

Potencial económico y buenas prácticas de manejo para especies nativas y teca en plantaciones puras y mixtas en Costa Rica

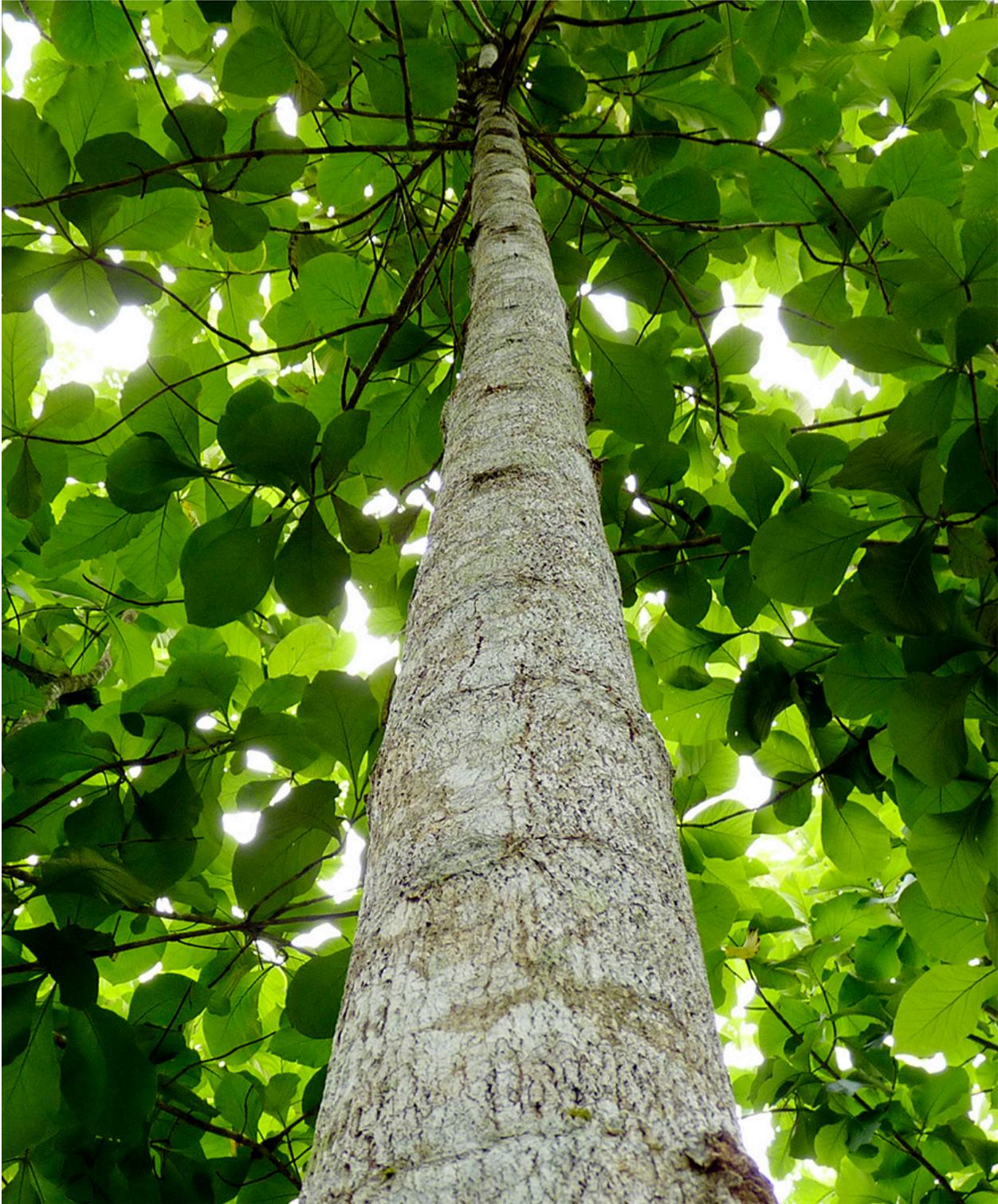
Anja Nölte
Arne Pinnschmidt
Rasoul Yousefpour
Marc Hanewinkel

sponsored by

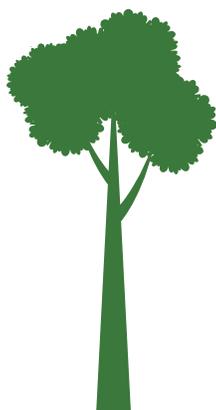


Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de



Serie técnica,
Informe Técnico. no. 463



Potencial económico y buenas prácticas de manejo para especies nativas y teca en plantaciones puras y mixtas en Costa Rica

Anja Nölte
Arne Pinnschmidt
Rasoul Yousefpour
Marc Hanewinkel

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
Turrialba, Costa Rica
2024

CATIE no asume la responsabilidad por las opiniones y afirmaciones expresadas por los autores en las páginas de este documento. Las ideas de los autores no reflejan necesariamente el punto de vista de la institución. Se autoriza la reproducción parcial o total de la información contenida en este documento, siempre y cuando se cite la fuente.

© Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, 2024

ISBN 978-9977-57-812-5

634.92

N7

Nölte, Anja.

Potencial económico y buenas prácticas de manejo para especies nativas y teca en plantaciones puras y mixtas en Costa Rica / Anja Nölte, Arne Pinnschmidt, Rasoul Yousefpour y Marc Hanewinkel – 1ª ed. – Turrialba, Costa Rica : CATIE, 2024. 72 p. : il. – (Serie técnica. Informe técnico / CATIE ; no. 463)

ISBN: 978-9977-57-812-5

1. Organismos nativos 2. Reforestación 3. Ordenación forestal
4. Vigilancia ambiental 5. América Latina I. CATIE II. Título III. Serie

Cita sugerida

Nölte, A., Pinnschmidt, A., Yousefpour, R., Hanewinkel, M. 2024. Potencial económico y buenas prácticas de manejo de especies nativas y teca en plantaciones puras y mixtas en Costa Rica (en línea). Turrialba, Costa Rica, CATIE. 72 p. (Serie técnica. Informe técnico / CATIE, no. 463). Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/12640>

Créditos

Autores:

Anja Nölte
Arne Pinnschmidt
Rasoul Yousefpour
Marc Hanewinkel

Revisión técnica:

Bárbara Viguera, Ingeniera Forestal. Especialista en adaptación al cambio climático, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

Guillermo Navarro Monge, Economista Forestal. Especialista en economía y política forestal, profesor afiliado del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

Diseño y diagramación

Tecnología de Información y Comunicación, CATIE

Universidad de Freiburg
Cátedra de Economía Forestal
y Planificación Forestal
Tennenbacher Str. 4, 2.OG
79106 Freiburg
Alemania

sponsored by



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Contenido

1. Introducción.....	6
2. Metodología	8
2.1. Precios de la madera	11
2.2. Flujos de caja.....	13
3. Descripciones de las especies	16
3.1. Dalbergia retusa (dare).....	18
3.2. Dipteryx oleifera (diol)	20
3.3. Hieronyma alchorneoides (hial)	22
3.4. Tectona grandis (tegr).....	24
3.5. Vochysia guatemalensis (vogu).....	25
4. Instrucciones prácticas (cómo utilizar la información de las tablas del capítulo 5)	27
4.1. Clase de productividad.....	28
4.2. Límite AB.....	30
4.3. AB removida.....	30
4.4. DAP final promedio	31
4.5. VAN.....	31
4.6. TIR.....	32
4.7. ¿Por qué hay un rango de VAN y TIR en lugar de un sólo valor?.....	33
5. Recomendaciones de manejo para la producción de madera.....	34
5.1. Recomendaciones de manejo para monocultivos	36
5.2. Recomendaciones de manejo para las mezclas.....	40
6. Recomendaciones de manejo para la producción de madera y créditos de carbono.....	45
7. Potencial de mejora económica mediante optimización del manejo específico del sitio	48
Bibliografía	50
Agradecimientos	59
Anexo I - Producción inicial de biomasa del fuste.....	60
Anexo II - Parámetros de manejo para la producción de madera y créditos de carbono	62

1. Introducción

Por décadas, los bosques de América Central han sido deforestados, dando lugar a grandes extensiones de tierras degradadas que hoy en día suelen reforestarse. La reforestación comercial está dominada por especies arbóreas introducidas en monocultivos; tal es el caso de aproximadamente el 87% y el 75% del área de plantaciones forestales en Panamá y Costa Rica, respectivamente (FAO, 2010; Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2015). Estas especies introducidas han demostrado proporcionar buenos rendimientos económicos y las estrategias de manejo son bien conocidas. Sin embargo, las especies nativas y las mezclas de especies son elementos clave para que las plantaciones forestales contribuyan a la conservación de la biodiversidad (Brocknerhoff *et al.*, 2013; Carnevale y Montagnini, 2002; Carnus *et al.*, 2006; Hartley, 2002). Las plantaciones mixtas tienen ventajas adicionales, como mayor crecimiento (Ewel *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2018; Mayoral *et al.*, 2017; Piotta, 2008; Schnabel *et al.*, 2019) y menores riesgos, p. ej. por el viento, desecación, plagas e erosión de suelo (Brocknerhoff *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2018; Messier *et al.*, 2022; Montagnini y Piotta, 2011). Además, las plantaciones mixtas con especies nativas neotropicales pueden ser altamente rentables e incluso superar a los monocultivos tradicionales en términos de rendimiento económico y secuestro de carbono (Pinnschmidt *et al.*, 2022; Pinnschmidt *et al.*, 2023).

A pesar de las ventajas de las plantaciones de especies nativas y mixtas para la protección de la biodiversidad y otros servicios ecosistémicos, la falta de experiencias y recomendaciones de manejo pueden causar importantes barreras para su establecimiento. Para reducir estas barreras, en esta guía presentamos recomendaciones prácticas de manejo para cuatro especies nativas: cocobolo (*Dalbergia retusa* Hemsl.), almendro de montaña (*Dipteryx oleifera* Benth.), pilón/zapatero (*Hieronyma alchorneoides* Allemao), y chancho/mayo (*Vochysia guatemalensis* Donn. Sm.), y una especie introducida: teca (*Tectona grandis* L.f.) en monocultivo, así como recomendaciones de manejo para cinco combinaciones de estas especies (cocobolo y almendro; cocobolo y almendro y chancho; cocobolo y teca; almendro y chancho; almendro y teca). Nuestras recomendaciones de manejo incluyen límites de área basal

(AB) para las intervenciones silviculturales y diámetros a la altura del pecho (DAP) óptimos para las cortas finales. Para cada especie o mezcla de especies, desarrollamos estrategias de manejo para cinco clases de productividad. Estas estrategias de manejo tienen como objetivo maximizar los ingresos económicos manteniendo un bajo riesgo económico. En los resultados también se presentan el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) esperados para la estrategia de manejo recomendada. Además, presentamos estimaciones del potencial económico máximo en condiciones de sitio y manejo óptimas. Por último, analizamos el potencial económico de la certificación del carbono (1) reportando los precios del carbono necesarios para compensar los costos de certificación y (2) presentando recomendaciones de manejo que incorporan el valor económico del carbono en la optimización, usando precios del carbono presentes y futuros.



2

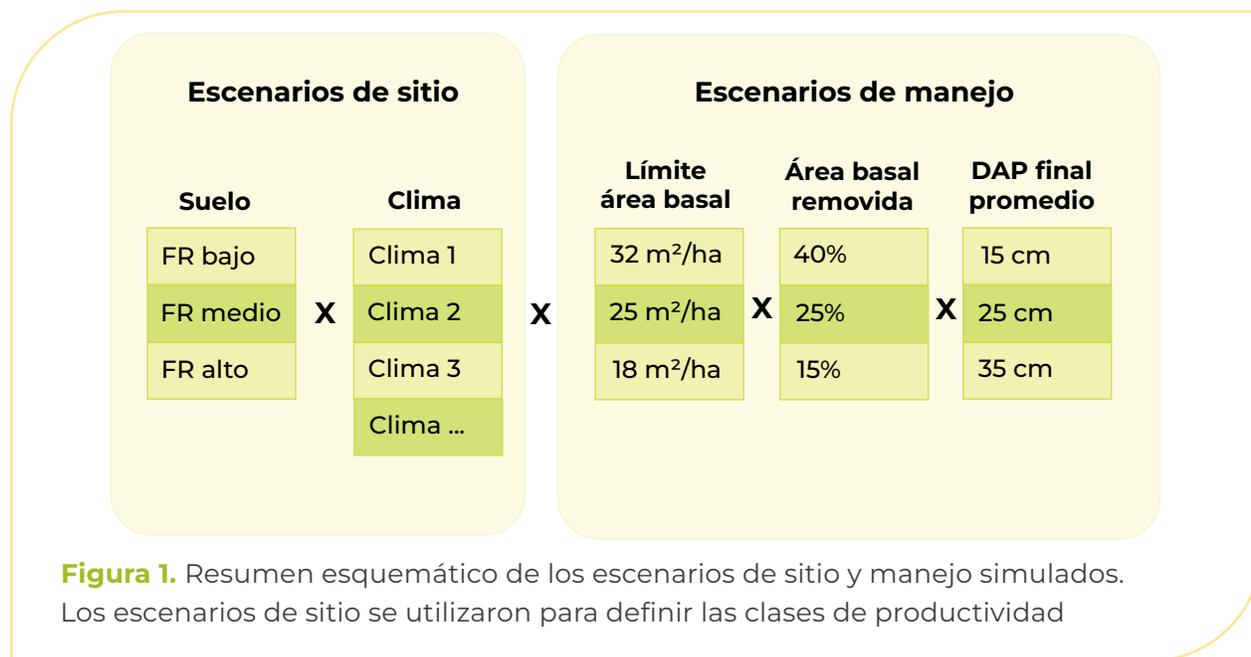
Metodología



Primero, desarrollamos predicciones de crecimiento forestal a gran escala y a largo plazo para cuatro especies nativas (*cocobolo*, *almendro*, *pilón*, *chancho*) y teca en plantaciones puras y mixtas calibrando un modelo de crecimiento forestal basado en procesos fisiológicos, que se llama *3-PGmix* (Nölte *et al.* 2022). Usamos datos de series de tiempo con 974 inventarios de 107 plantaciones diferentes en 77 sitios que fueron asociados a 9 estaciones climáticas diferentes distribuidas en Costa Rica y Panamá (Nölte *et al.* 2022). La edad máxima fue de 25 años para cocobolo, 22 años para almendro, 31 años para pilón, 24 años para teca, 21 años para chancho y 14 años para las plantaciones de especies mixtas. A continuación acoplamos *3-PGmix* a un modelo económico para desarrollar estrategias de manejo económicamente óptimas (Pinnschmidt *et al.* 2022; Pinnschmidt *et al.* 2023).

Desarrollamos recomendaciones de manejo económicamente óptimas para cinco clases de productividad de forma que, en conjunto, representan la variabilidad observada del crecimiento. Las clases de productividad se basan en 50-270 escenarios de sitio por especie resultante de las combinaciones de los tres índices de fertilidad del sitio (*FR*) y múltiples condiciones climáticas (Figura 1). Estos escenarios representan todas las combinaciones de las tres clases de *FR* con todos los datos climáticos utilizados para la calibración del modelo, por lo tanto, representan una estimación sólida de todos los escenarios de productividad. *FR* representa la variabilidad en el crecimiento que no se puede explicar por condiciones climáticas o limitación de agua; es decir, representa factores como disponibilidad de nutrientes, acidez del suelo o mal drenaje. Cada clase de productividad representa un rango de cinco quintiles de producción inicial de biomasa para los escenarios de sitio simulados (Figura 9, sección 4.1). Así, la clase 1 corresponde a los escenarios con la menor producción de biomasa (0-20%) y la clase 5 a los escenarios con la mayor producción de biomasa (80-100%). Las clases de productividad del sitio se determinaron antes de cualquier intervención de raleo. Para las plantaciones de especies mixtas, determinamos además que se mantuviera el carácter mixto de las plantaciones. Para este estudio, una plantación debe estar compuesta por al menos dos especies y cada una de las especies debe tener una participación mínima del 20% para ser clasificada como mezcla. Por lo tanto, excluimos los escenarios de manejo en los cuales especies arbóreas no dominantes

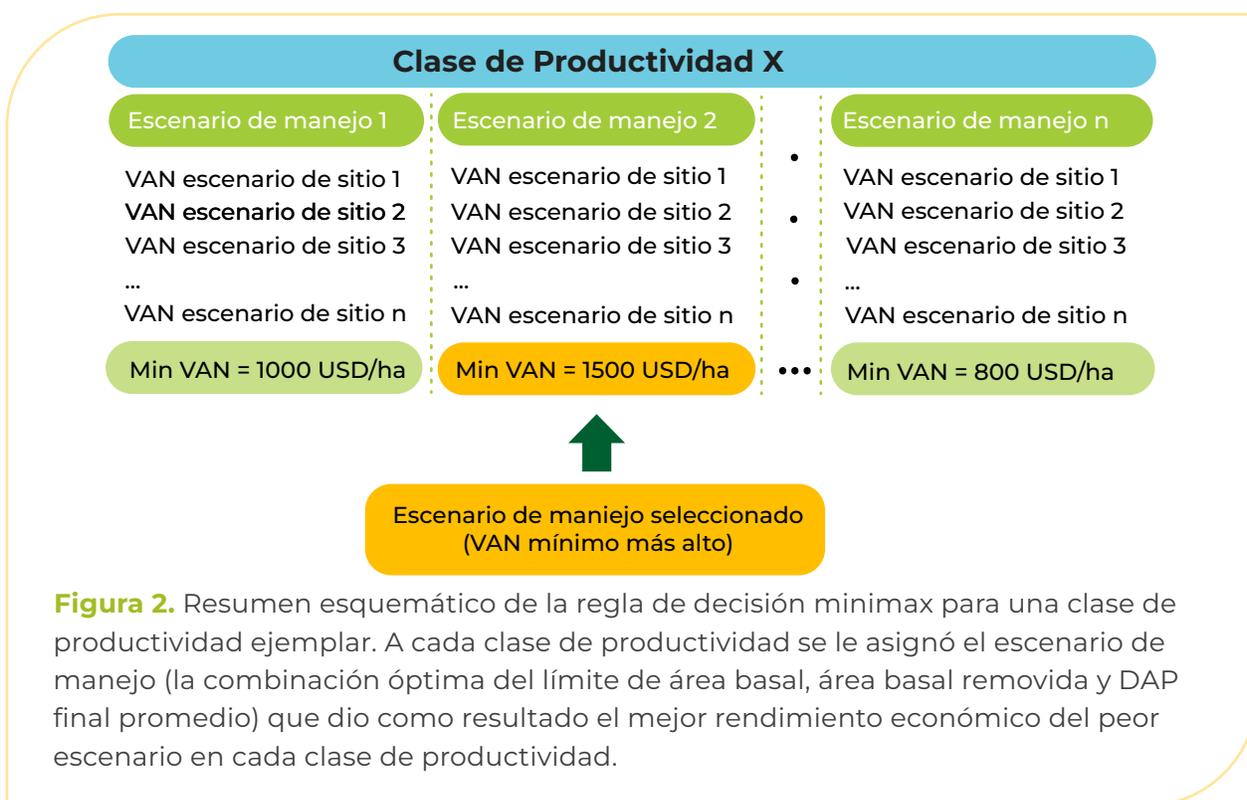
representaban menos del 20% de la biomasa del fuste de la plantación (promediado a lo largo de la rotación). Si la contribución de las especies arbóreas no dominantes era inferior a este límite, asumimos que la plantación se había convertido efectivamente en un monocultivo.



Para desarrollar recomendaciones de manejo generalizadas, simulamos el rendimiento económico de todos los escenarios de sitio para cada especie bajo escenarios de manejo predefinidos (Figura 1). Los escenarios de manejo son una combinación de tres valores predefinidos para cada uno de los tres parámetros de manejo (límite del área basal para el raleo, área basal removida y DAP final para la cosecha final), que se sintetizaron a partir de optimizaciones previas específicas para cada lugar (Pinnschmidt *et al.* 2022; Pinnschmidt *et al.* 2023). Dentro de cada clase de productividad, determinamos el VAN mínimo de cada escenario de manejo a través de todos los escenarios del sitio y luego seleccionamos el escenario de manejo con el VAN mínimo más alto (Figura 2). Esta regla de decisión denominada *minimax* pretende *minimizar* las pérdidas del peor escenario posible (*pérdida máxima*). *Minimax* reduce el riesgo de fracaso económico y, por tanto, los valores reportados del VAN o TIR pueden considerarse una estimación

robusta y conservadora (o aversa al riesgo) del rendimiento económico esperado. En la Sección 7 ilustramos las posibles mejoras económicas utilizando una regla de decisión *maximax* (*maximizando el mejor escenario dentro de cada clase de productividad*).

Para más detalles sobre el modelo de crecimiento forestal, los índices de fertilidad y las condiciones climáticas, véase Nölte *et al.* (2022) y para más detalles sobre el modelo económico, el proceso de optimización y los rendimientos económicos máximos véanse Pinnschmidt *et al.* (2022) y Pinnschmidt *et al.* (2023).



2.1. Precios de la madera

El precio de la madera tiene una gran influencia en la valoración económica, pero también presenta grandes fluctuaciones y gran incertidumbre, especialmente con respecto a la evolución futura de los precios. Por lo tanto, consideramos importante interpretar los ingresos económicos reportados conjuntamente con los precios de la madera supuestos.

Utilizamos los precios de la madera comunicados por la Oficina Nacional Forestal (ONF) de Costa Rica. La ONF es una organización forestal no gubernamental financiada con fondos públicos que realiza estudios anuales del mercado y de los precios de la madera en Costa Rica desde 2005. Utilizamos los precios para madera en pie publicados recientemente (Barrantes Rodríguez y Ugalde Alfaro 2020; Paniagua Vega y Salazar Chavez 2011), los transformamos a precios en dólares estadounidenses de 2020 (USD/m³) (Cuadro 1) utilizando el índice de precios al consumidor para Costa Rica (World Bank 2021) y el tipo de cambio medio de 2020 de colones costarricenses (CRC) a USD (Banco Central de Costa Rica 2021). En el caso de cocobolo, la ONF no ha publicado datos sobre precios. Basándonos en informes de precios locales (que en parte hacen referencia a fuentes de la ONF), estimamos que el precio de madera en pie de cocobolo es aproximadamente 750 USD/m³ (Diario Extra 2014; Fordaq.com 2016; Robbins 2012). También incluimos el precio medio de la madera para tarimas, que representa una gran parte del mercado de la madera en el país.

Los precios de la madera en Costa Rica están influenciados por dos características importantes de calidad del fuste: (1) el diámetro del fuste y (2) su contenido de duramen (Barrantes Rodríguez y Ugalde Alfaro 2020; Pérez y Kanninen 2003, 2005). En nuestra evaluación económica incorporamos correcciones de precios para abordar estas características de calidad en nuestro modelo de valoración (véase Pinnschmidt *et al.* (2022) para más detalles).

Cuadro 1. Precios de la madera por especie y para tarimas en Costa Rica

Especie	Precio madera en pie USD/m ³
<i>V. guatemalensis</i>	49,8
<i>D. retusa</i> ¹⁾	750,0
<i>D. oleifera</i> ²⁾	388,4
<i>T. grandis</i>	97,8
<i>H. alchorneoides</i>	57,3
Madera de tarimas ³⁾	31,1

1) Estimación basada en informes de precios locales

2) Precio de 2011, corregido a precios de 2020

3) Precio medio de la madera para tarimas según la especie

2.2. Flujos de caja

Calculamos los ingresos de la venta de madera, suponiendo una altura comercial del fuste de 7 m, vendida en dos secciones de 3,5 m cada una. Para calcular el volumen comercializable, primero calculamos el diámetro del fuste en los extremos inferior y superior de cada troza utilizando la relación diámetro-altura como índice de conicidad. Si el diámetro superior de una troza es superior a 10 cm, se considera comercializable. Además, la troza sólo se considera comercializable si ha sido podada. A continuación, calculamos el volumen de las piezas del fuste comercializables como conos truncados, restando 2 cm para la corteza de los diámetros (Berrocal *et al.* 2018; Pérez y Kanninen 2003; Tenorio *et al.* 2016). A continuación, multiplicamos el volumen comercializable de las trozas por un factor de precio dependiente del diámetro (Ecuación 1). Además, corregimos los precios de la madera en función del contenido de duramen, donde se asumió una anchura de albura de 4 cm (Pinnschmidt *et al.* 2022). Suponemos que la madera se venderá a la industria para tarimas o para productos de mayor valor, dependiendo de qué industria ofrezca el precio más alto. El valor de todas las trozas se suma para calcular los ingresos generados por cada raleo o cosecha.

$$pfD = \begin{cases} 0 & \text{cuando } D_{top} < 10\text{cm} \\ 0.739 * \log(D_{top}) - 1.393 & \text{cuando } 10\text{cm} \leq D_{top} \leq 25\text{cm} \\ 1 & \text{cuando } D_{top} > 25\text{cm} \end{cases} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde pfD es el factor de precio dependiente del diámetro y D_{top} es el diámetro de la pieza del fuste en su parte superior (con menor diámetro).

Los datos de costos de establecimiento y mantenimiento de las plantaciones (cuadros 2 y 3), se recopilaron de 12 empresas reforestadoras costarricenses de tamaño medio a grande y fueron recolectados desde 2008 hasta 2021 (Guevara-Bonilla 2011; Guevara-Bonilla y Murillo 2021; Vallejos 2019). Los costes de plantación y establecimiento incluyen laboreo, plántulas, plantación, fertilizantes, pesticidas y control de malezas. Los costos

de laboreo, plántulas, plantación y fertilización se consideran en el año de la plantación, mientras que los de pesticidas y del control de malezas se indican anualmente, pero disminuyendo en magnitud hasta el quinto año después de la plantación. Si después del quinto año la cobertura de las copas del rodal no supera el 60%, asumimos la continuación de gastos para el control de malezas. Esto puede ocurrir en casos de raleos fuertes o cuando la especie dominante se cosecha en una plantación mixta. Si nuestro modelo se aplica a varias rotaciones, los costos totales de plantación y establecimiento sólo se consideran en la primera rotación. En las siguientes rotaciones no se aplican los costes de laboreo y fertilización. Como suponemos que los árboles se venden en pie, no aplicamos ningún costo de tala, extracción o transporte. Sin embargo, los costes de selección y marcado de árboles y de supervisión del raleo se consideran en el momento del raleo/cosecha. En algunos casos, el raleo puede ocurrir antes de que los árboles hayan alcanzado un tamaño comercial. En este caso, asumimos que el propietario de la plantación debe cubrir la totalidad de los costes del raleo y aplicamos los costes de tala indicados por Paul *et al.* (2015). Por último, asumimos que la empresa maderera necesita ganar al menos 1000 USD/ha por concepto de la tala. Si no se alcanza este límite, la diferencia se añade como coste. Los costes fijos anuales de administración y mantenimiento se producen a nivel de plantación por ha (Cuadro 2 y 3). En plantaciones mixtas, se contabilizaron los costes fijos de cada especie en función de su área basal.

En Costa Rica, las plantaciones forestales deben ser evaluadas anualmente por consultores forestales autorizados (regentes forestales). Sin embargo, el estado ofrece incentivos a la reforestación como parte del programa de pago por servicios ambientales durante los primeros cinco años del establecimiento de las plantaciones (MINAE 2020). Los incentivos dependen de la especie y sólo se aplican en la primera rotación. Además, los proyectos de reforestación deben cumplir con requisitos específicos en cuanto al tamaño del área reforestada, la planificación y el monitoreo, de acuerdo con la Ley Forestal No. 7575. Sin embargo, se espera que los proyectos de tamaño mediano, con una tasa de reforestación inferior a 300 hectáreas por año, califiquen para recibir estos pagos. Los costos de evaluación y de regencias forestales y los incentivos asociados se pueden encontrar en el Cuadro 4.

Cuadro 2. Costes de establecimiento y mantenimiento de la plantación

Edad	Plantación	Planificación y preparación del sitio	Fertilización	Control de malezas	Mantenimiento de los árboles	Costes fijos
	USD/árbol	USD/ha	USD/árbol	USD/ha	USD/árbol	USD/ha
1	0,57	806	0,24	673,4	0,06	142,4
2				313,1		55,1
3				102,3	0,07	58,2
4				87,4		102,0
5				69,5		28,8
>5						115,1

Cuadro 3. Costes de poda y marcado de árboles

Actividad	Coste	
	USD/ha	USD/árbol
Primera poda	64,9	
Segunda poda	63,8	
Tercera poda	70,5	
Selección y marcado		0,09

Cuadro 4. Costes de evaluación y de regencias forestales e incentivos a la reforestación en Costa Rica

Edad	Costes de evaluación	Subsidios				
		<i>V. guatemalensis</i>	<i>D. oleifera</i>	<i>D. retusa</i>	<i>T. grandis</i>	<i>H. alchorneoides</i>
	USD/ha	USD/ha	USD/ha	USD/ha	USD/ha	USD/ha
1	39,2	619,6	1048,0	698,6	698,6	698,6
2	191,4	247,8	419,2	279,5	279,5	279,5
3	68,1	185,9	314,4	209,6	209,6	209,6
4	22,7	123,9	209,6	139,7	139,7	139,7
5	63,8	62,0	104,8	69,9	69,9	69,9
>5	22,7					

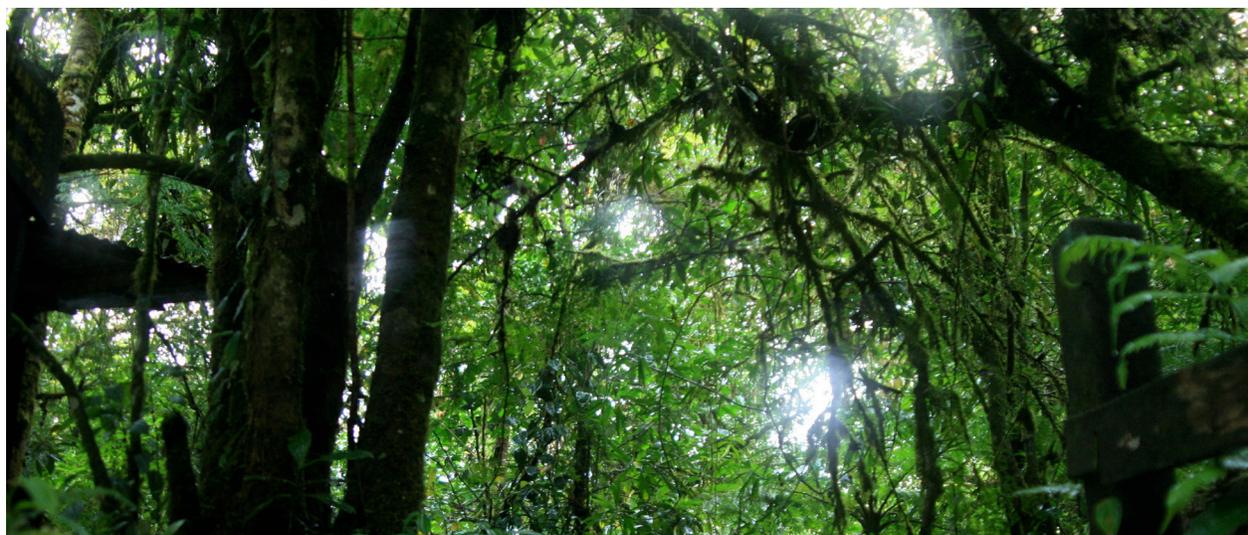
3

Descripción de las especies



Seleccionamos cuatro especies arbóreas nativas (cocobolo, almendro de montaña, pilón y chanco) y una especie arbórea introducida (teca), en representación de una amplia variedad de especies y características, especialmente en cuanto a tasas de crecimiento, valor maderero y distribución geográfica natural. Las especies seleccionadas están entre las especies consideradas como más prometedoras para la reforestación comercial en Costa Rica por propietarios forestales, expertos forestales locales o por su área de plantación actual (Instituto Nacional de Estadística y Censos 2015, Méndez y Pérez 2018). La disponibilidad de datos de crecimiento forestal prolongado en monocultivo y en cultivo mixto a una escala geográfica amplia fue otro criterio importante.

Los resultados mostrados en plantaciones mixtas de *almendro* y *chancho* se basan en simulaciones y fueron validados por observaciones. Las otras combinaciones de especies (cocobolo y almendro; cocobolo y almendro y chanco; cocobolo y teca y almendro y teca), se basan únicamente en simulaciones y son las que presentaron los mejores resultados en simulaciones anteriores (Pinnschmidt *et al.* 2022; Pinnschmidt *et al.* 2023). Sin embargo, el modelo fue validado con otras mezclas y cada una de las cinco especies consideradas aquí estuvo presente en al menos una de las mezclas utilizadas para la validación del modelo (Nölte *et al.* 2022). Los datos usados para la validación del modelo se limitaron a plantaciones mixtas de 14 años de edad o menores.



En la Figura 3 se observa una plantación mixta de estas dos especies de 3 años establecida en la zona norte, Costa Rica.



Figura 3. Vista de una plantación joven mixta de almendra de montaña y chancho establecida en la zona norte, Costa Rica
Fotografía: Anja Nölte

3.1. *Dalbergia retusa* (dare) / cocobolo

El cocobolo es una especie arbórea caducifolia de crecimiento lento que forma múltiple fustes cuando se cultiva a pleno sol. Se utiliza sobre todo para la artesanía fina y mobiliario y se ha convertido en una de las maderas más apreciadas del mundo (Camino 2018; Marshall *et al.* 2022). En consecuencia, ha sufrido gravemente las consecuencias de la cosecha ilegal y actualmente figura como especie en peligro crítico en la lista roja de la UICN (<https://www.iucnredlist.org/species/32957/67799410>). Al ser una especie fijadora de nitrógeno, es, especialmente interesante, en plantaciones de especies mixtas (Mayoral *et al.* 2017; Rothe y Binkley 2001). Se distribuye naturalmente en toda América Central, principalmente en elevaciones bajas en la costa del Pacífico en un clima de seco a húmedo con una estación seca de tres meses o más (Cordero y Boshier 2003). Su resistencia a la sequía (excluyendo las plántulas (Meyrat 2017)) y su alta eficiencia

en el uso del agua hacen que esta especie sea interesante bajo escenarios de cambio climático (Craven *et al.* 2011a; Sinacore *et al.* 2019). Puede crecer en una amplia gama de suelos, pendientes y condiciones climáticas, incluyendo suelos infértiles, ácidos y pedregosos (Ahumada y Villalobos 2009; Hall y Ashton 2016; Meyrat 2017). Se observó que el rendimiento del crecimiento inicial era mejor en sitios fértiles secos, pero la supervivencia inicial fue ligeramente mejor en sitios húmedos (Hall y Ashton 2016). Prefiere suelos arcillosos con bajo contenido de humus sobre suelos arenosos; el fósforo y el hierro mejoran su crecimiento (Czarnowski 2002). Según algunos autores, los suelos mal drenados, la altitud elevada, los climas muy húmedos y la sombra afectan negativamente el crecimiento de esta especie (Cordero y Boshier 2003; Czarnowski 2002; Hall y Ashton 2016; Rodríguez González *et al.* 2017). En un ensayo experimental con 64 especies nativas se observó que sus tasas de secuestro de carbono están por encima del promedio (Hall y Ashton 2016). Se recomienda la poda, especialmente si se quiere evitar una forma de crecimiento multifuste (Hall y Ashton 2016).

En la Figura 4 se muestra una plantación de esta especie de 10 años establecida en la provincia Darién, Panamá.



Figura 4. Vista de una plantación de cocobolo de 10 años establecida en la provincia Darién, Panamá

Fotografía: Anja Nölte

3.2. *Dipteryx oleifera* (diol) / almendro de montaña

El almendro de montaña es un árbol caducifolio, con una tasa de crecimiento de intermedia a lenta. La madera es muy apreciada por su alta densidad y resistencia; sin embargo, es dura, difícil de aserrar y presenta una alta incidencia de torsión en el proceso de secado (Moya 2018). Esta especie tiene un valor ecológico muy alto, siendo una importante fuente de alimento para más de 60 especies animales y el hábitat de nidificación preferido del *Ara ambiguus* (guacamaya ambigua o lapa verde), especie en peligro de extinción (Cordero y Boshier 2003). Se da con mayor abundancia en las llanuras de las tierras bajas del Atlántico en climas tropicales húmedos desde Nicaragua hasta Colombia (Cordero y Boshier 2003). En sitios húmedos, crece bien independientemente de la fertilidad. Sin embargo, se encontró que en sitios secos e infértiles, la supervivencia inicial fue extremadamente baja y, en sitios secos y fértiles, fue inferior al 50% (Hall y Ashton 2016). Puede encontrarse en suelos aluviales y arenosos y, a veces, en suelos franco-arcillosos y suelos ácidos (Cordero y Boshier 2003). Se ha señalado que suelos mal drenados, la altitud elevada y climas secos limitan su crecimiento (Cordero y Boshier 2003). Esta especie ha demostrado ser capaz de sobrevivir a la sombra, en claros y en condiciones soleadas (Vivar Balderrama y Chazdon 2005) por lo que se considera adecuada para su establecimiento en plantaciones mixtas. Esta especie produjo cantidades iguales de volumen en plantaciones mixtas y puras (Petit y Montagnini, 2006). Nosotros también observamos un buen crecimiento, a veces incluso mejor, en plantaciones mixtas, incluso con especies muy competitivas y de crecimiento rápido como el chancho. Sin embargo, el crecimiento inicial en altura se ve fuertemente reducido en condiciones de poca luz (Clark y Clark 1987; Piotto 2007), lo que sugiere que el control de malezas es esencial durante los primeros años tras el establecimiento de la plantación y que, en plantaciones mixtas, la densidad de las otras especies establecidas deben permitir una transmisión de luz suficiente. Esta especie pertenece a la familia de las *fabaceas* y es muy probablemente fijadora de nitrógeno no nodulante (Bryan *et al.* 1997; Montagnini 2000). Se considera que plantaciones de alta densidad de esta especie tienen un gran potencial para servir como sumideros de carbono a largo plazo (Redondo-Brenes 2007).

En la Figura 5 se observa una plantación de esta especie de 11 años establecida en la zona norte, Costa Rica.



Figura 5. Vista de una plantación de almendro de montaña de 11 años establecida en la zona norte, Costa Rica

Fotografía: Anja Nölte

3.3. *Hieronyma alchorneoides* (hial) / pilón

El pilón es una especie arbórea nativa, semicaducifolia o perennifolia de crecimiento intermedio. Es apreciada en los mercados nacionales por su madera durable de usos versátiles y, según Piotto *et al.* (2010), es económicamente muy rentable. Sin embargo, esta especie también reporta problemas de secado de la madera (Moya 2018). El pilón crece naturalmente en toda la costa atlántica de Centroamérica en climas húmedos a muy húmedos (Cordero y Boshier 2003). Es una especie exigente en luz que se puede encontrar cerca de ríos, claros y bordes de bosque (Cordero y Boshier 2003; Vivar Balderrama y Chazdon 2005). Prefiere suelos de textura franco-arcillosa o franco-arenosa, pero crece en una amplia variabilidad de suelos, incluyendo suelos pedregosos, ácidos y degradados o suelos mal drenados y periódicamente inundados (Cordero y Boshier 2003). Algunos autores sugieren que mejora la calidad del suelo

y facilita la regeneración natural gracias a su elevada producción y acumulación de hojarasca (Carnevale y Montagnini 2002; Cordero y Boshier 2003; Raich *et al.* 2007). No se recomienda para lugares secos (Cordero y Boshier 2003; Hall y Ashton 2016). Según los resultados de un ensayo experimental con 64 especies nativas establecidas en sitios húmedos e infértiles, las tasas de secuestro de carbono de esta especie fueron superiores al promedio (Hall y Ashton 2016). Durante los primeros años, el control de la competencia por malezas y lianas, así como la poda, parecen ser importantes para esta especie (Cordero y Boshier 2003; Montero *et al.* 2007).

En la Figura 6 se muestra una plantación de pilón de 23 años establecida en la provincia Chiriquí, Panamá.

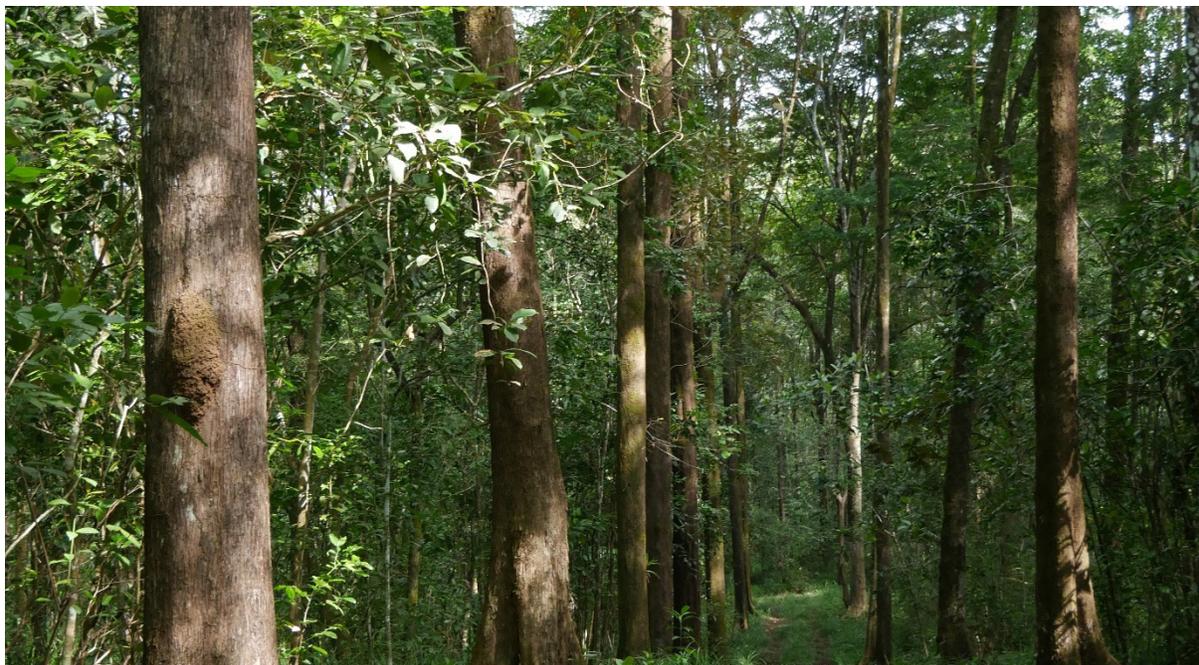


Figura 6. Vista de una plantación de pilón de 23 años establecida en la provincia Chiriquí, Panamá
Fotografía: Anja Nölte

3.4. *Tectona grandis* (tegr) / teca

La teca es una especie nativa del sudeste asiático, de crecimiento rápido, exigente en luz, y apreciada en todo el mundo por la calidad de su madera. Representa el 12% del comercio mundial anual de maderas tropicales y es una de las especies arbóreas tropicales más importantes del mundo desde el punto de vista económico (FAO 2015). Con el 49% y el 64% de la superficie de plantaciones forestales, es la especie más importante utilizada en reforestación en Costa Rica y Panamá, respectivamente (Instituto Nacional de Estadística y Censos 2015; Ugalde y Gómez 2006). Se da naturalmente en bosques caducifolios húmedos y secos por debajo de los 1000 m de altitud y crece mejor con precipitaciones anuales entre 1250 y 3750 mm (Pandey y Brown 2000). Los bosques naturales de teca crecen principalmente en terrenos montañosos y ondulados con *trapp*, basalto, granito, esquisto, gneis, caliza y arenisca como rocas subyacentes (Pandey y Brown 2000). Los mejores resultados de crecimiento se consiguen en suelos aluviales profundos y bien drenados (Pandey y Brown 2000) y en suelos con más de 90 cm de profundidad (Vasquez y Ugalde 1995). El crecimiento está limitado por la acidez del suelo ($\text{pH} < 6$), saturación de acidez del suelo $> 3\%$, concentraciones de calcio $< 68\%$, altos contenidos de hierro, fuertes vientos y precipitación anual por debajo de 1800 mm (Alvarado y Fallas 2004; Vasquez y Ugalde 1995); por lo tanto, esta especie no es adecuada para la reforestación de pastizales abandonados (Vasquez y Ugalde 1995). Se ha reportado que el crecimiento falla completamente en suelos arcillosos mal drenados (Pandey y Brown 2000). Según Alvarado y Fallas (2004) y Zhou *et al.* (2012), el encalado tuvo un efecto positivo en su crecimiento. Marshall *et al.* (2021) sugieren la plantación de enriquecimiento con especies nativas para rehabilitar las plantaciones de teca de bajo rendimiento. Al ser una especie tolerante a la sequía, la teca es una especie interesante para plantaciones bajo escenarios de cambio climático (Craven *et al.* 2011b). La poda y el raleo durante los primeros años, o la mezcla con especies arbustivas o árboles pequeños, se consideran importantes para obtener una madera de alta calidad (Ugalde y Gómez 2006; Vigulu *et al.* 2019; Víquez y Pérez 2005).

En la Figura 7 se observa una plantación de teca de 11 años establecida en la provincia Panamá, Panamá.



Figura 7. Vista de una plantación de teca de 11 años establecida en en la provincia Panamá, Panamá
Fotografía: Anja Nölte

3.5. *Vochysia guatemalensis* (vogu) / chancho

El chancho es una especie pionera semicaducifolia o perennifolia, de crecimiento muy rápido y baja densidad de madera. Ocupa el 3,7% del área bajo plantaciones forestales y es la segunda especie arbórea nativa más plantada en Costa Rica (Instituto Nacional de Estadística y Censos 2015), siendo la especie arbórea nativa más rentable económicamente en el norte de Costa Rica (Piotto *et al.* 2010). Sin embargo, se ha reportado que los problemas durante el secado de la madera, las torceduras y grietas de la madera aserrada, las dificultades para clavar clavos y la alta susceptibilidad a los ataques de hongos e insectos reducen su aceptación en el mercado maderero local (Méndez y Pérez 2018; Moya 2018). Se presenta naturalmente en climas tropicales

húmedos y lluviosos desde México hasta Colombia (Cordero y Boshier 2003). Crece bien en suelos aluviales arenosos o arcillosos (Cordero y Boshier 2003). Siendo un hiperacumulador (Camacho *et al.* 2016), tolera altas concentraciones de aluminio y hierro (Cordero y Boshier 2003). En el norte de Costa Rica se reportó que esta especie no solo está bien adaptada, sino que se desempeña mejor en suelos ácidos de bajo a medio contenido de nutrientes, lo que la hace excepcionalmente adecuada para la reforestación en suelos degradados (Mora *et al.* 2015). En Panamá, la supervivencia inicial en sitios secos fue muy pobre y el rendimiento de crecimiento inicial fue mayor en suelos infértiles húmedos (Hall y Ashton 2016). Según Calvo-Alvarado *et al.* (2007), la estacionalidad en el Pacífico sur de Costa Rica limita la productividad de esta especie; además según Solís Corrales y Moya Roque, el crecimiento es limitado en sitios anegados. A pesar de ser una especie exigente en luz, se han observado tasas de supervivencia de plántulas relativamente altas incluso en condiciones de baja luminosidad (Vivar Balderrama y Chazdon 2005) La alta producción de hojarasca, su acumulación y la presencia de regeneración natural, sugieren que esta especie contribuye positivamente a la restauración del suelo y de los bosques (Butler *et al.* 2008; Byard *et al.* 1996; Haggard *et al.* 1997; Powers *et al.* 1997). La especie parece adecuada para el establecimiento de plantaciones de especies mixtas (Petit y Montagnini 2006) y para el secuestro rápido de carbono (Hall y Ashton 2016; Redondo-Brenes 2007; Russell *et al.* 2010). Según Russell y Raich (2012), podría ser un fijador de nitrógeno no nodulante. El control de malezas, la poda y el raleo se consideran importantes durante los primeros años de su establecimiento (Solís Corrales y Moya Roque).

En la Figura 8 se observa una plantación de chancho de 10 años, después de un raleo, establecida en la zona norte, Costa Rica.



Figura 8. Vista de una plantación de chancho de 10 años, después de un raleo, establecida en la zona norte, Costa Rica

Fotografía: Susana Estrada

4

Instrucciones prácticas

(cómo utilizar la información de
los cuadros del capítulo 5)



4.1. Clase de productividad

Si desea determinar la clase de productividad de su plantación, compare la producción total de biomasa del fuste [t/ha] (incluidas las cosechas de raleo o antes del raleo, sumando la biomasa de todas las especies), con las cintas de clase de productividad que se muestran en la Figura 9. Los valores exactos de cada clase de productividad figuran en los cuadros 5 y 6 para una edad de 5 años y en el Anexo I para las edades 6-10 años.

Para determinar la clase de productividad se utilizó la biomasa en lugar del volumen, ya que permite representar mejor las especies de crecimiento lento y alta densidad de madera en mezclas con especies de crecimiento rápido y baja densidad. Para la conversión de los volúmenes de fuste en biomasa de fuste se utilizan los siguientes factores de conversión (adecuados para árboles jóvenes) para cada una de las especies:

Cocobolo (dare): 0,86

Almendra (diol): 0,73

Pilón (hial): 0,38

Teca (tegr): 0,60

Chancho (vogu): 0,35



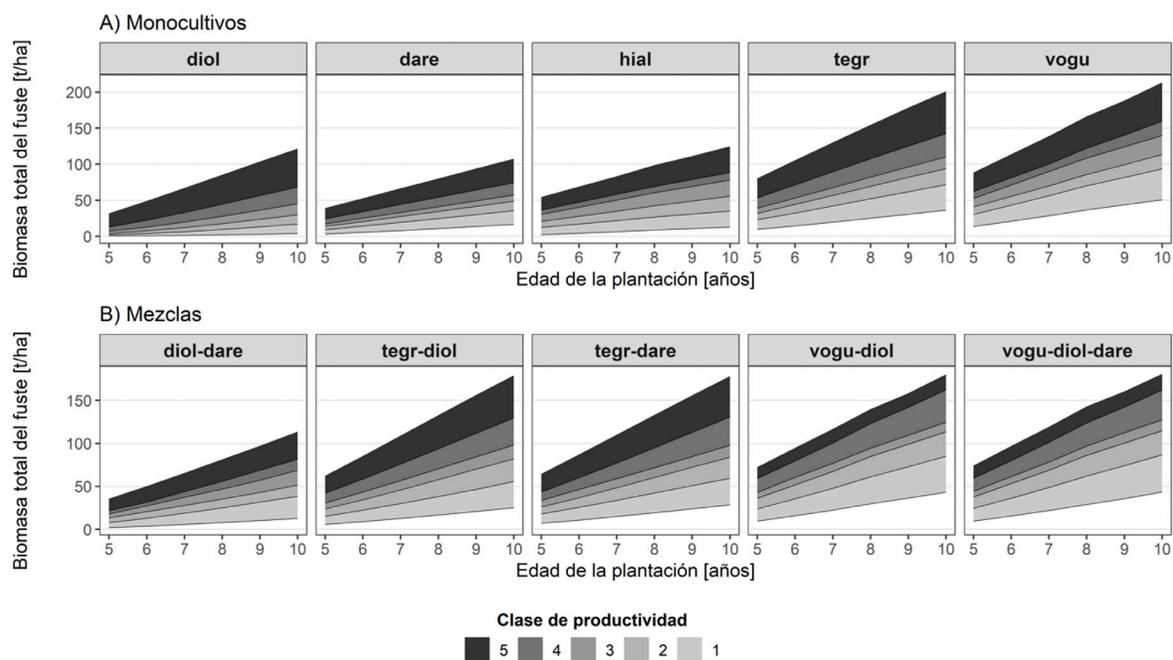


Figura 9. Biomasa total del fuste [t/ha] de cinco clases de productividad de plantaciones puras y mixtas de cinco especies forestales a edades de 5-10 años

Cuadro 5. Producción de biomasa de fuste inicial [t/ha] para cada una de las cinco clases de productividad en plantaciones puras a la edad de 5 años

Clase	Especies en monocultivo				
	<i>dare</i>	<i>diol</i>	<i>hial</i>	<i>tegr</i>	<i>vogu</i>
1	3,4 - 9,3	0,5 - 2,1	2,5 - 12,3	9,7 - 23	13,6 - 30,4
2	9,3 - 14	2,1 - 4,1	12,3 - 20,6	23 - 32,1	30,4 - 40,9
3	14 - 17,4	4,1 - 7,1	20,6 - 30,3	32,1 - 39	40,9 - 52,6
4	17,4 - 24,4	7,1 - 13	30,3 - 36,3	39 - 53,4	52,6 - 62,2
5	24,4 - 39,3	13 - 32	36,3 - 54,7	53,4 - 80,6	62,2 - 88,7

Cuadro 6. Producción inicial de biomasa del fuste (suma de todas las especies) [t/ha] para cada una de las cinco clases de productividad en **plantaciones mixtas** a la edad de 5 años

Clase	Especies en mezcla				
	<i>dare-diol</i>	<i>dare-diol-vogu</i>	<i>dare-tegr</i>	<i>diol-vogu</i>	<i>diol-tegr</i>
1	2,2 - 8	5,8 - 15,2	7,1 - 18	9,7 - 24	9,7 - 24,6
2	8 - 13,5	15,2 - 24	18 - 26,1	24 - 36,3	24,6 - 37,7
3	13,5 - 17,9	24 - 30,7	26,1 - 33,8	36,3 - 43,1	37,7 - 44,3
4	17,9 - 21,8	30,7 - 42,1	33,8 - 43,5	43,1 - 59,1	44,3 - 59,5
5	21,8 - 35,7	42,1 - 62,4	43,5 - 64,7	59,1 - 72,6	59,5 - 74,4

4.2. Límite área basal

El *límite área basal* indica a el área basal de la plantacion [m²/ha] a partir del cual se recomienda realizar un raleo. Si la celda del cuadro considerado está vacía, no se recomienda realizar un raleo. En algunos casos, es posible que plantaciones de una misma clase de productividad nunca alcancen el *límite de área basal* recomendado, mientras que otras plantaciones de la misma clase de productividad sí lo alcancen. En los cuadros, estos casos están marcados con un *. Las plantaciones sólo deben ralearse si se supera el *límite de área basal*.

4.3. Área basal removida

La intensidad del raleo se indica mediante el porcentaje de área basal removido y se refiere al área basal que se recomienda remover durante el raleo (por ejemplo, con un 40% de *área basal removida* y un *límite de* 25 m²/ha se recomienda ralear 10 m²/ha). El raleo se realiza desde abajo, lo que significa eliminar los árboles más pequeños de la **especie arbórea dominante** en la plantación, distribuidos uniformemente por toda el área. Si la celda del cuadro considerado está vacía, no se recomienda realizar un raleo.

4.4. DAP final promedio

El *DAP* (diámetro a la altura del pecho) *final promedio* [cm] es el diámetro del fuste promedio de la plantación para el cual se recomienda la cosecha final de la especie respectiva (corta de todos los árboles). En los cuadros también se indica la edad aproximada a la que se espera alcanzar el diámetro final para cada clase de productividad y especie. Sin embargo, la edad **no** debe ser el indicador para decidir cuándo llevar a cabo la cosecha final. La información sobre la edad sólo se ofrece para conocer el horizonte **aproximado** de planificación de la plantación.

En los cuadros de manejo ** significa que, en promedio considerando todos los escenarios de una clase de productividad, más del 20% de los árboles plantados de una especie mueren debido a la competencia con la otra especie de la plantación.

Según estas recomendaciones, no se debe volver a plantar hasta que se hayan cosechado los árboles de todas las especies, ya que se ha determinado que plantar debajo le dosel establecido no es rentable (Pinnschmidt *et al.* 2022).

4.5. VAN

El valor actual neto (VAN) se refiere a la rentabilidad económica esperada de una inversión con un horizonte de planificación fijo (*en este caso 80 años*), cuando se considera que los costes e ingresos de una inversión pueden producirse en distintos momentos. Al descontar los costes e ingresos futuros, se garantiza que los flujos de caja que se produzcan más cerca del presente reciban un mayor peso en la evaluación económica que los flujos de caja que se produzcan en un futuro más lejano. El concepto de descuento tiene en cuenta la incertidumbre de los flujos de caja futuros, así como la oportunidad perdida de invertir el dinero en otra parte. Aplicamos una tasa de descuento real del 8% (Cubbage *et al.* 2007; Cubbage *et al.* 2020). Elegimos un horizonte de planificación de 80 años para aproximar el valor esperado de la tierra (VET), que asume una repetición del ciclo de plantación infinito (esto tiene en cuenta los posibles beneficios económicos de una cosecha más temprana en rotaciones

posteriores). El uso del VET solamente es apropiado cuando todas los ciclos de una plantación tienen flujos de caja exactamente iguales; en nuestro modelo económico los costes de plantación de rotaciones posteriores fueron menores que el de la primera rotación y, además, se permitió plantar debajo del dosel establecido. Con una tasa de descuento del 8% los flujos de caja a los 80 años se aproximan a un valor presente cerca de cero y entonces el VAN se aproxima al VET.

Cuando una inversión alcanza un VAN igual o superior a cero se considera „económicamente viable“ o „rentable“. Se debe considerar que el coste de oportunidad de la tierra (el alquiler de la tierra) no se incluyó en el análisis, lo que significa que el VAN debe compararse con el precio de la tierra o el de su alquiler.

4.6. TIR

La tasa interna de retorno (TIR), se refiere a la tasa de descuento máxima que puede aplicarse antes de que la inversión deje de ser rentable; es decir, la tasa de descuento en la que el VAN es igual a cero. “*No viable*” significa que las plantaciones simuladas no son económicamente viables con ninguna tasa de descuento; es decir, que los ingresos totales generados por la plantación nunca superan los costos totales.

4.7. ¿Por qué hay un rango de VAN y TIR en lugar de un sólo valor?

Cada clase de productividad contiene varios escenarios de sitio que presentan cierta variabilidad (Figura 1), como resultado de las combinaciones de índices de fertilidad y condiciones climáticas. Los valores **mínimo** y **máximo** del VAN y de la TIR se refieren al VAN y a la TIR más altos y más bajos de cada clase de productividad cuando se aplica la estrategia de manejo presentada. Esta estrategia es el escenario de manejo que resulta en el VAN-mínimo más alto dentro de una clase de productividad (regla de decisión *minimax*) (Figura 2, sección 2), que pretende reducir el riesgo de pérdidas o fracaso económico. Esto hace que el rango de VAN y TIR presentado sea una estimación robusta y conservadora del rendimiento económico esperado en condiciones de incertidumbre. En otras palabras, el mínimo y el máximo indicado en los cuadros no representan el rendimiento económico global mínimo y máximo de una especie y mezcla determinada, sino el mínimo y el máximo esperado al aplicar la estrategia de manejo presentada. Véanse más detalles en la sección 2.

5

Recomendaciones de manejo para la producción de madera



En los cuadros siguientes se presentan las tablas de los límites de raleo y los diámetros finales que pueden utilizarse para guiar las intervenciones de manejo silvicultural a nivel de plantación; específicamente el momento y la intensidad del raleo y de la cosecha. Las recomendaciones se basan en un extenso análisis de escenarios en el que las plantaciones se clasificaron en función de sus resultados de crecimiento inicial de biomasa (es decir, clases de productividad). Para cada clase se ofrecen recomendaciones de manejo y límites. Según nuestros resultados, sólo las masas que alcanzan una productividad relativamente alta (es decir, las clases de productividad 4-5) pueden ser viables desde el punto de vista económico. Por lo tanto, antes de establecer un plantación, se debe prestar especial atención a la selección de especies y combinaciones con un alto potencial de crecimiento específico.

Las recomendaciones de manejo presentadas se determinaron para plantaciones en las que la producción y venta de madera es la única fuente de ingresos. En la práctica, la venta de créditos de carbono podría convertirse en una fuente de ingresos cada vez más importante para los propietarios de plantaciones. El potencial de los créditos de carbono como fuente de ingresos y las estrategias de manejo recomendadas cuando se incluyen los ingresos de los créditos de carbono, se analizan en la sección 6 y en el Anexo II.

Para obtener descripciones detalladas sobre cómo interpretar y utilizar la información de los cuadros, revise la sección 4.

5.1. Recomendaciones de manejo silvicultural para plantaciones puras

5.1.1. *Dalbergia retusa* / cocobolo

Según nuestros escenarios de sitio y los precios de la madera asumidos, las plantaciones puras de cocobolo pueden ser económicamente viables en condiciones de crecimiento muy buenas y sólo alcanzan una TIR superior al 8% en las condiciones correspondientes a la clase 5 de productividad (Cuadro 7). Se recomienda que las plantaciones de esta clase de productividad se mantengan por debajo de un área basal de 18 m²/ha y que se cosechen cuando el DAP promedio de la plantación alcance los 25 cm, lo que resulta en un período de rotación de 27-36 años. Debe recordarse que el cocobolo muestra típicamente una forma de crecimiento multifuste, así que para obtener fustes rectos, debe considerarse la poda intensiva o altas densidades de plantación a edades iniciales para promover la poda natural.

Cuadro 7. Parámetros de manejo y rendimientos económicos para plantaciones de cocobolo. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	m ² /ha	%	cm (años)	USD/ha	%
1			15 (28-64)	(-3455) - (-2636)	Inviabile - 1
2			15 (22-29)	(-2677) - (-2251)	Inviabile - 1
3			15 (19-21)	(-2211) - (-1995)	1 - 2
4			15 (15-19)	(-2023) - (-1645)	2 - 3
5	18	40	25 (27-36)	(-388) - (2827)	8 - 11

5.1.2. *Dipteryx oleifera* / almendro

Según nuestros escenarios de sitio y los precios de la madera asumidos, las plantaciones de almendro pueden ser económicamente viables en buenas condiciones de

crecimiento (Cuadro 8). Las plantaciones deberían mantenerse por debajo de un área basal de 18 m²/ha y cosecharse cuando el DAP promedio alcance los 25 cm. En condiciones óptimas, la rotación puede durar entre 18 y 25 años.

Cuadro 8. Parámetros de manejo y rendimientos económicos para plantaciones de almendro. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	m ² /ha	%	cm (años)	USD/ha	%
1			15 (32-52)	(-3110) - (-2717)	Inviabile
2			15 (21-27)	(-2628) - (-2429)	Inviabile
3	18	25	25 (33-44)	(-2126) - (-1263)	2 - 5
4	18	25	25 (26-34)	(-1359) - (-200)	5 - 8
5	18	15	25 (18-25)	199 - 2700	8 - 14

5.1.3. *Hieronyma alchorneoides* / pilón - zapatero

Según nuestros escenarios de sitio y los precios de la madera asumidos, las plantaciones de *H. alchorneoides* no son, en general, económicamente viables con una tasa de descuento del 8% en las condiciones actuales del mercado (Cuadro 9).

Cuadro 9. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de pilón. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	m ² /ha	%	cm (años)	USD/ha	%
1			15 (15-25)	(-3481) - (-3288)	Inviabile
2			15 (9-15)	(-3382) - (-3296)	Inviabile
3	18	40	25 (17-27)	(-2903) - (-2469)	Inviabile
4	25	40	25 (17-19)	(-1988) - (-1620)	2 - 3
5	25	25	25 (13-20)	(-1749) - (-548)	3 - 7

5.1.4. *Tectona grandis* / teca

Según nuestros escenarios de sitio y los precios de la madera asumidos, las plantaciones de teca pueden ser económicamente viables en buenas condiciones de crecimiento (Cuadro 10). El área basal debe mantenerse por debajo de 18-25 m²/ha y la cosecha final se recomienda cuando la plantación alcance un DAP promedio entre 25-35 cm.

Cuadro 10. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de teca. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	m ² /ha	%	cm (años)	USD/ha	%
1	18	40	25 (23-36)	(-3551) - (-2309)	Inviabile - 1
2	18	40	25 (17-23)	(-2371) - (-1508)	1 - 4
3	18	40	35 (23-27)	(-1543) - (-809)	5 - 6
4	25	25	25 (15-19)	(-935) - 422	6 - 9
5	18	40	35 (13-17)	939 - 3486	10 - 15

5.1.5. *Vochysia guatemalensis* / chancho

Según nuestros escenarios de sitio y los precios de la madera asumidos, las plantaciones de chancho pueden ser económicamente viables incluso en sitios menos productivos (Cuadro 11). Las plantaciones deberían mantener una alta densidad de plantación (límite de AB de 32 m²/ha) y ser cosechados a un DAP promedio de 35 cm. Las plantaciones económicamente viables se pueden rotar entre 9 y 16 años.

Cuadro 11. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de chanco. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	<i>m²/ha</i>	<i>%</i>	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	<i>%</i>
1	32	40	25 (11-19)	(-2201) - (-82)	2 - 8
2	32	25	25 (10-13)	(-475) - 876	7 - 10
3	32	25-40	35 (12-16)	815 - 2947	10 - 14
4	32	15-25	35 (12-13)	2586 - 3815	13 - 16
5	32	15	35 (9-11)	4267 - 6811	16 - 22

5.2. Recomendaciones de manejo para las plantaciones mixtas

5.2.1. *D. oleifera* – *D. retusa* / almendro - cocobolo

Según nuestros escenarios de sitio y los precios de la madera asumidos, las mezclas de almendro y cocobolo son económicamente viables en buenas condiciones de crecimiento (Cuadro 12). Sin embargo, su rendimiento económico fue muy variable incluso dentro la misma clase de productividad. Independientemente de la clase de productividad, la densidad de la plantación debe mantenerse baja (por debajo de 18 m²/ha).

Cuadro 12. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones mixtas de almendro y cocobolo. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de cada especie

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)		VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			diol	dare		
	m ² /ha	%	cm (años)	cm (años)	USD/ha	%
1	18 *	25-40	25 (28-58)	15 (15-63)	(-3204) - (-1759)	Inviabile - 4
2	18	15-25	25 (24-57)	15 (12-57)	(-2860) - (-731)	Inviabile - 6
3			15 (9-57)	15 (10-33)	(-2738) - (-2039)	Inviabile
4	18	15-40	25 (18-67)	25 (22-74)	(-688) - 2580	6 - 12
5	18	15-25	25-35 (16-80)	25 (23-80)	(-106) - 3524	7 - 13

* Algunas plantaciones de esta clase de productividad nunca alcanzaron el límite de AB (véase la sección 4 para más detalles)

5.2.2. *T. grandis* - *D. retusa* / teca - cocobolo

Según nuestros escenarios de sitio y los precios de la madera asumidos, las plantaciones mixtas de teca y cocobolo son económicamente viables en buenas condiciones de crecimiento (Cuadro 13). Los plantaciones deben mantenerse con una baja densidad en todas las clases de productividad. Cabe esperar una mortalidad considerable del cocobolo a consecuencia de la competencia.

Cuadro 13. Parámetros de manejo y rendimiento económico para mezclas de teca y cocobolo. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de cada especie

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)		VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			tegr	dare		
	m ² /ha	%	cm (años)	cm (años)	USD/ha	%
1	18 *	15	25 (20-31)	25 (35-80) **	(-3606) - (-1605)	Inviabile - 5
2	18	25	25 (15-23)	25 (21-74)	(-2435) - 1375	Inviabile - 11
3	18	40	35 (18-23)	25 (19-76) **	(-1298) - 2073	5 - 12
4	18	40	35 (15-21)	25 (37-65) **	(-649) - 2238	6 - 11
5	18	40	35 (12-16)	25 (33-58) **	464 - 4643	10 - 16

* Algunas plantaciones de esta clase de productividad nunca alcanzaron el límite de AB (véase la sección 4 para más detalles).

** En el promedio de todos los escenarios dentro de una clase de productividad más del 20% de los árboles plantados de la especie respectiva mueren debido a la competencia de la otra especie plantada (véase la sección 4 para más detalles)

5.2.3. *T. grandis* - *D. oleifera* / teca - almendro

Según nuestros escenarios de sitio y los precios de la madera asumidos, las las plantaciones mixtas de teca y almendro son económicamente viables en buenas condiciones de crecimiento (Cuadro 14). Los plantaciones deben mantenerse con una baja densidad en todas las clases de productividad. Cabe esperar una mortalidad considerable de almendro debido a la competencia.

Cuadro 14. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones mixtas de teca y almendro. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de cada especie

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (Edad final)		VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			tegr	diol		
	m ² /ha	%	cm (años)	cm (años)	USD/ha	%
1	18 *	15-40	15 (9-44)	25 (25-54)	(-3533) - (-1419)	Inviabile - 3
2	18	25	25 (14-49)	25-35 (20-73)	(-2129) - (-577)	Inviabile - 7
3	18	25-40	25 (12-48)	25 (16-57) **	(-1457) - 137	3 - 8
4	18	40	35 (15-39)	35 (23-63) **	(-211) - 1965	7 - 12
5	18	40	35 (12-15)	25 (26-66) **	608 - 4099	11 - 18

* Algunas plantaciones de esta clase de productividad nunca alcanzaron el límite de AB (véase la sección 4 para más detalles)

** En el promedio de todos los escenarios dentro de una clase de productividad más del 20% de los árboles plantados de la especie respectiva mueren debido a la competencia de la otra especie plantada (véase la sección 4 para más detalles).

5.2.4. *V. guatemalensis* - *D. oleifera* / chancho - almendro

Según nuestros escenarios de sitio y los precios de la madera asumidos, las mezclas de chancho y almendro son económicamente viables incluso en los sitios menos productivos (Cuadro 15). Para que el almendro alcance tamaños comercializables, las plantaciones deben mantenerse a densidades inferiores a 18-25 m²/ha. Si se mantienen densidades más elevadas, cabe esperar una mortalidad considerable por competencia.

Cuadro 15. Parámetros de manejo y rendimiento económico para mezclas de chancho y almendro. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de cada especie

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)		VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			vogu	diol		
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>cm (años)</i>	USD/ha	%
1	25 *	40	25 (9-18)	25 (31-73) **	(-2365) - 368	Inviabile - 9
2	25	40	35 (10-15)	35 (27-62) **	(-1214) - 714	2 - 9
3	18	40	35 (8-9)	15 (12-48)	(-936) - 779	4 - 11
4	18	40	35 (7-9)	15 (12-41)	(-655) - 1449	5 - 15
5	18	40	35 (6-7)	15 (12-39)	(-369) - 2138	7 - 19

* Algunas plantaciones de esta clase de productividad nunca alcanzaron el límite de AB (véase la sección 4 para más detalles).

** En el promedio de todos los escenarios dentro de una clase de productividad más del 20% de los árboles plantados de la especie respectiva mueren debido a la competencia de la otra especie plantada (véase la sección 4 para más detalles).

5.2.5. *V. guatemalensis* - *D. oleifera* - *D. retusa* / chancho - almendro - cocobolo

Según nuestros escenarios de sitio y los precios de la madera asumidos, las plantaciones mixtas de chancho, almendro y cocobolo son económicamente viables en buenas condiciones de crecimiento (Cuadro 16). Las plantaciones deben mantenerse con densidades inferiores a 18-25 m²/ha. Tanto para el almendro como para el cocobolo cabe esperar una mortalidad considerable debido a la competencia.

Cuadro 16. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones mixtas de chanco - almendro - cocobolo. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de chanco y 200 árboles/ha para las otras dos especies

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)			VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			vogu	diol	dare		
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>cm (años)</i>	<i>cm (años)</i>	USD/ha	%
1	18	40	35 (11-39)	25-35 (14-61)	25 (15-81)	(-2453) - 923	Inviabile - 10
2	25	25	35 (11-33)	25 (17-43) **	25 (18-54) **	(-1079) - 2739	2 - 13
3	25	40	35 (9-15)	35 (25-78) **	25 (21-65) **	(-562) - 2242	5 - 13
4	25	40	35 (8-10)	25-35 (15-76) **	25 (20-55) **	(-370) - 2607	7 - 15
5	25	40	35 (7-8)	35 (21-76) **	25 (18-49) **	(-32) - 2296	8 - 20

** En el promedio de todos los escenarios dentro de una clase de productividad más del 20% de los árboles plantados de la especie respectiva mueren debido a la competencia de las otras especies plantadas (véase la sección 4 para más detalles).

6

Recomendaciones
de manejo para la
producción de madera y
créditos de carbono



Anteriormente, la producción de madera había sido el motor principal del establecimiento de plantaciones forestales comerciales. Debido al aumento de los precios del carbono en el mercado voluntario, la venta de créditos de carbono se está convirtiendo en una fuente de ingresos cada vez más importante. El Cuadro 17 muestra los precios de equilibrio para los créditos de carbono que se requieren para cubrir los costos de certificación. A precios mayores a los indicados en el Cuadro, los créditos de carbono ofrecen una fuente de ingresos rentable adicional a los propietarios de plantaciones. Los precios de equilibrio varían entre 3,7 - 18,7 USD/tCO₂e. Las plantaciones de mayor productividad suelen alcanzar el límite de rentabilidad de la certificación a precios de carbono más bajos. Recientemente, los precios de los créditos de carbono procedentes de proyectos de forestación han oscilado entre 4 - 12 USD/tCO₂e y se prevé que superen los 100 USD/tCO₂e en el futuro. En ese caso, la venta de créditos de carbono podría convertirse en una fuente de ingresos rentable para todas las clases de productividad.

Cuadro 17. Precios de equilibrio del carbono con los que los ingresos procedentes de la venta de créditos de carbono de plantaciones puras y mixtas compensarían los costes adicionales derivados del proceso de certificación (para una superficie de reforestación de 500 ha (Gold Standard 2017).

Especie/mezcla	Precio de equilibrio del carbono (USD/tCO ₂ e)				
	Clase de productividad				
	1	2	3	4	5
dare	8	8,6	8,8	8,1	3,7
diol	15,1	16,8	5,7	6,8	6,3
hial	18,7	16,9	9,7	7,3	6,5
tegr	7,4	8,1	6,4	5,5	5,9
vogu	10,3	8,6	6,4	6,2	5,9
diol-dare	14,3	12,5	12,8	11,9	9
tegr-dare	13,7	9,6	7,7	10,5	10,4
tegr-diol	17,4	10,8	11,1	13	10,9
vogu-diol	14,3	9,7	12,3	11,9	12,2
vogu-diol-dare	8,5	11,2	8,2	8,2	9

Si se considera conjuntamente la producción de madera y los créditos de carbono, el manejo silvicultural de plantaciones podría adaptarse para mejorar la rentabilidad

global. Los parámetros de manejo y los indicadores de rentabilidad se muestran en el Anexo II para precios de carbono de 10 y 50 USD/tCO₂e. En general, la cantidad de créditos de carbono certificables para una plantación (y, por lo tanto, los ingresos por la venta de créditos de carbono), pueden incrementarse con las medidas siguientes:

1. Aumentando la densidad de la plantación y aplicando raleos a mayor área basal y menos intensivos.
2. Aumentando el período de rotación.
3. Promoviendo especies arbóreas que puedan mantener la acumulación de biomasa a largo plazo (es decir, especies clímax).

Por lo tanto, podría haber una competencia entre la generación de ingresos por la venta de madera y la de ingresos por la venta de créditos de carbono. Si los precios del carbono son lo suficientemente altos, puede resultar más rentable abstenerse por completo de cosechar madera durante el periodo de certificación. Esto es evidente en los parámetros de manejo recomendados si los precios del carbono alcanzaran los 50 USD/tCO₂e.

7

Potencial de mejora económica mediante la optimización del manejo específico del sitio



Las recomendaciones de manejo silvícola presentadas anteriormente son generalizadas para una amplia variedad de condiciones de sitio posibles. Si bien las recomendaciones minimizan el riesgo de fracaso comercial, a nivel específico del sitio, las plantaciones individuales podrían no alcanzar todo su potencial económico. La Figura 10 muestra el potencial de mejora del VAN y de la TIR si se optimizara el manejo para un sitio específico. La figura indica los aumentos del VAN y de la TIR que podrían lograrse en comparación con las recomendaciones de manejo generalizadas presentadas en la sección 5 (considerando únicamente los ingresos procedentes de las ventas de madera). Se observa que especialmente las plantaciones de especies mixtas podrían beneficiarse de la optimización del manejo específico de la plantación. Con el aumento de los precios del carbono, tanto las plantaciones puras como las de especies mixtas, podrían beneficiarse considerablemente de una optimización del manejo específico de la plantación.

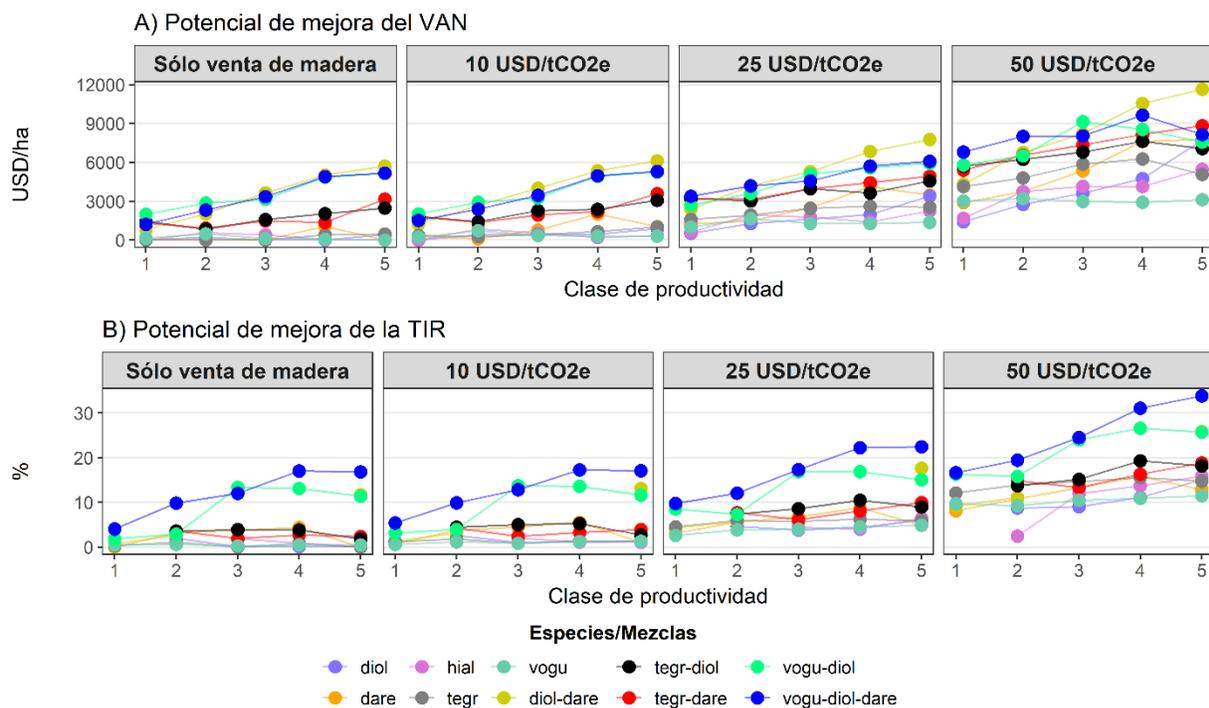


Figura 10. Posibles mejoras del VAN y de la TIR logradas si se optimizara el manejo específico de la plantación

Bibliografía



- Ahumada, O ; Villalobos, JR. 2009. A tactical model for planning the production y distribution of fresh produce. *Annals of Operations Research* 190(1):339–358. doi:10.1007/s10479-009-0614-4.
- Alvarado, A ; Fallas, JL. 2004. La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* L.f.) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28(1):81–87.
- Banco Central de Costa Rica. 2021. US Dollar purchase y sale rates. Disponible en: <https://gee.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/cuadros/frmvercatcuadro.aspx?CodCuadro=400&Idioma=2&FecInicial=2020/01/01&FecFinal=2020/12/31&Filtro=0>. Consultado 9.9.21.
- Barrantes Rodríguez, A ; Ugalde Alfaro, S. 2020. Precios de la madera en Costa Rica para el primer semestre del 2020 y tendencias de las principales especies comercializadas. San José, Costa Rica, Oficina nacional forestal de Costa Rica. 10 p.
- Berrocal, A; Gaitán-Alvarez, J; Moya, R; Fernández-Sólis, D; Ortiz-Malavassi, E. 2018. Development of heartwood, sapwood, bark, pith y specific gravity of teak (*Tectona grandis*) in fast-growing plantations in Costa Rica. *J. For. Res.* 3 (2), 111. doi:10.1007/s11676-018-0849-5.
- Brockerhoff, EG; Barbaro, L; Castagneyrol, B; Forrester, DI; Gardiner, B; González-Olabarria, JR; Lyver, PO; Meurisse, N; Oxbrough, A; Taki, H; Thompson, ID; van der Plas, F; Jactel, H. 2017. Forest biodiversity, ecosystem functioning y the provision of ecosystem services. *Biodivers Conserv* 26(13):3005–3035. doi:10.1007/s10531-017-1453-2.
- Brockerhoff, EG; Jactel, H; Parrotta, JA; Ferraz, SF. 2013. Role of eucalypt y other planted forests in biodiversity conservation y the provision of biodiversity-related ecosystem services. *Forest Ecology y Management* 301:43–50. doi:10.1016/j.foreco.2012.09.018.
- Bryan, JA; Berlyn, GP; Gordon, JC. 1997. Toward a new concept of the evolution of symbiotic nitrogen fixation in the Leguminosae. In Elkan, GH; Upchurch, RG. (Eds.). *Current Issues in Symbiotic Nitrogen Fixation*. Dordrecht, Netherlands, Springer p. 151–159.
- Butler, R; Montagnini, F; Arroyo, P. 2008. Woody understory plant diversity in pure y mixed native tree plantations at La Selva Biological Station, Costa Rica. *Forest Ecology y Management* 255 (7):2251–2263. doi:10.1016/j.foreco.2007.12.050.
- Byard, R; Lewis, KC; Montagnini, F. 1996. Leaf litter decomposition y mulch performance from mixed y monospecific plantations of native tree species in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 58(2-3):145–155. doi:10.1016/0167-8809(96)01028-6.
- Calvo-Alvarado, JC; Arias, D; Richter, DD. 2007. Early growth performance of native y introduced fast growing tree species in wet to sub-humid climates of the Southern region of Costa Rica. *Forest Ecology y Management* 242(2-3): 227–235. doi:10.1016/j.foreco.2007.01.034.
- Camacho, ME; Alvarado, A; Fernández-Moya, J. 2016. *Vochysia guatemalensis* Donn. Smith, an alternative species for reforestation on acid tropical soils. *New Forests* 47(4):497–512. doi:10.1007/s11056-016-9527-7.
- Camino, R. de. 2018. Especies para la reforestación en Costa Rica: formando un activo de alto valor. *AMBIENTICO* 267:10–16.
- Carnevale, NJ; Montagnini, F. 2002. Facilitating regeneration of secondary forests with the use of mixed y pure plantations of indigenous tree species. *Forest Ecology y Management* 163(1-3): 217–227. doi:10.1016/S0378-1127(01)00581-3.
- Carnus, J-M; Parotta, J; Brockerhoff, E; Arbez, M; Jactel, H; Kremer, A; Lamb, D; O'Hara, K; Walters, B. 2006. Planted Forests y Biodiversity. *Journal of Forestry* 104(2):65–77. doi:10.1093/jof/104.2.65.

- Clark, DB; Clark, DA. 1987. Population Ecology y Microhabitat Distribution of *Dipteryx panamensis*, a Neotropical Rain Forest Emergent Tree. *Biotropica* 19(3):236-244.
- Cordero, J; Boshier, DH (eds). 2003. Árboles de Centroamérica: un Manual para Extensionistas. s. l., OFI-CATIE. 1091 p.
- Craven, D; Cedeño, N; Mariscal, E; Deago, J; Wishnie, MH; Hall, JS. 2011a. Amelioration of growing conditions in mixed species plantation of *Terminalia amazonia* y nitrogen-fixing *Dalbergia retusa*: Chapter 4. In Montagnini, F; Finney, C (eds). Restoring degraded landscapes with native species in Latin America. New York, United States of America, Nova Science Publishers. 17 p.
- Craven, D; Dent, D; Braden, D; Ashton, MS; Berlyn, GP; Hall, JS. 2011b. Seasonal variability of photosynthetic characteristics influences growth of eight tropical tree species at two sites with contrasting precipitation in Panama. *Forest Ecology y Management* 261(10):1643–1653. doi:10.1016/j.foreco.2010.09.017.
- Cubbage, F; Kanieski, B; Rubilar, R; Bussoni, A; Olmos, VM; Balmelli, G; Donagh, PM; Lord, R; Hernández, C; Zhang, P; Huang, J; Korhonen, J; Yao, R; Hall, P; La Torre, R; Diaz-Balteiro, L; Carrero, O; Monges, E; Thu, HTT; Frey, G; Howard, M; Chavet, M; Mochan, S; Hoeflich, VA; Chudy, R; Maass, D; Chizmar, S; Abt, R. 2020. Global timber investments, 2005 to 2017. *Forest Policy y Economics* 112 102082. doi:10.1016/j.forpol.2019.102082.
- Cubbage, F; Mac Donagh, P; Sawinski Júnior, J; Rubilar, R; Donoso, P; Ferreira, A; Hoeflich, V; Olmos, VM; Ferreira, G; Balmelli, G; Siry, J; Báez, MN; Alvarez, J. 2007. Timber investment returns for selected plantations y native forests in South America y the Southern United States. *New Forests* 33(3):237–255. doi:10.1007/s11056-006-9025-4.
- Czarnowski, M. 2002. Suitability of native tree species for reforestation in the tropical dry forest of Costa Rica. s. n. t. 51 p. (Short version of the thesis for diploma of Martin Czarnowski)
- Diario Extra. 2014. Policía confirma existencia de mafia del cocobolo. Disponible en <https://www.diarioextra.com/Noticia/detalle/243440/policia-confirma-exi>. Consultado 9.9.21.
- Ewel, JJ; Celis, G; Schreeg, L. 2015. Steeply Increasing Growth Differential Between Mixture y Monocultures of Tropical Trees. *Biotropica* 47(2):162–171. doi:10.1111/btp.12190.
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). 2010. The State of the World's Forest Genetic Resources: Country Report Panamá. s. l.
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). 2015. Global teak trade in the aftermath of Myanmar's log export ban. In Kollert, W; Walotek, PJ. *Planted Forests y Trees*. Rome, Italy. (Working Paper FP/49/E.). Disponible en <http://www.fao.org/forestry/plantedforests/67508@170537/en/>. Consultado 1.12.2016.
- Fordaq.com. 2016. Venta de madera cocobolo *Dalbergia retusa* (sitio web). Disponible en <https://madera.fordaq.com/srvAuctionView.html?AucTlid=18056636>. Consultado 9.9.21.
- Gold Standard. 2017. Gold Standard Afforestation/Reforestation (A/R) GHG Emissions Reduction & Sequestration Methodology. s. n. t. (version 1). Disponible en https://globalgoals.goldstandard.org/standards/403_V1.0_LUF_AR-Methodology-GHGs-emission-reduction-and-Sequestration-Methodology.pdf
- Guevara-Bonilla, M. 2011. Productividad y costos operacionales de la chapea mecanizada en plantaciones jóvenes de *Acacia mangium* en la zona norte de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 8(20):27–30.

- Guevara-Bonilla, M; Murillo, O. 2021. Productividad y costos del primer raleo en plantaciones de *Acacia mangium* Willd en la zona norte de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 18(42):55–61.
- Haggar, J; Wightman, K; Fisher, R. 1997. The potential of plantations to foster woody regeneration within a deforested landscape in lowland Costa Rica. *Forest Ecology y Management* 99(1-2):55–64. doi:10.1016/S0378-1127(97)00194-1.
- Hall, J.S; Ashton, M.A. 2016. *Guide to Early Growth y Survival in Plantations of 64 Tree Species Native to Panama y the Neotropics*. Balboa, Panamá, Smithsonian Tropical Research Institute. 173 p.
- Hartley, M.J. 2002. Rationale y methods for conserving biodiversity in plantation forests. *Forest Ecology y Management* 155(1-3): 81–95. doi:10.1016/S0378-1127(01)00549-7.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. 2015. VI Censo Nacional Agropecuario: RESULTADOS GENERALES. San José, Costa Rica. 145 p. Disponible en https://admin.inec.cr/sites/default/files/media/reagropeccenagro2014-002_1_2.pdf. Consultado 19.2.2019.
- Liu, C.L.C; Kuchma, O; Krutovsky, K.V. 2018. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services y perspectives for the future. *Global Ecology y Conservation* 15(1–3): e00419. doi:10.1016/j.gecco.2018.e00419.
- Marshall, A; McLaughlin, B.P; Zerr, C; Yanguas-Fernández, E; Hall, J.S. 2021. Early indications of success rehabilitating an underperforming teak (*Tectona grandis*) plantation in Panama through enrichment planting. *New Forests* 52(3):377–395. doi:10.1007/s11056-020-09801-6.
- Marshall, A; Nelson, C.R; Hall, J.S. 2022. Species selection y plantation management in enrichment planting with native timber species in the Panama Canal watershed. *Front. For. Glob. Change* 5. doi:10.3389/ffgc.2022.925877.
- Mayoral, C; van Breugel, M; Cerezo, A; Hall, J.S. 2017. Survival y growth of five Neotropical timber species in monocultures y mixtures. *Forest Ecology y Management* 403:1–11. doi:10.1016/j.foreco.2017.08.002.
- Méndez, J; Pérez, R. 2018. La reforestación con especies nativas: análisis de la situación en la Región Huetar Norte de Costa Rica. *AMBIENTICO* 267:23–27.
- Messier, C; Bauhus, J; Sousa-Silva, R; Auge, H; Baeten, L; Barsoum, N; Bruelheide, H; Caldwell, B; Cavender-Bares, J; Dhiedt, E; Eisenhauer, N; Ganade, G; Gravel, D; Guillemot, J; Hall, J.S; Hector, A; Hérault, B; Jactel, H; Koricheva, J; Kreft, H; Mereu, S; Muys, B; Nock, C.A; Paquette, A; Parker, J.D; Perring, M.P; Ponette, Q; Potvin, C; Reich, P.B; Scherer-Lorenzen, M; Schnabel, F; Verheyen, K; Weih, M; Wollni, M; Zemp, D.C. 2022. For the sake of resilience y multifunctionality, let's diversify planted forests! *Conservation Letters* 15(1). doi:10.1111/conl.12829.
- Meyrat, A.K. 2017. *Biología y silvicultura de las especies de Dalbergia en América Central*. s. n. t. Disponible en https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiWjYXBkqmEAXWv9gIHHXTVDz4QFnoECBE-QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.sica.int%2Fbusqueda%2Fbusqueda_archivo.aspx%3FArchivo%3Dlibr_112074_1_03042018.pdf&usq=AOvVaw0YB3gPy2GluBv-2Bo1-udz2&opi=89978449. Consultado 27 feb. 2020.
- MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía). 2020. Resolución Ministerial: R-055–2020-MINAE. Disponible en <https://www.fonafifo.go.cr/media/2774/resoluci%C3%B3n-psa-2020.pdf>

- Montagnini, F. 2000. Accumulation in above-ground biomass y soil storage of mineral nutrients in pure y mixed plantations in a humid tropical lowland. *Forest Ecology y Management* 134(1-3):257–270. doi:10.1016/S0378-1127(99)00262-5.
- Montagnini, F; Piotto, D. 2011. Mixed Plantations of Native Trees on Abandoned Pastures: Restoring Productivity, Ecosystem Properties, y Services on a Humid Tropical Site. In Stimm, B; Günter, S; Weber, M; Mosandl, R. (Eds.). *Silviculture in the Tropics*. . Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. p. 501–511. (vol. 8).
- Montero, M; De Los Santos Posadas, H; Kanninen, M. 2007. *Hieronyma alchorneoides*: Ecología y silvicultura en Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 51 p. (Serie técnica. Informe técnico no. 354).
- Mora, F; Munoz, R; Meza, V; Fonseca, W. 2015. Factores edáficos que influyen en el crecimiento de *Vochysia guatemalensis* en la región Huertar Norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 39(1):71–89.
- Moya, R. 2018. La producción de madera de especies nativas en plantaciones comerciales: una opción real. *AMBIENTICO* 267:32–36.
- Nölte, A; Yousefpour, R; Cifuentes-Jara, M; Piotto, D; Murillo, O; Zúñiga, P; Hanewinkel, M. 2022. Broad-scale y long-term forest growth predictions y management for native, mixed species plantations y teak in Costa Rica y Panama. *Forest Ecology y Management* 520 120386. doi:10.1016/j.foreco.2022.120386.
- Pandey, D; Brown, C. 2000. Teak: a global overview: An overview of global teak resources y issues affecting their future outlook. *Unasylva* 201(51):3–13.
- Paniagua Vega, R; Salazar Chavez, G., 2011. Precios de la Madera en Costa Rica 2011 y tendencias de las principales especies comercializadas. s. l., ONF. 13 p.
- Paul, C; Griess, V.C; Havardi-Burger, N; Weber, M. 2015. Timber-based agrisilviculture improves financial viability of hardwood plantations: a case study from Panama. *Agroforest Syst* 89(2):217–235. doi:10.1007/s10457-014-9755-9.
- Pérez, D; Kanninen, M. 2003. Heartwood, sapwood y bark content, y wood dry density of young y mature teak (*Tectona grandis*) trees grown in Costa Rica. *Silva Fenn.* 37(1). doi:10.14214/sf.511.
- Pérez, D; Kanninen, M. 2005. Stand growth scenarios for *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Forest Ecology y Management* 210(1-3):425–441. doi:10.1016/j.foreco.2005.02.037.
- Petit, B; Montagnini, F. 2006. Growth in pure y mixed plantations of tree species used in reforesting rural areas of the humid region of Costa Rica, Central America. *Forest Ecology and Management* 233(2-3):338–343. doi:10.1016/j.foreco.2006.05.030.
- Pinnschmidt, A; Yousefpour, R; Nölte, A; Hanewinkel, M. 2023. Tropical mixed-species plantations can outperform monocultures in terms of carbon sequestration y economic return. *Ecological Economics* 211 107885. doi:10.1016/j.ecolecon.2023.107885.
- Pinnschmidt, A; Yousefpour, R; Nölte, A; Murillo, O; Hanewinkel, M. 2022. Economic potential y management of tropical mixed-species plantations in Central America. *New Forests* 54(3):565–586. doi:10.1007/s11056-022-09937-7.
- Piotto, D., 2007. Growth of native tree species planted in open pasture, young secondary forest y mature forest in humid tropical Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 19(2):92–102.
- Piotto, D. 2008. A meta-analysis comparing tree growth in monocultures y mixed plantations. *Forest Ecology y Management* 255(3-4):781–786. doi:10.1016/j.foreco.2007.09.065.

- Piotto, D; Craven, D; Montagnini, F; Alice, F. 2010. Silvicultural y economic aspects of pure y mixed native tree species plantations on degraded pasturelands in humid Costa Rica. *New Forests* 39(3):369–385. doi:10.1007/s11056-009-9177-0.
- Powers, J.S; Haggard, J.P; Fisher, R.F. 1997. The effect of overstory composition on understory woody regeneration y species richness in 7-year-old plantations in Costa Rica. *Forest Ecology y Management* 99(1-2):43–54. doi:10.1016/S0378-1127(97)00193-X.
- Raich, J.W; Russell, A.E; Bedoya-Arrieta, R. 2007. Lignin y enhanced litter turnover in tree plantations of lowland Costa Rica. *Forest Ecology y Management* 239(1-3):128–135. doi:10.1016/j.foreco.2006.11.016.
- Redondo-Brenes, A. 2007. Growth, carbon sequestration, y management of native tree plantations in humid regions of Costa Rica. *New Forests* 34(3):253–268. doi:10.1007/s11056-007-9052-9.
- Robbins, S. 2012. Altos precios de exótica madera impulsan tala ilegal en Panamá. Disponible en <https://es.insightcrime.org/noticias/noticias-del-dia/altos-precios-de-exotica-madera-impulsan-a-la-tala-ilegal-en-panama/>. Accessed 9.9.21.
- Rodríguez Gonzáles, A; Gonzáles Arce, L.A; Hernández Sánchez, L.G; Briceno, E; Quesada, M. 2017. Dictamen de Extracción No Perjudicial (DENP) para la especie de Cocobolo (*Dalbergia retusa* Hemsl., Fabaceae/Pap.) presente en Costa Rica, incluida bajo el Apéndice II de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES). Disponible en <https://www.sinac.go.cr/ES/docu/Vida%20Silvestre/ALBERGIA%20RETUSA-Denp-2017.pdf>. Consultado 2 abr. 2019.
- Rothe, A; Binkley, D. 2001. Nutritional interactions in mixed species forests: a synthesis. *Can. J. For. Res.* 31(11):1855–1870. doi:10.1139/cjfr-31-11-1855.
- Russell, A.E; Raich, J.W. 2012. Rapidly growing tropical trees mobilize remarkable amounts of nitrogen, in ways that differ surprisingly among species. *PNAS* 109(26):10398-10402.
- Russell, A.E; Raich, J.W; Bedoya Arrieta, R; Valverde-Barrantes, O; González, E. 2010. Impacts of individual tree species on carbon dynamics in a moist tropical forest environment. *Ecological Applications* 20(4): 1087–1100.
- Schnabel, F; Schwarz, J.A; Dănescu, A; Fichtner, A; Nock, C.A; Bauhus, J; Potvin, C. 2019. Drivers of productivity y its temporal stability in a tropical tree diversity experiment. *Global Change Biology* 25(12):4257–4272. doi:10.1111/gcb.14792.
- Sinacore, K; Asbjornsen, H; Hernandez-Santana, V; Hall, J.S. 2019. Drought Differentially Affects Growth, Transpiration, y Water Use Efficiency of Mixed y Monospecific Planted Forests. *Forests* 10(2): 153. doi:10.3390/f10020153.
- Solís Corrales, M; Moya Roque, R. *Vochysia guatemalensis* en Costa Rica. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Roger-Roque/publication/265232034_Vochysia_guatemalensis_en_Costa_Rica/links/572fdbff08ae3736095c1f9e/Vochysia-guatemalensis-en-Costa-Rica.pdf. Consultado 19 feb. 2019.
- Tenorio, C; Moya, R; Salas, C; Berrocal, A. 2016. Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica. *Bosque (Valdivia)*: 37(1):71–84. doi:10.4067/S0717-92002016000100008.

- Ugalde, L; Gómez, M. 2006. Perspectivas económicas y ambientales de las plantaciones de Teca bajo manejo sostenible, en Panamá. s. n. t. 77 p. Disponible en https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3329/Perspectivas_economicas_y_ambientales.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Consultado 15 dic. 2020.
- Vallejos, JA. 2019. Cultivo de madera de pilón (*Hyeronima alchorneoides* Allemão) en Costa Rica. Thesis Master. Cartago, Costa Rica, TEC. 120 p.
- Vasquez, WC; Ugalde, L. 1995. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribea* en Guanacaste, Costa Rica. In X Congreso Nacional Agronómico / II Congreso de Suelos 1996, San José, Costa Rica). p. 7-13.
- Vigulu, V; Blumfield, TJ; Reverchon, F; Bai, SH; Xu, Z. 2019. Nitrogen y carbon cycling associated with litterfall production in monoculture teak y mixed species teak y flueggea stands. *J Soils Sediments* 19(4):1672–1684. doi:10.1007/s11368-019-02275-w.
- Viquez, E; Pérez, D. Effect of pruning on tree growth, yield, y wood properties of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Silva Fennica* 39(3):381-390.
- Vivar Balderrama, SI; Chazdon, RL. 2005. Light-Dependent Seedling Survival y Growth of Four Tree Species in Costa Rican Second-Growth Rain Forests. *Journal of Tropical Ecology* 21:383-395.
- World Bank. 2021. Consumer Price Index. disponible en <https://data.worldbank.org/indicator/>. Consultado 9 set. 2021.
- Zhou, Z; Liang, K; Xu, D; Zhang, Y; Huang, G; Ma, H. 2012. Effects of calcium, boron y nitrogen fertilization on the growth of teak (*Tectona grandis*) seedlings y chemical property of acidic soil substrate. *New Forests* 43(2):231–243. doi:10.1007/s11056-011-9276-6.

Agradecimientos



Los autores agradecen el financiamiento de la *Deutsche Bundesstiftung Umwelt*, mediante la subvención AZ 34502/01-33/0. Agradecemos también los intercambios de personal de investigación e innovación (RISE) SuFoRun (<http://suforum.ctfc.cat/>), financiados por un proyecto Marie Skłodowska-Curie dentro del programa de investigación e innovación H2020 de la Unión Europea [número de subvención 691149, 2016-2020], así como del programa de intercambio de estudiantes con Engagement Global.

Queremos dar un agradecimiento especial al Dr. Miguel Cifuentes-Jara y al Dr. Guillermo Navarro por los conocimientos y experiencias compartidas, apoyo en redes sociales y organizativo, por atendernos en diferentes partes de Costa Rica y Panamá, por conectarnos con personal de investigación del CATIE y por revisar esta guía.

Agradecemos a los revisores técnicos del documento, el Dr. Guillermo Navarro y la Ing. For. Bárbara Viguera.

Nos gustaría dar las gracias a la empresa de reforestación Bauminvest, y, especialmente a la Dra. Anna Mohr y a Barbara San Martin, por facilitarnos los datos de crecimiento forestal, darnos acceso a las plantaciones forestales y por unel estrecho intercambio durante la investigación.

Damos las gracias al Dr. Olman Murillo, del Tecnológico de Costa Rica, por facilitarnos datos económicos muy detallados sobre las plantaciones forestales en Costa Rica y datos de crecimiento forestal de la Cooperativa de Mejora de Árboles (GENFORES).

Agradecemos a Milena Gutiérrez Leitón, del Programa de Restauración y Silvicultura del Área de Conservación Guanacaste, a Carlos Sandí, de la Universidad EARTH, a Pedro Zúñiga, de la organización no gubernamental Fundecor, a Orlando Vargas y a la Organización de Estudios Tropicales (OET) en La Selva, a Ricardo Lujan y José Corrales de la empresa reforestadora BARCA, a Julissa Domínguez, Yaels Camacho, Pedro Garay y otras personas más de la empresa reforestadora Forest Finance, a Iliana Armien y Andreas Eke, de la empresa reforestadora Futuro Forestal, al Dr. James Raich, de la Universidad Estatal de Iowa, al Dr. Jack Ewel, de la Universidad de Florida y al Dr. Daniel Piotto, de la Universidade Federal do Sul da Bahia, por el apoyo en el trabajo de campo y/o la provisión de datos de crecimiento forestal que fueron necesarios para calibrar el modelo de crecimiento forestal *3-PGmix*. También agradecemos a Susana Estrada y a Franziska Klaiber su colaboración en las mediciones de campo.

Anexo



Anexo I. Producción inicial de biomasa del fuste

Cuadro AI.1: Producción inicial de biomasa del fuste [t/ha] para cada una de las cinco clases de productividad en en plantaciones puras entre 5 y 10 años de edad

Clase	Edad de evaluación	dare	diol	hial	tegr	vogu
1	5	3,4-9,3	0,5-2,1	2,5-12,3	9,7-23	13,6-30,4
2		9,3-14	2,1-4,1	12,3-20,6	23-32,1	30,4-40,9
3		14-17,4	4,1-7,1	20,6-30,3	32,1-39	40,9-52,6
4		17,4-24,4	7,1-13	30,3-36,3	39-53,4	52,6-62,2
5		24,4-39,3	13-32	36,3-54,7	53,4-80,6	62,2-88,7
1	6	5,5-14,1	0,9-3,9	4,2-17,1	14,5-32,3	20,9-43,1
2		14,1-20,6	3,9-7,6	17,1-27,8	32,3-44,2	43,1-55,3
3		20,6-25,1	7,6-12,8	27,8-40,4	44,2-53,2	55,3-71,1
4		25,1-34,1	12,8-22,3	40,4-47,5	53,2-71,4	71,1-81,2
5		34,1-52,9	22,3-49,1	47,5-69,1	71,4-105,6	81,2-113,9
1	7	8-19,3	1,5-6,4	6,3-21,8	19,7-42,1	28,6-56,2
2		19,3-27,5	6,4-12,2	21,8-34,9	42,1-56,7	56,2-69,8
3		27,5-33	12,2-19,9	34,9-50,2	56,7-67,6	69,8-89,8
4		33-44,1	19,9-33	50,2-58,3	67,6-89,6	89,8-100,2
5		44,1-66,6	33-67,1	58,3-83,4	89,6-130,4	100,2-139
1	8	10,8-24,7	2,2-9,5	8,7-26,6	25,2-52	36,8-70
2		24,7-34,5	9,5-17,7	26,6-42,5	52-69,3	70-85,8
3		34,5-41,1	17,7-27,9	42,5-60,5	69,3-82	85,8-108,5
4		41,1-54,2	27,9-44,5	60,5-69,1	82-107,6	108,5-122,1
5		54,2-80,3	44,5-85,4	69,1-98,9	107,6-154,7	122,1-166,4
1	9	13,7-30,2	3-13,1	10,7-30,8	30,7-61,8	43,7-81,5
2		30,2-41,6	13,1-23,6	30,8-49	61,8-81,7	81,5-99,3
3		41,6-49,2	23,6-36,4	49-69,1	81,7-96,2	99,3-124,1
4		49,2-64,3	36,4-56,4	69,1-78,6	96,2-125,2	124,1-140,4
5		64,3-94	56,4-103,7	78,6-111,3	125,2-178,4	140,4-188,3
1	10	16,6-35,7	17-Abr	12,8-35	36,3-71,6	50,8-93,5
2		35,7-48,7	17-29,9	35-55,7	71,6-94	93,5-113,4
3		48,7-57,4	29,9-45,2	55,7-78,2	94-110,1	113,4-139,9
4		57,4-74,3	45,2-68,4	78,2-88,4	110,1-142,3	139,9-159,8
5		74,3-107,7	68,4-121,8	88,4-124,9	142,3-201,2	159,8-213,6

Cuadro A1.2. Producción inicial de biomasa del fuste (suma de todas las especies) [t/ha] para cada una de las cinco clases de productividad en plantaciones mixtas entre 5-10 años de edad

Clase	Edad de evaluación	diol-dare	tegr-dioll	tegr-dare	vogu-dioll	vogu-dioll-dare
1	5	2,2-8	5,8-15,2	7,1-18	9,7-24	9,7-24,6
2		8-13,5	15,2-24	18-26,1	24-36,3	24,6-37,7
3		13,5-17,9	24-30,7	26,1-33,8	36,3-43,1	37,7-44,3
4		17,9-21,8	30,7-42,1	33,8-43,5	43,1-59,1	44,3-59,5
5		21,8-35,7	42,1-62,4	43,5-64,7	59,1-72,6	59,5-74,4
1	6	3,8-13	9,1-22,3	10,8-25,8	15,8-35,5	15,6-36,1
2		13-20,7	22,3-34,4	25,8-36,9	35,5-51,7	36,1-53,2
3		20,7-27,4	34,4-43,4	36,9-46,4	51,7-60,5	53,2-61,4
4		27,4-31,5	43,4-58,6	46,4-60,1	60,5-79,7	61,4-80,1
5		31,5-50,4	58,6-85,5	60,1-87,2	79,7-94,9	80,1-97
1	7	5,8-19	12,7-30	15-33,9	22,5-47,9	21,9-48,8
2		19-27,8	30-45,8	33,9-48,4	47,9-67,5	48,8-68,9
3		27,8-37,4	45,8-56,8	48,4-59	67,5-77	68,9-78,2
4		37,4-43,8	56,8-76	59-77,1	77-100,6	78,2-101,2
5		43,8-65,8	76-109,2	77,1-110,2	100,6-116,9	101,2-119,3
1	8	7,9-25,1	16,7-38,2	19,4-42,3	29,9-61,2	29-62,1
2		25,1-35,3	38,2-57,8	42,3-60,3	61,2-84,9	62,1-86,1
3		35,3-46,9	57,8-70,5	60,3-71,8	84,9-94,4	86,1-96,8
4		46,9-56	70,5-93,9	71,8-95	94,4-123,1	96,8-123,8
5		56-81,4	93,9-133	95-133,2	123,1-140	123,8-143,2
1	9	10,3-31,7	20,9-46,5	23,9-50,8	36,4-72,8	35,8-74,1
2		31,7-43,1	46,5-70,1	50,8-72,4	72,8-99	74,1-100,4
3		43,1-57,3	70,1-84,4	72,4-84,6	99-109,4	100,4-112,3
4		57,3-68,9	84,4-111,9	84,6-112,9	109,4-142	112,3-142,2
5		68,9-97,3	111,9-156,5	112,9-155,9	142-158,5	142,2-160,7
1	10	12,7-38,3	25,2-55,7	28,6-59,5	43,2-85,1	43,4-86,7
2		38,3-51,5	55,7-82	59,5-84	85,1-113,5	86,7-114,8
3		51,5-68,9	82-98,2	84-98	113,5-124,6	114,8-127,5
4		68,9-81,6	98,2-129,8	98-130,8	124,6-162,4	127,5-162,1
5		81,6-113,7	129,8-179,3	130,8-178,3	162,4-180,3	162,1-180,9

Anexo II. Parámetros de manejo para la producción de madera y créditos de carbono

En este anexo se indican los parámetros de manejo recomendados en plantaciones forestales de especies mixtas para la producción conjunta de madera y créditos de carbono. Los parámetros de manejo se dan para escenarios con precios de créditos de carbono de 10 USD/tCO₂e o de 50 USD/tCO₂e. Los parámetros de manejo se refieren a los créditos de carbono que se emiten para la reforestación o aforestación de tierras previamente no forestadas, como lo son tierras agrícolas.

All.1. Parámetros de manejo para créditos de carbono de 10 USD/tCO₂e

Dalbergia retusa / cocobolo

Cuadro A2.1. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de cocobolo. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	<i>m²/ha</i>	<i>%</i>	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	<i>%</i>
1			15 (28-64)	(-3452) - (-2547)	Inviable - 1
2			15 (22-29)	(-2616) - (-2211)	Inviable - 1
3	18	40	25 (46-52)	(-1988) - (-1227)	5 - 6
4	18	40	25 (37-49)	(-1661) - 377	5 - 8
5	18	40	25 (27-36)	270 - 3461	8 - 12

Dipteryx oleifera / almendro

Cuadro A2.2. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de almendro. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1			15 (32-52)	(-3348) - (-2720)	Inviabile
2	18	40	25 (48-80)	(-2676) - (-2046)	Inviabile - 3
3	18	25	25 (33-44)	(-1923) - (-839)	3 - 6
4	18	25	25 (26-34)	(-936) - 8	6 - 8
5	18	15	35 (26-37)	638 - 3563	9 - 14

Hieronyma alchorneoides / pilón

Cuadro A2.3. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de pilón. En la columna 4, entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1				(-3671) - (-3307)	Inviabile
2	18	25	25 (32-49)	(-3261) - (-2532)	Inviabile
3	18	25	25 (17-36)	(-2685) - (-2369)	Inviabile
4	25	40	25 (17-19)	(-1862) - (-1467)	2 - 3
5	25	25	25 (13-20)	(-1584) - (-343)	4 - 7

Tectona grandis / teca

Cuadro A2.4. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de teca. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1	18	40	25 (23-36)	(-3356) - (-2235)	Inviable - 1
2	25	25	25 (23-34)	(-2214) - (-1359)	2 - 5
3	18	40	35 (23-27)	(-1305) - (-611)	5 - 7
4	25	40	35 (21-31)	(-573) - 1040	7 - 10
5	25	40	35 (15-21)	1279 - 4461	10 - 16

Vochysia guatemalensis / chancho

Cuadro A2.5. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de chancho. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1	32	40	25 (11-19)	(-2238) - (-63)	2 - 8
2	32	25-40	25-35 (10-18)	(-433) - 1544	6 - 11
3	32	25	35 (13-17)	1022 - 3165	10 - 15
4	32	15	35 (12-13)	2851 - 4058	14 - 16
5	32	15	35 (9-11)	4555 - 7057	17 - 23

D. oleifera - D. retusa / almendro - cocobolo

Cuadro A2.6. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones mixtas de almendro y cocobolo. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de cada especie

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)		VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			diol	dare		
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1	18 *	15-25	25 (31-59)	15 (15-63)	(-3262) - (-1377)	Inviabile - 4
2	18	15-25	25 (24-57)	15 (12-56)	(-3073) - (-531)	Inviabile - 6
3			15 (9-57)	15 (10-33)	(-2856) - (-2092)	Inviabile
4	18-32 *	15-40	15-25 (9-48)	15 (9-48)	(-2794) - 82	Inviabile - 8
5	18-32	15-25	15-35 (8-80)	15-25 (8-80)	(-2543) - 3671	Inviabile - 13

* Algunas plantaciones de esta clase de productividad nunca alcanzaron el límite de AB (véase la sección 4 para más detalles)

T. grandis - D. retusa / teca - cocobolo

Cuadro A2.7. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones mixtas de teca y cocobolo. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de cada especie

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)		VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			tegr	dare		
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1			15 (9-25)	15 (13-53)	(-3777) - (-2969)	Inviabile
2	18	25-40	25-35 (15-35)	25 (21-81)	(-2286) - 1563	Inviabile - 10
3	18	40	35 (18-23)	25 (19-76) **	(-1173) - 2349	Inviabile - 12
4	18	40	35 (15-21)	35 (52-76) **	(-687) - 2117	5 - 10
5	18	40	35 (12-16)	25-35 (33-70) **	346 - 5794	9 - 16

** En el promedio de todos los escenarios dentro de una clase de productividad más del 20% de los árboles plantados de la especie respectiva mueren debido a la competencia de la otra especie plantada (véase la sección 4 para más detalles)

T. grandis - D. oleifera / teca - almendro

Cuadro A2.8. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones mixtas de teca y almendro. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de cada especie

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)		VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			tegr	diol		
			cm (años)	cm (años)		
	<i>m²/ha</i>	%			<i>USD/ha</i>	%
1			15 (9-21)	15 (12-53)	(-3786) - (-3015)	Inviable
2	18-25	25-40	25 (14-48)	25-35 (20-73) **	(-2137) - 233	Inviable - 7
3	18-25	15-25	25 (13-48)	25 (19-67) **	(-1532) - 718	Inviable - 8
4	25 *	40	25 (11-13)	35 (27-68) **	(-1170) - 2397	Inviable - 11
5	18	40	35 (12-15)	35 (34-75) **	595 - 5002	11 - 17

* Algunas plantaciones de esta clase de productividad nunca alcanzaron el límite de AB (véase la sección 4 para más detalles)

** En el promedio de todos los escenarios dentro de una clase de productividad más del 20% de los árboles plantados de la especie respectiva mueren debido a la competencia de la otra especie plantada (véase la sección 4 para más detalles)

V. guatemalensis - D. oleifera / chancho - almendro

Cuadro A2.9. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones mixtas de chancho y almendro. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de cada especie

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)		VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			vogu	diol		
			cm (años)	cm (años)		
	<i>m²/ha</i>	%			<i>USD/ha</i>	%
1	25 *	40	25 (9-18)	25 (31-73) **	(-2554) - 1210	Inviable - 9
2	18	40	35 (10-12)	35 (25-69)	(-1401) - 2462	Inviable - 12
3	18	40	35 (8-9)	35 (27-69)	(-1157) - 3375	Inviable - 14
4	18	40	35 (7-9)	15 (12-41)	(-597) - 1432	4 - 15
5	18	40	35 (6-7)	15 (12-39)	(-400) - 2105	5 - 19

* Algunas plantaciones de esta clase de productividad nunca alcanzaron el límite de AB (véase la sección 4 para más detalles)

** En el promedio de todos los escenarios dentro de una clase de productividad más del 20% de los árboles plantados de la especie respectiva mueren debido a la competencia de la otra especie plantada (véase la sección 4 para más detalles)

V. guatemalensis - D. oleifera - D. retusa / chanco – almendro – cocobolo

Cuadro A2.10. Parámetros de manejo y rendimiento económico para mezclas de chanco, almendro y cocobolo. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de chanco y 200 árboles/ha para las otras dos especies

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)			VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			vogu	diol	dare		
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>cm (años)</i>	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1	18	40	35 (11-41)	25-35 (14-64)	35 (15-81)	(-2530) - 2061	Inviabile - 10
2	18-25	25-40	35 (9-31)	35 (18-72) **	25 (15-81) **	(-1155) - 2684	Inviabile - 13
3	18	40	35 (8-11)	25 (17-77)	25-35 (22-79)	(-1141) - 3423	Inviabile - 13
4	18	40	35 (7-9)	25 (18-55)	25 (21-81)	(-692) - 4019	4 - 16
5	18	25-40	35 (6-8)	25 (18-69)	25 (21-81)	(-499) - 4559	6 - 19

** En el promedio de todos los escenarios dentro de una clase de productividad más del 20% de los árboles plantados de la especie respectiva mueren debido a la competencia de las otras especies plantadas (véase la sección 4 para más detalles).

All.2. Parámetros de manejo para créditos de carbono de 50 USD/tCO₂e

Dalbergia retusa / cocobolo

Cuadro A2.11. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de cocobolo. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	<i>m²/ha</i>				
1			15 (28-64)	(-2025) - 49	Inviabile - 8
2	18	40	25 (56-71)	(-471) - 1502	5 - 12
3	18	40	25 (46-52)	1781 - 3353	12 - 15
4	18	40	25 (37-49)	2270 - 5966	13 - 19
5	18	15	25 (29-40)	5045 - 9193	17 - 23

Dipteryx oleifera / almendro

Cuadro A2.12. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de almendro. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1			15 (32-52)	(-2919) - (-1301)	Inviabile
2	18	40	25 (48-80)	(-979) - 320	4 - 9
3	18	15	25 (33-46)	469 - 2228	9 - 14
4	25	40	25 (30-41)	2185 - 4263	14 - 18
5			25 (25-37)	4995 - 7446	19 - 26

Hieronyma alchorneoides / pilón

Cuadro A2.13.: Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de pilón. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1				(-3055) - (-1609)	Inviabile
2	18	25	25 (32-49)	(-1346) - 362	Inviabile - 10
3			25 (26-43)	(-214) - 1578	6 - 14
4	25	25	35 (43-56)	1548 - 2435	15 - 17
5	25	15-25	35 (25-49)	2287 - 4542	17 - 21

Tectona grandis / teca

Cuadro A2.14. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de teca. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1	18	40	35 (41-50) *	(-1123) - 1190	4 - 12
2			25 (26-39)	1306 - 2796	13 - 16
3	25	40	35 (31-42)	3140 - 4909	18 - 21
4	25	15	35 (25-38)	3965 - 5343	20 - 22
5	25	25	35 (16-23)	4578 - 8559	21 - 30

Vochysia guatemalensis / chancho

Cuadro A2.15. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones de chancho. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)	VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1	32	25	25 (11-53)	(-801) - 1681	4 - 14
2	32	25	35 (15-22)	1607 - 4065	13 - 20
3	32	15-25	35 (13-17)	3434 - 5673	18 - 24
4	32	15	35 (12-13)	5470 - 6588	24 - 26
5	32	15	35 (9-11)	7277 - 9597	27 - 32

D. oleifera - D. retusa / almendro - cocobolo

Cuadro A2.16. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones mixtas de almendro y cocobolo. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de cada especie

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)		VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			diol	dare		
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1	18 *	15-25	25 (31-59)	15 (15-63)	(-2500) - 1865	Inviabile - 13
2	18	15-25	25 (23-57)	15 (12-57)	(-2538) - 1865	Inviabile - 13
3			15 (9-57)	15 (10-33)	(-1926) - (-263)	Inviabile
4	18-32 *	15-40	15-25 (9-48)	15 (9-48)	(-1766) - 2158	No viable - 15
5	18	15	25-35 (16-57)	15-25 (8-81)	(-1159) - 8311	Inviabile - 25

* Algunas plantaciones de esta clase de productividad nunca alcanzaron el límite de AB (véase la sección 4 para más detalles)

T. grandis - D. retusa / teca - cocobolo

Cuadro A2.17. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones mixtas de teca y cocobolo. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de cada especie

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)		VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			tegr	dare		
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1			15 (9-25)	15 (13-53)	(-2849) - (-1648)	Inviabile
2	18	40	35 (22-46)	25 (21-81)	489 - 4150	10 - 17
3	18	40	35 (18-23)	35 (31-79) **	716 - 8996	11 - 22
4	18	40	35 (15-21)	35 (52-76) **	1074 - 7092	13 - 25
5	18	40	35 (12-16)	25-35 (33-70) **	1860 - 12095	17 - 34

** En el promedio de todos los escenarios dentro de una clase de productividad más del 20% de los árboles plantados de la especie respectiva mueren debido a la competencia de otra especie de la mezcla (véase la sección 4 para más detalles)

T. grandis - *D. oleifera* / teca - almendro

Cuadro A2.18. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones mixtas de teca y almendro. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de cada especie

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)		VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			tegr	diol		
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1			15 (9-21)	15 (12-53)	(-3423) - (-1986)	Inviabile
2	25 *	25-40	25 (15-22)	35 (34-71) **	(-720) - 4974	6 - 19
3	25 *	25-40	25 (13-63)	35 (31-79) **	(-438) - 5630	7 - 21
4	25 *	40	25 (11-13)	35 (27-68) **	(-138) - 8392	7 - 28
5	18	40	35 (12-15)	35 (34-75) **	1997 - 10479	18 - 35

* Algunas plantaciones de esta clase de productividad nunca alcanzaron el límite de AB (véase la sección 4 para más detalles)

** En el promedio de todos los escenarios dentro de una clase de productividad más del 20% de los árboles plantados de la especie respectiva mueren debido a la competencia de la otra especie plantada (véase la sección 4 para más detalles)

V. guatemalensis - *D. oleifera* / chancho - almendro

Cuadro A2.19. Parámetros de manejo y rendimiento económico para mezclas de chancho y almendro. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de cada especie

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)		VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			vogu	diol		
	<i>m²/ha</i>	%	<i>cm (años)</i>	<i>cm (años)</i>	<i>USD/ha</i>	%
1	18	40	35 (11-22)	25-35 (24-70)	(-1712) - 4930	Inviabile - 22
2	18	40	35 (10-12)	35 (25-69)	132 - 6902	12 - 26
3	18	40	35 (8-9)	35 (27-69)	(-651) - 7702	6 - 29
4	18	40	35 (7-9)	15 (12-41)	612 - 2813	16 - 29
5	18	25-40	35 (6-8)	15 (12-39)	920 - 3576	20 - 27

V. guatemalensis - D. oleifera - D. retusa / chancho – almendro – cocobolo

Cuadro A2.20. Parámetros de manejo y rendimiento económico para plantaciones mixtas de chancho, almendro y cocobolo. Entre paréntesis se indica la edad aproximada a la cual se espera alcanzar el DAP final promedio de la plantación para cada especie. La densidad de plantación inicial fue de 800 árboles/ha, con 400 árboles/ha de chancho y 200 árboles/ha para las otras dos especies

Clase de productividad	Límite área basal	Área basal removida	DAP final promedio (edad final)			VAN (tasa de descuento del 8%)	TIR
			vogu	diol	dare		
			cm (años)	cm (años)	cm (años)		
	<i>m²/ha</i>					<i>USD/ha</i>	
1	25	15-25	35 (14-63)	35 (25-79) **	35 (36-80) **	(-884) - 7362	5 - 20
2	18	40	35 (9-31)	25-35 (13-73)	25-35 (15-81)	874 - 9568	13 - 27
3	18	40	35 (8-11)	25 (17-77)	35 (34-79)	121 - 9568	14 - 27
4	18	40	35 (7-9)	25-35 (18-78)	25-35 (21-79)	1659 - 9674	22 - 33
5	18	40	35 (6-7)	35 (25-64)	25 (21-81)	1866 - 8348	25 - 39

** En el promedio de todos los escenarios dentro de una clase de productividad más del 20% de los árboles plantados de la especie respectiva mueren debido a la competencia de las otras especies plantadas (véase la sección 4 para más detalles).



CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).



Tel. + (506) 2558-2000



comunica@catie.ac.cr



Sede Central, CATIE
Cartago, Turrialba, 30501
Costa Rica

ISBN: 978-9977-57-812-5



9 789977 578125