad de una plantación de melina hasta acortar su ciclo de corta a los 30 meses.
3. El espaciamiento 4 x 3,5m fue significativamente mejor para la producción de madera de melina en ciclo corto en el Pacífico central del país. La densidad inicial de plantación con melina clonal no debe superar el umbral de los 800 individuos ha⁻¹.
4. Tanto para el modelo de producción de tarimas con melina o para la producción de madera de aserrío con teca, el control de malezas fue la actividad de mayor costo, representando un 30% y un 23% respectivamente del total de costos asociados.
5. Los costos mínimos de producción de melina en ciclo corto y de teca en ciclo de 18 años rondan los 3000 dólares en el primer caso y 4500 en el segundo. Estos valores pueden variar de acuerdo con la región del país donde se establezca la plantación y de la intensidad de las labores de establecimiento y mantenimiento de la plantación que se realicen en los primeros dos a tres años.
6. El costo de un proyecto de reforestación de teca en US dólares es aproximadamente de \$ 5000 (1 \$ = ¢502) en zonas donde se requiere de un alto control de malezas. Un pequeño o mediano productor podría también reducir un poco costos de algunas actividades, hasta lograr un costo mínimo de US \$4500/ha.

RECOMENDACIONES

1. Establecer nuevos ensayos de fertilización a media rotación para entender adecuadamente la respuesta de los árboles a la aplicación de enmiendas y fertilizantes. Estos ensayos deben realizarse preferiblemente luego de la aplicación del primer raleo.
2. Evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas y fertilizantes en genotipos específicos de teca y melina.
3. Evaluar el efecto de las malezas en la productividad de plantaciones jóvenes de teca y melina y posibles tácticas de control que involucren controles culturales, manuales y químicos. Se debe optimizar esta labor ya que es el rubro de mantenimiento y manejo más caro.
4. Generar un programa permanente para el monitoreo de productividad y costos de actividades de mantenimiento y manejo en plantaciones clonales de teca y melina.

REFERENCIAS

- Adekunle VAJ, Alo AA, Adekayode FO. Yields and nutrient pools in soils cultivated with *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* in Nigerian rainforest ecosystem. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* (2011) 10:127-135.
- Alvarado, A., Raigosa, J. (2012). *Nutrición y fertilización forestal em regiones tropicales*. Editorial San José, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, CR. 416 p.
- Arias, D., Arguedas, M., Briceño, E., Canessa, R., Chavarría, A., Esquivel, E., Guevara, Mario. (2016). *Mejoramiento tecnológico de suelos para el incremento de la productividad en plantaciones de Tectona grandis*. Informe final de proyecto de investigación. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 86 p.
- Arriola, S., Villagra, K., Méndez-Morales, M., Gómez, N., Milton, S.-Q., & Rímolo-Donadío, R. (2019). *Desarrollo y validación de una metodología para la cuantificación de la erosión hídrica a través de fotogrametría UAS*. *Tecnología en Marcha*, 32, 43-52.
- Aruga, K., Hiyamizu, G., Nakahata, C. y Saito, M. (2013). *Effects of aggregating forests, establishing forest road networks, and mechanization on operational efficiency and costs in a mountainous region in Japan*. *Journal of Forestry Research*, 24(4), 747-754. doi:10.1007/s11676-013-0414-1.
- Banu, T., Borlea, G., & Banu, C. (2016). *The use of drones in Forestry*. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 557-562.
- Birdal, A., Avdan, U., Türk, T. (2017). *Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle*. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 8, 1144-1156. doi: 10.1080/19475705.2017.1300608.
- Bottinelli, N., Hallaire, V., Goutal, N., Bonnaud, P. y Ranger, J. (2014). *Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery*. *Geoderma*, 217, 10-17. doi:10.1016/j.geoderma.2013.10.025
- Briceño, E., Arias, D., Guevara, M., Esquivel, E., Arguedas, M., Canessa, R. (2016). *Effects of High Intensity Tillage Applications to Improve Productivity on Established Teak (Tectona Grandis) Plantations in Specific Site Conditions in Northern Costa Rica*. *Journal of Agriculture and Life Sciences*. Vol. 3, No. 2; December, 2375-4214.
- Dandois, J.P., Ellis, E.C. (2015). *High spatial resolution three heights with images from an unmanned aerial vehicle*. *Geomat Natural Hazards Risk*. 1-13

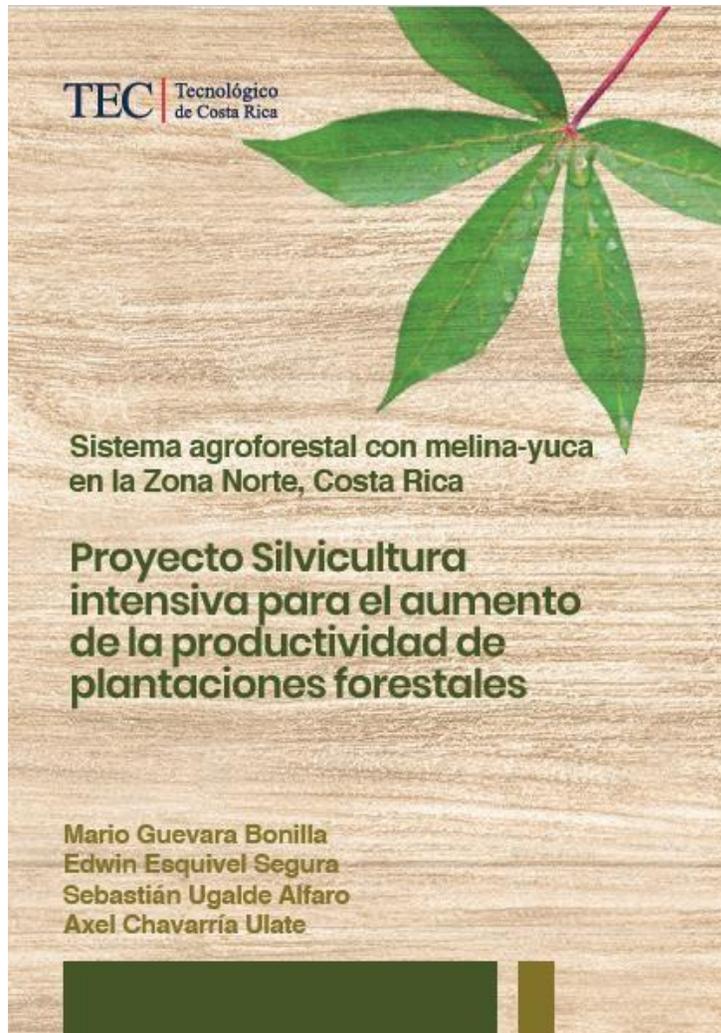
- Dick, B. (2003). The path to increase profitability!. In: PROCEEDINGS OF THE SECOND INTERNATIONAL PRECISION FORESTRY SYMPOSIUM. 2003.. University of Washington. Coll. of For. Resour. Seattle. Washington. p. 3-8.
- Chianucci, F., Puletti, N., Giacomello, E., Cutini, A. y Corona, P. (2015). Estimation of leaf area index in isolated trees with digital photography and its application to urban forestry. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(2), 377-382. doi:10.1016/j.ufug.2015.04.001
- Fernández-Moya, J. y Alvarado, A. (2014). Forest nutrition and fertilization in teak (*Tectona grandis* Lf) plantations in Central America. *New Zealand Journal of Science*, 44, 1-8. doi:10.1186/1179-5395-44-S1-S6
- González-Barrios, P., Pérez-Bidegain, M, & Gutiérrez, L. (2015). Effects of tillage intensities on spatial soil variability and site-specific management in early growth of *Eucalyptus grandis*. *Forest Ecology and Management*, 346, 41-50.
- Guerra-Hernández, J., González-Ferreiro, E., Sarmiento, A., Silva, J., Nunes, A., Correia, A., Fontes, L., Tomé, M., Díaz-Varela, R. (2016). Using high resolution UAV imagery to estimate tree variables in *Pinus pinea* plantation in Portugal. *Forest Systems*, 5, 2. doi:10.5424/fs/2016252-08895.
- JOKELA, et al. (2010). Twenty-Five years of intensive forest management with southern pines: Important lessons learned. *Journal of Forestry*. SAF. US: p. 338-347.
- Khanduri, V., Lalnundanga, L. y Vanlalremkimi, J. (2008). Growing stock variation in different teak (*Tectona grandis*) forest stands of Mizoram, India. *Journal of Forestry Research*, 19(3), 204-208. doi:10.1007/s11676-008-0043-2
- Mead DJ. Opportunities for improving plantation productivity. How much? How quickly? How realistic? *Biomass & Bioenergy* (2005) 28:249-266.
- Méndez, A., Vélez, J., Scaramuzza, F., & Villaroel, D. (2015). Los drones como herramienta para el monitoreo de cultivos. *Revista de la bolsa de comercio de Rosario*. 6-10.
- Mougin, E., Demarez, F., Diawara, M., Hiernaux, P., Soumaguel, N. y Berg, A. (2014). Estimation of LAI, fAPAR and fCover of Sahel rangelands (Gourma, Mali). *Agricultural and Forest Meteorology* 198, 155-167. doi:10.1016/j.agrformet.2014.08.006.
- Pádua, L., Vanko, J., Hruska, J., Adao, T., JJ, S., Peres, E., & Morais, R. (2017). UAS, sensors and data processing in agroforestry: a review towards practical applications. *International Journal of Remote Sensing*(38), 2349-2392.
- Panagiotidis, D., Abdollahenejad, A., Surovi, P., Chiteculo, V. (2016). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery.

International Journal of Remote Sensing, 38,8-10, 2392-2410. Doi: 10.1080/01431161.2016.1264028

- Onyekwelu JC, Mosandl R, Stimm B. Productivity, site evaluation and state of nutrition of *Gmelina arborea* plantations in Oluwa and Omo forest reserves, Nigeria. *For. Ecol. Manage.* (2006) 229:214-227.
- Tapia, A. (2014a). IMN Precipitación media CRTM05. En E. Ortiz-Malavasi (Ed.), Atlas Digital de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica. 1 DVD
- Tapia, A. (2014b). IMN Temp media CRTM05. En E. Ortiz-Malavasi (Ed.), Atlas Digital de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica. 1 DVD
- Ugalde, A.L. 2013. Teak: New trends in silviculture commercialization and Wood utilization. Ed 1. Cartago Costa Rica. International Forestry and Agroforestry (INFOA). 568 p.
- Vyas, D., Mehta, N., Dinakaran, N. y Krishnayya, K. (2010). Allometric equations for estimating leaf area index (LAI) of two important tropical species (*Tectona grandis* and *Dendrocalamus strictus*). *Journal of Forestry Research*, 21(2), 197-200. doi:10.1007/s11676-010-0032-0
- Yoshifuji, N., Kumagai, T., Tanaka, K., Tanaka, N., Komatsu, H., Suzuki, M. y Tantasirin, C. (2009). Inter-annual variation in growing season length of a tropical seasonal forest in northern Thailand. *Forest Ecology and Management*, 229, 333-339. doi:10.1016/j.foreco.2006.04.013
- Zhang, W., Yu, D., Shi, X., Wang, H., Gu, Z., Zhang, X. y Tan, M. (2011). The suitability of using leaf area index to quantify soil loss under vegetation cover. *Journal of Mountain Science*, 8(4), 564-570. doi:10.1007/s11629-011-1121-z

ANEXOS

Anexo 1. Documento técnico. Sistema agroforestal con melina-yuca en la Zona Norte, Costa Rica.



Sistema agroforestal con melina-yuca en la Zona Norte, Costa Rica

Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad de plantaciones clonales de teca y melina

Mario Guevara Bonilla¹

Edwin Esquivel Segura²

Sebastián Ugalde Alfaro³

Axel Chavarría Ulate⁴

PRESENTACIÓN

Un sistema agroforestal (SAF) es la forma de usar la tierra que implica la combinación de especies forestales en tiempo y espacio con especies agronómicas o distintas especies de animales. Entre sus principales beneficios se encuentran el aprovechamiento óptimo del espacio, diversificación de la producción, sostenibilidad de los componentes agrícolas y forestales y la producción de madera y almacenamiento de carbono.

Al establecer un SAF se deben aplicar técnicas de manejo de uso del suelo y de silvicultura para poder combinar los distintos componentes del sistema tanto en el espacio como en el tiempo.

Este documento es una recopilación de los resultados obtenidos de un sistema agroforestal implementado por el grupo de investigación y extensión en Silvicultura Intensiva de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Dentro del mismo se presentan aspectos técnicos sobre la preparación del sitio, establecimiento del SAF, actividades de mantenimiento y manejo, costos e ingresos durante sus dos años de desarrollo.

DESCRIPCION DEL SITIO

La propiedad se ubica en las coordenadas 84°27'09" E, 10°26'42" N, del distrito Pital, cantón de San Carlos, provincia de Alajuela. La precipitación media anual varía entre 3000 y 4000 mm (Tapia, 2014^a), la temperatura media anual entre 24 y 26 °C (Tapia, 2014b), altitud promedio de 170 msnm, con pendiente moderada y suelo de orden Inceptisol (Suelos CR, Universidad de Costa Rica, V 1.1, 2021). La finca tiene un área total de seis hectáreas de las cuáles 1 hectárea se destinó al cultivo de melina. El uso anterior de la finca fue

¹ Profesor e investigador, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, maguevara@itcr.ac.cr

² Profesor e investigador, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, eesquivel@itcr.ac.cr

³ Gestor de Silvicultura, Industria y Comercio, Oficina Nacional Forestal, sugalde@oficinaforestalcr.org,

⁴ Gestor de Desarrollo Organizacional, Oficina Nacional Forestal, achavarría@oficinaforestalcr.org,

predominantemente ganadería. Una sección de 3000 m² fue cultivada con piña durante los últimos 10 años.

SISTEMA AGROFORESTAL SELECCIONADO

El SAF implementado fue un sistema Taungya. Este modelo consiste en incluir dentro de las hileras con árboles, cultivos agronómicos que permitan generar un ingreso al productor mientras el componente arbóreo se desarrolla para su posterior aprovechamiento.

Las especies seleccionadas fueron *Gmelina arborea* (melina) y *Manihot esculenta* (yuca). La melina es una especie forestal de rápido crecimiento que se puede aprovechar en ciclos cortos. Entre los principales usos de su madera se encuentran la fabricación de tarimas, muebles y madera para aserrío. Por otra parte, la yuca es un cultivo agrícola de rápido crecimiento que puede ser cosechada aproximadamente en 10 meses. En Costa Rica existen dos variedades que se comercializan: valencia y señorita.

Adicionalmente, la melina es la especie maderable históricamente mejor cotizada en el nicho de mercado de la fabricación de materiales de embalaje. Para el primer semestre del 2021 el precio de la madera en pie que se destina a tarimas correspondió a 53 colones por pulgada maderera tica, es decir 20% más que el precio promedio. De igual forma en el caso de la madera en troza puesta en el aserradero cuyo precio correspondió a 123 colones e incluso en el caso de la madera aserrada se reporta una diferencia de 14% más que el promedio con 299 colones. (ONF, 2021)

En el 2020 el sector exportador utilizó 6.405.822 tarimas; 1,9% más que en el 2019 debido principalmente al aumento en las exportaciones de banano. Estas tarimas posibilitan la exportación de unos \$6.717 millones, de los cuales, \$1.960 millones se destina especialmente a las exportaciones agrícolas de piña y banano. Del total de tarimas, se fabricaron 5.267.968 con madera producida localmente y se estima que se requirió 417.066 m³-r. (ONF, 2021)

La escogencia de yuca se justifica debido a que se adapta muy bien a las condiciones climáticas del área del ensayo, no genera una competencia directa con los árboles de melina y debido a que posee un mercado internacional seguro considerando que las exportaciones desde Costa Rica se han incrementado de forma importante y sostenida. El valor de las exportaciones pasó de USD 9,4 millones en el año de 1990 a USD 91,7 millones en el año 2020. En el año del 2020 el país exportó más de 124,000 toneladas de yuca a 51 países. El principal destino de la exportación de yuca costarricense son los Estados Unidos, al que se exportaron 80,128 toneladas. Dicho volumen, constituye el 64,2% del total de exportaciones. (PROCOMER, 2021)

La canavalia es una leguminosa herbácea de ciclo anual a perenne con una altura de entre 60 y 100 cm. Tiene un porte arbustivo aunque en algunos casos podría tener un hábito trepador.

Sus usos varían desde cobertura viva hasta abono verde e insecticida (Peters *et al.* 2010). La escogencia de esta especie como cobertura viva para el control de malezas se basó en su porcentaje de cobertura, potencial de comercialización y facilidad de manejo una vez establecida en el campo.



Figura 1. Sistema agroforestal Taungya *Gmelina arborea* (melina) y *Manihot esculenta* (yuca). Pital, San Carlos, implementado en la Zona Norte de Costa Rica.

OBJETIVO DE PRODUCCIÓN

El objetivo del sistema fue la producción de madera para la fabricación de embalajes a través de un ciclo de cosecha reducido.

ACTIVIDADES INICIALES PARA EL ESTABLECIMIENTO DEL SISTEMA

Evaluación inicial del sitio

Como primer paso se determinaron los factores limitantes del sitio mediante la metodología de clasificación de uso de las Tierras agroecológicas (Decreto Ejecutivo No. 41960 MAG-MINAE). Esta metodología abarca la evaluación de 14 parámetros entre los que destacan, variables del clima suelo y fertilidad.

Con base en dicha evaluación se determinó que el factor limitante principal del sitio fue la fertilidad, clasificando el Lote 1 como clase IV y el Lote 2 como clase VI. De acuerdo con

esta clasificación el uso correcto de la tierra para ambos lotes debe limitarse a cultivos perennes. Adicionalmente se evaluó la resistencia a la penetración mediante el uso de un penetrómetro digital, en donde se determinó una compactación de los primeros 60 cm de suelo, esta información es utilizada para determinar a qué profundidad se debe mecanizar el suelo.

Cuadro 1. Análisis químico del suelo en el sitio dividido en 2 lotes por uso anterior

Lote	Prof. (cm)	pH H ₂ O	ACIDEZ cmol(+)/L	Ca cmol(+)/L	Mg cmol(+)/L	K cmol(+)/L	CICE cmol(+)/L	SA %	P mg/L	Zn mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L
1	0-20	5,0	1,56	2,87	1,60	0,22	6,25	25	1	2,9	11	187	154
1	20-40	5,1	2,21	1,87	0,97	0,12	5,17	43	1	1,5	7	140	77
2	0-20.	4,7	2,78	1,43	0,31	0,23	4,75	59	3	4,0	16	117	96
2	20-40	4,6	3,16	1,16	0,23	0,12	4,67	68	1	3,8	18	138	106
Mínimo recomendado		5.5	0.5	4	1	0,2	5		10	3	1	10	5

Nota: la solución extractora corresponde a KCl-Olsen Modificado

Preparación del terreno

Como primera actividad se eliminaron dos árboles que se encontraban en el sitio. Posteriormente, la mecanización del terreno se realizó con un tractor agrícola de 120 caballos de fuerza a la cual se le agregaron implementos como una rastra de 16 discos y un subsolador para actividades agrícolas.

Actividades realizadas:

- 3 pases de rastra.
- 1 pasada de subsolador a 60 cm de profundidad, en este caso se realizan 2 pasadas en el área que anteriormente se encontraba plantada con piña por la compactación presente en el sitio.
- Elaboración de camellones con una encamadora de piña. Las dimensiones de los camellones fueron 40 cm de alto y distanciados a un metro.
- Construcción de dos drenajes manuales en la parte que presentó mayor nivel freático (humedad).



Figura 2. Sitio mecanizado y listo para el establecimiento del SAF.

Establecimiento del sistema agroforestal

El sistema agroforestal se estableció en dos fases, siendo la melina el componente principal y el primer cultivo en ser establecido. La melina se plantó al inicio de la época lluviosa (mes de mayo) y se utilizó un distanciamiento de siembra 3 metros entre árboles y 4 metros entre calles. Se utilizaron clones de alta productividad procedentes de GENFORES⁵.

La siembra de la yuca se realizó un mes después del establecimiento de la melina con un distanciamiento de 1 x 0,60 m. La siembra se realizó a una profundidad de 10 cm sobre el camellón. Es importante mencionar que la época de siembra tradicional en la zona abarca los meses entre agosto y febrero.

ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO Y MANEJO

Manejo de la fertilidad del suelo

Como primer paso se realizó un análisis de suelo 6 meses antes del establecimiento del SAF. Con base en este análisis se calcularon las necesidades de encalado y fertilización, obteniendo como resultado la aplicación de una dosis de 4 ton/ha de cal. Esta dosis se fragmentó de la siguiente manera:

Primer encalado (1 ton/Ha): se realizó 6 meses antes del establecimiento del sistema.

⁵ Olman Murillo G., director de la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES), omurillo@tec.ac.cr, <https://www.tec.ac.cr/genfores>

- Segundo al cuarto encalado (1 ton/Ha): se realiza una vez cada cuatro meses, consiste en una tonelada por vez en manera alternada, usando carbonato de calcio y cal dolomita.

Fertilización de la melina y la yuca

Las labores de fertilización durante el primer año fueron:

- Aplicación de 70 g de fertilizante granulado 10-30-10 a la melina en el momento de plantar.
- Aplicación de fertilizante foliar a la melina al mes de plantado y a los 2 meses de edad.
- Aplicación de 5 g de fertilizante granulado 10-30-10 por planta a los 2 meses de edad de la yuca con el fin de minimizar la competencia intraespecífica.
- Aplicación foliar de K para mejorar el rendimiento de la yuca a los 7 meses de edad de la yuca.

No se fertilizó la melina durante el segundo año.

Control de plantas arvenses

El control de malezas se hizo mediante la incorporación de la especie leguminosa *Canavalia ensiformis* (canavalia) y mediante métodos manuales como deshierbas manuales y chapeas con machete. Se minimizó el uso de productos químicos dentro del sistema. La canavalia se plantó alrededor del árbol para que cumpliera el rol de cobertura viva e impidiera el crecimiento de gramíneas alrededor del árbol.



Figura 3. Planta de *Canavalia ensiformis*

Podas

Se realizó una deshija a los 4 meses de edad con el objetivo de eliminar brotes basales y corregir la forma de algunos árboles. Posteriormente se realizaron dos podas, una a los seis meses de establecida la plantación y otra a los 11 meses de edad posterior a la cosecha de la yuca. Los instrumentos de poda fueron el rabo de zorro y un tijerón de tipo neozelandés.

Manejo de plagas y enfermedades

El manejo integrado de plagas en sistemas agroforestales es importante para el desarrollo adecuado del sistema y se relaciona con el uso de prácticas adecuadas como controles mecánicos, biológicos y aplicación de insecticidas solo cuando sea necesario. La principal plaga encontrada fue la hormiga zompopa y su control fue realizado mediante la eliminación de reinas en nidos (hormigueros) jóvenes.



Figura 4. Control mecánico de hormigueros

En cuanto al manejo de la enfermedad de la melina (*Ceratocystis* sp) se realizaron las siguientes acciones preventivas:

- Aplicación de enmiendas para reducir los niveles de saturación de acidez del suelo
- Control de malezas intensivo con coberturas vivas y cultivo agrícolas
- Realización de podas oportunas y solo a ramas menores a los 3 cm de grosor
- Definición de un nivel crítico de acción. Solo se realizarán acciones de manejo cuando los niveles de incidencia de la plantación iguallen o superen al 10%.

La incidencia de la enfermedad a los 30 meses de edad fue de un 4,75% (38 árboles de 800)

Extracción de yuca

La yuca se extrajo a los 10 meses de haber sido plantada y se realizó una clasificación de acuerdo a su calidad. En total se extrajeron 3 calidades de yuca:

- Yuca de exportación: yuca de alta calidad, sin quebraduras y de 4 a 5 cm de diámetro.
- Yuca de segunda calidad: yuca que presentó algún tipo de quebradura, con un grosor de 2,5 cm y largos que excedan el tamaño de una caja.
- Yuca para alimentación animal: yuca que no cumple con ninguna de las características arriba mencionadas.



Figura 5. Proceso de extracción de yuca.

PRODUCCIÓN

Componente forestal - Melina

En esta sección se muestran las principales variables dasométricas y la productividad del sitio plantado con melina a partir del incremento medio anual tanto en volumen total como volumen comercial. (Cuadro 2)

Cuadro 2. Productividad expresada en incremento medio anual en volumen total y volumen comercial para el SAF melina-yuca. Pital, San Carlos. Costa Rica.

Edad (meses)	Edad (años)	N (arb/Ha)	DAP (cm)	Altura Total (m)	Vol. total (m ³ /Ha)	IMA Vol. total (m ³ ha/año)	Vol. com. (m ³ /Ha)	IMA Vol. com. (m ³ ha/año)
12	1	833	8,6	5,3	12,8	12,8	6,4	6,4
24	2	800	15,5	13	98,1	49,1	49,05	24,5
30	2,5	800	17,0	15	136,2	54,5	68,1	27,2

El Cuadro 2 muestra que la densidad pasa de 833 a 800 árboles por hectárea de 1 a 2,5 años de edad. Durante el ciclo de cosecha el IMA en altura total fluctuó entre 5,3 m/año a la edad de un año a 6,5 m/año, lo cual es sobresaliente. De igual forma el IMA en DAP que transcurrió entre 8,6 cm/año en el año 1, así como 6,8 cm/año a la edad de 2,5 años. Todo lo anterior a pesar de la alta densidad. (Figura 5)

El volumen total a la edad de 2,5 años correspondió a 136 m³/ha, es decir 54,5 m³/ha/año siendo este incremento medio anual un indicador de altísimo potencial forestal a pesar de las limitaciones que representan las condiciones edáficas del sitio del ensayo.

El volumen comercial correspondió a 68,1 m³/ha, es decir 24.652 pmt/Ha (3 camiones tipo tándem-9 a la edad de 2,5 años. Este volumen se considera comercial ya que el nicho de mercado de la fabricación de material de embalaje recibe materia prima que consiste en trozas con largos desde 1,2 m y con diámetros a partir de 11,4 cm.



Figura 5. Crecimiento en diámetro a 1,30 m expresado en centímetros para los árboles de melina a los 2 años de edad en el SAF melina-yuca. Pital, San Carlos. Costa Rica.

Componente agrícola - Yuca

El rango óptimo para cosechar la yuca varía de acuerdo al uso final del producto. Para la variedad valencia se recomienda un tiempo de cultivo de 8 a 10 meses (Aguilar *et al.* 2017). Si se cosecha posteriormente a estos periodos, se obtienen raíces más duras, que afectan la calidad culinaria y requieren un mayor tiempo de cocción. De acuerdo con el censo agropecuario realizado en el 2015 por el INEC, la producción promedio de yuca en Costa Rica es de 16,5 toneladas por hectárea.

Cuadro 3. Producción de yuca en el modelo planteado de acuerdo a su calidad en el SAF melina-yuca. Pital, San Carlos. Costa Rica.

Cultivo	Producción (kg)
Yuca primera calidad	2.852
Yuca segunda calidad	2.668
Tercera calidad	1.196
Total	6.716

COSTOS E INGRESOS

Todo proyecto agroforestal se compone de una serie de actividades distribuidas en el tiempo, las cuales tienen un costo, un rendimiento y una razón técnica para su ejecución. En el siguiente cuadro presenta los costos totales para el año uno y dos del modelo agroforestal seleccionado.

Cuadro 4. Costos e ingresos totales para el SAF melina-yuca. Pital, San Carlos. Costa Rica.

Labores	Año 1	Año2
Inversiones		
Árboles a plantar (5% mortalidad)	225.000	
Semilla Canavalia	9.000	
Preparación de sitio		
Mecanización del terreno	120.000	
Establecimiento del sistema		
Costo establecimiento melina	145.600	
Costo establecimiento yuca	83.200	
COSTO TOTAL ESTABLECIMIENTO	228.800	
Mantenimiento de la plantación		
Manejo cultivo melina	485.364	88.400
Manejo cultivo yuca	353.500	
COSTO TOTAL MANTENIMIENTO	838.864	88.400
Aprovechamiento yuca		
Aprovechamiento cultivo de yuca	60.360	
Regencia Forestal		80.000
COSTO TOTAL PROYECTO SAF	1.482.024	168.400
INGRESOS		
Yuca	₡1.219.000,00	
Venta semilla de Canavalia	₡487.500,00	
Ingreso venta de madera		1.594.000
Ingresos totales	₡1.706.500,00	₡1.594.000
Balance (Ingresos-costos)	₡224.476	₡1.425.600

Notas:

- Costo de mano de obra: ₡/hora, cargas sociales incluidas.
- Condiciones para la venta de la madera en pie: el comprador se hace cargo de costos de corta, trocea, carga y transporte.

ANALISIS FINANCIERO

El presente análisis financiero tiene como objetivo determinar la rentabilidad del sistema agroforestal melina-yuca probado en el sitio de estudio, en términos muy concretos para saber si vale la pena invertir en este negocio en específico.

Se resumen a continuación las variables con mayor incidencia en la rentabilidad del caso analizado y los valores reales obtenidos con la ejecución del ensayo:

- Tasa de descuento: 9%
- Costo de los clones: ¢250/plántula
- Cantidad de árboles plantados: 900 plántulas
- Volumen comercial de madera: 24.518 pmt/Ha
- Precio de venta de madera en pie: ¢65/pmt.
- Precio de venta de yuca: ¢280/kg
- Precio de venta canavalia: ¢3000/kg
- Costo de semilla de canavalia: ¢4500/kg
- Cantidad de canavalia para cultivo: 2 kg

Cuadro 5. Flujo de caja para el primer ciclo de cosecha a los 30 meses de edad del SAF melina-yuca. Pital, San Carlos, Costa Rica

Rubro	0 meses	12 meses	24 meses	30 meses	Total
Ingresos					
Yuca	0	1 219 000	0	0	¢1 219 000
Venta semilla de Canavalia	0	487 500	0	0	¢487 500
Ingreso venta de madera	0	0	0	1 593 670	¢1 593 670
Ingresos totales	¢0	¢1 706 500	¢0	¢1 593 670	¢3 300 170
Inversiones					
Árboles a plantar (incluye 5% mortalidad)	225 000	0	0	0	¢225 000
Semilla Canavalia (4500/k)	9 000	0	0	0	¢9 000
Preparación de sitio		0			
Mecanización del terreno	120 000	0	0	0	¢120 000
Establecimiento del sistema					
Costo establecimiento melina	145 600	0	0	0	¢145 600
Costo establecimiento yuca	83 200	0	0	0	¢83 200
Costo de establecimiento	582 800	0	0	0	¢582 800
Mantenimiento de la plantación					
Manejo cultivo melina	0	485 364	88400	0	¢573 764
Manejo cultivo yuca	0	353 500	0	0	¢353 500
Costo de mantenimiento	0	838 864	88 400	0	¢927 264
Aprovechamiento yuca					
Aprovechamiento cultivo de yuca	0	60 360	0	0	¢60 360
Regencia Forestal	0	0	80 000	0	¢80 000
Costo de aprovechamiento	0	60 360	80 000	0	¢140 360
COSTO TOTAL SAF	582 800	899 224	168 400	0	1 650 424
Flujo de caja neto	(¢582 800)	¢807 276	(¢168 400)	¢1 593 670	¢1 649 746

Cuadro 6. Resumen de indicadores financieros obtenidos del flujo de caja

Indicador Financiero	Valor obtenido
Valor actual neto (VAN)	¢598 881
Tasa interna de retorno (TIR)	13%
Relación beneficio-costos (B/C)	2,00

Bajo este escenario se obtuvo como resultado una TIR del 13% y el VAN en 30 meses corresponde a ¢598.881 por hectárea y calculado anualmente corresponde a ¢49.907 por hectárea. Mientras que el ingreso neto anual por la ganadería de carne en suelos marginales con desarrollo por siete meses (210 días) con 0,8 cabezas por hectárea (200 kg a la compra y 250 kg a la venta) dio como resultado ¢31.592 por hectárea (Sage, 2017). Es decir, resulta

más rentable producir madera de melina para tarimas en un turno reducido de 30 meses que optar por la ganadería de engorde en las condiciones antes descritas.

CONCLUSIONES

1. Los principales factores limitantes en el sitio del ensayo fueron la fertilidad del suelo, expresada principalmente en altos valores de saturación de acidez y en cuanto a las propiedades físicas, los altos valores de compactación en los primeros 60 cm. El uso correcto de la tierra para ambos lotes debe limitarse a cultivos perennes.
2. El establecimiento de la plantación requirió una preparación del terreno intensiva (incluido subsolado hasta 60cm de profundidad), dos pasadas de rastra, camellones y drenajes donde fuera necesario. Los árboles se plantaron con un espaciamiento de 3m x 4m. Además, se realizaron cuatro aplicaciones de encalado, una fertilización al momento de siembra y una fertilización foliar a los dos meses de edad y dos aplicaciones de fertilizante a la yuca. Se realizó una deshija y dos podas a los árboles de melina y no fue necesario realizar raleos.
3. A los 2,5 años de edad se alcanzó el turno de corta con 800 árboles por hectárea con un DAP de 17,0 centímetros y una altura total de 15,0 metros.
4. La melina produjo 68,1 metros cúbicos por hectárea de volumen comercial, es decir 24.652 pulgadas madereras ticas que representan un ingreso de 1.593.670 colones.
5. La cosecha de la yuca produjo 6.716 kg con un ingreso de 1.219.000 colones y la venta de semilla de Canavalia generó un ingreso de 487.500 colones.
6. El costo total del primer ciclo de cosecha del sistema agroforestal correspondió a 1.650.424 por hectárea en un plazo de 2,5 años.
7. La rentabilidad del sistema agroforestal estudiado se valoró a través de su respectivo flujo de caja del cual se derivó que la tasa interna de retorno (TIR) correspondió al 13% y el valor actual neto (VAN) fue de ¢598.881 por hectárea y calculado anualmente corresponde a ¢49.907 por hectárea. Además, la relación beneficio-costos (B/C) fue igual que 2,0. Se concluye que es más rentable producir madera de melina para tarimas en un ciclo de cosecha de 2,5 años que optar por la ganadería de engorde en sitios de baja productividad.

RECOMENDACIONES

1. En el caso de querer fomentar más la incorporación de cultivos agrícolas se recomienda aumentar el espaciamiento inicial de los árboles. Algunos espaciamientos que se pueden considerar son 4x4 metros o 5x 3 metros.
2. Debido al rápido crecimiento de la melina, se recomienda para la implementación de futuros sistemas agroforestales que incluyan combinaciones melina-yuca, establecer ambos cultivos al mismo tiempo.
3. Planificar adecuadamente el aprovechamiento forestal para fomentar la activación de yemas en los tocones
4. Evaluar el manejo de rebrotes.

LECCIONES APRENDIDAS

1. La identificación de los factores limitantes de un sitio es una técnica útil y fundamental para aumentar la productividad de plantaciones y sistemas agroforestales.
2. La incorporación de cultivos agrícolas dentro de plantaciones forestales es una alternativa viable para pequeños productores que deseen generar un ingreso adicional mientras el componente arbóreo se desarrolla para su posterior aprovechamiento
3. La implementación del SAF permitió un adecuado control de plantas arvenses y una reducción de insumos químicos. Adicionalmente, implementar una especie leguminosa como cobertura viva dentro del sistema aumentó los contenidos de nitrógeno foliar sin la necesidad de realizar aplicaciones constantes de fertilizante.
4. Las labores de cosecha de yuca fueron más agradables bajo los árboles que en un monocultivo.

REFERENCIAS

Aguilar, E., Saborío, D., Morales, J., Chacón, M., Rodríguez, L., Acuña, P., Torres, S., Gómez, Y. 2017. Manual del cultivo de Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) Instituto Nacional de Transferencia Agraria. Costa Rica. 96 p.

INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, Costa Rica). 2015. VI Censo Nacional Agropecuario. San José, Costa Rica. 146 p.

ONF. 2021. Usos y aportes de la madera en Costa Rica, Estadísticas 2020 y Precios 2021. Oficina Nacional Forestal. San José, Costa Rica. 68 p.

Peters, M., Franco, L., Schimidt, A., Hincapié, B. 2010. Especies forrajeras multipropósito. Opciones para productores del trópico americano. CIAT, Cali, Colombia. 222 p.

PROCOMER. 2021. Estadísticas de exportación de yuca. Portal Estadístico. Promotora de Comercio Exterior. Disponible en <http://servicios.procomer.go.cr/estadisticas/inicio.aspx>

Sage, L. 2017. Rentabilidad de ganadería de engorde en sitios de productividad marginal. Comunicación personal.

Anexo 2. Borrador de manuscrito Efecto de la aplicación de enmiendas y fertilizantes en el crecimiento de una plantación de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Santa Cecilia, La Cruz, Guanacaste

Efecto de la aplicación de enmiendas y fertilizantes en el crecimiento inicial de una plantación de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Santa Cecilia, La Cruz, Guanacaste

Alex Javier Ruiz-Moreno

Mario Guevara-Bonilla

Maribel Jimenez-Montero

Edwin Esquivel-Segura

Olman Murillo Gamboa

Yorleny Badilla Valverde

Resumen

La aplicación de enmiendas y fertilizantes en plantaciones forestales sigue siendo un tema de que hablar, algunas plantaciones son fertilizadas sin seguir criterios técnicos como por ejemplo curvas de absorción de elementos, esta carencia provoca crecimientos marginales que disminuyen la rentabilidad de las plantaciones. Con el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación de tres enmiendas (carbonato de calcio, dolomita y zeolita) y dos fertilizantes (fosfato diamónico y fórmula completa 10-30-10) en el crecimiento inicial de teca (*Tectona grandis* L.f.), se estableció un ensayo en Santa Cecilia de La Cruz, Guanacaste, Costa Rica en 2020. Se midió el crecimiento de los árboles en diámetro y altura cada 6 meses durante 30 meses y se estimó el volumen métrico a los 30 meses. Adicionalmente se hizo análisis de suelos a los 4 y 30 meses para valorar cambios en las condiciones del sitio. Se hizo una valoración de los costos de cada tratamiento y se hizo una estimación del valor de la madera a los 30 meses a fin de determinar la ganancia neta y la relación beneficio costo de cada tratamiento. Se encontraron diferencias significativas entre la aplicación de cualquiera de los tratamientos y el testigo, siendo el uso de zeolita a un 50% en combinación con 10-30-10 el mejor de los tratamientos tanto en términos productivos como económicos.

Palabras Claves: mejoradores de suelo, productividad, volumen, crecimiento, acidez.

Abstract

Key words: soil improvers, productivity, volume, growth, acidity.

INTRODUCCIÓN

La teca (*Tectona grandis* L.f.) es una de las especies maderables tropicales más conocidas a nivel mundial y goza internacionalmente de un lugar privilegiado en el contexto de la demanda y comercialización de su madera (De Camino y Morales, 2013; Ugalde, 2013). La teca es actualmente la especie comercial con mayor área reforestada en Costa Rica, con 47 167 hectáreas (INEC, 2015). La especie requiere de suelos con densidad aparente y porcentajes de saturación de acidez bajos, con niveles nutricionales elevados, drenajes profundos y poca pendiente (Khanduri et al., 2008).

En el proceso de selección de sitios para el establecimiento de plantaciones comerciales de esta especie, el manejo del suelo y la nutrición forestal son factores clave que determinarán la productividad futura de la plantación forestal. Adicionalmente, la disponibilidad de nutrientes del suelo es el único factor ambiental que los silvicultores pueden modificar de manera práctica (Fernández-Moya et al. 2014). Por lo tanto, los programas de aplicación de enmiendas y fertilización son necesarios y deberían complementar otros planes silvícolas para lograr tanto la productividad como la sostenibilidad de la plantación (Fernández-Moya et al. 2014).

La nutrición de la teca en Centroamérica debe prestar especial atención al N, K y Ca, ya que estos tres nutrientes son los más absorbidos por la teca, aunque P, Zn y Mg también pueden limitar la productividad en los bosques plantados de teca (Fernández-Moya et al. 2013, 2015, Zhou et al. 2016). En la región se han publicado algunos estudios de fertilización en plantaciones de teca a distintas edades (Kumar 2011, Alvarado 2012, Fernandez-Moya et al. 2017), sin embargo, pocos y con una evaluación en el tiempo.

A pesar de los resultados variables, la aplicación de fertilizantes es una práctica común al momento del establecimiento en las plantaciones de teca. Es por ello, que esta investigación buscó evaluar el efecto del uso de enmiendas y fertilizantes en el crecimiento inicial en altura y diámetro de plantaciones de teca en La Cruz,

Guanacaste, con miras a identificar la opción que genera mayores beneficios económicos en los primeros 30 meses de establecida la plantación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El área de estudio se encuentra en la Finca Santa Cecilia propiedad de la empresa Novelteak Costa Rica S.A. y localizada en el cantón de La Cruz, provincia de Guanacaste, coordenadas geográficas N 11.1153788° y O -85.431103°.



La precipitación media del sitio es de 1700 mm anuales y una temperatura promedio de 25,8 °C, con una estación seca muy marcada en donde solo los meses de marzo y abril se pueden considerar secos; altura promedio 350 msnm. Está ubicado en la zona de vida: Bosque húmedo tropical (bh-T) (Instituto de Desarrollo Rural de Costa Rica, (INDER), 2014).

El suelo en la zona pertenece al orden Ultisol, suborden Humult. Dichos suelos son caracterizados por ser suelos profundos, bien drenados, y de baja fertilidad. Según un análisis de suelos previo al establecimiento del ensayo el pH (5,10), la acidez (0,30) y la saturación de aluminio (5,0 %) no presentan valores críticos, aunque tienen altos niveles de hierro y manganeso y deficiencias severas de fósforo y en mucho menor grado de potasio. Así mismo, las deficiencias en potasio hacen que, la única relación entre bases que se encuentra dentro del rango óptimo sea Ca/Mg.

INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DE SUELOS													
Muestra	pH	cmol(+)/L				%	mg/L						BAJO MEDIO ÓPTIMO ALTO
		ACIDEZ	Ca	Mg	K	Sat.Al	P	Zn	Cu	Fe	Mn		
S-20-02747	5,10	0,33	4,68	2,16	0,13	4,50	ND	10,80	17,00	153,00	117,00		
S-20-02748	5,10	0,31	3,91	1,99	0,11	4,90	ND	8,20	16,00	103,00	142,00		

RELACIÓN ENTRE BASES					
Muestra	Relación				RELACIÓN ENTRE BASES
	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	
S-20-02747	2,17	36,00	16,62	52,62	Ca/Mg 2 - 5 Ca/K 5 - 25 Mg/K 2,5 - 15 (Ca+Mg)/K 10 - 40
S-20-02748	1,96	35,55	18,09	53,64	

Figura 2 interpretación por colores según la Hoja de interpretación de análisis de suelos de Meza et al 2018.

El material genético utilizado correspondió a un clon específico procedente del jardín. La plantación se estableció en junio de 2020 con un patrón de siembra de 5.1 x 5.0 m. Todos los tratamientos se aplicaron al voleo posterior a la plantación de los árboles. Los fertilizantes en el área de sombra, las enmiendas en la rodaja de crecimiento.

Se realizaron dos muestreos de suelos a los 4 y 30 meses después del establecimiento del ensayo, siguiendo la metodología establecida por Ramírez (1990) y la interpretación propuesta por Molina y Meléndez (2002).

Diseño experimental y análisis estadístico

Se realizó un diseño completamente al azar con seis tratamientos. Se tuvo seis repeticiones para los tratamientos con enmienda o fertilizante y dos para el testigo, para un total de 32 parcelas, con 16 árboles por parcela útil. Como enmiendas se utilizó carbonato de calcio (CaCO₃), dolomita (CaMg(CO₃)₂), producto comercial Magprill®90 y zeolita, y como fertilizantes se usó fosfato diamónico o DAP

$((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$ y 10-30-10 (tabla 2).

Cuadro 2. Lista de Tratamientos y repeticiones por utilizar en plantaciones de teca recién establecidas.

Tratamiento	Tratamiento	Kg/Ha	kg / árbol
Dolomita + DAP 50%	1	250	0,6
Dolomita	2	400	1,0
Carbonato de calcio	3	200	0,5
Zeolita 50% + 10-30-10	4	250	0,6
DAP	5	200	0,5
Testigo	6	0	0,0

VARIABLES EVALUADAS

Se hizo medición de altura cada seis meses durante 30 meses y de diámetro a la altura del pecho a partir de diámetros iguales o superiores a 1,0 cm. Para el mes 30 se estimó volumen métrico y volumen Hoppus en metros cúbicos. Para la estimación del volumen se usaron las fórmulas:

$$V_m = \left(\frac{Dap}{100}\right)^2 \times \frac{\pi}{4} \times H$$

$$V_{Hm} = \frac{(Dap \times \frac{\pi}{4})^2 \times H}{10000}$$

Donde:

- Dap: diámetro en centímetros medido a 1,30 m de altura
- H: altura en metros
- V_m : volumen métrico
- V_{Hm} : volumen Hoppus en metros cúbicos

El análisis de varianza se realizó con el módulo ANOVA, y la comparación de medias mediante la prueba de T ($P \leq 0.05$) para muestras independientes.

Análisis de costos

La estimación del costo de cada tratamiento se hizo considerando precios de mercado de cada materia prima puesta en finca y llevado a costo por hectárea. La valoración de los beneficios se hizo a partir del valor comercial del volumen estimado al mes 30 en m³/Ha. En todos los casos se utilizó un tipo de cambio CRC/USD de 550.

Análisis estadístico

Se realizaron varios ANOVA para analizar el efecto de los tratamientos sobre los valores de diámetro, altura y volumen comercial. Cuando las pruebas de ANOVA fueron significativas, se realizó una prueba de diferencias de medias y diferencias de Tukey-LSD para determinar el mejor tratamiento de fertilización en cada edad. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa R (versión 4.1.3), con un valor significativo de $\alpha = 0,05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de suelos realizado a los 4 meses de establecida la plantación hace ver una mejoría en las condiciones de pH, acidez y saturación de aluminio en especial con el uso de enmiendas que aportan calcio (CaCO₃ y dolomita). Se encuentran mejorías en los niveles de fósforo, aunque en aquellos tratamientos en los que se aplica el fósforo sin una enmienda que aporte calcio (DAP y zeolita 50%+10-30-10), los niveles registrados permanecen muy altos.

Cuadro 1. Análisis de suelos a los 4 meses de establecido el ensayo según tratamiento

Muestra	pH	cmol(+)/L			%			mg/L				
	H ₂ O	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
Testigo	5.70	0.12	5.70	2.39	0.28	8.47	1.40	1.00	10.25	13.50	103.00	90.00
DAP	5.72	0.40	6.74	2.98	0.28	10.40	3.85	220.00	11.87	13.67	135.67	172.67
Carbonato de calcio	6.50	0.14	8.41	2.60	0.37	11.52	1.55	4.00	8.05	13.17	96.33	53.00

Dolomita	7.15	0.09	9.55	3.19	0.37	13.19	0.70	2.67	5.67	11.67	69.50	41.50
Dolomita + DAP 50%	6.40	0.10	8.26	3.06	0.36	11.78	0.86	9.60	7.72	13.80	90.60	62.00
Zeolita 50% + 10- 30-10	5.50	0.16	7.11	2.68	0.64	10.59	1.65	55.40	10.05	14.00	117.00	92.17

A los 30 meses los niveles de algunos elementos como el fósforo se aproximan al valor previo al establecimiento del ensayo, así mismo los niveles de Ca, Mg y K son mayores que los iniciales. Así mismo el testigo presenta mejores valores de suelo atribuidos al manejo de arvenses con coberturas. Sin embargo, esto no impactó la altura de los árboles a los 6 meses (ver tablas 2 y 3).

Cuadro 2. Análisis de suelos a los 30 meses de establecido el ensayo según tratamiento

	pH		cmol(+)/L			%			mg/L			
	H ₂ O	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
Testigo	5.30	0.31	5.46	2.60	0.18	8.55	3.60	1.00	8.15	9.50	64.50	68.00
DAP	5.33	0.25	5.12	2.00	0.15	7.52	3.40	19.33	8.17	16.00	145.83	95.00
Carbonato de calcio	5.77	0.16	6.71	2.18	0.19	9.24	1.73	1.00	6.63	15.50	94.00	71.17
Dolomita	6.13	0.10	6.90	3.55	0.18	10.72	0.95	1.00	5.58	14.17	82.67	48.50
Dolomita + DAP 50%	5.72	0.12	5.99	2.77	0.16	9.04	1.38	1.75	6.78	16.00	136.40	69.20
Zeolita 50% + 10-30- 10	5.52	0.26	5.54	2.10	0.21	8.11	3.77	1.83	8.93	15.00	122.33	84.67

Cuadro 3. Altura promedio a 6 meses según tratamiento

Tratamiento	Altura (cm)
Testigo	62,94 a
Dolomita	87,03 b
Carbonato de calcio	93,75 b
Dolomita + DAP 50%	120,40 c

DAP	122,07 c
Zeolita 50% + 10-30-10	141,13 d

Con respecto a la respuesta en el crecimiento en altura en los primeros seis meses de establecida la plantación, se observa que el uso de zeolita al 50% con fertilizante 10-30-10 es el que genera los mejores resultados. Sin embargo, al año, no se encuentran diferencias significativas en el incremento en altura en los árboles que recibieron este tratamiento con respecto a aquellos que recibieron DAP sólo y combinado con dolomita.

En Costa Rica la teca absorbe los macronutrientes en el orden $Ca > N > K > P > Mg > S$, mientras que, bajo condiciones de África, los nutrimentos que más requiere la especie son $N > P > K > Ca > Mg > S$ (Alvarado & Raigosa, 2012; Drechsel et al., 1989). Cabe destacar que estas condiciones entre la Teca pueden variar por múltiples razones como lo es el material genético y las condiciones de sitio entre otras, por lo que no es de lo importante es lograr brindar los nutrientes de acuerdo a la necesidad de cada genotipo.

La respuesta de plantaciones de teca de hasta 2 años a la aplicación de entre 80 y 120 g año⁻¹ árbol⁻¹ de nitrógeno y fósforo como DAP mejora en forma significativa el crecimiento de los árboles y ligeramente el diámetro del tallo (Alvarado & Raigosa, 2012; Kishore, 1987). Esto indica que estos elementos podrían limitar el crecimiento en nuestras condiciones.

Adicionalmente, el crecimiento en altura en los primeros 12 meses de establecida la plantación es un factor importante para la sobrevivencia del árbol, pues esto reduce su competencia con las plantas arvenses, lo que además repercute en los costos de chapea.

Cuadro 4. Altura promedio a 12 meses según tratamiento empleado.

Tratamiento	Altura (cm)
Testigo	130,00 a
Dolomita	193,17 b
Carbonato de calcio	207,31 bc
DAP	237,74 cd
Zeolita 50% + 10-30-10	255,17 d
Dolomita + DAP 50%	260,80 d

Tanto a los 6 meses como al año, el uso de enmiendas o fertilizantes y el asocio de estos resultan en crecimientos en altura superiores a que si no se aplique ningún producto. Lo que desde el punto de vista práctico permite deducir que la aplicación de enmiendas y fertilizantes, solos o combinados aumentará el crecimiento, disminuirá la competencia por arvenses lo que podría impactar los rendimientos.

Cuadro 5. Volumen métrico estimado a 30 meses según tratamiento

Tratamiento	Vol métrico
Testigo	0,024 a
DAP	0,046 b
Carbonato de calcio	0,050 bc
Dolomita	0,052 bc
Zeolita 50% + 10-30-10	0,054 bc
Dolomita + DAP 50%	0,063 c

En relación con el volumen métrico estimado a los 30 meses de establecida la plantación, el uso de dolomita con DAP al 50% es el que resulta en el valor más alto, sin embargo, no existe diferencias significativas de este comparado con el uso de zeolita al 50% con 10-30-10, así como con el uso de dolomita sola o de carbonato de calcio.

Las zeolitas se definen como minerales aluminosilicatos micro porosos que se destacan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse reversiblemente. Incrementa los niveles en el suelo de fósforo, calcio, potasio y magnesio entre otros, más allá de lo que él mismo aporta, evitando problemas de fijación y optimizando las concentraciones de estos en el suelo y en los fertilizantes adicionados al suelo (Pérez-Marín, 2014). Por otra parte, las recomendaciones de fórmulas completas en plantaciones forestales deben estar orientadas a satisfacer las necesidades nutricionales de la especie y el tipo de suelo donde está sembrada. Durante la fase de almácigo o vivero, las fórmulas de siembra altas en P y que suministren cierta cantidad de N y K son más recomendadas, tal es el caso de fertilizantes como 10-30-10 (Alvarado & Raigosa, 2012).

En todos los casos que se usó una fuente de calcio, se obtuvieron mejores resultados que si del todo no se usa esta enmienda. Esto es consistente con lo indicado por Alvarado & Raigosa (2012), quienes indican que en ultisoles y andisoles, por los problemas de acidez que presentan, la práctica de encalado es necesaria para neutralizar la acidez del suelo, y de paso, incrementar el contenido de calcio o magnesio, en este último caso si se usa dolomita, y suplir estos dos elementos como nutrimentos a las plantas.

Al comparar el costo de cada tratamiento, la combinación de zeolita al 50% con 10-30-10 es el tratamiento de menor costo seguido del fosfato diamónico.

Cuadro 6. Costo por hectárea estimado por tratamiento

Tratamiento	Costo por kg	Kg/ha	Costo /ha (CRC)	Costo/ha (USD)
Dolomita	₡8 112,50	400	₡3 245 000,00	\$5 900,00
Dolomita + DAP 50%	₡4 243,85	250	₡1 060 962,50	\$1 929,02
Carbonato de calcio	₡1 515,00	200	₡303 000,00	\$550,91
DAP	₡375,20	200	₡75 040,00	\$136,44
Zeolita 50% + 10-30-10	₡317,35	250	₡78 338,02	\$144,25
Testigo	-	-	.	-

Tipo de cambio CRC ₡ 550/USD a 1 de mayo de 2023

Cuadro 7. Ganancia estimada por volumen métrico a 30 meses

Tratamiento	Vol promedio por árbol	Vol /ha	USD /Ha
Testigo	0,0237	9,02	\$1 804,04
DAP	0,0456	17,32	\$3 464,62
Carbonato de calcio	0,0496	18,86	\$3 771,96
Dolomita	0,0521	19,79	\$3 957,84
Dolomita + DAP 50%	0,0631	23,99	\$4 797,50
Zeolita 50% + 10-30-10	0,0537	20,40	\$4 079,37

Cuadro 8. Ganancia neta y relación B/C por ha en volumen métrico a 30 meses.

Tratamiento	Costos	Ingresos	Ganancia neta	B/C
Dolomita	\$5 900,00	\$3 957,84	-\$1 942,16	0,67
Dolomita + DAP 50%	\$1 929,02	\$4 797,50	\$2 868,48	2,49
DAP	\$550,91	\$3 771,96	\$3 221,06	6,85
Carbonato de calcio	\$136,44	\$3 464,62	\$3 328,18	25,39
Zeolita 50% + 10-30-10	\$144,25	\$4 079,37	\$3 935,11	28,28
Testigo	\$0,00	\$1 804,04	\$1 804,04	-

Con respecto a los costos el análisis beneficio costo puede ser el más valioso a realizar debido a que resume en un dato la relación del costo de las enmiendas y el fertilizante junto con los volúmenes que se podrían llegar a obtener. Por ello en la tabla 8 se puede observar como el Carbonato de Calcio y la Zeolita 50%+10-30-10 son los dos tratamientos donde se obtiene mayor beneficio. Cabe destacar que

la Zeolita lo logra con un costo por hectárea menor por lo que vuelve a este tratamiento muy atractivo.

CONCLUSIONES

El uso de zeolita en igual proporción en peso con fertilizante 10-30-10 genera los mejores beneficios económicos en los primeros 30 meses de establecida la plantación; adicionalmente, resulta en un mayor crecimiento en altura de la planta al año de establecida lo cual contribuye a una mayor sobrevivencia de los árboles ante la competencia por luz con plantas arvenses.

La no aplicación de enmiendas o fertilizantes en la producción de teca resultó en el menor crecimiento en diámetro y altura y por tanto en los menores ingresos. La ganancia neta fue una de las más bajas, siendo la menor de todas, el uso de una cal dolomita de alto precio en el mercado no generó las mejores ganancias

.Bibliografía

Alvarado, A., & Raigosa, J. (2012). Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. *Agronomía Costarricense*, 36, 113-115.

Álvarez Solís, J. D., Díaz Pérez, E., León Martínez, N. S., & Guillén Velásquez, J. (2010). Enmiendas orgánicas y actividad metabólica del suelo en el rendimiento de maíz. *Terra Latinoamericana*, 28(3), 239-245.

Domínguez Lerena, S., Murrias, G., Sierra, N. H., & Peñuelas, J. L. (2001). Cultivo de once especies mediterráneas en vivero: implicaciones prácticas. *Revista Ecología N°*, 15, 213-223.

Drechsel, P., Schmall, S., & Zech, W. (1989). Mineral nutrition and soil properties in young teak plantations in Benin and Liberia. *Mitt. Dtsch. Bodenkundk. Gesellsch*, 59(11), 691-696.

Escamilla Hernández, N., Obrador Olán, J. J., Carrillo Ávila, E., & Palma López, D. J. (2015). Uso de fertilizantes de liberación controlada en plantas de teca (*Tectona grandis*), en la etapa de vivero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(3), 329-333.

Escobar Rodríguez, R. (2007). *Manual de viverización. Eucalyptus globulus a raíz cubierta*. INFOR.

Instituto de Desarrollo Rural de Costa Rica, (INDER). (2014). Caracterización del Territorio Inder; Liberia, La Cruz. Territorio Liberia – La Cruz .

<https://www.inder.go.cr/liberia-la-cruz/Caracterizacion-Territorio-Liberia-LaCruz.pdf>

- Kishore, N. (1987). Preliminary studies on the effect of phosphatic fertilizers on teak plantation. *Indian Forester*, 113(6), 391-394.
- Labrador, J. (1996). Dinámica de la materia orgánica en los agro sistemas.
- Landis, T. D. (2000). No title. *Manual De Viveros Para La Producción De Especies Forestales En Contenedor*,
- Molina, E., & Meléndez, G. (2002). No title. *Tabla De Interpretación De Análisis De Suelos. Centro De Investigaciones Agronómicas, Universidad De Costa Rica*,
- Osorio, N. W. (2014). Manejo de nutrientes en suelos del trópico. *Editorial Medellín, Colombia: L. Vieco SAS*, 117-129.
- Pérez-Marín, M. F. (2014). Evaluación de la zeolita natural utilizada como una tecnología productiva y limpia, aplicada al pasto Maralfalfa (*Pennisetum sp*) como un complemento en el uso de los fertilizantes nitrogenados.
- Ramírez, M. (1990). Toma de muestras de suelos. (74), 1-4.
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-0416.pdf>
- Rotondo, R., Firpo, I. T., Ferreras, L., Toresani, S., Fernández, S., & Gómez, E. (2009). Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y fertilizante nitrogenado sobre propiedades edáficas y productividad en cultivos hortícolas. *Horticultura Argentina*, 28(66), 18-25.

Anexo 3. Acuse de recibo por parte de la Revista Agronomía Mesoamericana y artículo científico sometido.

Gracias por enviar el manuscrito "Efecto del espaciamiento en la productividad y valor económico de melina clonal (Gmelina arborea Roxb.), Pacífico central de Costa Rica" a Agronomía Mesoamericana. Con nuestro sistema de gestión de revistas en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial.

URL del manuscrito: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/authorDashboard/submission/59519>

Nombre de usuario/a: olmuga

En caso de dudas, contacte conmigo. Gracias por elegir esta revista para publicar su trabajo.

Nancy León Ulate

Ing. Nancy Patricia León Ulate

Agronomía Mesoamericana

pccmca@gmail.com

2511-7770

8877-0028

Efecto del espaciamiento en la productividad y valor económico de melina clonal (*Gmelina arborea* Roxb.), Pacífico central de Costa Rica

(Spacing effect in productivity and economical value of clonal melina (*Gmelina arborea* Roxb.), central Pacific of Costa Rica)

Sáenz, N¹., Murillo, O⁶2, Badilla, Y³., Guevara, M⁴., Esquivel, E⁵.

* Recepción: XX de abril, 2024. Aceptación: xx de xx, 2024. Este trabajo fue parcialmente financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC mediante el proyecto “Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad de plantaciones clonales de teca y melina”

^{1,2,3,4,5} Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. ¹ ORCID 0009-0007-7560-672, ²ORCID 0000-0003-3213-8867, ³ ORCID 0000-0002-6743-9734, ⁴ ORCID 0000-0003-3305-9132, ⁵ ORCID 0000-0001-9553-060X

Resumen

Introducción. La melina (*Gmelina arborea*) se cultiva significativamente en el país desde los años 80 y se ha convertido en la principal fuente de abastecimiento de madera para aserrío. La especie ha sido sujeta de programas de mejoramiento genético, que han logrado reducir su ciclo de producción de 12 años a 5 o 6 años, con una tasa aproximada de productividad de 30 a 40 m³ha⁻¹ año⁻¹. **Objetivo.** Se buscó determinar el efecto del

⁶ Murillo, O. Autor por correspondencia omurillo@itcr.ac.cr

espaciamiento inicial en la productividad y valor comercial de la melina, donde se evaluó los tratamientos 4x3,5m (N = 715), 4x3m (N = 833) y 4x2,5m (N = 1000). **Materiales y métodos.** La investigación se realizó en un ensayo clonal de melina, de 3,3 años, ubicado en Orotina, Pacífico central de Costa Rica. Los datos se analizaron en el programa "Avalúos Forestales, versión Enero2024" y en "R" para el análisis estadístico. **Resultados.** El espaciamiento 4x3,5m fue significativamente superior a los otros dos en todos los parámetros de calidad de árboles, crecimiento y rendimiento, así como en el valor de la madera. El incremento en el volumen, el valor comercial y en la productividad, siguen una relación exponencial positiva con la menor densidad inicial de plantación. **Conclusiones.** La melina en el Pacífico central del país puede crecer a una tasa del DAP de 6cm año⁻¹, de 40 m³ha⁻¹año⁻¹ y obtener un incremento en valor económico de \$1438ha⁻¹año⁻¹, durante sus primeros 3 años de vida, si se planta a una densidad de 4x3,5m. Se observó que a mayor crecimiento del DAP, se produce un aumento exponencial en la proporción de madera comercial en las categorías de aserrío de mayor valor, así como en el valor total de la plantación. La densidad inicial de plantación con melina clonal no debe superar el umbral de los 800 individuos por ha.

Palabras clave: Valuación, Economía forestal, Silvicultura clonal, Manejo de Plantaciones, Pacífico central, Costa Rica

Abstract

Introduction. Melina (*Gmelina arborea*) has been significantly cultivated in the country since the 1980s and has become the main source of sawtimber supply. The species has been the subject of tree improvement programs, which have reduced its production cycle from 12 years to 5 or 6 years, with an approximate productivity rate of 30 to 40 m³ha⁻¹year⁻¹. **Objective.** The objective was to determine the effect of initial spacing on the productivity and economical value of the species, where the treatments 4x3.5m (N = 715), 4x3m (N = 833) and 4x2.5m (N = 1000) were evaluated following an experimental design. **Materials and methods.** The research was carried out in a 3.3 years-old melina clonal trial located in Orotina, central Pacific, Costa Rica. Data was analyzed in the program "Avalúos Forestales, version January2024" and in "R" for statistical analysis. **Results.** The 4x3.5m spacing was significantly superior to the other two in all parameters of tree quality, growth and yield, as well as in timber value. The increase in volume, timber value and productivity

followed a positive exponential relationship with the lower initial planting density.

Conclusions. Melina in the central Pacific region of the country can grow at a DBH rate of 6 cm year⁻¹, 40 m³ha⁻¹ year⁻¹ and obtain an economic increment rate of \$1438ha⁻¹year⁻¹, during its first 3 years when planted at a density of 4x3.5m. It was observed that the higher the DBH growth, the greater increase rate of commercial timber, as well as in the economic value categories. The initial planting density with clonal melina should not exceed the threshold of 800 individuals per ha.

Key words: Appraisal, Economy, clonal forestry, plantation management, Central Pacific, Costa Rica

Introducción

La melina es una especie originaria del sudeste asiático, cuyas primeras plantaciones fueron establecidas en Costa Rica en 1966 en la región caribe (Lega, 1988), como parte de un ensayo de procedencias de Asia establecido a gran escala. Su introducción fue dirigida con fines de producción de fibra para la fabricación de papel. Sin embargo, la especie se consolidó como una de las principales fuentes de madera para aserrío en los programas de reforestación, debido a su buena adaptación y rapidez de crecimiento (Rojas *et al.*, 2004; Ávila *et al.*, 2015a; Hernández *et al.*, 2021a, Tenorio *et al.*, 2024).

La madera de melina se ha convertido en los últimos años en la de mayor consumo por la industria de la madera local (Oficina Nacional Forestal, 2023), gracias a sus propiedades y múltiples usos en la industria de mueblería, productos de construcción, tableros contrachapados, lápices y principalmente tarima (Moya *et al.*, 2012; ONF, 2023).

La especie ha sido sujeta de una amplia actividad en programas de mejoramiento genético, que ha logrado que en los últimos 15 años registre un aumento de más de un 30% en su productividad, calidad y valor económico en general (Salas, 2012; Murillo & Guevara, 2013; Ávila *et al.*, 2015b; Ávila, *et al.*, 2015c; Espitia *et al.*, 2016; Murillo & Badilla, 2015; Hernández *et al.*, 2016; Hernández *et al.*, 2017; Hernández *et al.*, 2018; Hernández, Murillo & Badilla, 2021a;b;c), así como la determinación de genotipos altamente tolerantes al hongo que causa la marchitez de la melina (Salas *et al.*, 2012; Méndez *et al.*, 2021; Méndez *et al.*, 2023).

La evaluación de la calidad de las plantaciones es esencial para determinar su valor comercial, en particular con especies latifoliadas tropicales, donde los árboles aún expresan

defectos del tronco y hábitos de ramificación producto de la baja calidad genética (Murillo & Guevara 2013; Rodríguez *et al.*, 2022). La densidad inicial de la plantación puede repercutir en su productividad, calidad y valor final (Tenorio *et al.*, 2019; Tenorio *et al.*, 2024). La competencia entre los árboles podría potencialmente resultar en una mejor relación altura/diámetro, mayor rectitud de tronco y menor cantidad y grosor de ramas (Murillo, 2000). Los estudios de calidad y valor de plantaciones forestales en la región se remontan al año 1993, donde se inició el desarrollo de todo un acervo de conocimiento que ha continuado evolucionando en el sector forestal local (Rojas & Murillo, 2000; Murillo, 2000; Murillo & Badilla, 2004; Murillo *et al.*, 2004; Murillo *et al.*, 2011; Murillo & Badilla, 2015). Sin embargo, el conocimiento es escaso en materia de productividad clonal de melina bajo distintos espaciamientos (Quirós, 2015; Fonseca *et al.*, 2021; Fonseca *et al.*, 2022), donde la mayoría de los estudios reportados se basan en investigaciones de alta densidad para biomasa (Tenorio *et al.*, 2018; Tenorio & Moya, 2019; Tenorio *et al.*, 2019; Tenorio *et al.*, 2024). Por lo que esta investigación se realizó con el objetivo de determinar el efecto de diferentes densidades iniciales, en la producción de madera, en la productividad en general y, en el valor de mercado de plantaciones clonales de melina en el Pacífico de Costa Rica.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en una plantación clonal de melina ubicada en Orotina, Pacífico Central de Costa Rica. El sitio se localiza a 220 msnm, donde en el período lluvioso registra aproximadamente 2250 mm/año, de abril/mayo hasta diciembre, con temperaturas cálidas que oscilan entre 24 y 34 °C. Durante el periodo seco (enero a marzo) se produce de una a dos lluvias al mes, que no superan los 30 mm. El sitio corresponde con la zona de vida Bosque Húmedo Tropical de Holdridge.

El sitio fue barrido al inicio con un tractor de oruga, para remover la sucesión de bosque secundario de alrededor de 4 años. El terreno se preparó luego con una rastra y subsolador, en fajas de 1m de ancho y cada 4m entre fajas, en dirección perpendicular a la pendiente (10%). Se aplicó un herbicida pre emergente y 15 días después se procedió a plantar. El hoyado se realizó con palín y las plantas de 6 semanas de edad se produjeron en ambiente protegido en Jiffy de 36mm. El sitio se plantó en octubre del 2019 y recibió lluvia hasta finales del mes de diciembre. Se aplicó 50g de cal dolomita al fondo del hoyo, y luego 100g de MAP (11-52-0) al hoyo (ver cuadro 1, donde se observa ausencia total de fósforo). Se incorporó Hidroretenedor al fondo del hoyo (0,5 litros por planta). A los dos meses se aplicó

una rodajea de 1m alrededor de cada árbol y 100 g de sulfato de amonio (NH₄NO₃), con dos hoyos con espeque, a 15 cm de cada planta. La hormiga cortadora se controló con insecticida repelente (Fipronil), una vez cada 1 o 2 mes, durante los primeros 18 meses.

Cuadro 1: Análisis químico completo del suelo al momento de la siembra del ensayo clonal de espaciamientos de melina, Orotina, Pacífico central de Costa Rica.

Table 1: Complete chemical soil analysis at planting of melina clonal spacement trial, Orotina, Central Pacific of Costa Rica

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS															
Solución Extractora:		pH	cmol(+)/L						%	mg/L					mS/cm
KCl-Olsen Modificado		H ₂ O	ACIDEZ	Al	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn	CE
ID USUARIO	ID LAB	5.5	0.5	0,3	4	1	0,2	5		10	3	1	10	5	1,5
0-20 cm	S-19-04687	5.8	0.16	<0,16	7.46	2.28	0.50	10.40	2	ND	3.1	15	124	18	0,1
20-40 cm	S-19-04688	5.7	0.12	<0,12	5.95	1.55	0.34	7.96	2	ND	2.9	16	106	15	0,1

El sitio registró una textura arcillosa (15% arena, 13% limo y 72% arcilla).

La plantación se estableció con un diseño experimental de bloques completos al azar con tres espaciamientos (4 x 2,5m; 4 x 3m y 4 x 3,5m), que correspondieron con una densidad N de 1000, 833 y 714 árboles por ha respectivamente. De cada tratamiento se establecieron dos repeticiones en lotes de 200 árboles cada uno de ellos como unidad experimental. Las 200 plantas estaban compuestas por 50 clones en mezcla del programa de mejoramiento genético de melina de GENFORES (Cooperativa de mejoramiento genético forestal, Hernández *et al.*, 2021a).

Las malezas se controlaron mecánicamente (motoguadaña) hasta los 6 meses de edad, el control químico se realizó cada 3 meses (primer año) y cada 4 meses (segundo año). La poda inició a los 2 meses con despunte de ramas laterales y poda de formación en algunos casos. La segunda poda se aplicó a los 6 meses con despunte de rama lateral y eliminación de ramas bajas hasta 1m. A los 14 meses se aplicó la tercera poda con motosierra hasta 1,8m de altura.

Las mediciones se realizaron a los 3,3 años por medio de una muestra aleatoria de un 15% de los árboles presentes, con base en el método de árboles individuales (Murillo, Badilla & Morales, 2011; Murillo & Badilla, 2015). Que básicamente consistió en un inicio aleatorio y luego una muestra sistemática de un árbol cada 7 individuos en pie. La muestra permitió recorrer toda la superficie plantada en cada uno de los tres espaciamientos y sus repeticiones, donde el número de muestra fue siempre superior a los 30 árboles en cada densidad de siembra. A cada árbol incluido en la muestra se le midió el DAP en cm y se

calificó la calidad de sus primeras 4 trozas, con base en la metodología de calidad de árboles en una escala de 1 a 4, donde 1 es excelente para aserrío y 4 no tiene valor comercial (Murillo & Badilla, 2004; Murillo & Badilla, 2015).

Procesamiento de datos y determinación del valor en pie:

Los datos tomados en campo se organizaron y revisaron en la hoja electrónica Excel, para su posterior análisis en el programa “Avalúos Forestales, versión 2023”. El programa utilizó un factor de conicidad para la melina (Quirós, 2015), con el que se estimó el diámetro a cada altura de fuste deseada. El largo de la troza se definió en 1,35 m (primera troza que considera los 10cm del tocón) y de 1,25m para las siguientes trozas, todas en función de su uso en la industria de la tarima. El diámetro mínimo se estableció en 12 cm con corteza en la cara menor de la troza. El precio de la madera en pie se definió en ¢50 por pulgada maderera tica (PMT), precio ajustado para el Pacífico central del país por su lejanía con la industria de tarima, con base en el valor de referencia (ONF, 2023). Mientras que la madera gruesa (>25cm) se tasó en ¢90 por pulgada maderera tica para esta región del país (ONF, 2023). El programa realiza el despiece de cada árbol y determina el volumen comercial para cada una de sus trozas con medidas comerciales. Durante el inventario en campo, el volumen de cada troza fue calificado en cuatro categorías de calidad para aserrío con valores de 1 a 4, según la metodología general de calificación de la calidad de trozas (Murillo & Badilla, 2004). El valor de mercado de cada troza se obtuvo con base en su volumen en pulgadas (PMT) penalizado por su categoría de calidad, con un 0% para la calidad 1, 30% para la calidad 2, 50% para la calidad 3. Las trozas de calidad 4 se consideraron sin valor de mercado (Murillo & Badilla, 2004; Salas, 2012; Hernández *et al.*, 2021a). Por tanto, cada troza fue valorizada con base en su clase diamétrica y categoría de calidad. La sumatoria de trozas generó el volumen comercial de cada árbol y su respectivo valor comercial:

$$\text{Volumen comercial del árbol } i = \sum \text{Troza}_{1+2+\dots+n}$$

$$\text{Valor comercial del árbol } i = \sum \text{Volumen}_i \cdot \sum \text{Calidad}_j$$

Donde:

i = la i ésima troza con valores de 1 a n

j = la j ésima calidad de troza con valores de 1 a 4

Finalmente, se obtuvo el volumen comercial y valor de mercado de cada espaciamiento, con base en la sumatoria de todos sus árboles individuales.

Una vez determinado el valor comercial de la plantación para cada espaciamiento, se determinó los índices Calidad General, Calidad de Cosecha, Calidad Máxima y Calidad de Trozas (Murillo, 2000; Rojas & Murillo, 2000).

Los datos fueron analizados con base en el lenguaje de programación "R", donde previo al análisis de varianza, se evaluó para cada variable, el cumplimiento de normalidad (prueba de Shapiro) y de homocedasticidad (prueba de Bartlett de homogeneidad de varianzas). La comparación múltiple entre espaciamientos se realizó mediante la prueba de Tukey. En aquellas variables que no cumplieron con los postulados de la regresión, se les analizó mediante la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis.

Resultados

En el cuadro 2 se muestra la relación entre el espaciamiento y la calidad potencial de los árboles para aserrío a los 3,3 años. De manera general puede observarse que no hay diferencias significativas en la calidad general entre los tres espaciamientos (Ca100). Sin embargo, si se observa diferencias en cuanto al índice de calidad de cosecha (N1+N2), se observa un leve gradiente de mayor proporción y cantidad de árboles de calidad 1 + 2 a medida que aumenta la densidad de plantación. En los tres espaciamientos se obtuvo una cantidad superior a los 500 individuos ha^{-1} de muy alta calidad, que superan el umbral de 300 a 400 individuos propuesto para este índice (Murillo, 2000). En los tres espaciamientos, menos de un 17% de los árboles son de baja calidad comercial (N3 y N4).

Con el criterio de calidad de Trozas 1 y 2, los resultados muestran un patrón similar, con más del doble de la cantidad de trozas de alta calidad, con respecto al valor propuesto de 1600 trozas ha^{-1} en la primera versión de los índices de calidad a finales de los años 90 (Murillo, 2000). En esta investigación se registró que más del 70% de las trozas son de alta calidad para aserrío y no se observó un patrón asociado a la densidad de plantación.

La calidad máxima posible se definió como una plantación ideal, donde todos los árboles de cosecha o 250 individuos ha^{-1} , se registran con la máxima calidad de "1" (Murillo, 2000). Los resultados muestran un claro gradiente de a mayor densidad de plantación, mayor cantidad y proporción de árboles de calidad 1.

Cuadro 2. Índices de calidad y crecimiento diamétrico para cada densidad inicial del ensayo de melina clonal a los 3,3 años, Orotina, Pacífico central de Costa Rica.

Table 1. Quality and diameter growth indexes for each initial density in a clonal trail of spacemings with melina at 3.3 years-old, Orotina, central Pacific of Costa Rica.

Espaciamiento (m)	Cal100	N1+N2 (%)	T1+T2 (%)	Calidad Máxima N1	Dap (cm) Prom	Dap (cm) Máx	Dap (cm) Mín	Homogeneidad
4 x 2,5 (N = 1000)	79,21	645 (83)	3961 (73)	399 (160%)	14,90	23,5	7,8	59,94
4 x 3 N = 833)	81,72	610 (90)	5121 (77)	282 (113%)	15,64	22,3	8,9	60,73
4 x 3,5 (N = 714)	81,29	513 (93)	4291 (85)	142 (57%)	19,80	28,0	15,0	67,63

N1+N2= Cantidad de individuos ha⁻¹ calidad 1 y 2; Amount of tres quality 1 and 2ha⁻¹; T1+T2 = Cantidad de trozas/ha calidad 1 y 2; Amount of logs quality 1 and 2ha⁻¹; Cal100 = Calidad expresada en una escala de 1 a 100; Quality expressed at a scale from 1 to 100

En relación con la variación diamétrica, se observa un fuerte gradiente que establece un mayor diámetro promedio a menor densidad de plantación, que supera en un 27% y en un 33% a los otros dos espaciamientos. Estos valores de diámetro promedio corresponden con un IMA (Incremento Medio Anual) de 6cm año⁻¹ para la menor densidad, 4,7cm año⁻¹ y 4,57cm año⁻¹ respectivamente para las otras dos densidades. El diámetro máximo muestra resultados no lineales, sin diferencias entre las dos densidades mayores, pero con un cambio abrupto en favor de la menor densidad, con un valor que supera en más de un 20% a los otros dos espaciamientos.

La homogeneidad de plantación es un parámetro que estima cuan semejantes son los árboles en la plantación. Por tanto, el índice va a registrar valores más altos en aquella plantación con menor cantidad de clases diamétricas (intervalo entre el árbol de dap mayor y menor) y mejor distribución de la cantidad de árboles en cada clase. Su utilidad práctica se puede encontrar en determinar la posibilidad de realizar raleos y podas sistemáticas. En el cuadro 2 se observa un gradiente evidente de mayor homogeneidad, a medida en que disminuye la densidad de plantación.

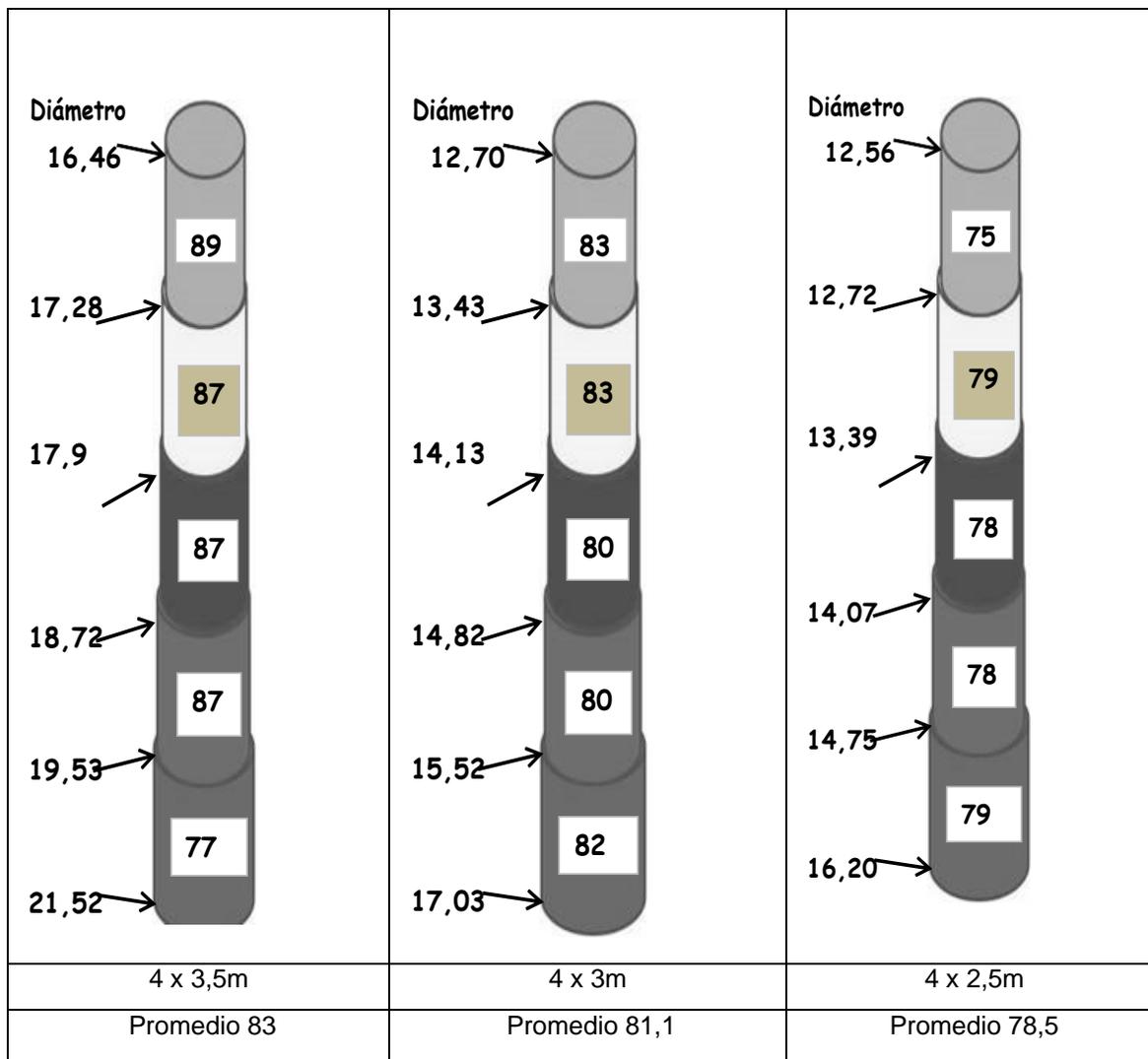


Figura 1. Calidad por troza del árbol tipo, para cada uno de los tres espaciamientos con clones de melina, a los 3,3 años, Orotina, Pacífico central de Costa Rica.

Figure 1. Quality by log in the typical tree, for each of the three spacings in a clonal trail with melina at 3.3 years-old, Orotina, central Pacific of Costa Rica.

La figura 1 muestra el árbol tipo para cada densidad de plantación, con los valores del diámetro a lo largo del fuste. Se observa un leve gradiente de mayor calidad de trozas a menor densidad de plantación (4 x3,5m, N = 714). Los árboles registran un patrón de alta calidad de trozas a lo largo del fuste que se mantiene desde la base hasta al menos las primeras 5 trozas, que corresponde con 6,25m de fuste (5 trozas * 1,25m).

Con respecto al volumen comercial (cuadro 3), se observa un fuerte gradiente de mayor volumen por ha y por árbol conforme disminuye la densidad de plantación. Donde el 4x3,5m supera en un 29% y 54% a los espaciamientos 4x3m y 4x2,5m respectivamente. El patrón es aún más fuerte si se comparan por el volumen comercial promedio por árbol, donde el

4x3,5m supera en un 62% y 117% a los espaciamientos 4x3m y 4x2,5m respectivamente. En términos de productividad se observa el mismo patrón, donde la menor densidad (N = 714, 4x3,5m) registró un IMA de 43 m³ha⁻¹año⁻¹, que supera ampliamente al IMA de 33,6 m³ha⁻¹año⁻¹ y al IMA de 28 m³ha⁻¹año⁻¹ de los otros dos espaciamientos respectivamente. Si se resta el volumen para leña, el IMA del volumen comercial aserrable es entonces de 41,5m³ha⁻¹año⁻¹ (N = 714), 23,5 m³ha⁻¹año⁻¹ (N = 833) y de 20,5 m³ha⁻¹año⁻¹ (N = 1000) para los tres espaciamientos investigados respectivamente, donde las diferencias son aún mayores.

Cuadro 3. Efecto de la densidad de siembra en la producción y el valor económico de la madera, del ensayo clonal de espaciamientos de melina a los 3,3 años, Orotina, Pacífico central, Costa Rica.

Table 3. Planting density effect in production and wood commercial value in a clonal trail of spacemings with melina, at 3.3 years-old, Orotina, central Pacific of Costa Rica

Criterios	Espaciamientos		
	4 x 2,5	4 x 3	4 x 3,5
Vol. Total Comercial Redondo (m ³ ha ⁻¹)	93	111	143
Volumen para leña (diámetro <12cm)	25,18	33,45	6
Vol. comercial redondo en troza para tarima (m ³ ha ⁻¹)	60,75	69,70	77
Vol. comercial redondo para aserrío delgado (m ³ ha ⁻¹) >18cm	7,30	7,52	56
Vol. comercial redondo para aserrío grueso (m ³ ha ⁻¹) > 25 cm	0,00	0,00	4
Volumen comercial promedio por árbol (m ³)	0,12	0,16	0,26
No árboles efectivos ha ⁻¹ (sin raleo)	773	679	550
No de trozas comerciales ha ⁻¹ (sin raleo)	5444	6658	5018
Valor Real en pie de leña (US \$ ha ⁻¹)	133	173	31
Valor Real en pie madera para tarima (US \$ ha ⁻¹)	1703	2006	1751
Valor Real en pie madera para aserrío (US \$ ha ⁻¹)	316	295	2995
Valor Total (US \$ ha ⁻¹)	2151	2474	4777
Valor promedio US\$ por árbol	2,78	3,64	8,68

El otro elemento importante de observar es el patrón de distribución del volumen total en volumen para aserrío, para tarima y para leña. Donde de nuevo, a menor densidad de siembra se registra una mejor distribución del volumen en las tres categorías, y una menor proporción en el volumen de leña (4%). Los otros dos espaciamientos registran un patrón inverso, con muy poco volumen comercial para aserrío (6,7% para N = 833 y 7,8% para N = 1000) y más del 93% restante en volumen para tarima o leña, que son productos de mucho menor valor comercial.

Finalmente, el mismo patrón se ve reflejado en las variables relacionadas con el valor comercial por ha. Donde el valor de la plantación y del árbol promedio aumentan con la menor densidad de plantación ($N = 714, 4 \times 3,5m$). El valor comercial del árbol promedio en la plantación de menor densidad, supera en más del doble a los otros dos árboles promedio. El comportamiento del IMA del valor $\$ha^{-1}$ resultante y substrayendo el valor de la leña, corresponde entonces con $\$1438ha^{-1}año^{-1}$ para la menor densidad de plantación ($4 \times 3,5m$ o $N = 714$). Mientras que las otras dos densidades mayores de plantación registraron un IMA del valor de $\$697ha^{-1}año^{-1}$ y $\$611ha^{-1}año^{-1}$ respectivamente. De manera visual se puede apreciar en la figura 2, estos patrones de volumen y valor comercial por ha, con respecto a la densidad de plantación.

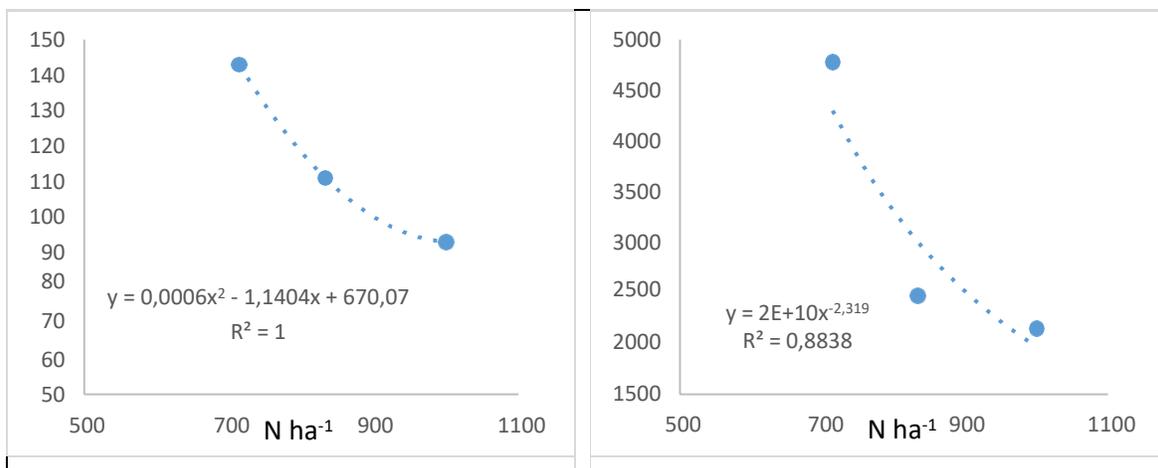


Figura 2. Efecto de la densidad de plantación en el volumen comercial (m^3ha^{-1} , Izq.) y en el valor ($US\$ha^{-1}$, Der.) en el ensayo clonal de espaciamientos de melina a los 3,3 años, Orotina, Pacífico central de Costa Rica.

Figure 2. Effect of density plantation in commercial volume (m^3ha^{-1} , Left.) and comercial value ($US\$ha^{-1}$, Right.) at 3.3 years-old in in a clonal trail of spacements with melina, Orotina, central Pacific of Costa Rica.

A pesar de que las diferencias y los patrones observados, del efecto del espaciamiento en casi todas las variables de productividad y valor son claramente visibles, se incluye un análisis de varianza y una prueba no paramétrica, como complemento y demostración de la significancia de estas diferencias entre los tratamientos.

El análisis de los datos indica que en las variables volumen comercial y valor no hay una distribución normal, ni tampoco homogeneidad de varianzas. Por lo que el análisis de varianza puede ser riesgoso en su interpretación. Mientras que para la variable calidad del árbol, si hubo distribución normal y un leve efecto en heterogeneidad de varianzas. En el cuadro 4 se registra los resultados del análisis de varianza para las variables volumen

comercial, valor comercial y calidad del árbol versus espaciamientos (densidad), el cual determinó la existencia de diferencias significativas para todas las variables investigadas.

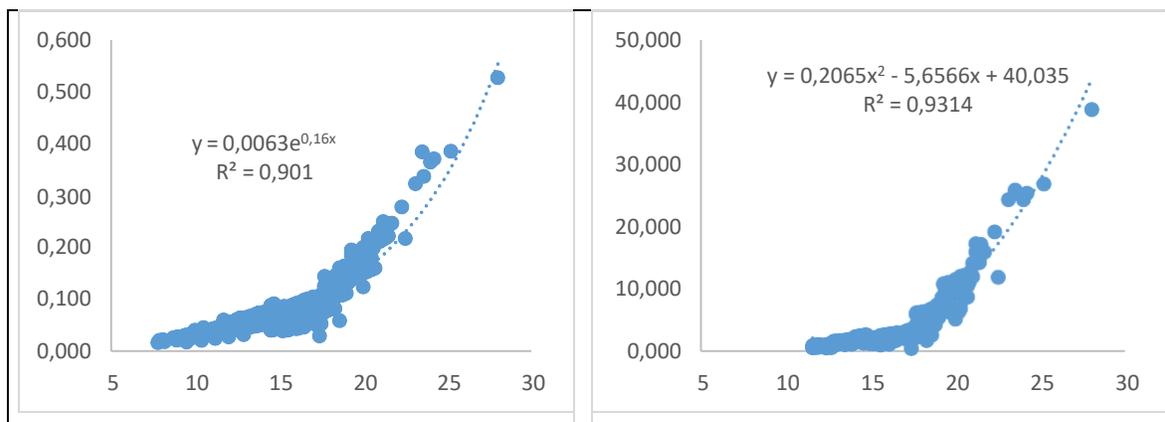


Figura 3. Relación entre el DAP y el volumen comercial (izq.) y el DAP y el valor de la madera (der.) en el ensayo clonal de espaciamientos de melina de 3,3 años, Orotina, Pacífico central de Costa Rica.

Figure 3. Relationship between DBH and commercial volume (left) and DBH and commercial value (right) in a clonal trail of spacings with melina at 3.3 years-old, Orotina, central Pacific of Costa Rica.

Puede observarse en la figura 3 una fuerte asociación entre el DAP y el volumen comercial y el DAP con el valor del árbol, sin importar la densidad de la plantación.

Cuadro 4. Análisis de varianza y prueba no paramétrica Kruskal-Wallis para el efecto de tres espaciamientos en el volumen comercial, valor comercial y calidad de la plantación clonal de melina a los 3,3 años, Orotina, Pacífico central, Costa Rica.

Table 4. Variance analyses and non parametric Kruskal-Wallis test for the effect of three spacings in commercial volume, commercial value and plantation quality in a 3.3 years-old melina clonal trail, Orotina, central Pacific of Costa Rica.

Variable	Valor de F Espaciamientos	Probabilidad P >	Valor de F Repeticiones	Probabilidad P >	Kruskal Wallis Espaciamientos
Volumen Comercial	82,83	< 2e-16 ***	10,65	0,00115***	59,878 ***
Valor	82,836	<2e-16 ***	4,964	0,0262**	60,634 ***
Calidad	5,151	0,006**	31,537	0,00603 **	26,137***

La prueba no paramétrica Kruskal-Wallis mostró también diferencias altamente significativas entre los espaciamientos para las tres variables investigadas.

Discusión

El ensayo sufrió daños causados por efectos ambientales (viento, ataque por hormiga y daño por bejuco) ajenos a los tratamientos de manejo aplicados, que causaron una mortalidad mayor a la esperada (superior al 20%). Sin embargo, su efecto no fue significativo debido a que cada Unidad Experimental (Tratamiento x Repetición) consistió en 202 árboles (observaciones) y a que la tasa de mortalidad se registró de manera similar en toda el área de investigación.

Efecto en la calidad de los árboles y de la plantación

De manera general, se observó un efecto leve de la densidad de plantación sobre la calidad del fuste de los árboles, donde el patrón registrado sugiere que, a mayor densidad disminuyó la calidad de los árboles para aserrío. El mejor indicador es el índice de calidad de cosecha ($N1 + N2$), que muestra una relación inversamente proporcional de mejores árboles en aumento desde un 83 hasta un 93%, con la disminución en la densidad de plantación desde 1000 hasta 714 individuos ha^{-1} . Con el índice del número de trozas ($T1 + T2$) se observa el mismo patrón, si se toma el dato a partir de la relación entre el porcentaje de trozas de alta calidad y la densidad de plantación, que aumenta desde un 73% hasta un 85% respectivamente. La cantidad de árboles o de trozas de alta calidad no sigue este mismo orden, debido a un mero efecto de mayor cantidad global de árboles a mayor densidad de plantación.

Estos datos sugieren que a mayor densidad de plantación y sin intervención de un raleo oportuno, los árboles de melina a partir de cierta edad van a tender a competir con mayor fuerza por recursos de luz, agua, nutrimentos. Melina es una especie de muy alto vigor de crecimiento y demandante de luz, por lo que es común observar que el fuste tiende a inclinarse o a torcerse cuando la densidad/competencia es muy alta. Árboles que inician con una excelente calidad de fuste en sus primeros dos años, pueden ver disminuida su calidad a medida que aumenta la competencia y no se interviene con podas y un raleo oportuno (Quirós, 2015; Tenorio *et al.*, 2018; Hernández, *et al.*, 2021b). Este mismo patrón se confirma en la figura 1, donde el árbol tipo promedio para cada densidad aumenta en calidad conforme disminuye la densidad de plantación. Sin embargo, si se observa en el cuadro 2 el índice de calidad máxima, que se basa en la cantidad total de individuos de calidad 1 o calidad máxima, se muestra un patrón contrario en favor de la mayor densidad de plantación. Este gradiente en favor de la mayor densidad de plantación puede ser un

efecto confundido y explicado por la conjunción de dos factores, el efecto de la mayor cantidad de árboles y, el efecto de la mayor competencia que estimula el desarrollo de árboles más rectos y de mejor fuste, como dicta la premisa silvicultural (Murillo, 2000; Murillo & Badilla, 2004).

La homogeneidad de la plantación es un parámetro de calidad basado en la magnitud de la diferencia entre el árbol de mayor y menor diámetro. Utiliza como principio de cálculo la cantidad de categorías diamétricas involucradas y la frecuencia de árboles en cada una de ellas. El patrón es evidente hacia una mayor homogeneidad en la medida en que la plantación disminuye su densidad. La explicación es claramente esperada, puesto que en una plantación con densidad alta y sin la realización de raleos se generará una alta competencia por recursos, que se reflejará en una mayor dispersión de diámetros. El crecimiento del diámetro es la variable más sensible a la competencia en plantación (Ávila *et al.*, 2015a; Tenorio *et al.*, 2018; Tenorio & Moya, 2019; Fonseca *et al.*, 2021). Esto puede observarse fácilmente en el mismo cuadro 2, si se obtiene el intervalo de dispersión diamétrica de cada espaciamiento. Donde esta heterogeneidad diamétrica es mayor a medida en que aumenta la densidad, lo cual explica el índice de homogeneidad observado. En la figura 1 se corrobora este mismo patrón, donde puede observarse que el diámetro medio aumenta conforma disminuye la densidad de plantación.

En términos de la calidad de los árboles, la aparición de rama gruesa en los primeros 5 a 6m de altura se convierte en una actividad pendiente por mejorar. Un camino por seguir será la búsqueda y selección de genotipos con mayor dominancia apical, que reprima la aparición de ramas vigorosas que compitan con la yema dominante. El programa de mejoramiento genético de melina de GENFORES involucra más de 100 genotipos activos en evaluación, donde se podrá profundizar en el refinamiento de aspectos de la calidad de los árboles.

Efecto en el crecimiento volumétrico y composición del volumen comercial

En el cuadro 3 y en la figura 2 se muestra claramente los patrones de mayor crecimiento del volumen comercial, asociado a la menor densidad de plantación a pesar de la menor cantidad de árboles presentes. El resultado es esperado y apegado a la premisa universal de la silvicultura, donde el diámetro promedio crecerá a una mayor tasa en la medida en que la competencia disminuya (Tenorio & Moya, 2019; Tenorio *et al.*, 2019; Tenorio *et al.*, 2024). La diferencia en crecimiento diamétrico de un 27% y un 33% respectivamente, entre

el diámetro promedio de la plantación de menor densidad con respecto a los otros dos espaciamientos, es un reflejo del estado de la alta competencia que ocurre a la edad de 3,3 años en melina si no se efectúa un primer raleo. Es un claro indicador de la pérdida en crecimiento que está ocurriendo en los dos espaciamientos de mayor densidad a tan temprana edad, donde el IMA desciende desde 6cm año^{-1} hasta alrededor de $4,7\text{ cm año}^{-1}$.

La variación en crecimiento volumétrico es aún mayor entre las tres densidades investigadas. El mejor espaciamiento (4x3,5m) registra un IMA del volumen comercial de madera sólida sin considerar la leña, que supera los $40\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ a la edad de 3,3 años. Este valor es sumamente alto para plantaciones de melina en el Pacífico central del país, donde se tiene un crecimiento efectivo de entre 8 y 9 meses al año (Quirós, 2015; Murillo & Badilla, 2015; Murillo *et al.*, 2016; Fonseca *et al.*, 2021; Fonseca *et al.*, 2022). Lo cual servirá de motivación para el fomento de plantaciones de melina basadas en clones de alto rendimiento.

En relación con la composición del volumen comercial, las diferencias son altamente significativas en favor de la menor densidad de plantación. Donde la proporción de madera aumenta considerablemente en las categorías de mayor diámetro y posibilidad de aserrío, y disminuye en el volumen de leña. El resultado es esperado y explicado por un mayor crecimiento del diámetro en la base, que se proyecta hacia la parte alta del fuste. Con lo cual, el árbol medio del 4x3,5m registra más del doble del volumen comercial con respecto a los otros dos espaciamientos. De manera gráfica se puede observar mejor este patrón en la figura 2, donde las diferencias el volumen comercial entre los tratamientos es claramente evidente y sigue una función exponencial. Con estos resultados es evidente que la premisa inicial de la investigación en favor de una mayor densidad de plantación, no se cumplió tal y como ha sido reportada en eucalipto (Stape *et al.*, 2022). La respuesta del incremento en diámetro y volumen superó significativamente todas las expectativas, que fácilmente compensaron la menor cantidad de árboles de 714 versus 833 y 1000 individuos desde el inicio.

El mayor factor limitante del suelo fue la ausencia de fósforo (cuadro 1), lo que motivó la aplicación al establecimiento del ensayo de 100 g por árbol del fertilizante MAP® (11-52-0). Un mejor seguimiento del comportamiento residual del fósforo y de la CICE en general, pudo haber contribuido a una mejor tasa de incremento anual del volumen comercial.

Dado que este ensayo involucró una colección amplia de 50 clones del programa de mejoramiento genético de melina, los resultados observados en crecimiento y rendimiento podrán ser significativamente mejorados si se plantan los 3 a 5 genotipos con mayor adaptación a esta región del país.

Definitivamente la densidad inicial de plantación con melina clonal no debe superar el umbral de los 800 individuos ha^{-1} , dado el extraordinario vigor y su tasa de crecimiento observada. Sería interesante evaluar comparativamente otras densidades de plantación alternativas, como un 4 x 4m (N = 625) o también 5 x 3m (N=667), o sistemas en distribución espacial en tresbolillo (Stape, Silva & Blinkey, 2022), con el propósito de observar su respuesta en crecimiento, calidad del árbol, calidad de plantación y valor económico.

En esta investigación no se incluyó el efecto del espaciamiento en la forma, conicidad y proporción diámetro/altura, que se ha reportado tener repercusión en el volumen comercial por árbol (Lega, 1988; Quirós, 2015). Lo cual genera una discusión de cómo se lograría el mayor volumen comercial por árbol, ¿con la promoción de una mayor altura comercial producto de mayor densidad de plantación o, con la promoción de un mayor diámetro que ocurrirá como resultado de una menor densidad?

Efecto en el valor de la plantación

El comportamiento del efecto de la densidad de plantación en el valor de la madera sigue exactamente el mismo patrón observado y analizado para el volumen comercial, tal y como se puede observar en el cuadro 3 y en la figura 2. Sin embargo, la pendiente de la curva del comportamiento del valor ha^{-1} es aún más pronunciada que la del volumen comercial ha^{-1} . Esto podría explicarse debido a que el valor de la plantación es la resultante entre la conjunción del Volumen Comercial con la Calidad de los árboles (Murillo, Meza & Cabrera, 2004). Las diferencias en valor siguen una función exponencial, mucho más marcada y evidente en favor de plantar melina a menor densidad. El valor del árbol promedio supera en 2 a 3 veces el valor de los otros dos espaciamientos (cuadro 3), debido a una mayor proporción de madera en las categorías de aserrío que en tarima o leña, que son de mucho mayor valor comercial. Es notable observar, que una diferencia en el diámetro promedio de tan solo 4 a 5 cm (26 a 33%) repercute en una diferencia en valor del árbol promedio de un 138 a un 212 % respectivamente.

La tasa del IMA del valor con el mejor espaciamiento es de casi $\$1500ha^{-1}año^{-1}$, que se puede considerar como alta y económicamente importante para un pequeño productor. Esta

tasa de crecimiento se aproxima a la registrada en melina en la región pacífico sur y región caribe con mucho mayor pluviosidad y cantidad de meses efectivos anuales (Ávila *et al.*, 2015a; c; Quirós, 2015; Hernández *et al.*, 2021b). En un escenario de buenas prácticas silviculturales corresponde realizar un primer raleo aproximadamente a los 30-36 meses, con el propósito de reducir la competencia y estimular el crecimiento de los árboles remanentes. De esta manera se podría esperar que los árboles de mejor calidad y crecimiento que continúen en pie, logren mejorar este IMA de \$1500ha⁻¹año⁻¹ y mantenerlo hasta el año 5 o 6 (en la cosecha). Debido a que como se observó, a mayor DAP aumenta de manera exponencial la proporción de madera en las categorías de aserrío de mayor valor.

Conclusiones

El espaciamiento 4 x 3,5m fue significativamente mejor para producir madera con melina en el Pacífico central del país. La densidad inicial de plantación con melina clonal no debe superar el umbral de los 800 individuos ha⁻¹.

El incremento en el volumen, el valor comercial y en la productividad, sigue una relación negativa no lineal a mayor densidad inicial de plantación.

La melina en el Pacífico central del país puede crecer a una tasa del DAP de 6cm año⁻¹, 40 m³ha⁻¹año⁻¹ y un valor de \$1438ha⁻¹año⁻¹, durante sus primeros 3 años de vida si se planta a una densidad de 4 x 3,5m.

A mayor crecimiento del DAP se produce un aumento exponencial en la proporción de madera en las categorías de aserrío de mayor valor, así como en el valor de la plantación.

Agradecimientos

Esta investigación tuvo el apoyo parcial de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Tecnológico de Costa Rica, mediante el proyecto “Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad de plantaciones clonales de teca y melina”.

El aporte de material clonal élite de melina de GENFORES (Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal) fue determinante en los resultados de la investigación.

Conflicto de intereses

No existe ningún tipo de conflicto de intereses con la información generada en el proyecto, dado el estatus de financiamiento con fondos públicos del Tecnológico de Costa Rica.

Referencias

- Ávila Arias, Carlos; Murillo Cruz, Rafael; Murillo Gamboa, Olman & Sandoval, Christopher. (2015^a). Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb. en dos sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. Rev. For. Mesoam. Kurú Vol 12 (28) Enero: 23-35. doi.org/10.18845/rfmk.v12i29.2250
- Ávila Arias, Carlos; Murillo Cruz, Rafael; Murillo Gamboa, Olman & Sandoval, Christopher. (2015^b). Interacción genotipo sitio para dos conjuntos clonales de *Gmelina arborea* Roxb., en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. Rev. For. Mesoam. Kurú Vol 12 (29) Julio: 2-14.
- Ávila, Carlos; Murillo, Rafael & Murillo, Olman. (2015^c). Selección de clones superiores de dos conjuntos genéticos de *Gmelina arborea* en el Pacífico sur de Costa Rica. Revista de Ciencias Ambientales Vol 49(1): 17-35. doi. org/10.15359/rca.49-1.2
- Espitia, M., Murillo, O., & Castillo, C. (2016). Ganancia genética esperada en melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Córdoba, (Colombia). *Árvore*, 40(1), 71–80 doi.org/10.1590/0100-67622016000100008
- Fonseca, W., Murillo, R., Ávila, C. Rojas, M. & Spínola, R.M. (2021). Modelos de biomasa y carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales. Revista de Ciencias Ambientales Vol 55(1): 143-159.
- Fonseca, W. Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C. Benavidez-Fallas, R., Arce-Ledezma, V. Carmona-Solís, R., Ulloa-Saborío, G., Salazar-Ruiz, A.G. & Carvajal-Arroyo, D. (2022). Predicción de biomasa en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L. f y *G. arborea arborea* Roxb. en Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú. 19 (44): 66-74
- Hernández, W.; Murillo, O. & Badilla, Y. (2016). Ganancia genética e impacto de los programas de mejoramiento genético en melina en Costa Rica. En: XIV CONAFA, 25-27 de octubre, Belén, Costa Rica.

- Hernández, W.; Badilla, Y. & Murillo, O. (2017). Ganancia genética realizada en plantaciones clonales de melina en Costa Rica. En: I Simposio Internacional GENFORES. 26-27 enero, 2017. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Hernández, W., Murillo, O. & Badilla, Y. (2018). Ganancia genética de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Costa Rica. VII Congreso Forestal Latinoamericano CONFLAT. 12-15 Junio. Porto Vitória, Espírito Santo, Brasil.
- Hernández, W., Badilla, Y., Esquivel, E., & Murillo, O. (2021a). Comportamiento de clones de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones de suelo ácidos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 212-232. doi.org/10.15359/rca.55-2.11
- Hernández, W., Badilla, Y., Murillo & O. (2021b). Estimación de parámetros genéticos de *Gmelina arborea* Roxb. (melina) en el Caribe de Costa Rica. *Uniciencia* Vol. 35(1) 352-366, January-June, 2021. doi.org/10.15359/ru.35-1.22
- Hernández-Castro, W., Murillo-Gamboa, O., & Badilla-Valverde, Y. (2021c). Selección temprana en ensayos clonales de melina (*Gmelina arborea* Robx.) en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 32(1), 93–106. doi.org/10.15517/ am.v32i1.42069
- Lega, F. F. (1988). Estudio de la forma de *Gmelina arborea* (Roxb.): análisis de las plantaciones de Manila, Siquirres. Tesis M.Sc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.
- Méndez, D., Murillo, O., Badilla, Y. & Hernández, W. (2021). Genetic tolerance to *Ceratocystis* wilt in melina (*Gmelina arborea* Roxb.). *Silvae Genetica* (70): 195 – 204. doi.org/10.2478/sg 2021-0017
- Méndez, D., Badilla, Y., Murillo, O. & Ferreira, R. (2023). Genetic resistance to *Ceratocystis fimbriata* in elite genotypes of *Gmelina arborea*. *Agronom. Mesoamericana* Volumen 34(3): doi.org/10.15517/am.2023.52968
- Moya, R., Muñoz, F., Salas, C., Berrocal, A., Leandro, L. & Esquivel, E. (2012). Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 7(18-19), pág. 1–208.
- Murillo, O., Meza, A., & Cabrera, J. M. (2004). Estimación del valor real y del valor de mercado en pie de la plantación forestal. *Revista Agronomía Costarricense*, 28(1), 47–55.

- Murillo, O.; Badilla, Y. & Morales, M. (2011). Método de inventario para plantaciones pequeñas. En: V Congreso Forestal Latinoamericano. 18-21 octubre, 2011, Lima, Perú.
- Murillo, Olman & Guevara, Víctor. (2013). Estado de los recursos genéticos forestales de Costa Rica. MINAET/FAO/CONAGEBIO, San José, Costa Rica. 159 pp.
- Murillo, O. (2000). Índices de calidad para la reforestación en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 24 (2): 41-48.
- Murillo, O. & Badilla, Y. (2004). Calidad y valoración de plantaciones forestales. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 51 p.
- Murillo, O. & Badilla, Y. (2015). Consultoría. Definición de una metodología de muestreo de contratos del programa de pago de servicios ambientales para la medición de la biomasa, para el desarrollo de proyectos de comercialización de créditos de carbono. FONAFIFO, San José, Costa Rica. 108 P.
- Murillo, O.; Vallejos, J.; Badilla, Y.; Guzmán, N.; Luján, R. & González, E. (2016). Crecimiento efetivo mensual inicial em plantações de teca (*Tectona grandis*) em Costa Rica. *Revista Nativa (Brasil)* vol 4(2): 87-90.
- Oficina Nacional Forestal (ONF). (2023). Precios de la madera en Costa Rica para el primer semestre del 2023 y tendencias de las principales especies comercializadas. Oficina Nacional Forestal. San José, Costa Rica. 11 p.
- Quirós, S., (2015). Modelos de volumen comercial, perfil de fuste y crecimiento para plantaciones clonales de *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. en Costa Rica. Tesis Lic. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 70p.
- Rodríguez-Pérez, D., Moya, R. & Murillo, O. (2022). Effect of stem height in variation of bark, heartwood, sapwood and physical properties of wood in *Dipteryx panamensis* Pittier in a provenance/progeny test. [Ciencias Florestais 32\(1\): 141-162](#)
- Rojas, F., Arias., D., Moya. R., Meza. A., Murillo, O. & Arguedas. M. (2004). Manual para productores de Melina *Gmelina arborea* en Costa Rica, Fondo de Financiamiento Forestal, San José, Costa Rica.
- Rojas, O. & Murillo, O. (2000). Calidad de las plantaciones de teca en la Península de Nicoya, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 24 (2): 65-76.

- Salas, R. (2012). Evaluación de un ensayo genético de *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón. Tesis. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago.
- Salas, A., Murillo, O., Murillo, R. & Ávila, Carlos. (2016). Evidencia de tolerancia genética de clones de *Gmelina arborea* Roxb. a la pudrición del tronco en Costa Rica. Rev. For. Mesoam. Kurú 13 (32): 30-39.
- Stape, J.L.; Silva, C.R. & Binkley, D. (2022). Spacing and geometric layout effects on the productivity of clonal *Eucalyptus* plantations. Tree Forest and People Vol 8, June 100235. doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100235.
- Tenorio, C., Moya, R. & Arias-Aguilar, D. (2018). Evaluation of changes in tree morphology parameters, biomass yield, chemical and energy properties at three spacings of short rotation energy plantations of *Gmelina arborea* in Costa Rica from one to two years of age. Waste Biomass Valori. 9(7): 1163-1179. doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100235
- Tenorio, C. & Moya, R. (2019). Propiedades de la biomasa de plantaciones de corta rotación de dos clones de *Gmelina arborea* Roxb en tres espaciamientos. Revista Forestal Mesoamericana Kurú. 16 (39): 23-32.
- Tenorio, C. Moya, R., Valverde & J.C., Arias, D. (2019). Biomass production and characteristics of short rotation plantations of clones of *Gmelina arborea* in three spacings. Silvae Genetica. 68, 92 – 100. doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100235
- Tenorio, C., Moya, R., Murillo, O. & Loría, J. (2024). Energy production and its characteristics from four tropical tree species planted in short rotation woody systems in Costa Rica. BioResources 19 (1): 695-715. doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100235

Anexo 4. Presentación charla. Prácticas silviculturales para el manejo preventivo de la enfermedad de la melina.



Anexo 5. Registro de la Participación en programa radial con el tema “Fertilización intensiva de Forestales”.



San José, 14 de mayo del 2021
ACCS-006-2021

Estimado
Ing. Mario Guevara Bonilla
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Presente

Estimado Ingeniero:

Agradezco mucho su participación en nuestro programa de radio del día 28 de abril, 2021 con el tema “Fertilización intensiva de Forestales”.

Además deseo aprovechar esta ocasión para felicitarlo por sus valiosos aportes a esta actividad, la cual es muy importante para nuestro programa anual de actividades de comunicación para el cuidado de los suelos, organizado por la Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.

Atentamente,

Ing. Esteban Loria Lizano
Presidente
ACCS

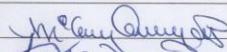
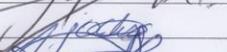
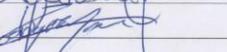
c.c. Archivo



Anexo 6. Día de campo Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad de plantaciones clonales de teca y melina. Cóbano, Los Chiles

12 de noviembre del 2021

Día de campo
Técnicas de Silvicultura intensiva para el aumento de la
Productividad de plantaciones clonales de teca y melina

LISTA DE PARTICIPANTES		
	Nombre	Firma
1	Maria Eugenia Quiroz	
2	Luis Alberto Arce	
3	Ana Yancy Vargas Arias	
4	Sebastian Conales Arce	
5	Yoselin Gonzalez Padilla	
6	Yoselin Gonzalez Padilla	
7	Laura Mora Chaves	
8	Laura Mora Chaves	
9	Alfonso Gutiérrez G	
10	Alfonso Gutiérrez G	
11	Manuel Mora de la	
12	CARLOS PORRAS	
13	Oscar Quiros Muñoz	
14	Graefo Ampiee Corrocha	
15	Sebastián Ugalde A.	
16	Oscar Rodríguez A.	
17		
18		

Anexo 7. Día de campo Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad de plantaciones clonales de teca y melina. Pital, San Carlos.

www.tec.ac.cr

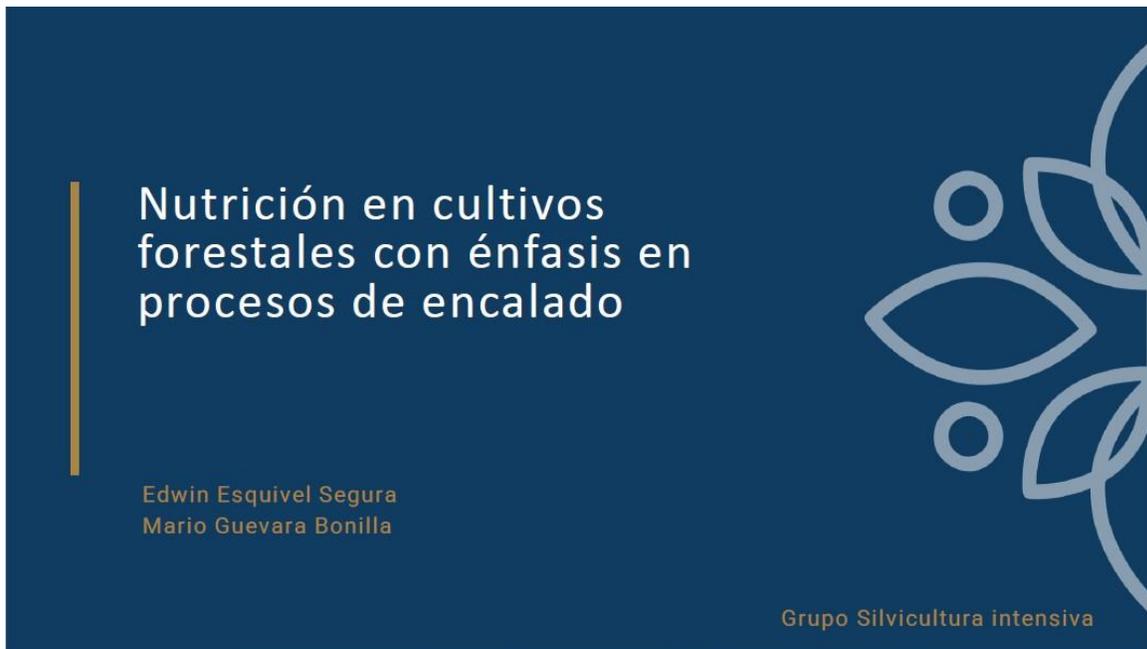


13 de noviembre del 2021

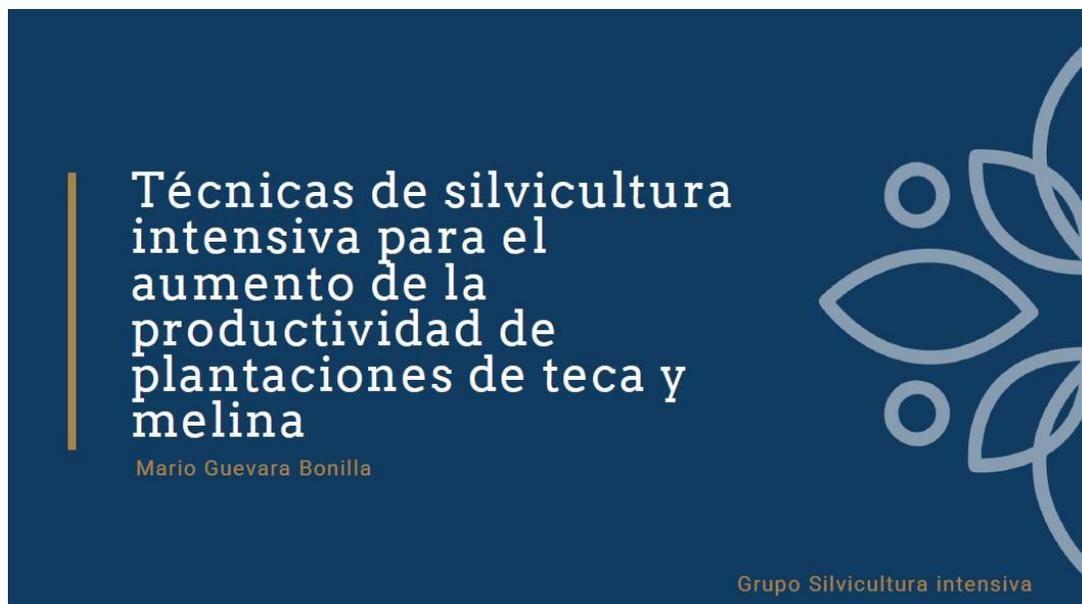
Día de campo
Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad
de plantaciones clonales de teca y melina

LISTA DE PARTICIPANTES		
	Nombre	Firma
1	José Daniel Hernández	[Firma]
2	Paty Alvarez Cusiquispe	[Firma]
3	[Firma] Narciza Bernilla	[Firma]
4	Juan Pablo Rodríguez Garavito	[Firma]
5	Luis Diego Jiménez Alvarado	[Firma]
6	Victoria Alejandra Romero Romero	[Firma]
7	Juan Luis Hernández	[Firma]
8	José Heriberto Rosa	[Firma]
9	Heidy Vanessa Corraón Toral	[Firma]
10	Deivis Castillo Pérez	[Firma]
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		

Anexo 8. Charla: Nutrición en cultivos forestales con énfasis en encalado



Anexo 9 Presentación Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad de plantaciones clonales de teca y melina.



Anexo 10. Presentación en Congreso CONAFA Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad de una plantación de melina de turno corto.

CONAFA
XV Congreso Agropecuario, Forestal y Ambiental
X Congreso Nacional de Suelos
12-14 de junio, 2023 - Hotel Real Intercontinental, Costa Rica

Técnicas de silvicultura intensiva para el aumento de la productividad de una plantación de melina de turno corto

Mario Guevara Bonilla

ACCS ACEM ANEAF AFN Gestores Ambientales

COLEGIO DE INGENIEROS AGRÓNOMOS COSTA RICA

Cumplió de manera satisfactoria la participación de las 20 horas académicas del
XV Congreso Agropecuario, Forestal y Ambiental, X Congreso Nacional de Suelos
realizado en San José, Costa Rica los días 12 al 14 de junio del 2023

CONAFA
XV Congreso Agropecuario, Forestal y Ambiental
X Congreso Nacional de Suelos
12-14 de junio, 2023 - Hotel Real Intercontinental, Costa Rica

Ing. Agr. **Fernando Mojica Betancourt**
Presidente
Colegio Ingenieros Agrónomos de Costa Rica

ACCS ACEM ANEAF AFN Gestores Ambientales

Anexo 11. Manual de buenas prácticas para el diagnóstico y manejo de la fertilidad del suelo en plantaciones forestales de teca (*Tectona grandis* L.f) y melina (*Gmelina arborea* Roxb).



Anexo 10. Carta aceptación y revisión del Manual de cultivo de melina en ciclo corto.



Cartago, 22 de abril 2024

Respetados autores:

Olman Murillo Gamboa
Mario Guevara Bonilla
Yoriely Badilla Valverde
Edwin Esquivel Segura

Hemos recibido su manual titulado:

**MANUAL DE CULTIVO DE MELINA (Gmelina arborea Roxb) EN
CICLO CORTO**

El mismo será sometido inmediatamente a los procedimientos de revisión establecidos por la Revista Forestal Mesoamericana Kurú para manuales. Oportunamente le enviaremos las resoluciones.

Le agradecemos mucho nos seleccionara para difundir los resultados de sus investigaciones. Muy atentamente,

TEC | Firmado digitalmente por DORIAN VANEGAS de Costa Rica 2024.04.22 09:36:17 -0500'

Ing. Dorian Carvajal Vanegas
Escuela de Ingeniería Forestal
Revista forestal Mesoamericana Kurú,
Editor

Anexo 11. Tesis licenciatura Estephanie Robles Cordero

chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/13177/TFG_Estephanie_Robles_Cordero.pdf?sequence=1&isAllowed=y

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**CAMBIO EN LA CAPACIDAD DE USO DEL SUELO
MEDIANTE UN SISTEMA TAUNGYA COMO POSIBLE
ALTERNATIVA PARA LA RECUPERACIÓN DE SITIOS, SAN
CARLOS, COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

ESTEPHANIE ROBLES CORDERO

CARTAGO, COSTA RICA

MARZO, 2021

Anexo 12. Acta de aprobación de trabajo final de graduación Alex Ruiz Moreno.

Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción

ACTA DE APROBACIÓN DE TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN (DEFENSA ORAL)

Con fundamento en lo que establece el "Manual de Normas y Procedimientos para optar por el título de "MAESTRÍA", el Tribunal Examinador del Proyecto Final de Graduación denominado:

"EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS Y FERTILIZANTES EN EL CRECIMIENTO DE UNA PLANTACIÓN DE TECA (*Tectona grandis* L.f.) RECIÉN ESTABLECIDA. SANTA CECILIA, LA CRUZ, GUANACASTE"

Habiendo analizado el resultado general de la defensa oral presentada por el(los) estudiante(s):

Primer Apellido	Segundo Apellido	Nombre	No. De carné
Ruiz	Moreno	Alex Javier	2021582196

Emite el siguiente dictamen:

<input checked="" type="checkbox"/> APROBADO NOTA DEFENSA ORAL: 97 _____ _____ _____	REPROBADO <input type="checkbox"/> SE RECOMIENDA <input type="checkbox"/> NO SE RECOMIENDA Brindarle una nueva oportunidad para la DEFENSA PUBLICA de su Trabajo Final NUEVA FECHA: _____
--	---

Dando fe de lo aquí expuesto firmamos

 Firmado digitalmente por MARIO GUEVARA BONILLA (FIRMA) Fecha: 2023.05.03 21:07:04 -06'00'	 Firmado digitalmente por EDWIN ANTONIO ESQUIVEL SEGURA (FIRMA) Fecha: 2023.05.03 20:11:39 -06'00'
Ing. Mario Guevara Bonilla Profesor Tutor	Ing. Edwin Esquivel Segura Profesora Lectora
 Firmado digitalmente por DAGOBERTO ARIAS AGUILAR (FIRMA) Fecha: 2023.05.03 19:00:23 -06'00'	
Ing. Dagoberto Arias Aguilar, PhD Presidente Tribunal Coordinador del Área Académica Agroforestal	