

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

**Crecimiento y aporte financiero del cedro (*Cedrela odorata*  
L.) en sistemas agroforestales con café en Pérez Zeledón,  
Costa Rica**

Tesis con informe final en artículo científico para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en  
Ciencias Forestales con énfasis en Comercio de Productos Forestales

Presentado por:

Mariela González Rojas

Heredia, Costa Rica

Agosto, 2017

Acta de aprobación

Crecimiento y aporte financiero del cedro (*Cedrela odorata L.*) en sistemas agroforestales con café en Pérez Zeledón, Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería en Ciencias Forestales con énfasis en Comercio de Productos Forestales.

Tribunal Examinador:

---

M.Sc. Tomás Marino Herrera  
**Decano, FCTM**

---

M.Sc. Rafael Murillo Cruz  
**Director del trabajo**

---

Ph.D. Sergio Molina Murillo  
**Lector del trabajo**

---

M.Sc. Mario Campos Ugalde  
**En representación de la Dirección EDECA**

---

Bach. Mariela González Rojas  
**Postulante**

## **Crecimiento y aporte financiero del cedro (*Cedrela odorata* L.) en sistemas agroforestales con café en Pérez Zeledón, Costa Rica**

### **Resumen general**

El estudio se realizó en fincas cafetaleras de Pérez Zeledón, en la provincia de San José, Costa Rica, donde se han establecido árboles de cedro (*Cedrela odorata* L.) en combinación con el cultivo y forman parte del Programa de Pago por Servicios Ambientales (PPSA) tramitado por la Cooperativa CoopeAgri R.L. El objetivo del estudio fue determinar cuáles son las características biofísicas y/o de manejo del sistema agroforestal (SAF) que ejercen mayor influencia sobre el crecimiento del cedro y el aporte financiero del cedro al SAF. Los datos se obtuvieron en parcelas temporales de muestreo de 1000 m<sup>2</sup>, con árboles entre dos y 17 años de edad (no se encontraron árboles con edad entre 13 y 15 años). Se midió la altura total (HT), altura comercial (HC) y diámetro (DAP) de los árboles de cedro y se recolectó información biofísica y socioeconómica en los SAF evaluados. El crecimiento de la especie varió en un rango de 2 a 3 cm año<sup>-1</sup> en DAP y 1,6 a 2,2 m año<sup>-1</sup> en altura total. Las variables biofísicas que influyeron negativamente en 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 explican el crecimiento de la especie ( $VT_{\text{árb}}^{-1}$  e  $IMA_{VT_{\text{árb}}^{-1}}$ ) a partir de variables biofísicas. La abundancia óptima de árboles de cedro por hectárea correspondió a un rango entre 72 a 96 árboles por hectárea (árb ha<sup>-1</sup>) 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<sup>-1</sup> de Cu y 165 mg L<sup>-1</sup> de Fe, pH mayor de 4,9 y una relación Ca Mg<sup>-1</sup> mayor a 4,1. Por otro lado, los modelos de predicción del volumen comercial (m<sup>3</sup> árb<sup>-1</sup>) determinados para la zona de estudio, predijeron más del 90 % de la variabilidad en función del DAP y la HC y en un 79 % de la variabilidad utilizando la edad. La producción de café promedio de los sitios muestreados fue de 26 fanegas (fan) ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. El modelo de predicción del volumen comercial estimado para la zona en función del DAP promedio a los 17 años de edad (43,3 cm) determinó una producción de 1,047 m<sup>3</sup> árb<sup>-1</sup> (92,134 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) de madera en pie, lo cual representó un aporte financiero de 81 % de los ingresos netos en el período de análisis. El SAF café-cedro generó un VAN de ₡ 8 198 601,50 ha<sup>-1</sup>, una TIR de 16 % y una relación B/C de 1,34.

**Palabras clave:** variables biofísicas, manejo de fincas, modelos de crecimiento forestal, rentabilidad.

## Growth and financial contribution of cedar (*Cedrela odorata* L.) in agroforestry systems with coffee in Pérez Zeledón, Costa Rica

### General Abstract

The study was carried out on coffee farms in Pérez Zeledón where cedar trees (*Cedrela odorata* L.) have been established in combination with the crop and are part of the Program for Payment for Environmental Services processed by Cooperative CoopeAgri R.L. The objective of the study was to determine the biophysical and/or management characteristics of the agroforestry (AF) system that influence the growth of cedar; and the financial contribution of the cedar to the system. The data were obtained in sampling plots of 1000 m<sup>2</sup>, with trees between two and 17 years of age (no trees between 13 and 15 years old were found). The total height, commercial height and diameter (Dbh) of the cedar trees were measured and biophysical and socioeconomic information was obtained in the evaluated farms. The growth of the species varied in a range of 2 to 3 cm year<sup>-1</sup> in Dbh and 1.6 to 2.2 m year<sup>-1</sup> in total height. The biophysical variables that negatively influenced cedar growth were increased altitude above sea level, increased tree abundance per hectare, increased copper content in the soil, and increased frequency of annual chemical cleanings. Multiple regression models explaining species growth (total volume per tree and average annual increase per tree) were obtained from biophysical variables. The abundance of cedar trees per optimum hectare corresponded to a range between 72 to 96 tree ha<sup>-1</sup> from the establishment to the final cycle. The species was best developed at an altitude between 608 and 707 meters above sea level, on slopes less than 21% and soils with contents lower than 3.6 mg L<sup>-1</sup> Cu, 165 mg L<sup>-1</sup> Fe, pH higher than 4.9 and a Ca Mg<sup>-1</sup> ratio greater than 4.1. On the other hand, commercial volume prediction models (m<sup>3</sup> tree<sup>-1</sup>) determined for the study area, predicted more than 90% of variability as a function of Dbh and commercial height, and 79% using age. The average coffee production of the sampled sites was 26 fanegas ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. The prediction model of the commercial volume estimated for the area as a function of the average Dbh at 17 years of age (43.3 cm) determined a production of 1,047 m<sup>3</sup> tree<sup>-1</sup> (92,134 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) of standing timber, which represented a financial contribution of 81% of the net income in the analysis period. The coffee-cedar SAF generated a NAV of ₡ 8 198 601.5 a 16 % IRR and a B/C ratio of 1.34.

**Key words:** biophysical variables, management, growth models, profitability.

## **Agradecimientos**

A Dios, por su guía y extraordinaria energía.

A mi familia, por su apoyo incondicional y confianza en todo momento.

A los compañeros del INISEFOR-UNA, por brindarme la oportunidad de trabajar en su equipo y por su valioso apoyo logístico y financiero. En especial al M.Sc. Rafael Murillo Cruz, por su excelente labor como tutor, su apoyo constante y sus consejos tan atinados.

Al personal de CoopeAgri R.L., por su amabilidad, colaboración constante y apoyo técnico y financiero. En especial a los colegas del Departamento Forestal; al Ing. Luis Salazar Salazar, por permitirme realizar este proyecto y darme la oportunidad de iniciar una nueva etapa profesional en la empresa. A los compañeros Luis Diego Zúñiga Vargas y el Ing. Donald Córdoba Aguilar, por el acompañamiento y apoyo logístico.

A los caficultores que me recibieron en sus fincas, por su amabilidad y el tiempo que me brindaron para obtener la información.

Al Ph.D. Elías de Melo Virginio Filho, por su entusiasmo y disposición a colaborar en esta investigación, así como por sus aportes y enseñanzas.

Al Ph.D. Sergio Molina Murillo, por sus aportes al mejoramiento del presente documento.

A profesionales del CICAFFE, por su amabilidad y atención, en especial al Ing. Mainor Rojas y el Ing. Alfredo Garita.

## Índice general

Resumen general .....	iii
General Abstract .....	iv
Agradecimientos.....	1
1. Introducción general .....	4
2. Artículos completos .....	1
2.1. Influencia de factores biofísicos y de manejo en el crecimiento de Cedrela odorata L. en asocio con café en Pérez Zeledón, Costa Rica .....	1
2.2. Aporte financiero de Cedrela odorata L. en sistemas agroforestales con café, Pérez Zeledón, Costa Rica .....	30

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Categorías de manejo para los sistemas agroforestales evaluados en Pérez Zeledón.....	8
Cuadro 2. Análisis químico de los suelos presentes en los sistemas agroforestales de café con maderables de cedro en la zona de Pérez Zeledón .....	15
Cuadro 3. Medidas resumen de las dimensiones de crecimiento en diámetro (dap) y altura total del cedro en cafetales de Pérez Zeledón.....	17
Cuadro 4. Correlación de las variables biofísicas y de manejo con el crecimiento del cedro en fincas cafetaleras, Pérez Zeledón.....	19
Cuadro 5. Modelos de predicción múltiple del volumen total por árbol ( $V_t \text{ árb}^{-1}$ ).....	20
Cuadro 6. Prueba de medias (T) de las variables biofísicas y de manejo que influyen el IMA bajo, medio y alto del $VT \text{ árb}^{-1}$ .....	22
Cuadro 7. Análisis químico de los suelos presentes en los sistemas agroforestales de café con maderables de cedro en la zona de Pérez Zeledón .....	35
Cuadro 8. Crecimiento en DAP, HC y VC del cedro en asocio con café, Pérez Zeledón, Costa Rica .....	37

Cuadro 9. Estructura de costos por hectárea de las actividades de manejo del SAF café-cedro en Pérez Zeledón .....	40
Cuadro 10. Insumos de la estructura de costos del manejo del SAF café-cedro en Pérez Zeledón .....	41
Cuadro 11. Modelos de regresión simple para la predicción del volumen comercial con corteza por árbol de cedro (VCc árb-1) en cafetales de Pérez Zeledón .....	43
Cuadro 12. Costo total anual del SAF café-cedro .....	45
Cuadro 13. Indicadores financieros del SAF café-cedro .....	48

### Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de las parcelas de muestreo en la zona de estudio .....	6
Figura 2. Frecuencia relativa de las parcelas según la abundancia por hectárea del cedro (A), la altitud (msnm) (B), la pendiente (C) y la sombra (D) en los sitios muestreados .....	13
Figura 3. Flujo neto anual del sistema agroforestal .....	47

## 1. Introducción general

En Costa Rica existen 84 133 ha cultivadas con café (INEC, 2015), siendo una de las actividades agrícolas más importantes en cuanto a área total sembrada. Durante la cosecha 2015-2016 el café aportó un 11,5% del Producto Interno Bruto Agrícola (PIB) en el país y representó un 8,9% de la producción total de café en Centroamérica (ICAFFE, 2016).

Actualmente es común encontrar sistemas agroforestales de café (Virginio Filho, Arrieta, Rapidel y Ropusar, 2015), lo cual contribuye a la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático. Además, puede representar una opción atractiva para mejorar la competitividad del producto y generar ingresos adicionales con especies forestales de alto valor comercial como el cedro (*Cedrela odorata*). Esta especie es frecuente en cafetales de Costa Rica (Beer, Muschler, Kass y Somarriba, 1998) y muy común en fincas de Pérez Zeledón, donde también son usuales otras especies como *Terminalia ivorensis* A. Chev., *Terminalia amazonia* J.F. Gmel. y *Eucalyptus spp.* (Orozco, López, Rojas y Somarriba, 2005). En esta zona, La Cooperativa CoopeAgri R.L. ha sido uno de los principales precursores del establecimiento de SAF con café en asocio con maderables de cedro en conjunto con los productores de la región.

Pérez Zeledón cuenta con un área de 12 522 ha de café, que representan un 15 % del área total nacional (ICAFFE, 2015). En la última cosecha esta zona aportó un 15,2 % del total de la producción nacional de café en fruta (INEC, 2015); sin embargo, la inestabilidad en los precios de este producto en las últimas décadas, aunado a otros factores como el ataque de la roya (*Hemileia vastatrix* Berk & Br.), han afectado la productividad de este cultivo, manteniendo una tendencia a disminuir en los últimos años. A nivel nacional, en el período 2013-2014 la producción se redujo 13,31 %, convirtiéndose en una de las cosechas más bajas desde mediados de la década de los 70 y la región de Pérez Zeledón ocupó el primer lugar de importancia en cuanto a esa reducción (ICAFFE, 2014) por el fuerte ataque de la roya favorecido por las variaciones en los patrones de las lluvias y la edad avanzada de muchos cafetales.

La diversificación en las fincas cafetaleras con especies de árboles de alto valor comercial como el cedro le puede permitir al productor mejorar sus ingresos en el mediano y largo plazo. No obstante, existe gran variabilidad en el crecimiento y la productividad comercial de los árboles de cedro, de acuerdo al manejo

que se le dé a estos (Petit y Montagnini, 2006) y al sistema en general, además de las variaciones en las condiciones edáficas, topográficas y altitudinales del sitio.

En CoopeAgri R.L. se considera que la utilización del cedro asociado a plantaciones de café es una opción para mejorar los ingresos de los caficultores. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue relacionar el crecimiento del cedro con las características biofísicas y de manejo en fincas cafetaleras de la zona de Pérez Zeledón y determinar el aporte financiero de la especie en este tipo de sistema agroforestal.

Para cumplir con el objetivo planteado, se desarrollaron dos artículos: en el primero se analizó la correlación de variables biofísicas y de manejo con el crecimiento del cedro en asocio con el cultivo de café; en el segundo se determinó la rentabilidad del sistema y el aporte financiero de la especie. Cada artículo está elaborado con base en las normas establecidas para la publicación de artículos científicos en la Revista Forestal Mesoamericana Kurú.

## 2. Artículos completos

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

Mariela González Rojas

#### 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 m<sup>2</sup>, 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<sup>-1</sup> en DAP y 1,6 a 2,2 m año<sup>-1</sup> 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 ( $VT_{\text{árb-1}}$  e  $IMA_{VT_{\text{árb-1}}}$ ) a partir de variables biofísicas. La abundancia de árboles de cedro por hectárea óptima correspondió a un rango entre 72 a 96 árb ha<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> de Cu, 165 mg L<sup>-1</sup> de Fe, pH mayor de 4,9 y una relación Ca Mg<sup>-1</sup> mayor a 4,1.

**Palabras clave:** SAF café-cedro, suelo, rango altitudinal, abundancia, modelos de crecimiento.

## **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 m<sup>2</sup>, 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<sup>-1</sup> in Dbh and 1.6 to 2.2 m year<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> Cu, 165 mg L<sup>-1</sup> of Fe, pH greater than 4.9 Mg and Ca<sup>-1</sup> ratio greater than 4.1.

**Key words:** agroforestry systems, altitude, soil, abundance management, growth models.

## 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*) (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*), 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 Platen, 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 (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<sup>-1</sup> y un 47 % de cobertura de sombra, lo cual permitió obtener entre 28-32 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> y 1,43 m

año<sup>-1</sup>) 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 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 km<sup>2</sup>; su área cafetalera representa un 6,9 % del área total del cantón y un 15 % del área cafetalera total nacional (12 522,8 ha) (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [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.

Con la base de datos y mediante una visita de campo previa, se incluyeron solo aquellos sitios con un lote de café representativo, es decir, donde se ubicara cedro con edad uniforme. En total se establecieron 39 parcelas temporales de forma rectangular con un tamaño de 1000 m<sup>2</sup> (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.

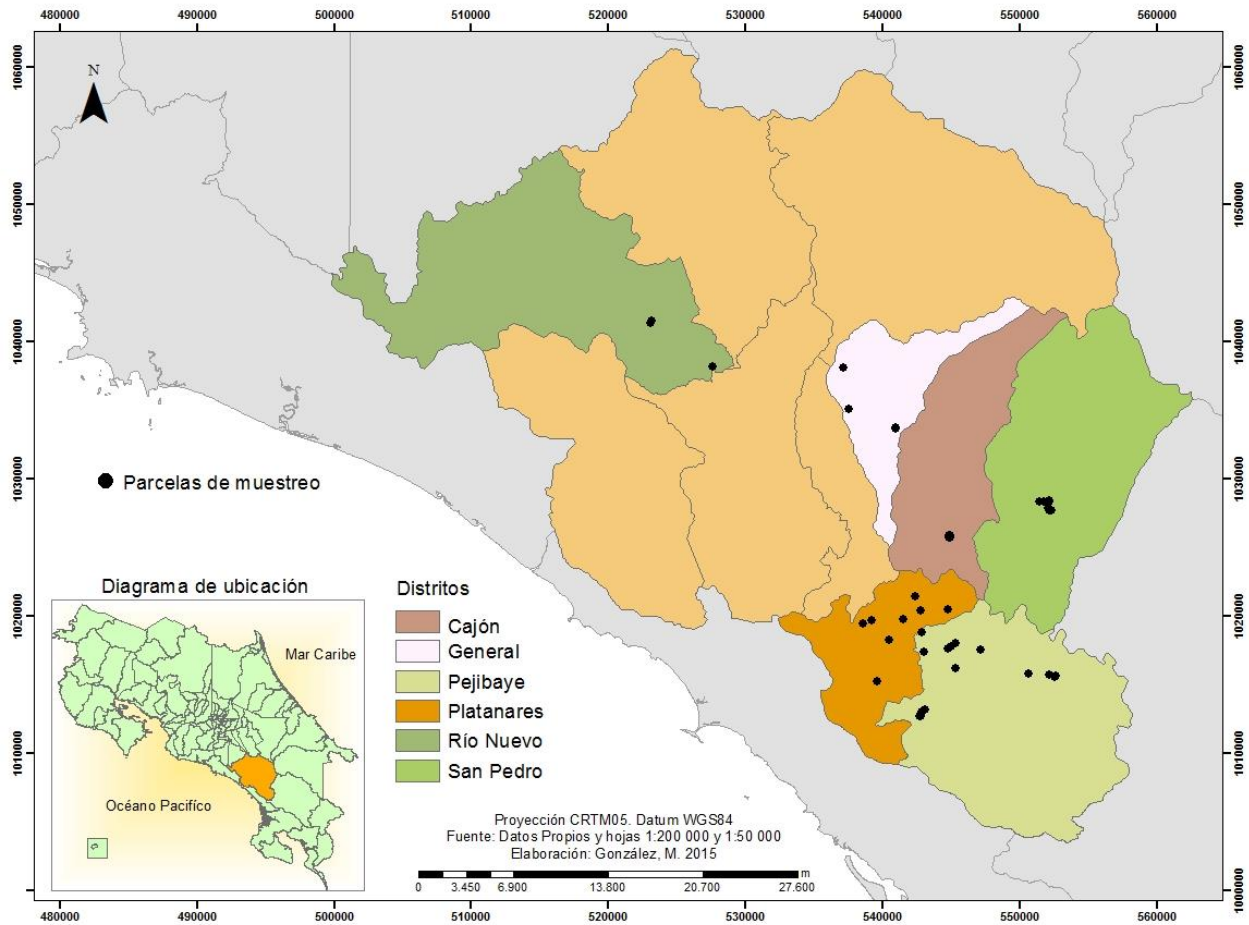


Figura 1. Ubicación de las parcelas de muestreo en la zona de estudio

Figure 1. Location of the samples in the study zone

### VARIABLES 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. En cada parcela se midió el porcentaje de sombra con un densímetro forestal esférico (Model-C®) en seis puntos de la parcela distribuidos sistemáticamente. Esta medición 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 obtenidos en la parcela determinó el porcentaje de sombra.

En los mismos puntos donde se midió la sombra (seis puntos), se colectaron submuestras de suelo a 15 cm de profundidad para formar una muestra y en tres puntos se tomó una muestra de suelo con un cilindro para estimar la densidad aparente en los primeros 10 cm de profundidad. 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 ( $\text{Ca Mg}^{-1}$ ), relación calcio potasio ( $\text{Ca K}^{-1}$ ), relación magnesio potasio ( $\text{Mg K}^{-1}$ ) y relación calcio + magnesio respecto al potasio ( $(\text{Ca}+\text{Mg}) \text{K}^{-1}$ ).

En cada unidad de muestreo 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 en las unidades de muestreo se determinó mediante consulta a los propietarios de las fincas, considerando las variables que se presentan en el cuadro 1. 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 donde se evaluó la sombra y se colectó cada submuestra de suelo, para un total de 60 plantas de café evaluadas por parcela.

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	Categorías de manejo		
	Bajo	Medio	Alto
Cantidad de fertilizante aplicado (fórmula completa 18-5-15-6-0.2) <sup>1</sup>	<7 sacos ha año <sup>-1</sup>	7-14 sacos ha año <sup>-1</sup>	> 14 sacos ha año <sup>-1</sup>
Conocimiento sobre qué fertilizante aplicar	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 <sup>-1</sup>	0-1	2	≥3
Limpieza química de hierbas competidoras por ha año <sup>-1</sup>	0-1	2	≥3
Estado de las plantas de café <sup>2</sup>	> 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	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 enfermedades del café (fungicidas) <sup>3</sup>	0-1 aplicación ha año <sup>-1</sup>	2 aplicaciones ha año <sup>-1</sup>	≥3 aplicaciones ha año <sup>-1</sup>
<p>1 saco=45 kg  <sup>1</sup>Garita, A. (2015). Ing. Agrónomo, Centro de Investigaciones en Café. Comunicación personal, 2015.  <sup>2</sup>Virginio Filho (2009).  <sup>3</sup>Salazar, L. (2015). Ing Forestal, Coopeagri R.L. Comunicación personal, 2015.</p>			

## **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= Volumen total (m<sup>3</sup>).

DAP= Diámetro a 1,30 m de la base del árbol (cm).

HT= 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= área basal (m<sup>2</sup>).

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

## **Análisis estadístico**

Para iniciar el estudio de las variables que podrían tener un efecto importante sobre el crecimiento del cedro, se realizó un análisis de correlación entre las variables de crecimiento y las variables biofísicas y de manejo. Se utilizó el incremento medio anual (IMA) de las variables de crecimiento DAP (diámetro a la altura de pecho en cm), HT (altura total en m),  $VT_c$  (volumen total con corteza en  $m^3$ ) y AB (área basal en  $m^2$ ), pues los datos están influenciados por las diferentes edades. Para el área basal (AB) y el volumen total, se empleó el promedio por árbol. Además, según los valores de IMA del  $VT_{\text{árb}}^{-1}$ , se hizo una clasificación de bajo, medio y alto, donde se analizó cada agrupación de variables biofísicas y de manejo con el fin de determinar rangos óptimos en donde se desarrolla la especie. Esto mediante una prueba T-student con una probabilidad al 5 % de error y considerando las variables con una correlación alta ( $r \geq 0,4$ ).

Se construyeron modelos de predicción del  $Vt_{\text{árb}}^{-1}$ , utilizando variables biofísicas y de manejo. En este caso se tomó en cuenta la metodología de ajuste por mínimos cuadrados y paso a paso. La elección de los modelos consideró como criterios de ajuste el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el  $R^2$  ajustado, el cuadrado medio del error (CME) y el error estándar (E.E). 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. Para todo lo anterior, se utilizó el *software* Stat Graphics versión 16.1.18.

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<sup>-1</sup>. 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 árb ha<sup>-1</sup> en los sitios muestreados. Frecuentemente se ubicaban en un rango de abundancia de 40 a 118 árb ha<sup>-1</sup> (36 % de parcelas) y de 195 a 272 árb ha<sup>-1</sup> (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 árb ha<sup>-1</sup>. Estos autores determinaron que las fincas pequeñas (17,7 ha) estaban dominadas por *Terminalia ivorensis* y *T. amazonia* sembradas a altas densidades y el cedro predominaba en fincas grandes (80 ha) en densidades adecuadas (68 árb ha<sup>-1</sup>).

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 ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, 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<sup>-1</sup>. La fertilización se aplicó al cultivo del café principalmente, siendo en promedio 18 sacos ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (810 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) de fertilizante de la fórmula completa 18-5-15-6 distribuidos en tres aplicaciones, más una aplicación de

fertilizante nitrogenado ( $73 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), lo cual se considera una fertilización alta. Solo el 22 % de caficultores empleó una fertilización menor a  $14 \text{ sacos ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Ramírez (2014) recomienda fertilizar el cedro asociado con café en la zona de Pérez Zeledón aplicando alrededor de  $100 \text{ g árb}^{-1}$  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  $\text{K}_2\text{O}$ .

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  $26 \text{ fanegas ha}^{-1}$ , siendo de baja a media de acuerdo con el promedio general nacional de producción de café ( $26 \text{ a } 34 \text{ fan ha}^{-1}$ ). Según esta producción, lo recomendado es aplicar una fertilización con fórmula completa de  $629 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Instituto Nacional del Café [ICAFFE], 2015).

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 % ( $\pm 15\%$ ), sin embargo, donde solo se encontró el cedro como sombra del café, la sombra promedio fue de 54 % ( $\pm 33\%$ ). 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; Portuguez, 2012). 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 %.

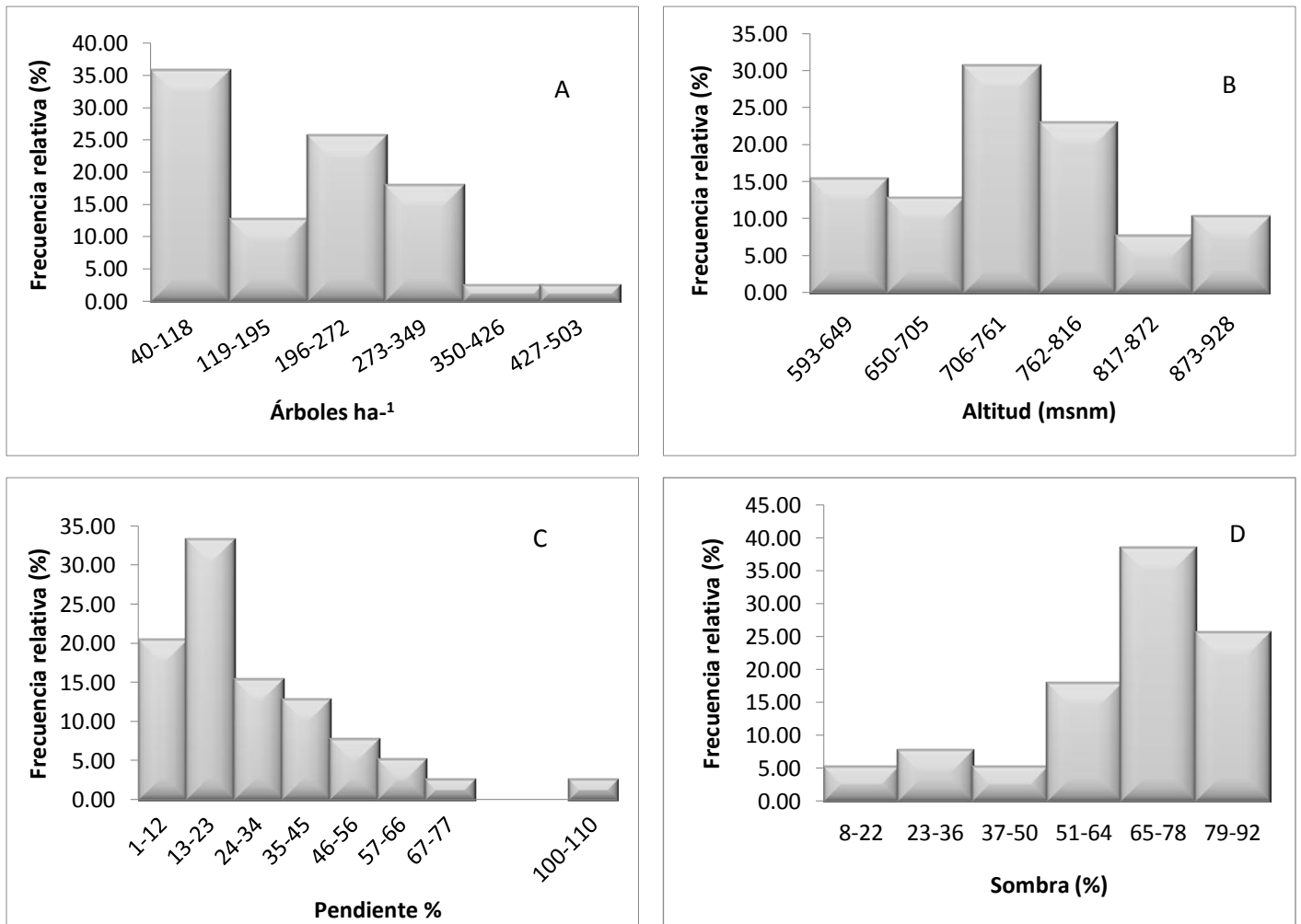


Figura 2. Frecuencia relativa de las parcelas según la abundancia por hectárea del cedro (A), la altitud (msnm) (B), la pendiente (C) y la sombra (D) en los sitios muestreados

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

En estos sistemas agroforestales se encontraron suelos con pH menores a 5 (69 % de los sitios) y otros entre 5 y 5,5 (31 %). Un 51 % de los sitios presentó contenidos altos de acidez de  $2,29 \text{ cmol L}^{-1}$  ( $\pm 2,28 \text{ cmol L}^{-1}$ ) en promedio, lo que significa una saturación de acidez de 31,6 % ( $\pm 23,3$  %). Consecuentemente, existen bajos contenidos de calcio y fósforo ( $<4 \text{ cmol L}^{-1}$  para Ca y  $<12 \text{ mg L}^{-1}$  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 medio (Molina y Meléndez, 2002). Dreschel y Zech (1991) señalan que el orden de nutrimentos 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  $0,94 \text{ g cm}^{-3}$  (cuadro 2), lo cual le favorece a la especie, ya que se desarrolla bien en suelos con una densidad aparente inferior a  $1,15 \text{ g cm}^{-3}$  (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.

Cuadro 2. Análisis químico de los suelos presentes en los sistemas agroforestales de café con maderables de cedro en la zona de Pérez Zeledón

Table 2. Chemical analysis of soil present in coffee agroforestry systems with cedar in Pérez Zeledón

Variable	Unidades	Valor Mín	Valor Max	Promedio	D.E (±)
pH		4,1	5,5	4,8	0,38
Ca	(cmol L <sup>-1</sup> )	0,3	12,6	3,9	2,77
Mg	(cmol L <sup>-1</sup> )	0,2	3,2	1	0,75
K	(cmol L <sup>-1</sup> )	0,1	1,7	0,3	0,31
Acidez	(cmol L <sup>-1</sup> )	0,1	12,5	2,2	2,28
CICE	(cmol L <sup>-1</sup> )	2,9	18,3	7,5	3,98
Sat.Acid.	%	1,2	87,2	31,6	23,3
P	(mg L <sup>-1</sup> )	0,2	39	8,6	6,91
Fe	(mg L <sup>-1</sup> )	51	592	228,3	141,5
Cu	(mg L <sup>-1</sup> )	1	16	5,8	3,28
Zn	(mg L <sup>-1</sup> )	0,3	12	2,7	2,38
Mn	(mg L <sup>-1</sup> )	5	147	33	32,29
B	(mg L <sup>-1</sup> )	0	9	0,2	1,42
Sat. K	%	1,7	21,3	4,6	3,48
Sat. Ca	%	5,6	83,2	50,7	19,18
Sat. Mg	%	3,6	28,7	13,1	6,02
Ca Mg <sup>-1</sup>	(cmol L <sup>-1</sup> )	1,2	8,3	4,2	1,76
Mg K <sup>-1</sup>	(cmol L <sup>-1</sup> )	0,9	10,4	3,6	2,08
Ca+(Mg K <sup>-1</sup> )	(cmol L <sup>-1</sup> )	3,6	41,8	18,3	10,17
Ca K <sup>-1</sup>	(cmol L <sup>-1</sup> )	2	36,6	14,7	8,66
D.A	g cm <sup>-3</sup>	0,55	0,94	0,81	0,09
D.E=Desviación estándar de la media D.A=Densidad aparente del suelo CICE= Capacidad de intercambio catiónico efectiva Sat.= Saturación					

### 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 hubieron 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 la especie es de 30 a 40 m a los 40 años de edad, no obstante, Jiménez (2012), Rojas y Rodríguez (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  $12,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  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  $\text{cm año}^{-1}$  en DAP y 1,6 a 2,2  $\text{m año}^{-1}$  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  $\text{cm año}^{-1}$  en DAP y 2  $\text{m año}^{-1}$  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  $\text{cm año}^{-1}$  en dap, lo cual coincide con el crecimiento de la especie en este estudio.

Cuadro 3. Medidas resumen de las dimensiones de crecimiento en diámetro (dap) y altura total del cedro en cafetales de Pérez Zeledón

Table 3. Summary measures of the dimensions of growth in diameter (Dbh) and total height of cedar in coffee plantations of Pérez Zeledón.

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

### Variables biofísicas y de manejo que influyen en 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  $\text{Ca Mg}^{-1}$  y la cantidad de limpiezas químicas anuales (cuadro 5). 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 *Cedrela odorata* 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.

Los suelos del estudio presentaron contenidos de cobre óptimos (Molina y Meléndez, 2002), pero se determinó que a mayor cantidad de cobre ( $\text{mg L}^{-1}$ ), el IMA en el  $Vt \text{ arb}^{-1}$  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  $\text{Ca Mg}^{-1}$  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 *et al.* (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.

Cuadro 4. Correlación de las variables biofísicas y de manejo con el crecimiento del cedro en fincas cafetaleras, Pérez Zeledón

Table 4. Correlation of biophysical and management variables with cedar growth in coffee farms, Pérez Zeledón.

Variable	Correlación	Probabilidad
Abundancia del cedro (árb ha <sup>-1</sup> )	-0,49**	0,00002
	-0,64*	0,00001
Altitud (msnm)	-0,59*	0,00007
Sombra %	0,42*	0,01
Cu (mg L <sup>-1</sup> )	-0,46*	0,029
pH	0,52*	0,0006
Ca Mg <sup>-1</sup>	0,40*	0,01
CQ	-0,42*	0,01
**Variable de crecimiento IMA DAP		
*Variable de crecimiento IMA VT árb <sup>-1</sup>		
CQ: Cantidad de limpiezas químicas anuales		

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<sup>-1</sup> se incluyeron en el modelo tres, sin embargo, a pesar de que este modelo tuvo uno de los R<sup>2</sup> más altos (83 %), la probabilidad de la relación Ca Mg<sup>-1</sup> 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  $Vt \text{ \acute{a}rb}^{-1}$  de la especie con el  $R^2$  m\u00e1s alto (84 %), el cual integr\u00f3 como variables predictoras la edad, la altitud y el pH (cuadro 6). No obstante, el modelo dos, el cual utiliz\u00f3 como variable predictora la altitud del terreno, present\u00f3 menor diferencia agregada ( $0,89 \text{ m}^3$ ), sobrestimando en un 3,14 %. De esta forma, los modelos uno y dos fueron los m\u00e1s adecuados para predecir el volumen total por \u00e1rbol de cedro utilizando variables biof\u00edsicas del sitio.

Cuadro 5. Modelos de predicci\u00f3n m\u00faltiple del volumen total por \u00e1rbol ( $Vt \text{ \acute{a}rb}^{-1}$ ).

Table 5. Prediction models for total volume per tree ( $Vt \text{ \acute{a}rb}^{-1}$ ).

Modelo	Ecuaci\u00f3n	Variables	Valor-P	$R^2$ (%)	$R^2$ ajustado (%)	CME	E.E	AIC
1	$Vt \text{ \acute{a}rb}^{-1} = -1,033 + 0,124337*e - 0,00291022*a + 0,617144*p$	e= edad	0,0000	84,12	82,76	0,1819	0,4266	-1,49
		a=altitud	0,0045					
		p= pH	0,0171					
2	$Vt \text{ \acute{a}rb}^{-1} = 1,91423 + 0,152315*e - 0,00326853*a$	e= edad	0,0000	80,95	79,97	0,2011	0,4485	-1,41
		a= altitud	0,0017					
3	$Vt \text{ \acute{a}rb}^{-1} = 1,12751 + 0,144394*e - 0,00262695*a + 0,0885051*b$	e= edad	0,0000	82,67	81,31	0,1877	0,4333	-1,43
		a= altitud	0,0117					
		b= Ca $\text{Mg}^{-1}$	0,0593					
4	$Vt \text{ \acute{a}rb}^{-1} = -2,55856 + 0,135876*e - 0,00191024*d + 0,533795*p$	e= edad	0,0000	80,90	79,40	0,2069	0,4549	-1,38
		d= \u00e1rb $\text{ha}^{-1}$	0,0163					
		p= pH	0,0220					

CME= Cuadrado medio del error  
E.E= Error est\u00e1ndar  
AIC= Criterio de Akaike  
Edad (a\u00f1os), Altitud (msnm).

Por otro lado, al clasificar el IMA del  $VT \text{ \acute{a}rb}^{-1}$  en bajo, medio y alto, se encontraron diferentes par\u00e1metros que revelaron las condiciones biof\u00edsicas y de manejo ideales para el buen desarrollo del cedro en los sitios muestreados (cuadro 7). Los mejores incrementos en esta variable se dieron en un intervalo de abundancia de 72 a 96 \u00e1rb  $\text{ha}^{-1}$  desde el establecimiento hasta el ciclo final, para as\u00ed obtener incrementos

medios anuales en volumen total de  $0,15 \text{ m}^3 \text{ árb}^{-1} \text{ año}^{-1}$  ( $2,55 \text{ m}^3 \text{ árb}^{-1}$  en 17 años). Con más de  $192 \text{ árb ha}^{-1}$ , el IMA del VT  $\text{árb}^{-1}$  se redujo en 91 %.

En Costa Rica se usan densidades que varían de 50 a  $128 \text{ árboles ha}^{-1}$  en SAF (Beer, Muschler, Kass y Somarriba, 1998). Salgado (2015) recomienda finalizar con plantaciones de entre 70 y  $156 \text{ árboles ha}^{-1}$ . 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  $100 \text{ árboles ha}^{-1}$ ; también con una abundancia de  $100 \text{ árboles maderables ha}^{-1}$ , 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  $\text{árb}^{-1}$ , 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  $3,6 \text{ mg L}^{-1}$  de Cu,  $165 \text{ mg L}^{-1}$  de Fe y 25 % en el caso de la saturación de acidez. Contrariamente el pH debe ser mayor de 4,9 y la relación  $\text{Ca Mg}^{-1}$  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.

Cuadro 6. Prueba de medias (T) de las variables biofísicas y de manejo que influyen el IMA bajo, medio y alto del VT  $\text{árb}^{-1}$

Table 6. Mean test (T) of biophysical and management variables that influence the low, medium and high IMA of VT  $\text{árb}^{-1}$

Variable	Grupo 1	Grupo 2	Media(1)	Media(2)	Media(1)-Media(2)	LI(95)	LS(95)	p-valor
<b>Abundancia del cedro (<math>\text{árb ha}^{-1}</math>)</b>	M	A	211	84	127	74	180	0,0004
	A	B	84	277	-193	-279	-107	0,0009
<b>Sombra (%)</b>	M	B	77	56	20	7	34	0,0058
	A	B	73	56	17	4	29	0,0112
<b>Altitud (msnm)</b>	M	A	775	658	117	54	180	0,0012
	A	B	658	794	-136	-205	-67	0,0007
<b>Pendiente (%)</b>	M	A	37	14	22	6	38	0,0117
	A	B	14	32	-18	-31	-4	0,0142
<b>Cu (<math>\text{mg L}^{-1}</math>)</b>	A	B	3,1	6,8	-3,7	-6,7	-0,7	0,0228
<b>Fe (<math>\text{mg L}^{-1}</math>)</b>	A	B	124,4	234,8	-110,3	-209,2	-11,5	0,0319
<b>pH</b>	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
<b>Sat ac (%)</b>	A	B	16,9	39,3	-22,3	-42,5	-2,1	0,0332
<b>Ca <math>\text{Mg}^{-1}</math></b>	A	B	5,7	3,8	1,9	0,1	3,7	0,0436
<b>CQ</b>	M	A	2,6	0,8	1,9	0,8	2,9	0,0025

**A: Crecimiento alto**

**M: Crecimiento medio**

**B: Crecimiento bajo**

**CQ: Cantidad de limpiezas químicas anuales**

**n=9**

## **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  $\text{Ca Mg}^{-1}$  en el suelo permitieron un mayor crecimiento de la especie.

Con los modelos obtenidos fue posible predecir el volumen total ( $\text{m}^3$ ) 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 siempre estar anuentes a colaborar. Al Ph.D.. Elías de Melo Virginio Filho del Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (CATIE) y al Ph.D. Sergio Molina Murillo de la Universidad Nacional. Así mismo, a los profesionales del Centro de Investigación del Café (CICAFE).

## Bibliografía

- 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 Systems*, 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. y 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.
- Burzyński, M. y Klobus, G. (2004). Changes of photosynthetic parameters in cucumber leaves under Cu, Cd and Pb stress. *Photosynthetica*, 42:505-510
- Cabanettes, A., Auclair, D. e 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 nutrimental. *BOSQUE*, 36 (2): 265-273. DOI: 10.4067/S0717-92002015000200012

- Cantillo, E. (1992). Efecto de la fertilización en vivero en el crecimiento de *Alnus jorullensis*, *Cedrela montana* y *Laphoensia speciosa* a diferentes dosis de N.P.K. *Revista Colombiana Forestal*, 3 (5):6-16.
- 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. y Barbara, H. (eds). *Silvics of North America. Hardwoods. Agricultural Handbook*. (pp 250-257). Washington, Costa Rica: Department of Agriculture, Forest Service.
- Cole, T. y Ewel, J. (2006). Allometric equation for four valuable tropical tree species. *Forest Ecology and Management* 229: 351-360.
- 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.
- Distancia, O., De Rios, J., Rueda, A. y Gallejos, A. (2008). *Evaluación del crecimiento de una plantación experimental de 1992 al 2005 de Cedrela odorata, Swietenia macrophylla, Enterolobium cyclocarpum y Tabebuia rosea en la costa de Jalisco*. Jalisco, México: NIFAB-CIRPAC.
- Drechsel, P. y 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.
- Fang, Z. y 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.
- Guevara, G. (1988). *Experiencias colombianas con cedro (Cedrela odorata L.)*. Bogotá: Editorial Gente Nueva.
- 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).
- Holdridge, L. (1976). Ecología de las meliáceas latinoamericanas. En: Whitmore, J.L. (ed). *Studies on the shootborer Hypsipyla grandella Zeller. Misc. Pub. 1*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Instituto Costarricense del Café de Costa Rica (ICAFE). (2015). *Costos de Producción Agrícola de Café Fruta Cosecha 2014-2015. Fincas de 26 a 34 Und.400L/ha*. San José, Costa Rica: Autor.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario*. San José, Costa Rica: Autor.
- Jiang, W., Liu, D. y 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. y 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](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.
- Murillo, O. y Badilla, Y. (2004). *Evaluación de la calidad y estimación del valor en pie de la plantación forestal*. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica
- 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.

- Palomeque, E. (2011). *Evaluación dasométrica de una plantación de cedrela odorata en Mapastepec, Chiapas*. (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Chiapas. México.
- Pasternak, T., Rudas, V., Potters, G. y 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. y 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.
- Portuguez, E. (2012). *Estimación de la extracción de nutrientes por parte aérea en plantaciones de teca (Tectona grandis Linn. f.) de las empresas Panamerican Woods y C&M Investment Group Ltda. en la península de Nicoya, Guanacaste, Costa Rica*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
- Price, C. y 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 nutrientes 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.
- 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. y 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.
- Viera, C. y Pineda, A. (2004). Productividad de lindero maderable de *Cedrela odorata*. *Agronomía Mesoamericana*, 15(1): 85-92.
- 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. y Haggar, 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. (2009). ¿Cómo podemos mejorar la finca cafetalera en la cuenca? Managua, Nicaragua: 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.

## 2.2. Aporte financiero de *Cedrela odorata* L. en sistemas agroforestales con café, Pérez Zeledón, Costa Rica

Mariela González Rojas

### 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 30 parcelas temporales de muestreo de 1000 m<sup>2</sup> en SAF con cedro entre cinco y 17 años de edad. Se evaluó el crecimiento en diámetro (DAP) y la altura comercial (HC) de la especie, así como el manejo del SAF (actividades, insumos y rendimientos) desde el establecimiento hasta el momento de la evaluación, con el objetivo de obtener modelos de predicción del volumen comercial (m<sup>3</sup> árb<sup>-1</sup>) en función de la edad (R<sup>2</sup>=88,7%), el diámetro (DAP) (R<sup>2</sup>=90,3%) y la altura comercial (HC) (R<sup>2</sup>=97,2%) y determinar la rentabilidad del SAF. La producción de café promedio de los sitios muestreados fue de 26 fanegas ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. El modelo de predicción del volumen comercial estimado para la zona en función del DAP promedio (43,3 cm) a los 17 años de edad indicó una producción de 1,04 m<sup>3</sup> árb<sup>-1</sup> (92,13 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) de madera en pie, lo cual representó un aporte financiero de 81 % de los ingresos netos en el período de análisis. El SAF café-cedro generó un VAN de ₡ 8 198 601,5, una TIR de 16 % y una relación B/C de 1,34.

**Palabras clave:** modelo de volumen comercial, producción, rentabilidad.

### Abstract

The study was carried out in agroforestry (AF) systems of coffee associated with timber of bitter cedar (*Cedrela odorata* L.) in the canton of Pérez Zeledón, province of San José, Costa Rica. Thirty temporary sampling plots of 1000 m<sup>2</sup> were established in AF systems with cedar between five and seventeen years of age. Diameter growth (Dbh) and commercial height (HC) of the species were evaluated, also the system management (activities, input and yields) was collected from the establishment to the time of the evaluation, with the objective to obtain a commercial volume prediction models (m<sup>3</sup> tree<sup>-1</sup>) according to age (R<sup>2</sup> = 88.7%), Dbh (R<sup>2</sup> = 90.3%) and commercial height (R<sup>2</sup> = 97.2%) and determinate the system

profitability. The average coffee production of the sampled sites was 26 fanegas ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. The prediction model of the commercial volume estimated for the area as a function of the average DBH at 17 years of age (43.3 cm) determined a production of 1,047 m<sup>3</sup> árb<sup>-1</sup> (92,134 m<sup>3</sup> árb<sup>-1</sup>) of standing timber, which represented a financial contribution of 81% of the net income in the analysis period. The coffee-cedar AF system generated a NAV of ₡ 8 111 720, a 16% IRR and a B/C ratio of 1.34.

**Key words:** commercial volume model, production, profitability.

## Introducción

En muchos países latinoamericanos se ha promovido la diversificación de los cafetales para reducir la dependencia de dicho cultivo como fuente principal de ingresos (Yépez, 2002). Además, considerando la reducción en la oferta de los productos forestales provenientes de los bosques en Costa Rica (Barrantes y Ugalde, 2015), los sistemas agroforestales con café tienen el potencial para producir madera de alta calidad para el mercado local y mundial. En Costa Rica los cafetales cubren 84 133 ha y están en manos de 26 527 productores (INEC, 2015), encontrándose además que el 82 % del área cafetalera se mantiene bajo sombra, principalmente con especies de servicio del género *Inga spp.* (50 %) y en algunos casos con maderables (17 %) (Virginio Filho, Arrieta, Rapidel y Ropusar, 2015).

La región cafetalera de Pérez Zeledón cuenta con un área de 12 522,8 ha de café, que representa un 15 % del área total nacional destinado a este cultivo (INEC, 2015). Orozco, López, Rojas y Somarriba (2005) mencionan que las especies maderables más frecuentes en cafetales de Pérez Zeledón son *Terminalia ivorensis*, *Terminalia amazonia*, *Eucalyptus spp.* y *Cedrela odorata*. En esta zona, CoopeAgri R.L. promueve que los caficultores planten árboles maderables de alto valor comercial como el cedro (*Cedrela odorata*).

La madera de cedro amargo se ha utilizado a lo largo de los años en la elaboración de muebles, decoración de interiores, lanchas, puertas e instrumentos musicales, armarios y cajas para almacenamiento (Timyan, 1996; Arnáez y Flores, 1988). En el mercado nacional, según estadísticas de la Oficina Nacional Forestal (ONF, 2016), el cedro amargo sigue posicionada como una de las maderas con los mejores precios en el mercado, alcanzando en el primer semestre del año 2016 un precio promedio de ₡ 241 la pulgada maderera tica en pie (1 pmt= 2,54 cm x 2,54 cm x 3,36 m).

El ataque del barrenador (*Hypsipyla grandella*) es el mayor problema en la producción de madera de calidad de esta especie, sin embargo, en plantaciones agroforestales se han observado ataques menores (ACEEFN, 1992). Además, las especies forestales crecen más en diámetro y altura en estos sistemas que en plantaciones puras (Somarriba, Valdivieso, Vásquez y Galloway, 2001; Suatunce, Díaz y García, 2009; Hernández, Beer y Von Planten, 1997; Villareal, Carrero, Arends, Sánchez y Escalante, 2006). El

crecimiento de la especie en la plantación y en ausencia del barrenador, bajo buenas condiciones de sitio y luz puede variar entre 1,3 a 1,6 m en altura y, en sistemas agroforestales, entre de 2 a 3 cm año<sup>-1</sup> en diámetro (DAP) y 2 m año<sup>-1</sup> en altura (Herrera y Lanuza, 1997).

En la actualidad se han desarrollado varios modelos de predicción del volumen comercial de la especie en países como Honduras, Colombia y México (Osorio, 1983; PROECEN, 2003; Galán, De los Santos y Valdez, 2008; Jiménez, 2012). En Costa Rica, Ford (1979) desarrolló un modelo de predicción del volumen comercial del cedro, creciendo en SAF de café en San Carlos y en Tabarcia de Puriscal. Otros modelos más generales como el de Lojan (1966) también permiten predecir el volumen de la especie. No obstante, considerando que los modelos de predicción son proyecciones del crecimiento de la especie en las condiciones particulares de cada sitio y este cálculo determina de forma importante la productividad del sistema, uno de los objetivos de este estudio fue establecer un modelo de predicción del volumen comercial del cedro creciendo en los cafetales de Pérez Zeledón.

Por otro lado, la utilización de indicadores financieros como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y la relación beneficio-costos (B/C) son clave para promover este tipo de asociaciones. López y Musálem (2007), al hacer la evaluación financiera de varias especies asociadas con café, encontraron que los SAF con cedro generaron ganancias de tres y cinco veces mayores (US \$ 160 000 vs \$ 50 000 y \$ 160 000 vs \$ 30 000) que la asociación café-nogal (*Juglans pyriformis*) y café-primavera (*Tabebuia donnell-smithii*), y una relación B/C de 3,01. En otro estudio realizado en 0,7 ha de café en Santa Bárbara, Honduras, Viera y Pineda (2004) señalaron que los árboles de cedro representaron un ingreso de 25,7 % con respecto a la producción de café anual.

Los árboles maderables asociados al cultivo de café son una fuente de ingresos adicional para los caficultores y dada la importancia de promover este tipo de sistemas, en este estudio se determinó la producción comercial de cedro con base en un modelo obtenido en la zona de estudio y la rentabilidad del SAF café-cedro a los 17 años de la plantación.

## **Materiales y métodos**

### **Localización y características del área de estudio**

El estudio se llevó a cabo en los distritos de Río Nuevo, General, Platanares, Pejibaye, Cajón y San Pedro del cantón de Pérez Zeledón, provincia San José de Costa Rica. En Pérez Zeledón las lluvias oscilan de los 2 000 a los 4 000 mm anuales y la temperatura promedio anual registrada es entre 18 y 24 °C (Bolaños, Watson y Tosi, 2005). Posee una estación seca de diciembre a marzo y la precipitación máxima mensual se presenta en el mes de setiembre y octubre (Fallas y Valverde, 2005).

El estudio se realizó en una distribución altitudinal entre los 593 msnm y los 928 msnm, en sitios con pendientes entre 1 % y 70 %. El tamaño promedio de las fincas donde se efectuó el estudio fue de 6,24 ha ( $\pm 5,03$  ha). El café se manejó comúnmente a una abundancia de 5000 plantas  $\text{ha}^{-1}$  y la sombra se componía por especies de servicio múltiple (poró (*Erythrina spp*), guaba (*Inga spp*) y/o musáceas) frecuentemente a una abundancia de 625 plantas  $\text{ha}^{-1}$  y maderables de cedro a una abundancia variable entre 61 y 503 árb  $\text{ha}^{-1}$ .

Predominan suelos de origen ultisol, con pH menores a 5, contenidos altos de acidez de 2,29  $\text{cmol L}^{-1}$  ( $\pm 2,28$   $\text{cmol L}^{-1}$ ) en promedio, saturación de acidez de 31,6% ( $\pm 23,3\%$ ), contenidos bajos de calcio ( $< 4$   $\text{cmol L}^{-1}$ ), fósforo ( $< 12$   $\text{mg L}^{-1}$ ) y niveles medios de magnesio, potasio, zinc y boro (Molina y Meléndez, 2002). La densidad aparente del suelo en los sistemas agroforestales oscila en un rango de 0,55 a 0,94  $\text{g cm}^{-3}$ , siendo en promedio de 0,81 ( $\pm 0,09$   $\text{g cm}^{-3}$ ) (cuadro 7).

Cuadro 7. Análisis químico de los suelos presentes en los sistemas agroforestales de café con maderables de cedro en la zona de Pérez Zeledón

Table 7. Chemical analysis of soil present in coffee agroforestry systems with cedar timber in Pérez Zeledón

		Valor Mín	Valor Max	Promedio	D.E (±)
<b>pH</b>		4,1	5,5	4,8	0,38
<b>Ca</b>	(cmol L <sup>-1</sup> )	0,3	12,6	3,9	2,77
<b>Mg</b>	(cmol L <sup>-1</sup> )	0,2	3,2	1	0,75
<b>K</b>	(cmol L <sup>-1</sup> )	0,1	1,7	0,3	0,31
<b>Acidez</b>	(cmol L <sup>-1</sup> )	0,1	12,5	2,2	2,28
<b>CICE</b>	(cmol L <sup>-1</sup> )	2,9	18,3	7,5	3,98
<b>S.A</b>	%	1,2	87,2	31,6	23,3
<b>P</b>	(mg L <sup>-1</sup> )	0,2	39	8,6	6,91
<b>Fe</b>	(mg L <sup>-1</sup> )	51	592	228,3	141,5
<b>Cu</b>	(mg L <sup>-1</sup> )	1	16	5,8	3,28
<b>Zn</b>	(mg L <sup>-1</sup> )	0,3	12	2,7	2,38
<b>Mn</b>	(mg L <sup>-1</sup> )	5	147	33	32,29
<b>B</b>	(mg L <sup>-1</sup> )	0	9	0,2	1,42
<b>Sat.K CICE<sup>-1</sup></b>	%	1,7	21,3	4,6	3,48
<b>Sat. Ca CICE<sup>-1</sup></b>	%	5,6	83,2	50,7	19,18
<b>Sat. Mg CICE<sup>-1</sup></b>	%	3,6	28,7	13,1	6,02
<b>Sat. Al CICE<sup>-1</sup></b>	%	1,2	87,2	31,6	23,3
<b>Relaciones</b>	Ca Mg <sup>-1</sup>	1,2	8,3	4,2	1,76
	Mg K <sup>-1</sup>	0,9	10,4	3,6	2,08
	Ca+(Mg K <sup>-1</sup> )	3,6	41,8	18,3	10,17
	Ca K <sup>-1</sup>	2	36,6	14,7	8,66
<b>D.A</b>	g cm <sup>-3</sup>	0,55	0,94	0,81	0,09
<b>D.E=Desviación estándar de la media</b>					
<b>D.A=Densidad aparente del suelo</b>					
<b>Sat.= Saturación</b>					

### Muestreo

Utilizando las fincas registradas en CoopeAgri R.L. sometidas al Programa de Pago por Servicios Ambientales (PPSA) del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), se construyó una base de datos con las fincas cafetaleras donde se ha establecido cedro en combinación con café con más de cinco años de edad. La edad máxima encontrada fue de 17 años, sin embargo, no se identificaron sistemas con cedro entre 13 y 16 años de edad.

Con la base de datos y mediante una visita previa de campo, se incluyeron solo aquellos sitios con plantaciones de cedro con edad uniforme en un lote de café de al menos una hectárea. El muestreo se llevó a cabo entre mayo y agosto del 2015. En total se realizaron 30 parcelas temporales de forma rectangular con un tamaño de 1 000 m<sup>2</sup> (25 m x 40 m) en 21 fincas. Se establecieron tres unidades de muestreo por edad entre cinco y once años; cuatro unidades a los doce años y cinco a los 17 años de edad.

### **Recolección de datos en la parcela**

A los árboles de cedro se les midió el diámetro (cm) (DAP) a 1,30 m del suelo con cinta diamétrica y la altura comercial (m) (HC) (considerando un diámetro mínimo de 20 cm) con clinómetro, el número de trozas comerciales (de 2,5 m de longitud) y la calidad de las trozas de acuerdo con la metodología propuesta por Murillo y Badilla (2004), registrándose valores continuos de uno a cuatro, donde uno la máxima calidad. En total se midieron 542 árboles de cedro.

Mediante una entrevista semiestructurada se les consultó a los propietarios acerca de las actividades de manejo que habían realizado en el SAF desde el establecimiento hasta el momento de la evaluación, así como la producción de café en año de alta y baja producción (fanegas por hectárea). Se consideró la frecuencia y cantidad de producto utilizado (incluyendo el nombre comercial), así como el rendimiento y cantidad de jornales requeridos por actividad (fertilización, manejo de enfermedades, limpieza química y encalado).

### **Análisis de la información**

#### **Modelo de predicción del volumen comercial de cedro**

Se determinó el volumen comercial por edad, con las mediciones de DAP y HC del cedro (cuadro 8). El volumen se calculó utilizando la ecuación de Lojan (1966):

$$VC = (0,0000837876) * (DAP^{2,03986}) * (HC^{0,779})$$

Cuadro 8. Crecimiento en DAP, HC y VC del cedro en asocio con café, Pérez Zeledón, Costa Rica

Table 8. Growth in DBH, HC and VC of cedar in association with coffee at Pérez Zeledón, Costa Rica

Edad	Cantidad Árb Com >20 cm <sub>DAP</sub> (%)	DAP (cm)				HC (m)				VC <sub>pie</sub> (m <sup>3</sup> árb <sup>-1</sup> )			
		Mínimo	Máximo	Media	D.E	Mín	Máx	Media	D.E.	Mín	Máx	Media	D.E.
5	0	15,3	16	15,8	0,4	0	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0	9	15,1	11,6	3,16	0	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000
7	34	15,4	21,1	18,6	2,93	2,5	5	4,17	1,44	000	0,106	0,070	0,060
8	43	12,9	25,8	21,0	7,03	3	7,5	5,6	2,33	0,010	0,307	0,189	0,157
9	90	26,3	35,9	31,2	4,8	5,9	7,5	6,73	0,8	0,286	0,609	0,444	0,162
10	71	18,4	32,3	25,9	7,02	4,3	7,8	6,03	1,75	0,080	0,509	0,294	0,215
11	89	23,9	37,5	31,3	6,87	4,3	10	7,17	2,85	0,173	0,823	0,492	0,325
12	89	22,6	31,6	27,5	3,91	4,9	7	6,25	0,95	0,175	0,466	0,322	0,126
17	100	35,2	49,5	43,3	5,52	9	11,3	10	0,91	0,700	1,505	1,204	0,321

De acuerdo a los valores de crecimiento del cuadro anterior, se construyeron modelos de predicción simple del volumen comercial con corteza utilizando como variables predictoras la edad, la altura comercial y el DAP, a partir de árboles con un DAP mínimo de 20 cm. La elección de los modelos consideró como criterios de ajuste el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el  $R^2$  ajustado, el cuadrado medio del error (CME) y el error estándar (E.E).

Como una última fase para elegir el mejor modelo, se analizó la diferencia agregada y el análisis de residuales. El estadístico de la diferencia agregada (DA) se utilizó 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 empleó la gráfica de residuales para presenciar gráficamente la dispersión de las diferencias (Moret, Jerez y Mora, 1998). Si los residuales estandarizados eran menores que tres desviaciones estándar, el modelo se calificaba como válido. Para todo lo anterior, se utilizó el programa Stat Graphics versión 16.1.18.

## Calidad de árbol

Se evaluó la calidad de los árboles en el SAF con el promedio ponderado de la calidad individual de las primeras cuatro o cinco trozas comerciales de 2,5 m de largo cada una. El peso ponderado de la troza en el fuste se basó en su aporte al volumen total según la cantidad de trozas (Murillo y Badilla, 2004):

$$\text{Árbol con 1 troza} = T1 * 1$$

$$\text{Árbol con 2 trozas} = T1 * 0,6 + T2 * 0,4$$

$$\text{Árbol con 3 trozas} = T1 * 0,44 + T2 * 0,33 + T3 * 0,22$$

$$\text{Árbol con 4 trozas} = T1 * 0,4 + T2 * 0,3 + T3 * 0,2 + T4 * 0,1$$

$$\text{Árbol con 5 trozas} = T1 * 0,4 + T2 * 0,3 + T3 * 0,15 + T4 * 0,1 + T5 * 0,05$$

## Análisis de la rentabilidad

Se determinó la rentabilidad del sistema agroforestal con las estructuras de costos e ingresos por hectárea desde el establecimiento del SAF hasta los 17 años; edad a la que se evaluó el mayor crecimiento del cedro. La estructura de costos se construyó asumiendo las actividades e insumos requeridos anualmente según lo indicado por los caficultores (Cuadro 9 y Cuadro 10).

Con esta información se definió la cantidad de producto y frecuencia de aplicación anual por hectárea para cada actividad de manejo en el cafetal y la mano de obra requerida. Se utilizaron los precios de insumos a enero del 2016 del Centro de Suministros CoopeAgri R.L., ubicado en San Isidro del General. El costo por cajuela de café cosechada (1/20 de fanega) consideró el precio establecido para la cosecha 2015-2016 (¢ 1000 colones cajuela<sup>-1</sup>). El costo del jornal se calculó con base en el salario mínimo de acuerdo con el Decreto Ejecutivo nº 39055 y no incluye cargas sociales. El costo de establecimiento de las plantas de café se estimó a partir de una abundancia de 5000 plantas ha<sup>-1</sup>, 100 árb ha<sup>-1</sup> de cedro y 625 árboles de servicio múltiple (poró (*Erythrina sp*) y/o guaba (*Inga sp*)). Se utilizó el precio de venta del vivero forestal CoopeAgri; ¢ 175 planta café<sup>-1</sup> y ¢ 190 árb cedro<sup>-1</sup>. Los árboles como el poró y la guaba son producidos dentro de la misma finca y, por esta razón, solo se incluyó el costo de establecimiento.

Los ingresos consideraron la venta de café, la venta de madera de cedro y el incentivo del PPSA del FONAFIFO para sistemas agroforestales de café, desembolsados en los tres primeros años después de establecidos los árboles (Decreto nº 39083-MINAE, 2015, artículo 3). La producción en fanegas por hectárea se definió con el promedio de producción de café en año de alta y baja producción según lo indicado por los propietarios de las fincas muestreadas. Para determinar el ingreso por la venta de café, se utilizaron los precios históricos de la fanega de café (Inverniz) registrados por la Cooperativa CoopeAgri R.L. en los últimos 17 años (1998-2015) y actualizados con la inflación anual del Banco Central de Costa Rica (BCCR).

La determinación del volumen comercial en pie se realizó con el modelo de predicción del volumen comercial con corteza por árbol ( $m^3$ ) obtenido en el estudio, en función del diámetro promedio a los 17 años de edad. Se efectuó la conversión del volumen comercial con corteza en metros cúbicos al sistema de medición empleado en Costa Rica (pulgadas madereras ticas (pmt)), donde  $362 \text{ pmt} = 1 \text{ m}^3$ .

El ingreso por la venta de madera se calculó utilizando una abundancia de 88 ( $\pm 16$ ) árboles por hectárea, según lo encontrado en las parcelas establecidas a los 17 años de edad. El precio de la pulgada maderera tica en pie correspondió al promedio de los valores consultados a diez comerciantes y productores vinculados al comercio del cedro en la zona de estudio. El ingreso del incentivo del PPSA se estimó con base en una abundancia de  $277 \text{ árb ha}^{-1}$  (50 % de árboles de servicio múltiple (poró y/o guaba) y 50 % maderables) a un monto de  $\text{₡ } 929 \text{ árb}^{-1}$  (Decreto nº 39083-MINAE) desembolsados en los primeros tres años (65 %, 20 % y 15 %) y con un costo administrativo de 18 % (porcentaje utilizado en CoopeAgri para SAF).

La rentabilidad del sistema agroforestal se analizó mediante los indicadores financieros valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y la relación beneficio costo (R B/C). Los flujos netos se proyectaron a 17 años utilizando el promedio de la inflación anual del Banco Central de Costa Rica (BCCR) del año 2006 al 2015 (6,1%). La tasa de actualización utilizada para estimar el VAN y la R B/C fue de 6%, de acuerdo a la tasa de interés utilizada por el Programa de Crédito del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) para producción forestal.

Cuadro 9. Estructura de costos por hectárea de las actividades de manejo del SAF café-cedro en Pérez

Table 9. Cost structure of coffee-cedar agroforestry system management in Pérez Zeledón

Costo de mano de obra	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4*	Año 5**
Preparación del terreno	¢105.585,92				
Ahoyado para siembra y resiembra de café	¢144.500,81	¢15.210,61			
Ahoyado para siembra y resiembra de cedro	¢5.000,00	¢292,51			
Siembra de café	¢152.106,12	¢15.210,61			
Siembra de cedro	¢3.042,12	¢304,21			
Control fitosanitario del cedro	¢2.399,68				
Establecimiento de sombra (árboles de servicio)	¢38.026,53				
Obras de conservación de suelos	¢76.053,06				
Encalado	¢15.210,61			¢15.210,61	
Aplicación de abono orgánico	¢22.815,92	¢22.815,92	¢22.815,92	¢22.815,92	¢22.815,92
Aplicaciones de abono químico	¢68.447,75	¢68.447,75	¢68.447,75	¢68.447,75	¢68.447,75
Control manual de hierbas	¢30.421,22	¢30.421,22	¢30.421,22	¢30.421,22	¢30.421,22
Aplicación de herbicidas	¢30.421,22	¢30.421,22	¢30.421,22	¢30.421,22	¢30.421,22
Aplicación de fertilizantes foliares	¢30.421,22	¢30.421,22	¢30.421,22	¢30.421,22	¢30.421,22
Aplicación de insecticidas	¢15.210,61	¢15.210,61	¢15.210,61	¢15.210,61	¢15.210,61
Aplicación de fungicidas	¢45.631,83	¢45.631,83	¢45.631,83	¢45.631,83	¢45.631,83
Poda cedro		¢15.210,61			
Regulación de sombra		¢45.631,83	¢45.631,83	¢45.631,83	¢45.631,83
Mantenimiento de finca		¢15.210,61	¢15.210,61	¢15.210,61	¢15.210,61
Cosecha del café			¢520.000,00	¢520.000,00	¢520.000,00
Transporte de café fruta hasta centro de acopio			¢52.000,00	¢52.000,00	¢52.000,00
Poda del café				¢38.026,53	¢38.026,53
Deshija del cafeto				¢60.842,45	¢60.842,45
*Los costos del año 4 se presentan sucesivamente cada tres años (encalado).					
**Los costos del año 5 son igual a los años siguientes, exceptuando los años que se hace encalado.					

Cuadro 10. Insumos de la estructura de costos del manejo del SAF café-cedro en Pérez Zeledón

Table 10. Inputs of the structure of management costs in SAF coffee-cedar, Pérez Zeledón

Insumos	Unidad	Precio de producto (¢)
Plantas de café	Planta	175
Árboles de cedro	Planta	190
Abono orgánico (El sembrador)	45 Kg	1 300
Fórmula nitrogenada (Nitron)	45 Kg	9 150
Fertilizante químico (18-5-15-6-2)	50 kg	11 121
Foliar (Mg)	25 Kg	3 505
Foliar (Zn)	25 Kg	14 793
Foliar (B)	25 Kg	16 824
Fungicida (Soprano®)	1 L	14 163
Insecticida (Diazinon®)	1 L	5 226
Coadyuvante	1 L	3 283
Pre-emergente	1 L	7 840
Cal	23 Kg	2 028
Herbicida (Glifosato)	1 L	2 200
Herbicida (Diquat)	1 L	5 004
Serrucho podador	1	10 000
Insecticida cedro (Decis ®)	1 L	30 489

### Supuestos del modelo financiero

- Los precios de la madera e insumos son conocidos y constantes durante el periodo del análisis.
- Los rendimientos de producción forestal son conocidos y libres de riesgos biológicos y ambientales.
- El mercado de capitales es imperfecto. Hay varias tasas de interés para prestar y arrendar dinero.

- El precio de la madera asumido corresponde al reportado por los entrevistados y puede variar por calidad de la madera y condiciones en el sitio.
- El modelo de crecimiento del cedro, con el que se calculó el volumen comercial disponible, es genérico y corresponde a la curva de crecimiento medio de los datos encontrados durante la evaluación hasta una edad de 17 años.
- Los ingresos por la venta de madera se basan en una corta final del componente forestal a los 17 años.
- Para los precios que no corresponden al año en estudio (2016), se utilizó la inflación del Banco Central de Costa Rica (BCCR) para actualizarlos.
- La rentabilidad calculada es genérica, con base en las características de la finca promedio de la zona de estudio y no puede ser tomada como recomendación específica para cada finca.

## **Resultados y discusión**

### **Modelos de predicción del volumen comercial del cedro**

Los modelos de predicción del volumen comercial del cedro ( $VC_c$  arb<sup>-1</sup> m<sup>3</sup>) determinados para la zona de estudio predijeron más del 90 % de la variabilidad en función del DAP y la HC y en un 79 % utilizando la edad (cuadro 11). Al analizar la diferencia agregada de los modelos seleccionados, con respecto a los valores observados se presentó una diferencia promedio de un 2 % empleando la altura comercial como variable predictora y menor al 1 % al usar el DAP y la edad.

El modelo en función de la HC predijo el volumen a partir de trozas con valores superiores a 2,5 m. En el caso del modelo fundamentado en el DAP, estimó a partir de 16,25 cm y con base en la edad a partir de 5,2 años de la plantación. Ford (1979) implementó un modelo de predicción del volumen comercial del cedro asociado a cafetales de San Carlos y Puriscal de Costa Rica, en función del DAP, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 98 %, este modelo predice a partir de diámetros de 5,7 cm.

Cuadro 11. Modelos de regresión simple para la predicción del volumen comercial con corteza por árbol de cedro ( $VC_c \text{ árb}^{-1}$ ) en cafetales de Pérez Zeledón

Table 11. Simple regression models for predicting the commercial volume per cedar tree ( $VCC \text{ tree}^{-1}$ ) in coffee plantations of Pérez Zeledón

Ecuación	$R^2$ (%)	$R^2$ ajustado (%)	CME	E.E	Valor-P
$VC_c \text{ árb}^{-1} = -0,627329 + 0,0386481 * DAP$	90,3	90,0	0,019	0,13	0,0000
$VC_c \text{ árb}^{-1} = (-0,331307 + 0,138545 * HC)^2$	97,2	94,4	0,007	0,08	0,0000
$VC_c \text{ árb}^{-1} = -0,117677 + 0,00444514 * Edad^2$	88,7	78,7	0,040	0,20	0,0000
DAP: diámetro a 1,30 del suelo (cm) HC: altura comercial (m) Edad (años)					

### Costos del SAF café-cedro

Los costos del SAF se percibieron principalmente por las actividades de manejo del cultivo de café. El manejo del cedro consistió en la aplicación de insecticida para el control del barrenador y una poda anual; no se aplicó ninguna fertilización adicional a la del cultivo de café. El 29 % de los productores realizaron ambas prácticas de manejo (seis de 21 productores), un 33 % aplicó solamente alguno de los dos mecanismos (control fitosanitario o poda de formación) y un 38 % no utilizó ningún tipo de manejo a los árboles de cedro. De los caficultores que aplicaron control fitosanitario al cedro, el 90 % lo hizo una única vez en el primer año de establecimiento; mientras que el 83 % de quienes llevaron a cabo podas de formación efectuó solo una poda antes de los tres años de edad.

A pesar de que los productores del estudio señalaron que no fue necesario llevar a cabo el control fitosanitario del cedro, pues no se manifestó el ataque del barrenador, en la mayoría de las fincas (57 %) se encontraron árboles de cedro calidad 2, esto principalmente porque los árboles poseían bifurcaciones en algún punto de las primeras 3-4 trozas y ramas gruesas en la zona comercial del fuste. Por lo tanto, esto permite deducir que hubo ataque del barrenador de las meliáceas y evidencia que los caficultores no efectuaron un manejo adecuado de podas y control fitosanitario del cedro en los primeros años de establecimiento de la plantación.

Los costos del cultivo de café representaron un 99,8 % de los costos totales en 17 años, mientras que el manejo de los árboles de cedro tan solo un 0,2 %. La incorporación del cedro y la aplicación de insecticida para el control fitosanitario de los árboles significó un 1 % de los costos totales del año uno, mientras que en el año dos fue de 3 % (resiembrado y poda de formación) (Cuadro 12). El manejo eficiente de los árboles de cedro en el SAF implicaría la fumigación mensual de la yema principal del árbol desde el primer año de establecimiento hasta los dos o tres años de edad, lo cual tendría un costo aproximado de  $\text{C}\$ 39\,772\text{ ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$ , así como la fertilización anual ( $100\text{ g árb}^{-1}$ ) al menos tres años ( $\text{C}\$ 9\,829\text{ ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$ ) y una poda anual del año dos al seis (cinco podas) ( $\text{C}\$ 119\,316\text{ ha}^{-1}$ ), lo cual costaría alrededor de  $\text{C}\$ 312\,590\text{ ha}^{-1}$ . En la zona de Pérez Zeledón, Ramírez (2014) recomienda que el cedro en combinación con el cultivo de café se fertilice con  $100\text{ g árb}^{-1}$  de la fórmula 18-5-15-6-2 en el momento de la fertilización del café y además se refuerce al cuarto y séptimo año (momento en que se tiende hacer poda de ramas) con fórmulas altas en N y  $\text{K}_2\text{O}$ .

En el estudio de Álvarez (2014), el costo de hacer control intensivo de la palomilla en el cedro en plantación ( $833\text{ árb ha}^{-1}$ ), es decir, una aplicación mensual de insecticida (terbufos) durante los tres primeros años de establecimiento, fue de  $\text{C}\$ 1\,890\,442,6\text{ ha}^{-1}$ . Al adaptar este monto a las condiciones del SAF café-cedro ( $100\text{ árb ha}^{-1}$ ), el costo de hacer control fitosanitario sería aproximadamente de  $\text{C}\$ 226\,950\text{ ha}^{-1}$ , o sea, un 47 % mayor al costo estimado en este estudio en caso de que el productor realice un manejo óptimo del cedro en el SAF ( $\text{C}\$ 39\,772\text{ ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$ ).

En general, los costos del sistema fueron más elevados en el primer año debido a que se efectuó la preparación del terreno, incluyendo el encalado ( $690\text{ kg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$  de cal (cada tres años)) y la compra de plantas de café y de cedro. La primera recolección de café al tercer año de la plantación elevó los costos del sistema un 53 % con respecto al año anterior. La fertilización aplicada al suelo fue la actividad de manejo más costosa en el período de análisis ( $\text{C}\$ 7\,417\,434,39$ ), la cual consistió en la aplicación de 18 sacos  $\text{ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$  ( $810\text{ kg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$ ) de la fórmula completa 18-5-15-6-2 distribuidos en tres aplicaciones, más una aplicación de fertilizante nitrogenado ( $73\text{ kg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$ ) y de abono orgánico ( $4,5\text{ ton ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$ ).

La aplicación de fertilizante químico se consideró alta (810 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) de acuerdo a lo recomendado por el Instituto del Café de Costa Rica (629 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de fórmula completa) en cafetales con una producción media (24 a 36 fan ha<sup>-1</sup>). La poda de cafetos (una por año) y la deshija (dos anuales) se realizaron a partir del cuarto año de la plantación, lo que representó un aumento del 10 % en los costos. El costo de mano de obra durante el período de análisis significó un 65 % de los costos totales, esto principalmente por el costo de cosecha del café (₡ 520 000 año<sup>-1</sup>).

El costo promedio de producción de una fanega en los SAF evaluados fue de ₡ 54 915. Rojas (1996) señala que el costo de producir una fanega de café es de ₡ 15 200, es decir, un costo actual mayor al estimado en este estudio (₡ 71 492 fan<sup>-1</sup>). El Instituto del Café de Costa Rica (2015) menciona que para una producción promedio de 30,5 fan ha<sup>-1</sup>, el costo de producción es de ₡ 57 355 fan<sup>-1</sup> y para una producción de 22,8 fan ha<sup>-1</sup>, es de ₡ 69 880 fan<sup>-1</sup>.

Cuadro 12. Costo total anual del SAF café-cedro

Table 12. Total cost per year of AF system coffee and cedar

Costos	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4*	Año 5**
Café	₡2 250 070,60	₡866 167,25	₡1 407 322,00	₡1 465 803,45	₡1 389 752,84
Cedro	₡30 356,47	₡27 707,34	₡0,00	₡0,00	
Café+cedro	₡2 280.427,07	₡893 874,59	₡1 407 322,00	₡1 465 803,45	₡1 389 752,84

\*Los costos del año 4 se presentan sucesivamente cada tres años (encalado).  
 \*\*Los costos del año 5 son igual a los años siguientes, exceptuando los años que se hace encalado.

### Producción e ingresos del SAF café-cedro

En los primeros dos años del SAF, solo se percibió el ingreso del incentivo del PPSA, el cual fue de ₡ 203 154 ha<sup>-1</sup> al año uno (65 % del monto total) y ₡ 62 509 ha<sup>-1</sup> al año dos (20 % del monto total). El último desembolso del PPSA al año tres fue de ₡ 46 882 ha<sup>-1</sup> (15 % del monto total), mismo año en que se percibió el primer ingreso por la venta de café. El PPSA permitió percibir un ingreso total al SAF de ₡ 312 545 ha<sup>-1</sup> (4 % del total de ingresos en 17 años).

La producción de café promedio de los sitios muestreados fue de 26 fanegas  $\text{ha}^{-1}$   $\text{año}^{-1}$ . Esta producción se consideró de baja a media según el promedio general nacional de producción de café en Costa Rica (Icafe, 2015). En CoopeAgri R.L., siete de cada diez asociados cafetaleros entrega menos de 15 fanegas  $\text{año}^{-1}$  (Rodríguez, comunicación personal, 2016). Dzib (2003) determinó una producción menor de 21 fanegas  $\text{ha}^{-1}$  en cafetales de Pérez Zeledón asociados a *Terminalia amazonia*.

El modelo de predicción del volumen comercial del cedro estimado para la zona de estudio, indicó una producción de madera en pie de  $92,134 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  a los 17 años de la plantación con un DAP promedio de 43,3 cm y una abundancia de 88  $\text{árb ha}^{-1}$ . Ford (1979) al estimar la producción del cedro en asocio con café en San Carlos, Costa Rica, estableció que el cedro con una edad promedio de 17,5 años, DAP de 42,6 cm y HC de 8,7 m produjo  $77,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (84  $\text{árb ha}^{-1}$ ).

Durante el periodo de análisis (17 años), el ingreso neto por la venta de café se comportó irregular debido a la variabilidad en los precios de la fanega (figura 3). Los precios más bajos se registraron en el período de producción en los años 2000-2003, lo que coincidió con los ingresos más bajos del SAF del año tres al seis, registrándose pérdidas de hasta  $\text{C} 517\,383 \text{ ha}^{-1}$ . Los ingresos por la venta de café fueron positivos a partir del año siete, momento en que el precio actualizado de la fanega se mantuvo superior a  $\text{C} 65\,000$  por fanega. El ingreso más alto por venta de café permitió al caficultor obtener una ganancia de  $\text{C} 1\,255\,200 \text{ ha}^{-1}$  al año 14, el resto de los años cuando el ingreso neto fue positivo, el ingreso se mantuvo entre  $\text{C} 303\,559$  y  $\text{C} 688\,806 \text{ ha}^{-1}$ , es decir, la actividad cafetalera le generó al productor un ingreso mensual promedio entre  $\text{C} 25\,296$  y  $\text{C} 57\,400 \text{ ha}^{-1}$ .

Por otro lado, la madera de cedro en pie en la zona de estudio se cotizó a un precio entre  $\text{C} 150$  y  $\text{C} 250 \text{ pmt}^{-1}$ , variando según los intereses particulares del comparador, como las dimensiones del árbol (DAP y HC) y las condiciones del sitio (ubicación, topografía, acceso, etc.). Al considerar un precio promedio de  $\text{C} 200 \text{ pmt}^{-1}$ , la venta de madera de cedro en pie originó un ingreso neto de  $\text{C} 6\,607\,063,41 \text{ ha}$  al año 17 de la plantación. En conjunto con el ingreso neto por la venta de café de ese mismo año ( $\text{C} 407\,270,18 \text{ ha}^{-1}$ ), el ingreso del SAF fue de  $\text{C} 7\,071\,584$ , es decir, el cedro representó un 93 % de los ingresos netos de ese año.

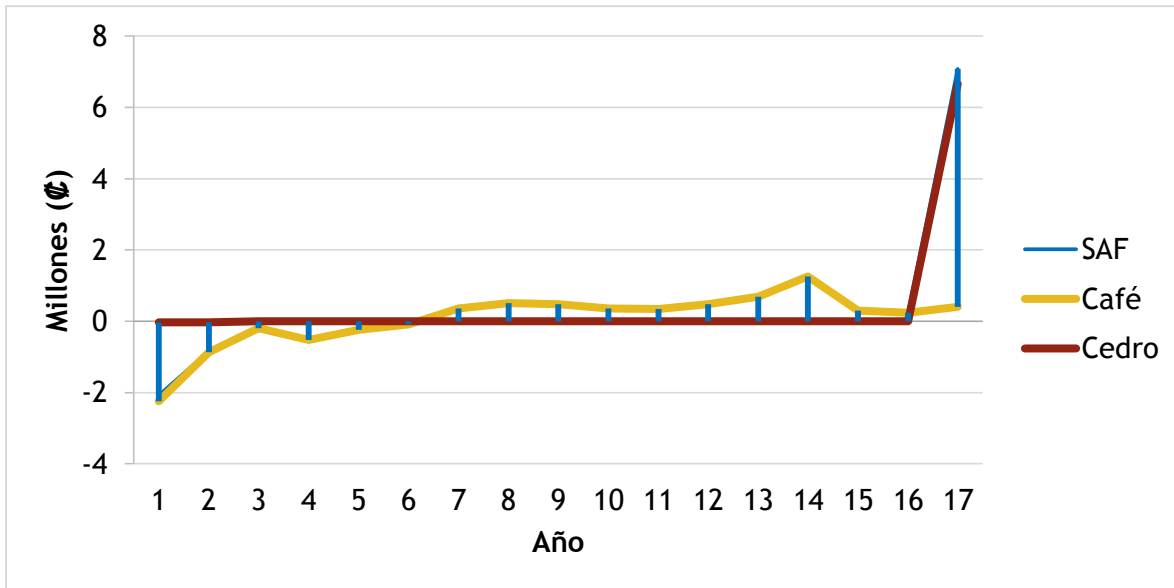


Figura 3. Flujo neto anual del sistema agroforestal

Figure 3. Annual net flow of the agroforestry system

### Rentabilidad del SAF café-cedro

El SAF café-cedro generó un VAN de ₡ 8 198 601,5, una TIR de 16 % y una relación B/C de 1,34 (Cuadro 13). El VAN indica que este tipo de sistema generó una rentabilidad positiva, siendo el componente maderable el que produjo un mayor aporte. El cedro generó un aporte financiero de 81 % de los ingresos netos acumulados en 17 años. Dzib (2003) determinó en cafetales de San Isidro de Pérez Zeledón, que la venta de madera de *Terminalia amazonia* aportó un 54 % de los ingresos acumulados en ocho años, considerando una densidad de 373 árb ha<sup>-1</sup> y una producción de 21 fanegas ha<sup>-1</sup>. En un estudio realizado en 0,7 ha de café en Santa Bárbara, Honduras, Viera y Pineda (2004) concluyeron que los árboles de cedro en linderos de cafetales representaron un ingreso de 25,7 % con respecto a la producción de café anual; sin embargo, este cálculo no incluyó los costos de plantación ni mantenimiento de los árboles, es decir, en este caso el ingreso por la venta de café fue mayor al ingreso por la venta de madera; contrario lo encontrado en los SAF evaluados en la zona de estudio.

La TIR del SAF evaluado sugiere que esta combinación de cultivo soporta una tasa de interés de 16 %, o sea, si la inversión se financia a un coste equivalente a esa tasa, el proyecto no aportaría riqueza ni

supondría coste económico para el productor. En este caso, el productor podría optar por obtener financiamiento del FONAFIFO; ente que ofrece crédito para este tipo de proyectos a una tasa de interés de 6 % (hipotecaria) y 8 % (fiduciaria), lo cual no implicaría un coste económico mayor al que podría originar el sistema. La relación B/C del SAF señala que el productor recuperó cada colón invertido y por cada uno obtuvo una ganancia 0,34 colones.

Cuadro 13. Indicadores financieros del SAF café-cedro

Table 13. Financial indicators of agroforestry system

Indicadores	Café	Cedro	SAF café-cedro
VAN	₡1 278 993,45	₡6 607 063,41	₡8 198 601,50
TIR	9%	44%	16%
RB/C	1,05	114,79	1,34
*Incluye el incentivo del PPSA (312 545 ₡ Ha)			

Al considerar cada componente del SAF por separado, tanto la actividad cafetalera como la venta de madera de cedro generó un VAN positivo. Actualmente, CoopeAgri R.L. ofrece crédito a los productores cafetaleros a una tasa de interés anual de 12 %. Si se toma en cuenta solamente la rentabilidad del cultivo de café, la cual generó una TIR de 9 %, el productor estaría limitado a optar por este plan crediticio. Bajo este escenario, el componente maderable aumentó la posibilidad de optar por un crédito que puede soportar una tasa de interés hasta de 16 %.

El aumento en la producción de café (dos fanegas) podría mejorar la rentabilidad del cultivo (TIR 12,7 %), sin embargo, el precio de venta de la fanega podría ser uno de los factores con mayor influencia en el aumento de los ingresos por la venta de café. Los árboles maderables dentro del SAF mejoraron los ingresos del productor cafetalero, sin embargo, al ser un ingreso que se percibe en el largo plazo, es necesario que el productor incorpore otras especies de sombra dentro del cafetal, como árboles frutales u otras opciones que generen ingresos en el corto y mediano plazo, ya que como lo menciona CONAFOR (2013), uno de los factores más importantes en la toma de decisiones que realizan los productores para escoger el tipo de arreglo del SAF (especies) es la obtención de ingresos en los primeros años.

## **Conclusiones**

Los modelos permitieron estimar el volumen comercial del cedro ( $m^3$ ) en asocio con el cultivo de café utilizando como variables predictoras el DAP, la HT y la edad.

Las labores de manejo del SAF se concentraron principalmente en el cultivo de café, por lo que el costo de incorporar el cedro no fue significativo (0,2 % de los costos totales).

La rentabilidad del SAF fue positiva, siendo el componente maderable el que generó mayor aporte financiero en el período de análisis (81%).

## **Recomendaciones**

Se recomienda llevar a cabo estudios de rentabilidad en este tipo de sistemas considerando la venta de madera de cedro con mayor valor agregado. Así mismo, la combinación del cultivo de café con otros componentes agrícolas que le generen ingresos al productor en el corto y mediano plazo.

## Bibliografía

- Álvarez, D. (2014). *Evaluación de la gestión forestal y propuestas de actuación en una finca tipo de tres equis*. Costa Rica. (Tesis de maestría). CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Arnáez, E. y Flores, E. (1988). Características de la madera de *Cedrela odorata* L. (cedro amargo, Meliaceae) en Costa Rica. *Revista Biología Tropical*, 36 (1):67-73.
- Asociación Costarricense para el Estudio de Especies Forestales Nativas de Costa Rica (ACEEFN). (1992). *Encuentro regional sobre especies forestales nativas de la zona norte y atlántica de Costa Rica; memoria*. [Puerto Viejo de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica, 24-25 set. 1992]. Cartago, Costa Rica: ITCR.
- Barrantes, A. y Ugalde, S. (2015). *Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Estadísticas 2014*. San José, Costa Rica: Oficina Nacional Forestal.
- 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.
- 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 nutrimental. *BOSQUE*, 36 (2): 265-273. DOI: 10.4067/S0717-92002015000200012.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2013). *Sistemas agroforestales maderables en México*. México: Universidad de Chapingo.
- Dzib Castillo, 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.
- Fallas, J. y Valverde, C. (2005). *Eventos hidrológicos extremos y bosques*. Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional.
- Ford, L. (1979). *An estimate of the yield of Cedrela odorata L. (Syn. C. mexicana Roem) grown in association with coffee. Agro-forestry 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. (1995). *Rendimiento y análisis financiero del sistema agroforestal café (Coffea arabica cv Caturra) con poró (Erythrina poeppigiana) bajo diferentes densidades de laurel (Cordia alliodora)*. (Tesis de maestría). CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- 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).
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario*. San José, Costa Rica: Autor.
- Instituto Nacional del Café (ICAFFE). (2015). *Costos de Producción Agrícola de Café Fruta Cosecha 2014-2015. Fincas de 26 a 34 Und.400L/ha*. San José, Costa Rica: Autor.
- Instituto Nacional del Café. (2016). Sector Cafetalero implementa medidas para mitigar emisiones y adaptará cultivo al cambio climático. *Innova Icafe*, 7: 22-24.
- 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.
- Lojan, L. (1966). Una fórmula para estimar volúmenes en un bosque tropical húmedo. *Revista Turrialba* 16 (1):67-72.
- López, E. y Musálem, M. (2007). Sistemas agroforestales con cedro rojo, cedro nogal y primavera, una alternativa para el desarrollo de plantaciones forestales comerciales en Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13 (1):59-66.
- Molina, E. y Meléndez, G. (2002). *Tabla de interpretación de análisis de suelos*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

- 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.
- Murillo, O. y Badilla, Y. (2004). *Evaluación de la calidad y estimación del valor en pie de la plantación forestal*. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Muschler, R. (1999). Árboles en cafetales. *Módulo de Enseñanza Agroforestal*, (5).
- Oficina Nacional Forestal (ONF). (2016). *Precios de la madera para las especies más comercializadas. Primer semestre del 2016*. Recuperado de: <http://www.onfcr.org/media/uploads/documents/precios-de-la-madera-en-costa-rica-2016.pdf>
- 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.
- 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.
- Proyecto de Estudio de Comportamiento de especies Nativas del Trópico Húmedo en Honduras (PROECEN)/ Escuela Nacional de Ciencias Forestales (ESNACIFOR). (2003). *Guías silviculturales de 23 especies forestales del bosque húmedo de Honduras*. Siguatepeque, Honduras: Autor.
- Somarriba, E., Valdivieso, R., Vásquez, W. y 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.
- Timyan, J. (1996). *BWA YO: Important tree of Haiti*. Washington, Estados Unidos: SECID.
- Viera, C. y Pineda, A. (2004). Productividad de lindero maderable de *Cedrela odorata*. *Agronomía Mesoamericana*, 15 (1): 85-92.

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., 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.

Yépez, C. (2002). ¿Cómo diversificar la sombra en cafetales con criterios locales de selección? *Agroforestería en las Américas*, 9 (35):95-98