

Influencia de **factores biofísicos** y de manejo en el crecimiento de
***Cedrela odorata* L.** en asocio con café en Pérez Zeledón, Costa Rica

Influence of biophysical and management factors on the growth of *Cedrela odorata* L. in association with coffee in Pérez Zeledón, Costa Rica

Mariela González-Rojas¹

Rafael Murillo-Cruz²

Eliás De Melo Virginio-Filho³

Carlos Ávila-Arias²

Abstract

The study was realized in agroforestry (AF) systems of coffee associated with cedar (*Cedrela odorata* L.) in the canton of Pérez Zeledón, Province of San Jose, Costa Rica. There were 39 temporary sample plots of 1000 m², with the objective of evaluating the effect of the biophysical and management characteristics on the growth in diameter (DBH) and total height (HT) of the cedar of the two at 17 years of age. The growth of the species varied in the range of 2 to 3 cm year⁻¹ in Dbh and 1.6 to 2.2 m year⁻¹ in total height. The increasing altitude above sea level, a greater abundance of trees per hectare, increasing of the copper content in the soil and a higher frequency of annual chemical cleaning, had a negative effect of growth of cedar. Multiple regression models that explain the growth of the species were obtained (total volume and average annual increase of total volume) from biophysical variables. The optimum abundance of cedar trees per hectare corresponds to a range between 72 to 96 trees ha⁻¹ from inception to the final cycle. The species had a better developed at an altitude between 608 and 707 meters above sea level, on lower slopes to 21 % and soils with less content to 3.6 mg l⁻¹ Cu, 165 mg l⁻¹ of Fe, pH greater than 4.9 Mg and Ca⁻¹ ratio greater than 4.1.

Key words: *Cedrela odorata*, agroforestry systems with coffee, management, biophysical variables, growth.

1. Corporación CoopeAgri R.L., Perez Zeledón, Costa Rica; marielagr91@gmail.com

2. Universidad Nacional de Costa Rica, Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR); Heredia, Costa Rica; murillorafael5454@yahoo.com, carlosenriquea79@gmail.com

3. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE); Cartago, Costa Rica; eliasdem@catie.ac.cr

Recibido: 13/09/2017

Aceptado: 15/10/2017

Publicado: 14/12/2017

Introducción

Los árboles maderables en sistemas agroforestales (SAF) son una excelente alternativa de diversificación productiva y de ingreso para los productores (Lux y Von Platen, 1995). En sistemas agroforestales de café en la zona de Pérez Zeledón, es frecuente el uso del cedro (*Cedrela odorata* L.) (Orozco, López, Rojas y Somarriba, 2005) como una opción para mejorar los ingresos del productor y brindar sombra al cultivo. Esta especie pertenece a la familia de las meliáceas, crece naturalmente de los 0 a los 1900 msnm (Martínez, 2015), sin embargo, se desarrolla mejor en un rango altitudinal de 0 a 1200 msnm (Flores y Obando, 2003). La especie soporta amplias variaciones de pH (Whitmore, 1978; Flores y Obando, 2003), pero requiere suelos bien drenados y aireados (Flores y Obando, 2003). En la zona de Pérez Zeledón crece sobre suelos ultisoles y su desarrollo es afectado por la palomilla (*Hypsipyla grandella* Zeller), principalmente en los primeros dos o tres años de crecimiento (Briceño, 1997; Pérez, Eigenbrode, Hilje, Tripepi, Aguilar y Mesén, 2010; Ramírez, 2014).

Los árboles maderables de alto valor comercial como el cedro crecen más en diámetro y altura en sistemas agroforestales que en plantaciones puras (Castaing, 1982; Hernández, Beer y Von Planten, 1997; Somarriba, Valdivieso, Vásquez y Galloway, 2001; Villareal, Carrero, Arends, Sánchez y Escalante, 2006; Suatunce, Díaz y García, 2009; Alvarado, 2012). No obstante, algunos estudios demuestran que el crecimiento depende también de otros factores biofísicos del sitio como la fertilidad del suelo y la altitud, y del manejo del sistema como sombra, abundancia de árboles, fertilización, podas, entre otros.

Calixto, López, Equihua, Lira y Cetina (2015) encontraron que en plantaciones de cedro, existió una respuesta positiva del crecimiento en diámetro (DAP) mediante la aplicación de nitrógeno y con el suministro de potasio se manifestó una reducción del ataque de *H. grandella*, evidenciando el potencial de la fertilización en el manejo de la plantación. En un estudio realizado en Honduras, se determinó que el mejor escenario de manejo del SAF café-cedro resultó con una abundancia máxima alcanzable de 65 árboles ha⁻¹ y un 47 % de cobertura de sombra, lo cual permitió obtener entre 28-32 m³ ha⁻¹ de madera aserrada a los 21 años de edad (Jiménez, 2012). Asimismo, en un estudio efectuado por Ford (1979), el cedro asociado al cultivo de café mostró un mayor incremento en diámetro y altura (2,8 cm año⁻¹ y 1,43 m año⁻¹) a 800 msnm en suelos franco arenosos, con respecto a un sitio ubicado a 250 msnm con suelos franco arcillosos. También, análisis realizados por Dzib (2003) en 66 fincas de tres regiones de Costa Rica mostraron que la fertilización hecha en el cafetal y la limpieza anual de hierbas influyeron positivamente

en el crecimiento de tres especies maderables: *Cordia alliodora*, *Eucaliptus deglupta* y *Terminalia amazonia*.

Por otro lado, actualmente existen diferentes modelos que permiten predecir el crecimiento de árboles en bosques y plantaciones puras; además muchos de estos han sido adaptados y ajustados para sistemas agroforestales (Cabanettes, Auclair e Imam, 1999). Con relación a lo expuesto, Osorio (1983) llevó a cabo un estudio sobre conicidad y volumen del cedro en Samacá, Colombia, con 103 árboles de rodales naturales y obtuvo modelos de predicción de volumen total y comercial en función del DAP y la altura comercial. Galán, De los Santos y Valdez (2008) determinaron un modelo de crecimiento del cedro en el estado de Oaxaca, México, con mediciones de árboles plantados entre tres y diez años de edad, siendo el modelo Fang y Bailey (1999) el que presentó mejor ajuste. En el caso de Costa Rica, hay pocos estudios donde se modele el crecimiento del cedro en asocio con café. Ford (1979) determinó un modelo de predicción del volumen comercial de la especie asociado a cafetales de San Carlos y Tabarcia en Puriscal. Otras fórmulas más generales, como la desarrollada por Lojan (1966) para especies del bosque tropical húmedo en Costa Rica, posibilitan cuantificar el crecimiento de varias especies, incluyendo el cedro.

En Pérez Zeledón, la Cooperativa CoopeAgri R.L. ha participado en conjunto con los productores de la zona en el establecimiento de aproximadamente 150 mil árboles de cedro amargo desde el año 2003, principalmente asociado a cultivos de café. Al ser una especie importante en la región, en el presente estudio se evaluaron las características biofísicas y de manejo que tienen mayor influencia sobre el crecimiento de la especie en el SAF y además se desarrollaron modelos de predicción del crecimiento del cedro en función de esas características.

Materiales y métodos

Localización y características del área de estudio

El estudio se realizó en los distritos Río Nuevo, General, Platanares, Pejibaye, Cajón y San Pedro del cantón de Pérez Zeledón, provincia San José. Pérez Zeledón se ubica entre 500 y 1700 msnm, las lluvias oscilan desde los 2000 hasta los 4000 mm anuales y la temperatura promedio anual registrada es entre 18 y 24 °C (Bolaños, Watson y Tosi, 2005). Presenta una estación seca de diciembre a abril. Los suelos son de orden inceptisol y ultisol (Orozco et al., 2005). Pérez Zeledón posee una extensión de 1900 km²; su área cafetalera representa

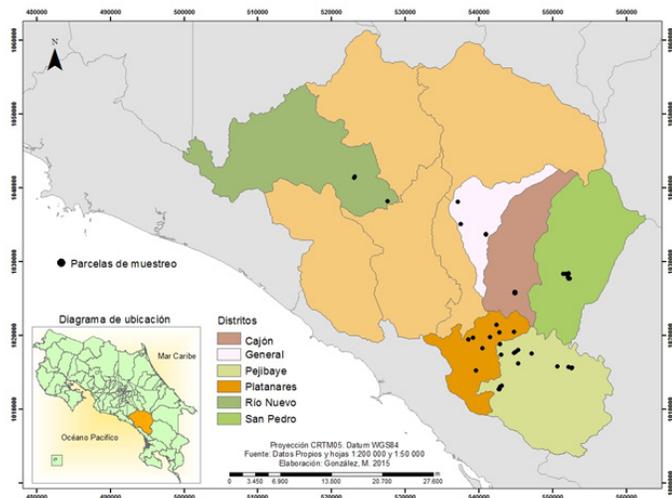


Figura 1. Ubicación de las parcelas de muestreo en la zona de estudio
Figure 1. Location of the samples in the study zone

un 6,9 % del área total del cantón y un 15 % del área cafetalera total nacional (12 522,8 ha) (INEC, 2015).

En la región las plantaciones de café bajo sombra se componen principalmente de especies de servicio como poró (*Erythrina* spp), guaba (*Inga* spp.) y musáceas (varios tipos de bananos y plátanos) y especies maderables como laurel (*Cordia alliodora*), eucalipto (*Eucalyptus* spp.), cedro (*Cedrela odorata*), entre otras (Orozco et al., 2005).

Muestreo

Utilizando las fincas registradas en Coopeagri R.L. y sometidas al Programa de Pago por Servicios Ambientales (PPSA), se construyó una base de datos de las fincas cafetaleras donde se ha establecido cedro en combinación con café. Se empleó información relevante como: nombre del propietario, teléfono, área total de la finca, área sembrada con la especie, total de árboles de cedro, tipo de arreglo de siembra, fecha de establecimiento y ubicación del inmueble. Se encontró un total de 77 proyectos de cedro en combinación con café, los cuales tenían entre dos y 17 años de edad y estaban ubicados en 59 fincas. La edad máxima fue de 17 años, sin embargo, no se localizaron plantaciones con cedro entre 13 y 16 años de edad.

Mediante una visita previa de campo se realizó un muestreo selectivo, y se seleccionaron solo aquellos sitios que presentaban un lote de café con cedro con edad homogénea en un área mínima de 1000 m², ubicada a 10 m de distancia de caminos y 15 m de áreas de protección para evitar el efecto de borde sobre el crecimiento de la especie.

En total se establecieron 39 parcelas temporales de forma rectangular con un tamaño de 1000 m² (25 m x 40 m) en 24 fincas, donde se midió un total de 751 árboles de cedro. Para cedro entre las edades de dos y once años, se establecieron tres unidades de muestreo por edad; en el caso de doce años, cuatro unidades y en cuanto a 17 años, cinco unidades.

Variabes medidas en la parcela

A los árboles de cedro se les midió el diámetro (cm) a 1,30 m del suelo con cinta diamétrica y la altura total (m) con clinómetro. Dentro de la parcela de 1000 m² se establecieron 6 subparcelas de 13,3 m x 12,25 m.

En el centro de cada subparcela se midió la sombra con un densímetro esférico Model-C® y se colectaron muestras de suelo a 15 cm de profundidad. Además, en tres puntos de la parcela se tomó una muestra de suelo con un cilindro para estimar la densidad aparente en los primeros 10 cm de profundidad. La medición de la sombra se realizó a 1,30 m del suelo aproximadamente, evitando la sombra de los cafetos, para así obtener solo la sombra proyectada por las otras especies (cedro y especie de servicio múltiple). La lectura con el densímetro se llevó a cabo contando los puntos cubiertos por el dosel (cada cuadro tiene cuatro puntos, es decir, 96 en total). La suma de los puntos multiplicada por 1,04 indicó el porcentaje de cobertura. El promedio de los seis valores de sombra determinó el porcentaje de sombra en la parcela.

Las muestras se utilizaron para realizar el análisis químico del suelo: reacción del suelo (pH), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), acidez extraíble, fósforo (P), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B), saturación de acidez (Sat. ac.), capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), relación calcio magnesio (Ca Mg⁻¹), relación calcio potasio (Ca K⁻¹), relación magnesio potasio (Mg K⁻¹) y relación calcio + magnesio respecto al potasio ((Ca+Mg) K⁻¹). Adicionalmente se colectó información biofísica como: porcentaje de pendiente, altura sobre el nivel del mar y composición y abundancia de las especies de sombra.

El manejo del sistema agroforestal se determinó mediante consulta a los propietarios de las fincas, considerando las variables que se presentan en el cuadro 1. El manejo se categorizó en bajo (1), medio (2) y alto (3), y a cada variable se le asignó un valor numérico en un rango de uno a tres (máxima relevancia), de esta forma se obtuvo una sumatoria que permitió categorizar cada parcela según manejo.

El estado de las plantas de café se estableció con la metodología propuesta por Virginio Filho (2009), pero adaptada a las condiciones de la parcela. Para ello, se evaluó el estado de diez plantas de café (cinco plantas en dos líneas), en cada uno de los mismos seis puntos

Cuadro 1. Categorías de manejo para los sistemas agroforestales evaluados en Pérez Zeledón

Table 1. Evaluation categories of agroforestry system management in Pérez Zeledón

Variable	Valor	Categorías de manejo		
		Bajo $0 \leq 16,5$	Medio $16,6 \leq 27,5$	Alto $27,6 \leq 33$
Cantidad de fertilizante aplicado (fórmula completa 18-5-15-6-0.2) ¹	3	<7 sacos *ha*año ⁻¹	7-14 sacos*ha*año ⁻¹	> 14 sacos*ha*año ⁻¹
Conocimiento sobre qué fertilizante aplicar	1	El propietario no sabe qué aplicar o no cuenta con recursos económicos para mayores aportes	El propietario lo aplica por recomendación del vendedor	El propietario lo aplica de acuerdo al análisis de suelo
Limpieza manual o mecánica de hierbas competidoras por ha*año ⁻¹	1	0-1	2	≥3
Limpieza química de hierbas competidoras por ha*año ⁻¹	1	0-1	2	≥3
Estado de las plantas de café ²	1	> 40 % de las plantas requieren poda sanitaria y/o poda de formación	10-40 % requieren poda sanitaria y poda de formación	< 10 % requieren poda sanitaria y poda de formación
Manejo del cedro	3	A los árboles no se les hizo poda y/o control de plagas	A los árboles se les ha hecho poda o control de plagas (una de las dos)	A los árboles se les ha hecho poda y control de plagas (ambas)
Manejo de enfermedad ^{des del café (fungicidas)} ³	2	0-1 aplicación*ha*año ⁻¹	2 aplicaciones*ha*año ⁻¹	≥3 aplicaciones*ha*año ⁻¹

1 saco=45 kg

¹Garita, A. (2015). Ing. Agrónomo, Centro de Investigaciones en Café. Comunicación personal, 2015.

²Virginio Filho (2009).

³Salazar, L. (2015). Ing Forestal, Coopeagri R.L. Comunicación personal, 2015.

donde se evaluó la sombra y se colectó cada submuestra de suelo, para un total de 60 plantas de café evaluadas por parcela.

Análisis de la información

Se estimó el diámetro y la altura total promedio por parcela. Para el cálculo del volumen total del cedro, se utilizó la ecuación propuesta por Lojan (1966), ya que mostró ser la ecuación con menor variación (2,2 % de sobreestimación) con respecto al resultado de la fórmula general de volumen total con un factor de forma de 0,6 (Detlefsen, Marmillod, Scheelje y Ibrahim, 2012).

Ecuación de Lojan (1966):

$$VT = (0,0000837876) * (DAP^{2,03986}) * (HT^{0,779})$$

Donde:

VT es el volumen total (m³).

DAP es el diámetro a 1,30 m de la base del árbol (cm).

HT es la altura total (m).

A todas las parcelas se les aplicó corrección de pendiente mediante la fórmula trigonométrica del coseno del ángulo y así se obtuvo la abundancia real de árboles por hectárea. Además, se calculó el área basal y el incremento medio anual (IMA) de las diferentes variables. El IMA equivale a la variable de crecimiento (DAP, HT, VT) entre la edad correspondiente. El área basal se calculó con la siguiente fórmula:

$$AB = \frac{\pi}{4} * DAP^2$$

Donde:

AB es el área basal (m²).

DAP es el diámetro a 1,30 m de la base del árbol (cm).

Para el análisis estadístico se utilizó el software Stat Graphics versión 16.1.18. Se estimó la desviación estándar (s) de las diferentes variables medidas (suelo, sombra, diámetro, altura, etc), para así mostrar cuánto se alejan los valores respecto al promedio. Se

realizó un análisis de correlación (r) entre las variables dependientes (Incremento Medio Anual (IMA) del DAP, HT, VT y AB) e independientes (variables biofísicas y de manejo), considerando que aquellas variables con $r \geq 0,4$ ejercieron mayor efecto sobre el crecimiento del cedro.

Los valores de IMA del VT árb^{-1} se agruparon en tres grupos ($n=9$): bajo, medio y alto. En cada agrupación se analizaron las variables biofísicas y de manejo mediante una prueba T-student con una probabilidad al 5 % de significancia y considerando las variables con una correlación alta ($r \geq 0,4$). Posteriormente se determinaron los intervalos de confianza para cada una de las variables biofísicas y de manejo con una correlación alta en cada grupo, con el fin de determinar rangos óptimos en donde se desarrolló la especie.

Con las variables independientes más correlacionadas, se construyeron modelos de predicción del Vt árb^{-1} . En este caso se tomó en cuenta la metodología de ajuste por mínimos cuadrados y paso a paso. La elección de los modelos consideró los siguientes criterios de ajuste: coeficiente de determinación (R^2), el R^2 ajustado, el cuadrado medio del error (CME) y el error estándar (EE). En el caso de regresiones múltiples, se incluyó además el criterio de información de Akaike (AIC), siendo el mejor modelo aquel con un valor AIC menor.

Como una última fase para elegir los mejores modelos, se analizó la diferencia agregada y el análisis de residuales. El estadístico de la diferencia agregada (DA) se empleó para conocer las diferencias entre el valor real del muestreo y el estimado por los modelos, considerando una diferencia menor al 10 % para confirmar la viabilidad del modelo. Este estadístico se obtuvo mediante la diferencia del valor observado menos el valor estimado (Prodan, Rolan, Cox y Real, 1997). Como segundo criterio se utilizó la gráfica de residuales para presenciar gráficamente la dispersión de las diferencias (Moret, Jerez y Mora, 1998). Si los residuales estandarizados eran menores que 3, el modelo se calificaba como válido.

Resultados y discusión

Características biofísicas y de manejo de los sistemas agroforestales de café-cedro en Pérez Zeledón

Los sistemas agroforestales de café-cedro presentaron diversas condiciones biofísicas y de manejo. En el 80 % de las fincas muestreadas, además del cedro, existe un estrato medio conformado frecuentemente por poró (*Erythrina* spp), guabas (*Inga* spp) y/o musáceas y en algunos casos árboles frutales como aguacate (*Persea* spp.) y cítricos (*Citrus* spp.); comúnmente con una abundancia de 625 plantas ha^{-1} . Según Virginio Filho y Hagggar (2005), la presencia de varios estratos verticales (medio y alto) que den sombra intermedia (frutales

y especies de servicio) y sombra alta (maderables) optimizan la productividad del sistema. En el caso de los árboles de cedro, la abundancia por hectárea tuvo un coeficiente de variación promedio de 56 %, encontrándose desde 40 hasta 503 $\text{árb} \text{ha}^{-1}$ en los sitios muestreados. Frecuentemente se ubicaban en un rango de abundancia de 40 a 118 $\text{árb} \text{ha}^{-1}$ (36 % de parcelas) y de 195 a 272 $\text{árb} \text{ha}^{-1}$ (25 % de parcelas) (Figura 2). Al respecto, Orozco et al. (2005) identificaron en cafetales de Pérez Zeledón una abundancia de árboles maderables entre 68 y 605 $\text{árb} \text{ha}^{-1}$. Estos autores determinaron que las fincas pequeñas (17,7 ha) estaban dominadas por *Terminalia ivorensis* y *Terminalia amazonia* sembradas a altas densidades y el cedro predominaba en fincas grandes (80 ha) en densidades adecuadas (68 $\text{árb} \text{ha}^{-1}$).

El 75 % de las fincas evaluadas en este estudio empleó un manejo “alto” al sistema (principalmente al cultivo de café), el resto corresponde a un manejo “medio”. El manejo alto consistió en la aplicación de fertilización mayor a 14 sacos $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, dos limpiezas de hierbas manuales y dos químicas anuales, más del 80 % de las plantas de café en buen estado, manejo del cedro (podas y/o control fitosanitario), tres aplicaciones anuales de fungicidas, entre otros. Un poco más de la mitad de los propietarios (53 %) realizó podas o control fitosanitario a los árboles de cedro y, en menor proporción (15 %), aplicaron los dos mecanismos.

El cultivo de café se encontró comúnmente a una abundancia de 5000 plantas ha^{-1} . La fertilización se aplicó al cultivo del café principalmente, siendo en promedio 18 sacos $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ (810 $\text{kg} \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) de fertilizante de la fórmula completa 18-5-15-6 distribuidos en tres aplicaciones, más una aplicación de fertilizante nitrogenado (73 $\text{kg} \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$), lo cual se considera una fertilización alta. Solo el 22 % de caficultores empleó una fertilización menor a 14 sacos $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$. Ramírez (2014) recomienda fertilizar el cedro asociado con café en la zona de Pérez Zeledón aplicando alrededor de 100 $\text{g} \text{árb}^{-1}$ de la fórmula mencionada anteriormente en el momento de la fertilización al café y además reforzar al cuarto y séptimo año (momento en que se tiende a hacer poda de ramas) con fórmulas altas en N y K_2O .

A partir de un sondeo realizado por Virginio Filho, Arrieta, Rapidel y Ropusar (2015), los cafetaleros en Costa Rica normalmente llevan a cabo dos aplicaciones con fórmula completa y una tercera con fertilizante nitrogenado, sin embargo, en este estudio los caficultores aplicaron una dosis mayor de fórmula completa. La producción de café promedio en los sistemas evaluados fue de 26 fanegas ha^{-1} , siendo de baja a media de acuerdo con el promedio general nacional de producción de café (26 a 34 fan ha^{-1}). Según esta producción, lo recomendado es aplicar una fertilización con fórmula completa de 629 $\text{kg} \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ (ICAFE, 2015).

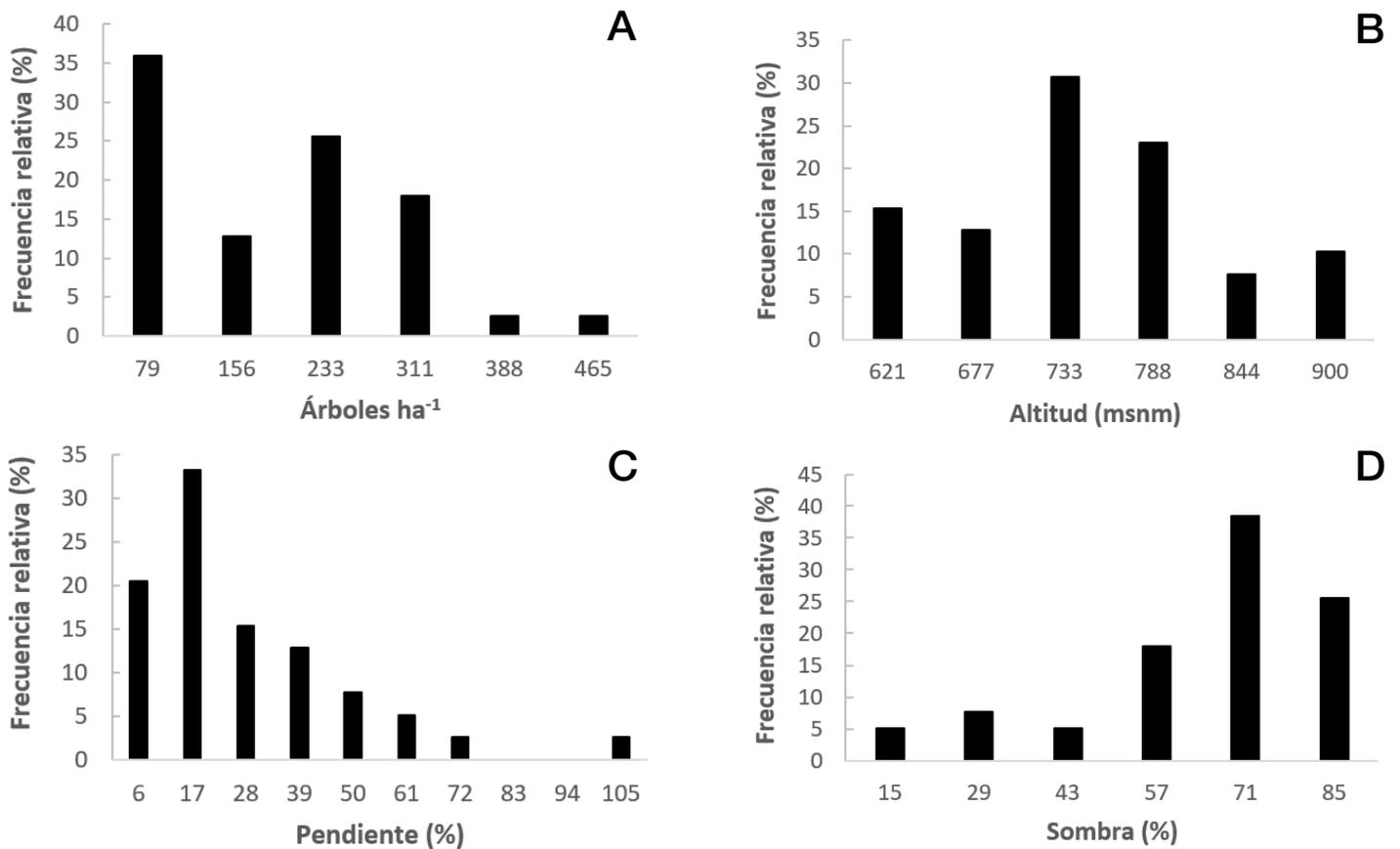


Figura 2. Frecuencia relativa de las parcelas según la abundancia por hectárea del *Cedrela odorata* L. (A), la altitud (msnm) (B), la pendiente (C) y la sombra (D) en los sitios muestreados.

Figure 2. Plots relative frequency of *Cedrela odorata* L. abundance per hectárea (A), altitude (m) (B), slope (C) and shadow (D) at the study sites.

El 54 % de los sitios (21 sitios) se distribuyeron en un rango de altitud entre los 705 y los 816 msnm. Las pendientes del terreno variaron entre 1 y 70 %, solo en un caso se identificó una pendiente superior correspondiente a 110 % (figura 2). El porcentaje promedio de sombra del sistema cedro-café y otras especies en un estrato medio de crecimiento fue de 69 % ($s = \pm 15$ %), sin embargo, donde solo se encontró el cedro como sombra del café, la sombra promedio fue de 54 % ($s = \pm 33$ %). En este caso, la sombra proyectada por el cedro no presentó una correlación estadísticamente significativa con la edad ($p=0,11$) ni con la cantidad de árboles por hectárea ($p=0,46$), es decir, una mayor sombra en el SAF no se relaciona con una mayor abundancia de cedro o tamaño de los árboles.

Lo anterior puede deberse a que conforme aumenta la edad de los árboles, existe una reducción de la masa de hojas y pecíolos del árbol con respecto al aumento en la masa de madera (Ramírez, 2014). Además, Somarriba (2004) sostiene que la sombra no solo está influenciada por el dosel, sino también por otros factores como la exposición y la pendiente. La influencia positiva o negativa de la sombra en la producción del sistema

depende de diversos factores como la altitud del terreno y las características de las especies en asocio; Virginio Filho y Hagggar (2005) mencionan niveles óptimos de sombra entre 20 y 50 %.

En estos sistemas agroforestales se encontraron suelos con pH menores a 5 (69 % de los sitios) y otros entre 5 y 5,5 ($s = 31$ %). Un 51 % de los sitios presentó contenidos altos de acidez de 2,29 cmol l^{-1} ($s = \pm 2,28$ cmol l^{-1}) en promedio, lo que significa una saturación de acidez de 31,6 % ($s = \pm 23,3$ %). Consecuentemente, existen bajos contenidos de calcio y fósforo (<4 cmol l^{-1} para Ca y <12 mg l^{-1} para P, según Molina y Meléndez (2002) en un 62 % y un 74 % de los sitios. Esto se debe a que los suelos muestreados pertenecen al orden de los ultisoles, los cuales por su mineralogía son ricos en óxidos de Fe y Al, lo que desde el punto de vista nutricional puede tener efectos en la disponibilidad de P; además poseen una baja fertilidad debido a la poca capacidad de intercambio catiónico (Bertsch, 1995). La especie crece bien en este tipo de suelos, a pesar de ser ácidos, sin embargo, no tolera un mal drenaje (Cintrón, 1990). Otros nutrientes como el magnesio, el potasio, el zinc y el boro se encuentran en los suelos muestreados en un nivel

Cuadro 2. Análisis químico de los suelos presentes en los sistemas agroforestales de café con maderables de *Cedrela odorata* L. en la zona de Pérez Zeledón.

Table 2. Chemical analysis of soil present in coffee agroforestry systems with *Cedrela odorata* L. in Pérez Zeledón.

Variable	Unidades	Valor Mín	Valor Max	Promedio	s (±)
pH		4,1	5,5	4,8	0,4
Ca	(cmol l ⁻¹)	0,3	12,6	3,9	2,8
Mg	(cmol l ⁻¹)	0,2	3,2	1,0	0,75
K	(cmol l ⁻¹)	0,1	1,7	0,3	0,31
Acidez	(cmol l ⁻¹)	0,1	12,5	2,2	2,28
CICE	(cmol l ⁻¹)	2,9	18,3	7,5	3,9
Sat.Acid.	%	1,2	87,2	31,6	23,3
P	(mg l ⁻¹)	0,2	39,0	8,6	6,9
Fe	(mg l ⁻¹)	51,0	592,0	228,3	141,5
Cu	(mg l ⁻¹)	1,0	16,0	5,8	3,3
Zn	(mg l ⁻¹)	0,3	12,0	2,7	2,4
Mn	(mg l ⁻¹)	5,0	147,0	33,0	32,3
B	(mg l ⁻¹)	0,0	9,0	0,2	1,4
Sat. K	%	1,7	21,3	4,6	3,5
Sat. Ca	%	5,6	83,2	50,7	19,2
Sat. Mg	%	3,6	28,7	13,1	6,0
Ca Mg ⁻¹	(cmol l ⁻¹)	1,2	8,3	4,2	1,8
Mg K ⁻¹	(cmol l ⁻¹)	0,9	10,4	3,6	2,1
Ca+(Mg K ⁻¹)	(cmol l ⁻¹)	3,6	41,8	18,3	10,2
Ca K ⁻¹	(cmol l ⁻¹)	2,0	36,6	14,7	8,7
D.A	g cm ⁻³	0,55	0,94	0,81	0,09

s=Desviación estándar de la media

D.A=Densidad aparente del suelo

CICE= Capacidad de intercambio catiónico efectiva

Sat.= Saturación

medio (Molina y Meléndez, 2002). Dreschel y Zech (1991) señalan que el orden de nutrientes que requiere el cedro para un óptimo desarrollo es 3,07 % de N > 2,44 % de K > 1,27 % de Ca > 0,24 % de Mg > 0,23 % de P, de acuerdo con la concentración en las hojas.

La densidad aparente del suelo en los sistemas agroforestales osciló en un rango de 0,55 a 0,94 g cm⁻³ (cuadro 2), lo cual le favorece a la especie, ya que se desarrolla bien en suelos con una densidad aparente inferior a 1,15 g cm⁻³ (Castaing, 1982). A pesar de que los suelos muestreados presentaron bajo contenido de Ca y en general pH menor a 5, al estudiar el crecimiento de la biomasa del cedro en Pérez Zeledón, Ramírez (2014) indica que los suelos en la zona son óptimos para el desarrollo de la especie.

Crecimiento del cedro en asocio con cafetales de Pérez Zeledón

Los diámetros y alturas promedio del cedro a una misma edad variaron por las distintas condiciones biofísicas encontradas en los sitios muestreados. Estas variables de crecimiento presentaron un coeficiente de variación promedio de 20,1 % en DAP y 16,5 % en HT a una misma edad. A los 17 años de edad, el cedro tenía diámetros mínimos de 35,2 cm y máximos de 49,5 cm, sin embargo, a edades menores hubo diámetros máximos similares: 35,9 cm a los 9 años y 37,5 cm a los 11 años, lo que explica la presencia de sistemas de café con árboles de cedro en condiciones de mayor crecimiento (mayor índice de sitio). A los 17 años de edad el cedro se encontró en rangos de altura total entre 25,9 m y 36,9 m, sin aplicar ningún tipo de manejo silvicultural (cuadro 3). Malimbwi (1978) asegura que la altura máxima de

Cuadro 3. Medidas resumen de las dimensiones de crecimiento en diámetro (dap) y altura total de *Cedrela odorata* L. en cafetales de Pérez Zeledón
 Table 3. Summary measures of the dimensions of growth in diameter (Dbh) and total height of *Cedrela odorata* L. in coffee plantations of Pérez Zeledón

Edad años	DAP (cm)					Altura total (m)			
	N	Mín	Máx	Media	s	Mín	Máx	Media	s
2	3	3,30	5,60	4,63	1,19	4,0	5,2	4,57	0,60
3	3	4,20	9,10	7,33	2,72	4,4	9,0	6,87	2,32
4	3	8,50	9,90	9,13	0,71	5,7	8,1	6,63	1,29
5	3	15,3	16,00	15,77	0,40	12,2	14,2	12,93	1,10
6	3	9,00	15,10	11,57	3,16	7,7	12,7	9,40	2,86
7	3	15,4	21,10	18,63	2,93	11,5	14,7	12,60	1,82
8	3	12,9	25,80	20,97	7,03	11,8	15,4	14,17	2,05
9	3	26,3	35,90	31,17	4,80	17,5	20,3	18,67	1,46
10	3	18,4	32,30	25,93	7,02	13,1	21,2	17,93	4,27
11	3	23,9	37,50	31,27	6,87	16,1	21,4	18,77	2,65
12	4	22,6	31,60	27,48	3,91	16,5	19,5	17,85	1,48
17	5	35,2	49,50	43,30	5,52	25,9	33,6	30,14	3,00

la especie es de 30 a 40 m a los 40 años de edad, no obstante, Jiménez (2012), Jiménez et al. (2002) y Flores y Obando (2003) indican que pueden alcanzar hasta los 45 metros de altura. Lamb (1968) estimó que después de los 25 años una plantación puede llegar a crecer hasta alrededor de 32 m de altura, dando como resultado un incremento anual de 12,6 m³ ha⁻¹ de madera.

El IMA en DAP y HT de la especie en el sistema agroforestal fue poco variable de los dos a los 17 años de edad, encontrándose un rango promedio de 2 a 3 cm año⁻¹ en DAP y 1,6 a 2,2 m año⁻¹ en HT. Lo anterior significa que el cedro crece bien en sistemas agroforestales con café de la zona de Pérez Zeledón, ya que según Herrera y Lanuza (1997), el cedro en ausencia del barrenador, bajo buenas condiciones de sitio y luz crece en la plantación de 1,3 a 1,6 m en altura y en sistemas agroforestales crece entre 2 a 3 cm año⁻¹ en DAP y 2 m año⁻¹ en altura. En Turrialba, Costa Rica, con manejo tecnificado del cultivo de café, o sea, alta fertilización, control de malezas y altos rendimientos, el cedro presentó incrementos mayores en crecimiento anual en diámetro de 4,4 cm y 2,7 m de altura a una edad inicial de la plantación (Montenegro, Ramírez y Blanco, 1997). Por su parte, en cafetales de Tabarcia, Puriscal, a 800 msnm, Ford (1979) reportó un incremento del cedro de 2,5 cm año⁻¹ en dap, lo cual coincide con el crecimiento de la especie en este estudio.

Variables biofísicas y de manejo que influyen el crecimiento del cedro

Las variables biofísicas y de manejo que mostraron una correlación alta ($r \geq 0,4$) con las variables de crecimiento del cedro fueron la altitud sobre el nivel del mar (msnm), la abundancia de árboles de cedro por hectárea, el

porcentaje de sombra, el contenido de cobre en el suelo, el pH, la relación Ca Mg⁻¹ y la cantidad de limpiezas químicas anuales (cuadro 4). La abundancia de árboles de cedro por hectárea y la altitud del sitio influyeron negativamente en el crecimiento de la especie. A mayor cantidad de árboles por hectárea, el incremento medio anual (IMA) en volumen total por árbol y DAP se redujo, explicado por una correlación negativa de -0,64 ($p=0,00001$) y -0,49 ($p=0,00002$) respectivamente. Al estudiar el crecimiento del cedro en cafetales de Honduras, Jiménez (2012) determinó las dimensiones más bajas en los pisos altitudinales altos, atribuyendo a esto la afectación en el desarrollo en diámetro y altura de la especie.

Por su parte, a mayor porcentaje de sombra, se encontró más volumen por árbol ($r = 0,42$), esto significa que los árboles de cedro estaban en una etapa de crecimiento donde la sombra de un estrato medio ya no representaba ninguna influencia sobre el crecimiento de la especie y, por ende, la correlación positiva no indicó que un mayor porcentaje de sombra favorecía el crecimiento de la especie. Consecuentemente, si se analiza el crecimiento del cedro cuando los árboles poseen una altura menor a 6 m, existe una correlación negativa de -0,7 con el IMA en DAP de la especie. En este caso, la correlación alta ($r = -0,7$) evidenció que un porcentaje alto de sombra ($\geq 50\%$) influye negativamente en el crecimiento del cedro en los primeros años de edad, aunque estadísticamente la probabilidad no es significativa ($p = 0,12$). Además, al analizar el crecimiento de plántulas de cedro en el área de claro y área con sombra de dosel entre tres y cuatro metros, Arteaga (2006) determinó que la proporción de crecimiento en altura fue mayor en las plántulas del claro.

Cuadro 4. Correlación de las variables biofísicas y de manejo con el crecimiento de *Cedrela odorata* L. en fincas cafetaleras, Pérez Zeledón

Table 4. Correlation of biophysical and management variables with *Cedrela odorata* L. growth in coffee farms, Pérez Zeledón

Variable	Correlación	Probabilidad
Abundancia del cedro (árb ha ⁻¹)	-0,49**	0,00002
	-0,64*	0,00001
Altitud (msnm)	-0,59*	0,00007
Sombra %	0,42*	0,01000
Cu (mg l ⁻¹)	-0,46*	0,02900
pH	0,52*	0,00060
Ca Mg ⁻¹	0,40*	0,01000
CQ	-0,42*	0,01000

s=Desviación estándar de la media

**Variable de crecimiento IMA DAP

*Variable de crecimiento IMA VT árb⁻¹

CQ: Cantidad de limpiezas químicas anuales

Los suelos del estudio presentaron contenidos de cobre óptimos (Molina y Meléndez, 2002), pero se determinó que a mayor cantidad de cobre (mg l⁻¹), el IMA en el Vt árb⁻¹ del cedro disminuyó porque el cobre puede provocar la reducción en el proceso de división celular, daño estructural o muerte de las células del meristemo apical (Jiang, Liu y Liu, 2001; Liu, Jiang, Meng, Zou, Gu y Zeng 2009), lo cual ocasiona una contracción del diámetro de raíces y tallos y una disminución en el crecimiento de hojas (Pasternak, Rudas, Potters y Jansen, 2005; Kasim, 2006). El cobre también altera el transporte de hierro a las hojas y esto puede reducir la síntesis de clorofila (Price y Carell, 1964; Burzyński y Klobus, 2004).

Contrariamente, cuando el pH y la relación Ca Mg⁻¹ aumentan, el crecimiento de la especie es influenciado de manera positiva. En un estudio realizado en la zona de Pérez Zeledón, Ramírez (2014) encontró que el Ca es el tercer nutriente de mayor concentración en árboles de cedro en un rango entre 0,85-0,31 %. Este elemento permite una mejor translocación y transporte de otros nutrimentos, además influye en las propiedades mecánicas de la madera tales como la resistencia a la ruptura y la elasticidad (Wimmer y Lucas, 1997).

De acuerdo al manejo, resultó que a mayor cantidad de limpiezas químicas anuales, el desarrollo de la especie fue afectado, explicado por una correlación negativa de $r = -0,42$. La mayoría de los productores de este estudio utilizó glifosato como herbicida; al respecto para el año 2015 el centro de suministros de CoopeAgri R.L. registró un 20 % más de ventas de este producto con relación a otros empleados para este fin y que el 60 % del total de las ventas correspondían a glifosato y el 40 % a otros productos sustitutos (Ing. Corrales,

comunicación personal, 2016), debido principalmente a que es un producto de menor costo. Johal y Huber (2009) argumentan que el glifosato tiene un efecto negativo sobre comunidades de organismos benéficos del suelo y modifica la disponibilidad de nutrientes. Además, Bolliger, Magrid, Amado, Neto, Ribeiro, Calegari, Ralisch y Neergaard (2006) señalan que luego de algunos años de aplicaciones frecuentes de este producto, se incrementan los problemas en la productividad de las plantas de café.

Al integrar las variables biofísicas que presentaron mayor correlación con el crecimiento del cedro en estos sistemas, fue posible predecir el volumen total por árbol de la especie a una edad determinada. Las variables de predicción que resultaron ser significativas fueron la altitud sobre el nivel del mar (msnm), la abundancia de cedro por hectárea y el pH del suelo. Otras variables como la relación Ca Mg⁻¹ se incluyeron en el modelo tres, sin embargo, a pesar de que este modelo tuvo uno de los R² más altos (83 %), la probabilidad de la relación Ca Mg⁻¹ en el modelo no fue estadísticamente significativa ($p = 0,0593$). En el modelo cuatro, la abundancia de cedro junto con el pH fue estadísticamente significativa y en conjunto predijeron el crecimiento de la especie en un 81 %. El modelo uno predijo el Vt árb⁻¹ de la especie con el R² más alto (84 %), el cual integró como variables predictoras la edad, la altitud y el pH (cuadro 5). No obstante, el modelo dos, el cual utilizó como variable predictora la altitud del terreno, presentó menor diferencia agregada (0,89 m³), sobrestimando en un 3,14 %. De esta forma, los modelos uno y dos fueron los más adecuados para predecir el volumen total por árbol de cedro utilizando variables biofísicas del sitio. Por otro lado, al clasificar el IMA del VT árb⁻¹ en bajo, medio y

Cuadro 5. Modelos de predicción múltiple del volumen total por árbol (Vt árb⁻¹) de *Cedrela odorata* L.

Table 5. Prediction models for total volume per tree (Vt árb⁻¹) of *Cedrela odorata* L.

Modelo	Ecuación	Variables	Valor-P	R ² (%)	R ² ajustado (%)	CME	EE	AIC
1	Vt árb-1= -1,033 + 0,124337*e - 0,00291022*a + 0,617144*p	e= edad	0,0000	84,12	82,76	0,1819	0,4266	-1,49
		a=altitud	0,0045					
		p= pH	0,0171					
2	Vt árb-1= 1,91423 + 0,152315*e - 0,00326853*a	e= edad	0,0000	80,95	79,97	0,2011	0,4485	-1,41
		a= altitud	0,0017					
3	Vt árb-1= 1,12751 + 0,144394*e - 0,00262695*a + 0,0885051*b	e= edad	0,0000	82,67	81,31	0,1877	0,4333	-1,43
		a= altitud	0,0117					
		b= Ca Mg ⁻¹	0,0593					
4	Vt árb-1= -2,55856 + 0,135876*e - 0,00191024*d + 0,533795*p	e= edad	0,0000	80,90	79,40	0,2069	0,4549	-1,38
		d= árb ha ⁻¹	0,0163					
		p= pH	0,0220					

CME= Cuadrado medio del error

EE= Error estándar

AIC= Criterio de Akaike

Edad (años), Altitud (msnm).

Cuadro 6. Prueba de medias (T) de las variables biofísicas y de manejo que influyen el IMA bajo, medio y alto del VT árb⁻¹ de *Cedrela odorata* L.

Table 6. Mean test (T) of biophysical and management variables that influence the low, medium and high IMA of VT árb⁻¹ of *Cedrela odorata* L.

Variable	Grupo 1	Grupo 2	Media(1)	Media(2)	Media(1)- Media(2)	LI(95)	LS(95)	p-valor
Ábundancia del cedro (árb ha ⁻¹)	M	A	211,0	84,0	127,0	74,0	180,0	0,0004
	A	B	84,0	277,0	-193,0	-279,0	-107,0	0,0009
Sombra (%)	M	B	77,0	56,0	20,0	7,0	34,0	0,0058
	A	B	73,0	56,0	17,0	4,0	29,0	0,0112
Altitud (msnm)	M	A	775,0	658,0	117	54,0	180,0	0,0012
	A	B	658,0	794,0	-136,0	-205,0	-67,0	0,0007
Pendiente (%)	M	A	37,0	14,0	22,0	6,0	38,0	0,0117
	A	B	14,0	32,0	-18,0	-31,0	-4,0	0,0142
Cu (mg l ⁻¹)	A	B	3,1	6,8	-3,7	-6,7	-0,7	0,0228
Fe (mg l ⁻¹)	A	B	124,4	234,8	-110,3	-209,2	-11,5	0,0319
pH	M	A	4,8	5,2	-0,3	-0,6	0,01	0,0447
	A	B	5,2	4,8	0,4	0,0	0,8	0,0452

alto, se encontraron diferentes parámetros que revelaron las condiciones biofísicas y de manejo ideales para el buen desarrollo del cedro en los sitios muestreados (cuadro 6). Los mejores incrementos en esta variable se dieron en un intervalo de abundancia de 72 a 96 árb ha⁻¹ desde el establecimiento hasta el ciclo final, para así obtener incrementos medios anuales en volumen total de 0,15 m³ árb⁻¹ año⁻¹ (2,55 m³ árb⁻¹ en 17 años). Con más de 192 árb ha⁻¹, el IMA del VT árb⁻¹ se redujo en 91 %.

En Costa Rica se usan densidades que varían de 50 a 128 árboles ha⁻¹ en SAF (Beer, Muschler, Kass y Somarriba, 1998). Salgado (2015) recomienda finalizar con plantaciones de entre 70 y 156 árboles ha⁻¹. La abundancia óptima en este estudio concuerda con lo encontrado por Hernández et al. (1997) en Costa Rica, donde los mejores IMA por árbol de *Cordia alliodora* asociado al café fueron en densidades menores de 64 a 100 árboles ha⁻¹; también con una abundancia de 100

árboles maderables ha⁻¹, la producción por planta de café fue similar a la producción por planta a pleno sol.

En el caso de la sombra en el cafetal, un 73 % favoreció el IMA del VT árb⁻¹, pero este parámetro no puede tomarse en cuenta como factor de manejo de la sombra para favorecer el desarrollo del cedro, ya que como se mencionó anteriormente, el porcentaje de sombra está relacionado con otras condiciones del sitio. Según el límite inferior del intervalo de confianza calculado para las muestras ubicadas en bajo crecimiento, por encima de los 737 msnm el cedro presentó el crecimiento más bajo; el mejor crecimiento ocurrió en un intervalo de confianza entre 608 y 707 msnm. Además, lo ideal es que el cedro se ubique en pendientes inferiores a 21 %.

Niveles altos de Fe y Cu afectaron el buen desarrollo de la especie. El límite superior del intervalo de confianza para el grupo de datos de alto crecimiento, indicó que el contenido en el suelo no debe ser mayor a 3,6 mg l⁻¹ de Cu, 165 mg l⁻¹ de Fe y 25 % en el caso de la saturación de acidez. Contrariamente el pH debe ser mayor de 4,9 y la relación Ca Mg⁻¹ mayor a 4,1.

En cuanto al manejo, resultó que la cantidad de limpiezas químicas anuales que los productores realizan en el cafetal (2) no beneficia el desarrollo de la especie arbórea, por lo que idealmente debería aplicarse solo una, o bien, emplear otros productos diferentes al glifosato.

Conclusiones

El cedro presentó buen crecimiento en asocio con el cultivo de café en la zona de Pérez Zeledón, a pesar de recibir poco manejo silvicultural.

El crecimiento de la especie fue afectado negativamente por el incremento de las siguientes variables: la altitud sobre el nivel del mar, la cantidad de árboles por hectárea, el contenido de cobre en el suelo y las limpiezas químicas anuales. El aumento del pH y la relación Ca Mg⁻¹ en el suelo permitieron un mayor crecimiento de la especie.

Con los modelos obtenidos fue posible predecir el volumen total (m³) de la especie utilizando variables como el pH del suelo, la abundancia de árboles por hectárea y la altitud del sitio.

Agradecimientos

Se agradece a los colegas de CoopeAgri R.L. y del INISEFOR-UNA, por el apoyo logístico y financiero para la realización de esta investigación. A los caficultores que participaron en el estudio, por su anuencia a colaborar en la recolección de la información. Al Ph.D. Sergio Molina Murillo de la Universidad Nacional y a los profesionales del Centro de Investigación del Café (CICAFE).

Resumen

El estudio se realizó en sistemas agroforestales (SAF) con café asociado a maderables de cedro amargo (*Cedrela odorata* L.) en el cantón de Pérez Zeledón, provincia de San José, Costa Rica. Se establecieron 39 parcelas temporales de muestreo de 1000 m², con el objetivo de evaluar el efecto de las características biofísicas y de manejo sobre el crecimiento en diámetro (DAP) y altura total (HT) del cedro amargo de los dos a los 17 años de edad. El crecimiento de la especie varió en un rango de 2 a 3 cm año⁻¹ en DAP y 1,6 a 2,2 m año⁻¹ en altura. Las variables biofísicas que influyeron negativamente el crecimiento del cedro fueron el aumento de la altitud sobre el nivel del mar (msnm), una mayor abundancia de árboles por hectárea, el aumento del contenido de cobre en el suelo y una mayor frecuencia de limpiezas químicas anuales. Se obtuvieron modelos de regresión múltiple que explicaron el crecimiento de la especie (VT árb⁻¹ e IMA VT árb⁻¹) a partir de variables biofísicas. La abundancia de árboles de cedro por hectárea óptima correspondió a un rango entre 72 a 96 árb ha⁻¹ desde el establecimiento hasta el ciclo final. La especie se desarrolló mejor a una altitud entre 608 y 707 msnm, en pendientes inferiores a 21 % y suelos con contenidos menores a 3,6 mg l⁻¹ de Cu, 165 mg l⁻¹ de Fe, pH mayor de 4,9 y una relación Ca Mg⁻¹ mayor a 4,1.

Palabras clave: *Cedrela odorata*, sistemas agroforestales con café, manejo, variables biofísicas, crecimiento.

Referencias

- Alvarado, A. (2012). Nutrición y fertilización de *Cedrela odorata*. En Alvarado, A. y Raigosa, J. (eds.). Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales (pp. 209-215). San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Arteaga, L. (2006). Crecimiento y herbivoría de plántulas de *Cedrela odorata* (Meliaceae) comparando un área abierta y otras bajo regeneración natural en la Estación Biológica Tunquin. *Ecología en Bolivia* 41(2), 130-137.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D. y Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry System*, 38(1-3), 139-164.
- Bertsch, F. (1995). La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Bolaños, R., Watson, V. y Tosi, J. (2005). Mapa ecológico de Costa Rica (Zonas de Vida), según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L.R. Holdridge, Escala 1:750 000. San José, Costa Rica: Centro Científico Tropical.
- Bolliger, A., Magrid, T., Amado, T., Neto, F., Ribeiro, M., Calegari, A., Ralisch, R. & Neergaard, A. (2006). Taking Stock of the Brazilian "zero-till revolution": a review of landmark research and farmers' practice. *Advances in Agronomy* 91, 47-110.

- Briceño, A. (1997). Aproximación hacia un manejo integrado del barrenador de las meliáceas, *Hypsipyla grandella* Zeller. *Revista Forestal Venezolana* 4 (1), 27-23.
- Burzyuski, M. & Klobus, G. (2004). Changes of photosynthetic parameters in cucumber leaves under Cu, Cd and Pb stress. *Photosynthetica* 42, 505-510.
- Cabanettes, A., Auclair, D. & Imam, W. (1999). Diameter and height growth curves for widely spaced trees in European agroforestry. *Agroforestry Systems* 43, 169-181.
- Calixto, C., López, M., Equihua, A., Lira, D. y Cetina, V. (2015). Crecimiento de *Cedrela odorata* e incidencia de *Hypsipyla grandella* en respuesta al manejo nutricional. *BOSQUE* 36(2), 265-273. DOI: 10.4067/S0717-92002015000200012
- Castaing, A. (1982). Algunos factores edáficos y dasométricos relacionados con el crecimiento y comportamiento de *Cedrela odorata* L. (Tesis de maestría). Programa conjunto UCR-CATIE. Cartago, Costa Rica.
- Cintron, B. (1990). *Cedrela odorata* L. En: Russell, B. & Barbara, H. (eds). *Silvics of North America. Hardwoods. Agricultural Handbook*. (pp 250-257). Washington, Costa Rica: Department of Agriculture, Forest Service.
- Detlefsen, G., Marmillod, D., Scheelje, M. e Ibrahim, M. (2012). Protocolo para la instalación de parcelas permanentes de medición de la producción maderable en sistemas agroforestales de Centroamérica. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Drechsel, P. & Zech, W. (1991). Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: A tabular review. *Plant and soil* 131(1), 29-46.
- Dzib, B. (2003). Manejo, secuestro de carbono e ingresos de tres especies forestales de sombra en cafetales de tres regiones contrastantes de Costa Rica. (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica. 58-62 p.
- Fang, Z. & Bailey, R. L. (1999). Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in Southern China. *Forest Science* 45(1), 85-100.
- Flores, E. y Obando, G. (2003). Árboles del trópico húmedo: Importancia socioeconómica. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Ford, L. (1979). An estimate of the yield of *Cedrela odorata* L. (Syn. *C. mexicana* Roem) grown in association with coffee. *Agroforestry systems in Latin America*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Galán, R., De los Santos, H. y Valdez, J. (2008). Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosque* 14(2), 65-82.
- Hernández, O., Beer, J. y Von Planten, H. (1997). Rendimiento de café (*Coffea arabica* cv *Caturra*), producción de madera (*Cordia alliodora*) y análisis financieros de plantaciones con diferentes densidades de sombra en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 4, 8-13.
- Herrera, Z. y Lanuza, B. (1997). Especies para reforestación en Nicaragua. Nicaragua: Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARENA).
- ICAPE (Instituto Costarricense del Café de Costa Rica). (2015). Costos de Producción Agrícola de Café Fruta Cosecha 2014-2015. Fincas de 26 a 34 Und.400L/ha. San José, Costa Rica: Autor.
- INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos). (2015). VI Censo Nacional Agropecuario. San José, Costa Rica: Autor.
- Jiang, W., Liu, D. & Liu, X. (2001). Effects of copper on root growth, cell division, and nucleolus of *Zea mays*. *Biology Plant* 44, 105-109
- Jiménez, G. (2012). Producción de madera y almacenamiento de carbono en cafetales con cedro (*Cedrela odorata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*) en Honduras. (Tesis de maestría). CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Jiménez, Q., Rojas, F., Rojas, V. y Rodríguez, L. (2002). Árboles maderables de Costa Rica: Ecología y Silvicultura. Heredia, Costa Rica: Instituto Nacional de Biodiversidad (INBio).
- Johal, G. y Huber, D. (2009). Glyphosate effects on diseases of plants. *European Journal of Agronomy* 31, 144-152.
- Kasim, W. A. (2006). Changes induced by copper and cadmium stress in the anatomy and grain yield of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Int. J. Agriculture and Biology* 8, 123-128.
- Lamb, A. (1968). *Cedrela odorata*, fast growing timber trees of the lowland tropics No.2. Oxford, Reino Unido: Commonwealth Forestry Institute.
- Liu, D., Jiang, W., Meng, Q., Zou, J., Gu, J. & Zeng, M. (2009). Cytogenetical and ultrastructural effects of copper on root meristem cells of *Allium sativum* L. *Biocell* 33, 25-32.
- Lojan, L. (1966). Una fórmula para estimar volúmenes en un bosque tropical húmedo. *Revista Turrialba* 16(1), 67-72.
- Lux, M. y Von Platen, H. (1995). Consumo y comercialización de madera en baja Talamanca, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Malimbwi, R. (1978). *Cedrela* species international provenance trial (CFI at Kwamsambia, Tanzania). Oxford, Reino Unido: Commonwealth Forestry Institute.
- Martínez, H. (2015). Especies para sistemas agroforestales: condiciones para su cultivo. Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono. Recuperado de: http://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/fomento_de_la_reforestacion_comercial_para_la_mejora_y_conservacion_de_las_reservas_de_carbono.pdf
- Molina, E. y Meléndez, G. (2002). Tabla de interpretación de análisis de suelos. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Montenegro, J., Ramírez, G. y Blanco, H. (1997). Evaluación del establecimiento y crecimiento inicial de seis especies maderables asociadas con café. *Agroforestería en las Américas* 4(13), 14-20.
- Moret, A., Jerez, M. y Mora, A. (1998). Determinación de ecuaciones de volumen para poblaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la unidad experimental de la reserva forestal Caparo, estado Barinas-Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 42(1), 41-50.
- Orozco, L., López, A., Rojas, M. y Somarriba, E. (2005). Tipologías de fincas cafetaleras con sombra de maderables en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Agroforestería de las Américas* (43), 86-91.

- Osorio, E. (1983). Volumen y conicidad del Cedro (*Cedrela odorata*). Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Pasternak, T., Rudas, V., Potters, G. & Jansen, M. (2005). Morphogenic effects of abiotic stress: reorientation of growth in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Environmental and Experimental Botany* 53, 299-314.
- Pérez, J., Eigenbrode, S., Hilje, L., Tripepi, R., Aguilar, M. & Mesén, F. (2010). Leaves from grafted Meliaceae species affect survival and performance of *Hypsipyla grandella*; (Zeller) (Lepidoptera: Pyralidae) larvae. *Journal of Pest Science* 83(2), 95-104.
- Price, C. & Carell, E. (1964) Control by iron of chlorophyll formation and growth in *Euglena gracilis*. *Plant Physiology* 39, 862-86
- Prodan, M., Rolan, P., Cox, F. y Real, P. (1997). *Mensura forestal. Serie de investigación y educación en desarrollo sostenible.* San José, Costa Rica: Agroamérica.
- Ramírez, D. (2014). Estimación de la absorción de nutrimentos de cedro amargo (*Cedrela odorata* L.) como mecanismo de diagnóstico para mejorar las recomendaciones de manejo sostenible de la especie en plantaciones de pequeños agricultores del Programa Forestal de CoopeAgri R.L, Costa Rica. (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, San José. 1-91.
- Salgado, J. (2015). Producción de madera en sistemas agroforestales con café. En Detlefsen, G. y Somarriba, E (Eds.). *Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica.* (pp. 145-158). Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Somarriba, E. (2004). ¿Cómo evaluar y mejorar el dosel de sombra en cacaotales? *Agroforestería en las Américas* (41-42), 120-128.
- Somarriba, E., Valdivieso, R., Vásquez, W. & Galloway, G. (2001). Survival, growth, timber productivity and site index of *Cordia alliodora* in forestry and agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 51, 111-118.
- Suatunce, P., Díaz, G. y García, L. (2009). Evaluación de cuatro especies forestales asociadas con café (*Coffea Arabica* L.) y en monocultivo en el litoral ecuatoriano. *Ciencia y Tecnología* 2(2), 29-34.
- Villareal, A., Carrero, G., Arends, E., Sánchez, D. y Escalante, E. (2006). Evaluación de rendimientos y rentabilidad de los componentes asociados *Swietenia macrophylla* (Caoba), *Cedrela odorata* (Cedro) y *Carica papaya* (Lechosa), establecidos en ensayos agroforestales en la Finca ULA, Estación Experimental Caparo, Edo. Barinas, Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana* 39, 85-104.
- Virginio Filho, E. (2009). ¿Cómo podemos mejorar la finca cafetalera en la cuenca? Managua, Nicaragua: CATIE.
- Virginio Filho, E. y Hagggar, J. (2005). ¿Cómo analizo y manejo los árboles en mi cafetal? Guía para evaluación con productores y productoras. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Virginio Filho, E., Arrieta, S., Rapidel, B. y Ropusar, O. (2015). Diseño Piloto de Sistemas Agroforestales en el ámbito de la NAMA-CAFÉ Costa Rica. En: *Presentación de Informe de avance de NAMA-CAFÉ Costa Rica.* Pérez Zeledón, San José.
- Whitmore, J. (1978). *Cedrela* provenance trial in Puerto Rico and St. Croix; establishment phase. Puerto Rico: Institute of Tropical Forestry.
- Wimmer, R. y Lucas, B. (1997). Comparing mechanical properties of secondary wall and cell corner middle lamella in spruce wood. *IAWA Journal* 18, 77-78.