








# Índice de sitio para *Cedrela odorata* L. en sistemas agroforestales con café en Pérez Zeledón, Costa Rica

## Site index for *Cedrela odorata* L. in coffee agroforestry systems in Pérez Zeledón, Costa Rica

David Carvajal-Arroyo<sup>1</sup>  • Rafael Murillo-Cruz<sup>2</sup>  • Johnny Rodríguez-Chacón<sup>3</sup>  • Edgar Ortiz-Malavassi<sup>4</sup>   
• Mariela González-Rojas<sup>5</sup>  • Luis Salazar-Salazar<sup>5</sup>  • Ana Isabel Barquero-Elizondo<sup>2</sup> 

Recibido: 16/12/2021    Aceptado: 27/5/2022

### Abstract

The study objective was to determine the site quality for *Cedrela odorata* L. in coffee Agroforestry Systems, using anamorphic site index curves based on a simple regression model. The foregoing, because the productive capacity of a site is one of the determining factors for the yield and timber production of any forest species. The study was carried out in Pérez Zeledón, Costa Rica on coffee farms with *C. odorata* trees between 1 and 20 years old. 140 plots of 1 000 m<sup>2</sup> and a total of 2 155 individuals were sampled, of which 391 were selected as dominant trees. From this sample, six dominant height prediction models were developed as a function of age and the respective site index curves were generated. The best model was  $H_{dom} = \exp(1.15993 + 0.778002 * \ln(\text{Age}))$  whose determination coefficient was 0.87, this model was selected as the guide curve. They were cross-validated to the total volume per hectare to determine the best curves set. The best set of curves was the common slope, and five classes of IS were obtained (15, 17, 19, 21, and 23 m), at a base age of 10 years. At 20 years, the sites with the lowest productivity project a dominant height of 25.7 m, while those with the highest yield project up to 39.4 m.

**Keywords:** Site quality, anamorphic curves, site index, regression models, agroforestry systems.

1. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica; [davidcarpio.daca@gmail.com](mailto:davidcarpio.daca@gmail.com)
2. Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica; [rafael.murillo.cruz@una.cr](mailto:rafael.murillo.cruz@una.cr), [ana.barquero.elizondo@una.ac.cr](mailto:ana.barquero.elizondo@una.ac.cr)
3. Consultor forestal, San José, Costa Rica, [jrcrodriguez@gmail.com](mailto:jrcrodriguez@gmail.com)
4. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica; [eortiz@itcr.ac.cr](mailto:eortiz@itcr.ac.cr)
5. CoopeAgri R. L., San Isidro de El General, Pérez Zeledón, Costa Rica; [marielagr91@gmail.com](mailto:marielagr91@gmail.com), [lsalazar@coopeagri.co.cr](mailto:lsalazar@coopeagri.co.cr)

## Resumen

El objetivo del estudio fue determinar la calidad de sitio para *Cedrela odorata* L. en Sistemas Agroforestales con café, usando curvas de índice de sitio anamórficas basadas en un modelo de regresión simple. Lo anterior, debido a que la calidad de sitio es uno de los factores determinantes para el rendimiento y producción maderable de cualquier especie forestal. El estudio se realizó en Pérez Zeledón, Costa Rica en fincas cafetaleras con árboles de *C. odorata* de edades entre 1 y 20 años. Los datos provienen de 140 parcelas de 1 000 m<sup>2</sup> y un total de 2 155 individuos, de los cuales se seleccionaron 391 como árboles dominantes. A partir de esta muestra se desarrollaron seis modelos de predicción de altura dominante en función de la edad y se generaron las respectivas curvas de índice de sitio. El mejor modelo fue  $H_{dom} = \exp(1,15993 + 0,778002 \cdot \ln(\text{Edad}))$  cuyo coeficiente de determinación fue 0,87 siendo éste el seleccionado como curva guía. Para determinar el mejor conjunto de curvas se realizó una validación cruzada de estas con respecto al volumen total por hectárea. El mejor conjunto de curvas fue el de pendiente común y se obtuvieron cinco clases de IS (15, 17, 19, 21 y 23 m), a una edad base de 10 años. A los 20 años los sitios con muy baja calidad de sitio proyectan una altura dominante de 25,7 m, mientras que los de muy alta proyectan hasta 39,4 m.

**Palabras clave:** Calidad de sitio, curvas anamórficas, índice de sitio, modelos de regresión, sistemas agroforestales.

## Introducción

La calidad de un sitio es un factor determinante en la productividad de madera en plantaciones forestales, sistemas agroforestales y bosques la cual se encuentra condicionada por factores bióticos y abióticos [1] [2] [3]. La capacidad productiva que permite que algunos árboles crezcan, tanto en altura como en diámetro, más rápido que otros se conoce como calidad de sitio, la cual varía según las condiciones del sitio [4].

Existen métodos directos e indirectos para conocer la calidad de sitio y por ende su capacidad productiva que proporcionan información precisa sobre el potencial rendimiento de madera a obtener [5]. Los más comúnmente utilizados han sido los directos que proporcionan información precisa a un bajo costo y utilizando variables fáciles de medir y calcular; como el método basado en la altura dominante del rodal [6] [7]. En este sentido, el índice de sitio (IS), cuya información se basa en la relación que existe entre la altura dominante de un rodal y su edad es uno de los métodos más utilizados. Generalmente, para calcular el IS los

rodal deben ser puros, maduros y homogéneos para obtener información confiable, por lo que en sistemas combinados de cultivos agrícolas con especies arbóreas existe escasa información.

Para los sistemas de IS se han ajustado diferentes modelos y utilizado curvas anamórficas y polimórficas para representar conjuntos de curvas de IS, sin embargo, se ha determinado que las curvas polimórficas tienden a sobreestimar el volumen en edades tempranas, principalmente en los sitios que presentan árboles con un bajo rendimiento [8].

En Costa Rica la información acerca de IS para *Cedrela odorata* es poca, sin embargo, en países como México se ha logrado determinar, tanto para rodales jóvenes como maduros, el IS utilizando el método de curva guía basados en modelos de predicción. En el trópico de México Murillo et al. [9] establecieron tres clases de IS a una edad base de 10 años, utilizando el modelo Hossfeld IV; también se han registrado IS para edades tempranas en Veracruz, mediante curvas anamórficas [10] así como estimaciones de productividad del sitio en Oaxaca utilizando el modelo de Schumacher para determinar la curva guía [11]. En Quintana Roo García et al., [8] obtuvieron curvas anamórficas y polimórficas de *C. odorata* con edades entre los 3 y 24 años, siendo las anamórficas las de mejor ajuste, mientras que Bravo [12] registró cuatro clases de IS (6, 8, 10 y 12 m) para sitios fertilizados y sin fertilizar a edad base de 80 meses (más de 7 años) para esta especie y para caoba (*Swietenia macrophylla* King).

Los estudios del rendimiento de *C. odorata* en combinación con cafetales son escasos, no obstante, hay registros sobre la producción de madera y almacenamiento de carbono en cafetales con la especie en Honduras [13] y datos de viabilidad financiera, crecimiento e influencia de factores biofísicos y de manejo en Costa Rica a los 17 años [14] [15]. A pesar de que estos estudios no determinaron la calidad de sitio, proporcionan información de crecimiento e influencia de factores externos en el desarrollo de la especie, así como de la rentabilidad del sistema.

La combinación de una especie maderable con el cultivo del café en un Sistema Agroforestal (SAF) es una alternativa rentable y una excelente opción de diversificación de productos para los propietarios de finca [15] [16]; a pesar de ello, se desconoce la información sobre la capacidad de los sitios para la producción de madera de *C. odorata* en estos sistemas. En merito a lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar la calidad de sitio mediante curvas de índice de sitio anamórficas basadas en un modelo de regresión simple en SAF en fincas cafetaleras en Pérez Zeledón, Costa Rica.

## Materiales y métodos

### Descripción del sitio

El estudio se realizó en los distritos Cajón, General, Pejibaye, Platanares, Río Nuevo, Cajón, Páramo, Daniel Flores y Rivas del cantón de Pérez Zeledón, provincia de San José, Costa Rica ubicados entre los 500 y 1 700 msnm, con una precipitación media anual que varía entre los 2 000 y 4 000 mm por año y temperatura media anual que varía entre 18 y 24 C° [17]. Los suelos se caracterizan principalmente por poseer varios horizontes y presentar un pH ácido, característico de suelos de orden inceptisoles y ultisoles, que son predominantes en la zona así como pendientes ligeramente onduladas (>6 %) en la mayoría del territorio [18]. La mayor parte del cantón se encuentra en la zona de vida de Bosque muy húmedo premontano y Bosque pluvial premontano, aunque hay distritos con variedad de zonas de vida. Los principales cultivos en la zona son la caña de azúcar y el café, este último cuenta con 12 522 ha equivalentes al 15 % del total de la producción nacional de café, siendo una de las principales fuentes de empleo en la zona [19].

### Muestreo

Se establecieron 140 parcelas temporales rectangulares de 1 000 m<sup>2</sup> (25x40 m) abarcando un rango de edades de 1 a 20 años. A todos los árboles en las parcelas se le midió el diámetro normal a 1.30 metros con cinta diamétrica y la altura total (Ht) con clinómetro SUNTO. En total se midieron 2 155 árboles en los periodos entre el 2017 y 2019 de las cuales 29 % se ubican en Platanares, 16 % en Pejibaye, 17 % en General, 14 % en Cajón, 10 % en Río Nuevo, 7 % en Daniel Flores, 3 % en San Pedro y 2 % en Rivas y Páramo. De estos se seleccionó solo al 10 % de los árboles dominantes, tres individuos por cada parcela, usando una ponderación del 70 % de la altura y un 30 % del diámetro. Este criterio de selección permitió tomar en cuenta el crecimiento diamétrico para determinar los árboles verdaderamente dominantes, tanto en altura como en diámetro. En total se seleccionaron 420 árboles dominantes de cedro para el rango de edad del estudio. De esta muestra, se eliminaron datos atípicos lo cual redujo la cantidad de árboles a 391, con los cuales se generó el modelo estadístico.

### Análisis estadístico

Se generaron seis modelos de predicción de la altura dominante en función de la edad, usando el software STATGRAPHICS Centurion Version 16.1.18. Se seleccionó el mejor modelo basado en una normalización de 10 parámetros estadísticos que incluyeron el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), el error estándar del estimado (EEE), el error medio absoluto (EMA), la prueba de Durbin Watson (DW), el Cuadrado Medio del Error (CME), la diferencia agregada (DA), el Índice de Furnival (IF), la

sumatoria del cuadrado de los residuos (PRESS), el error porcentual (E %) y el Criterio de Información de Akaike (AIC). La normalización consistió en transformar los valores nominales de cada parámetro a una escala comparable de cero a uno y se realizó la sumatoria de todos los estadísticos, siendo el mejor modelo aquel que resultó con el mayor valor. El modelo seleccionado fue de carácter multiplicativo y fue utilizado como curva guía para generar las demás curvas de IS.

### Curvas de índice de sitio

La selección se realizó analizando un grupo de curvas con una pendiente común y otro grupo con un intercepto común, ambos conjuntos originados por una curva guía del modelo de predicción de altura dominante [7]. Este método ha demostrado tener éxito para determinar IS en Costa Rica con especies como *Tectona grandis* Linn. [20] así como en plantaciones puras de *C. odorata* en México [8].

En ambos casos se realizó una validación cruzada, utilizando el volumen total por hectárea en relación con el IS proyectado por el conjunto de curvas, que funciona como método para verificar la eficacia del sistema de IS [7]. De este modo se realizó un agrupamiento de cuatro clases de IS y cuatro conjuntos de edades que permitieron validar la concordancia entre el volumen y los índices de sitio. La edad base para las curvas fue de 10 años.

Para graficar las curvas con una pendiente común se utilizó la Ecuación 1 mientras que para las curvas con intercepto común se utilizó la Ecuación 2:

$$\ln(H_{dom}) = \ln(IS) + \beta_1 * [\ln(Edad) - \ln(10)] \quad (1)$$

$$\ln(H_{dom}) = \alpha_1 + [\ln(IS) - \alpha_1] * \left[ \frac{\ln(Edad)}{\ln(10)} \right] \quad (2)$$

Por su parte se utilizó las ecuaciones 3 y 4 para calcular el índice de sitio mediante una pendiente común y un intercepto común respectivamente.

$$\ln(IS) = \ln(H_{dom}) - \beta_1 * [\ln(Edad) - \ln(10)] \quad (3)$$

$$\ln(IS) = \alpha_1 + [\ln(H_{dom}) - \alpha_1] * \left[ \frac{\ln(10)}{\ln(Edad)} \right] \quad (4)$$

Donde H<sub>dom</sub>= altura dominante, ln= logaritmo natural, IS= índice de sitio, α<sub>1</sub> y β<sub>1</sub> = valores a estimar por el modelo de regresión simple.

Para la validación se consideró la amplitud de los índices de sitio proyectados por cada ecuación, vacíos de información y la secuencia lógica del incremento en volumen según IS y rango de edad.

**Cuadro 1.** Variables dasométricas promedio de *C. odorata* en sistemas agroforestales con café, Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, 2020.**Table 1.** Mean dasometric characteristics of *C. odorata* in agroforestry systems with coffee, Pérez Zeledón, San Jose, Costa Rica, 2020.

Edad (años)	Parcelas	Árboles medidos	DAP (cm)	D.E.	Hdom (m)	D.E.	Volumen (m <sup>3</sup> *ha <sup>-1</sup> )
1	3	32	4,87	1,30	4,51	0,90	0,25
2	6	134	5,54	1,60	5,83	1,38	0,64
3	5	96	7,87	3,13	7,88	2,35	3,09
4	7	151	12,23	2,75	10,78	1,45	6,41
5	3	53	17,92	1,20	16,93	1,77	23,15
6	13	281	15,46	2,80	13,45	1,90	14,06
7	9	149	19,51	5,72	13,48	2,27	22,23
8	9	145	23,94	6,46	16,90	3,40	37,52
9	9	130	29,86	4,66	21,47	2,82	60,79
10	20	312	31,73	4,13	24,54	3,25	86,68
11	6	100	36,04	4,72	23,57	3,31	118,02
12	11	154	36,04	5,46	24,67	2,60	114,20
13	6	74	41,87	4,63	25,90	2,63	124,42
14	3	25	46,28	3,25	27,34	1,81	141,72
15	5	64	43,25	5,61	29,57	1,53	155,71
16	5	75	43,24	5,21	25,56	1,94	164,18
17	5	44	53,52	10,13	32,60	1,28	193,47
18	3	35	49,63	3,93	27,20	3,48	216,72
19	5	45	54,38	5,11	29,48	1,28	193,06
20	7	56	59,17	6,65	28,44	1,72	207,46
Total	140	2 155	-	-	-	-	-

## Resultados

### Variables dasométricas

Las variables de DAP, número de árboles y volumen total por hectárea presentaron una alta variabilidad en todas las edades, mientras que en la altura dominante se observó una variabilidad intermedia, principalmente en edades mayores a los 15 años. La altura dominante máxima registrada fue de 36 m, mientras que, para el diámetro normal y el número de árboles por hectárea, los valores máximos fueron 78,9 cm y 326 árboles respectivamente. Por su parte, el volumen total promedio por hectárea varió entre 155,7 m<sup>3</sup>\*ha<sup>-1</sup> y 216,7 m<sup>3</sup>\*ha<sup>-1</sup>, desde los 15 hasta los 20 años (Cuadro 1).

### Modelos de predicción

Los modelos de predicción en función de la edad lograron explicar la variabilidad entre un 82 y un 87 %, siendo el modelo multiplicativo (Ecuación 5) el que obtuvo los mejores estadísticos y una mejor distribución sobre la línea de tendencia en comparación con los demás modelos (Cuadro 2). Además, este modelo presentó la

mayor puntuación en el proceso de la normalización de parámetros estadísticos, comparando equitativamente dichos valores. Lo anterior, respaldado por valores bajos en EEE de 0,19 m y EMA de 0,15 m, que indican una aproximación válida al conjunto de datos observados.

$$Hdom = \exp(1,15993 + 0,778002 * \ln(Edad)) \quad (5)$$

Todos los modelos, incluyendo el seleccionado, muestran una subestimación de la altura dominante a partir de los 10 años, acentuándose en los modelos con un R<sup>2</sup> ajustado menor al 0,84. El error porcentual promedio del modelo seleccionado fue de 3,5 % a partir de los 10 años, mientras que en edades jóvenes ( $\leq 10$  años) este error aumenta a 17,2 %. Similar situación ocurre para el resto de los modelos, ya que presentaron una mayor subestimación en edades tempranas en sus predicciones. También hay edades en las cuales se registró sobreestimación, aunque en una menor proporción.

### Curva guía

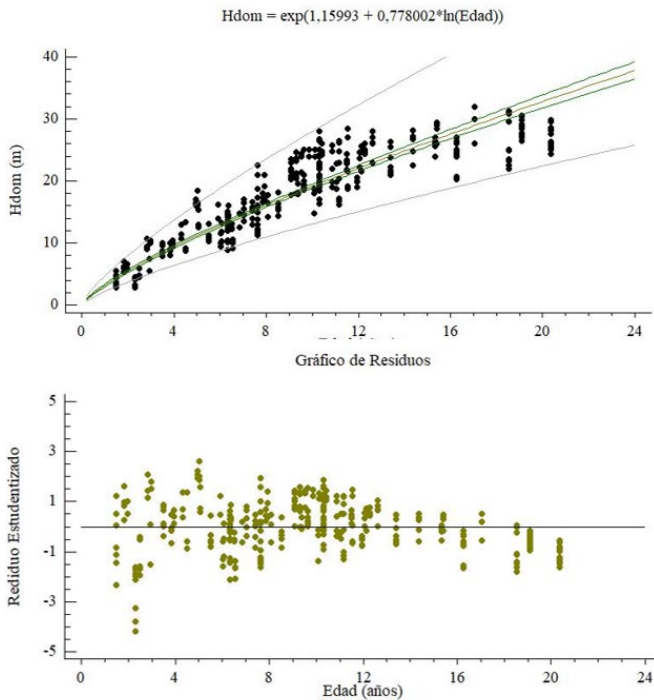
El modelo seleccionado como curva guía presentó un coeficiente de determinación de 0,87, sin embargo,

**Cuadro 2.** Modelos seleccionados para la predicción de altura dominante en función de la edad de *C. odorata* en sistemas agroforestales con café en Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, 2020.

**Table 2.** Selected models for prediction of dominant height as a function of age of *C. odorata* in agroforestry systems with coffee in Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, 2020.

Modelo	R <sup>2</sup> ajust	EEE	EMA	DW	ECM	DA	IF	PRESS	E%	AIC
Hdom = (1,22821 + 1,40599*ln (Edad)) <sup>2</sup>	87	0,34	0,28	0,66	2,88	0,116	3,65	3 254	15	1,07
Hdom = exp (1,15993 + 0,778002*ln (Edad))	87	0,19	0,15	0,60	3,32	0,132	0,93	4 323	15	1,21
Hdom= -5,63513+8,02828*√ (Edad)	84	2,96	2,40	0,65	2,95	-0,002	0,01	3 421	15	1,09
Hdom = -4,17128 + 10,7671*ln (Edad)	84	3,00	2,50	0,64	2,99	-0,002	0,00	3 504	17	1,10
Hdom = (1,10519 + 1,02604*√(Edad)) <sup>2</sup>	84	0,39	0,31	0,52	3,33	0,146	0,87	4 335	16	1,21
Hdom = 1/ (0,0129557 + 0,386744/Edad)	82	0,02	0,01	0,49	3,02	0,533	0,99	3 585	14	1,11

Hdom= Altura dominante (m), ln= logaritmo natural, DW= prueba de Durbin Watson CME= Error Cuadrático Medio, IF=Índice de Furnival, AIC= Criterio de Información de Akaike, R<sup>2</sup> ajust= coeficiente de determinación ajustado, DA=diferencia agregada, E%= error porcentual, PRESS= suma de los errores cuadrados, EMA= error m= error estándar estimado



**Figura 1.** Curva guía, dispersión y grafico de residuos del mejor modelo de predicción de *C. odorata* con café en Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, 2020.

**Figure 1.** Guide curve, dispersion, and residual plot of the best prediction model of *C. odorata* in agroforestry systems with coffee in Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, 2020.

hay sobreestimaciones y subestimaciones en algunas edades en particular. En este sentido, entre los 16 y 20 años hubo una sobreestimación del 4,8 %, así como a los seis años (E%=6,9), mientras que en el resto de las edades se da una subestimación de la altura dominante.

El gráfico de residuos mostró una distribución normal con algunos puntos atípicos en edades tempranas, sin

embargo, estos fueron aceptables ya que se ajustan bien a la línea de tendencia (Figura 1).

**Validación de curvas**

El conjunto de curvas generadas con una pendiente común mostró tener mayor concordancia con respecto al volumen total por hectárea. Lo anterior debido a que al observar las curvas generadas a partir de un intercepto común, estas presentaron vacíos de información en edades tempranas para altos índices de sitio. Además, presentaron un amplio rango de IS que varió entre 3,5 a 60 m, lo que dificultó el análisis y agrupamiento por índice de sitio, así como poca concordancia entre el volumen y el rango de índices de sitio en algunas edades (Cuadro 3). Por ejemplo, en el rango de IS de 33 a 47,9 m se registró mayor volumen entre los 6 y 10,9 años, que en los rangos de edad mayores. En el caso de las curvas de pendiente común, se mantuvo una lógica y una concordancia, tanto por rangos de edad como por índices de sitio, con relación al volumen registrado en el SAF (Cuadro 4). Lo anterior determinó que este conjunto de curvas fuera seleccionado para el índice de sitio.

**Curvas de índice de sitio**

Se generaron cinco curvas basadas en pendiente común cuyos valores representan los sitios con una calidad productiva muy baja (IS=15 m), baja (IS=17 m), media (IS=19 m), alta (IS=21 m) y muy alta calidad (IS=23 m) (Figura 2). Los sitios comprendidos en el estudio obtuvieron una variación de índice de sitio que va de 10 hasta 35 m. Además, de las 140 unidades muestrales el 55 % se ubicaron en una calidad de sitio alta y muy alta, mientras que un 21 % se ubicó en una calidad entre baja y muy baja correspondientes a un menor crecimiento. Por su parte un 24 % del muestreo se clasificó en sitio de mediana calidad. Los resultados de la calidad de sitio



**Cuadro 3.** Volumen total por hectárea por rango de edad según índice de sitio calculado por el método de intercepto común de *C. odorata* en sistemas agroforestales con café, en Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, 2020.

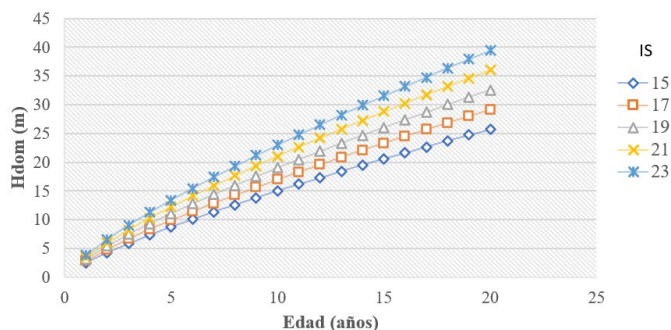
**Cuadro 3.** Total volume per hectare by age range according to site index calculated by the common intercept method of *C. odorata* in agroforestry systems with coffee in Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, 2020.

Rango de Edad (años)	Volumen total (m³/ha)			
	Índice de sitio			
	3-17,9	18-32,9	33-47,9	48-60
1-5,9	8,57	-	-	-
6-10,9	30,94	83,68	230,21	-
11-15,9	-	106,64	151,81	166,82
16-20	-	-	189,95	203,061

**Cuadro 4.** Volumen total por hectárea por rango de edad según índice de sitio calculado por el método de pendiente común de *C. odorata* en sistemas agroforestales con café, en Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, 2020.

**Table 4.** Total volume per hectare by age range according to site index calculated by the common slope method of *C. odorata* in agroforestry systems with coffee in Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, 2020.

Rango de Edad (años)	Volumen total (m³/ha)			
	Índice de sitio			
	10-15,9	16-21,9	22-27,9	28-34
1-5,9	0,6	7,8	11,3	21,9
6-10,9	13,6	46,6	82,7	145,7
11-15,9	100,7	130,5	140,0	185,2
16-20	187,8	205,4	212,4	-



**Figura 2.** Curvas de índice de sitio de *C. odorata* en sistemas agroforestales con café con edad base de 10 años, Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, 2020.

**Figure 2.** Curves of site index for *C. odorata* in agroforestry systems with coffee with base age of 10 years in Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, 2020.

**Cuadro 5.** Distribución porcentual de calidades de sitio según distrito para *C. odorata* en SAF con café en Pérez Zeledón, 2020.

**Table 5.** Percentual distribution of site qualities according to district for *C. odorata* in agroforestry systems with coffee in Pérez Zeledón, San José, Costa Rica, 2020.

Distrito	Proporción según IS (%)				
	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
Platanares	38	27	20	5	10
Pejibaye	32	36	18	5	9
General	29	29	38	0	4
Río Nuevo	36	14	14	14	22
Páramo	100	0	0	0	0
San Pedro	75	0	25	0	0
Cajón	10	15	30	40	5
Daniel Flores	20	20	40	20	0
Rivas	0	0	0	0	100
Total	31	24	24	11	10

según distrito mostraron que en Platanares, Pejibaye, Páramo y San Pedro predominan calidades de sitio altas o muy altas, mientras que los sitios con menor calidad (IS=15) registrada por el índice de sitio se encuentran en Río Nuevo y Rivas (Cuadro 5).

Al incorporar la variable de índice de sitio al modelo de regresión utilizando una pendiente común se obtuvo la ecuación para el índice de sitio (Ecuación 6).

$$IS = \exp(\ln(Hdom) - 0,778002 * (\ln(Edad) - \ln(10))) \quad (6)$$

Donde IS=Índice de sitio, exp= exponencial del número, ln= logaritmo natural y Hdom= altura dominante (m) y Edad en años.

## Discusión

### Variables dasométricas

Las alturas dominantes obtenidas en Pérez Zeledón para generar las curvas de IS son superiores a las registradas en SAF con café en Honduras y a las registradas en edades tempranas y maduras en plantaciones puras en México. En efecto, a los 20 años Jiménez [13] en Honduras registra 19,8 m de altura dominante promedio, cuyo valor es inferior al de Pérez Zeledón, Costa Rica, a esa misma edad (28,4 m). Del mismo modo, pero en plantaciones puras de *C. odorata* jóvenes en México,

Bravo [12] registra 12,1 m a los siete años, valor que es ligeramente inferior (10,5 %) al del presente estudio. A los 10 y 15 años, Murillo-Brito et al. [9] también en México, obtuvieron valores de 18,3 y 22 m de altura dominante respectivamente, los cuales son inferiores a los 24,5 m y los 29 m registrados en este estudio para ambas edades. Las diferencias en esta variable indican un mayor crecimiento y rendimiento en altura para SAF en comparación con plantaciones puras, tal y como lo determinan Somarriba et al. [21] en su estudio con *Cordia alliodora*.

Con respecto al volumen total, Galán et al. [11] registran 101,1 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> en los mejores sitios de crecimiento (IS=26) a los 10 años, mientras que Mejía [22] determina valores de 95,2 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> a la misma edad y 284,8 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> a los 20 años. Ambos estudios presentan un mayor volumen total que el obtenido en la presente investigación, que registra 86,7 y 207,4 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> a los 10 y 20 años respectivamente. Las diferencias en volumen se pueden explicar debido a las particularidades de los sistemas productivos y también porque el volumen obtenido en Pérez Zeledón fue un promedio que incluye sitios de baja y alta calidad.

### Modelos de regresión

El modelo seleccionado para la predicción de la altura dominante en función a la edad presenta una bondad de ajuste ( $R^2=0,87$ ) que coincide con la registrada por Salazar et al. [10] utilizando un modelo de asociación exponencial y Galán et al. [11] que usó el modelo de Chapman-Richards. Por el contrario, el coeficiente de determinación del presente estudio es inferior al obtenido por Sandoval [23] en Oaxaca ( $R^2=0,96$ ) quien también utilizó el modelo Chapman-Richards en plantaciones jóvenes de hasta 12 años. El modelo de la presente investigación es superior, en cuanto a bondad de ajuste ( $R^2=0,87$ ), al modelo registrado por García et al. [8] en Quintana Roo ( $R^2=0,35$ ) y al modelo de Mejía et al. [22] ( $R^2=0,77$ ). Ambas investigaciones determinaron el modelo de Schumacher como aquel con mayor ajuste con respecto a los datos.

### Curvas de IS

Las cinco clases de índice de sitio obtenidas en Pérez Zeledón coinciden en amplitud con las registradas por Bravo [12] ya que generó cuatro índices cada dos metros (6, 8, 10 y 12 m). Además, al comparar el mejor sitio proyectado por este autor en Oaxaca, se observa que es inferior al del presente estudio. De esta manera, a los seis años en Oaxaca se obtienen 12 m en el mejor sitio, mientras que para el mejor IS de este estudio se obtienen 15,5 m.

Caso contrario sucede al comparar los índices de sitio registrados por Galán et al. [11] en plantaciones de enriquecimiento de vegetación secundaria con valores

entre 14 y 26 m y a los obtenidos por Mejía et al. [22], quienes determinan alturas dominantes en los mejores sitios, superiores a los 25 m a una edad base de 10 años. Estos estudios realizados en Oaxaca utilizan datos de plantaciones jóvenes inferiores a 11 años por lo que, para edades mayores a 11 años, los resultados muestran ser inferiores a los obtenidos en Pérez Zeledón. En este sentido, la presente investigación presenta a los 20 años alturas dominantes de 25 y 39,4 m en sitios de muy baja (IS=15) y muy alta calidad (IS=23) respectivamente, mientras que Mejía et al. [22] registra 19,1 m en baja calidad de sitio y 31.8 m en los sitios de alta calidad a esa misma edad.

De los tres IS registrados por Murillo-Brito et al. [9] en Tabasco, dos de ellos coinciden con los registrados en este estudio, así como las proyecciones de alturas dominantes en distintas edades. A pesar de que el estudio realizado en Tabasco no contó con datos de plantaciones mayores a los 15 años, sus proyecciones son similares a las de los SAF en Pérez Zeledón. En mérito a lo anterior, Murillo-Brito et al. [9] registran para los 20 años en IS=15 y para IS= 19 valores aproximados a 24 y 30 m respectivamente, mientras que en el presente estudio se registran 25,7 y 32 m, para los mismos índices de sitio a los 20 años.

## Conclusiones y recomendaciones

Se logró obtener un modelo multiplicativo satisfactorio, capaz de predecir la altura dominante en función de la edad y que explica la variabilidad de los datos en un 87 % para edades entre 1 y 20 años. Este modelo fue el que presentó un mejor ajuste con respecto a modelos semejantes e incluso con respecto a otros modelos como el de Schumacher, utilizados para el IS en otros países.

Las curvas de IS permiten conocer la capacidad productiva de una finca ya sea en sus primeros años de crecimiento o a edad más avanzada, por lo cual es considerada como una herramienta útil para el monitoreo del crecimiento del rodal y la toma de decisiones en el manejo del SAF.

Se recomienda continuar con estudios de crecimiento y rendimiento según cada calidad de sitio determinada, así como un estudio financiero que determine rentabilidad según IS. En este sentido, conocer los valores de incremento medio anual en variables como área basal, volumen y altura dominante, pueden orientar a mejorar vacíos de información con respecto al comportamiento de *C. odorata* en combinación con café. Igualmente se sugiere replicar este tipo de evaluaciones en otras zonas cafetaleras del país.

## Agradecimientos

Se agradece a los caficultores del cantón de Pérez Zeledón que participaron en el estudio y permitieron la recolección de la información. A CoopeAgri R. L. y al INISEFOR-UNA, por el apoyo logístico y financiero para la realización de esta investigación. También se agradece a la revista y a las personas revisoras anónimas por sus oportunos comentarios.

## Referencias

- [1] M. Prodan, R. Peters, F. Cox y P. Real, Mensura forestal. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), pp.586, 1997.
- [2] A. Alvarado y J. Raigosa. Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. Agronomía Costarricense, vol 36, no1, Jun., pp. 113-115, 2012.
- [3] P. Martínez-Zurimendi, M. Domínguez-Domínguez, A. Juárez-García, L. M, López- López, V. de la Cruz-Arias y J. Álvarez-Martínez. "Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de Gmelina arborea en Tabasco, México". Revista fitotecnia mexicana, vol. 38, no. 4, Dic., pp. 415-425, 2015.
- [4] F. Cailliez y D. Alder. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos: Vol. 2 - Predicción del rendimiento. Roma, Italia: FAO. 118 pp. 1980.
- [5] J. L. Clutter, J.C. Fortson, L. V. Pienaar, G. H. Brister y R. L. Bailey. Timber management: a quantitative approach. John Wiley & Sons Inc. New York, NY. USA. 333 p. 1983.
- [6] H.Y. Chen, K. Klinkan y R. D. Kabzems. "Site index, site quality, and foliar nutrients of trembling aspen: relationships and predictions". Can. J. For. Res, vol. 28, no.12, pp. 1743-1755, 1998. <https://doi.org/10.1139/x98-154>
- [7] E. Ortiz-Malavasi. "Crecimiento y rendimiento forestal: Curvas de Índice de Sitio para Plantaciones de Teca Edad Base= 12 años". Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, enero, 2020.
- [8] X. García-Cuevas, J. Flores-Garnica, y J. Benavides-Solorio. "Índice de Sitio para *Cedrela odorata* L. (Cedro rojo) en Quintana Roo, México". Ciencia Forestal en México, vol. 32, no. 101, Ag., pp. 71-92. 2007.
- [9] Y. Murillo-Brito, M. Domínguez- Domínguez, P. Martínez-Zurimendi, L. Lagunes y A. Aldrete. "Índice de sitio en plantaciones de *Cedrela odorata* en el trópico húmedo de México". FCA UNCUYO, vol.49, no. 1, Jun., pp. 15-31. 2017. <https://bdigital.uncu.edu.ar/9250>
- [10] J. G. Salazar-García, O. Santiago-Trinidad, V. Sánchez-Monsalvo, C. Monroy-Rivera y E. Couttolenc-Brenis. "Modelo para determinar calidad de sitio a edades tempranas de cuatro especies tropicales". Revista Mexicana de Ciencias Forestales, vol. 3, no.11, pp. 71-80. 2012. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11322012000300006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322012000300006&lng=es&tlng=es)
- [11] R. Galán-Larrea, H. M. de los Santos-Posadas y J. I. Valdez-Hernández. "Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José, Chacalapa, Pochutla, Oaxaca". Madera y Bosques, vol. 14, no. 2, Ago., pp. 65-82. 2008
- [12] A. Bravo-Mendel. "Estimación maderable y evaluación financiera de plantaciones forestales comerciales de cedro y caoba en Oaxaca, México". Tesis de Maestría en Ciencias, especialista forestal, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México, México, 2007.
- [13] N. G. Jiménez-Nehring. "Producción de madera y almacenamiento de carbón en cafetales con cedro (*Cedrela odorata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*) en Honduras". Tesis de maestría en Agroforestería Tropical. CATIE. Costa Rica, 2012.
- [14] M. González-Rojas, R. Murillo-Cruz, E. D. Virgínio-Filho, y C. Ávila-Arias. "Influencia de factores biofísicos y de manejo en el crecimiento de *Cedrela odorata* L. en asocio con café en Pérez Zeledón, Costa Rica". Revista Forestal Mesoamericana Kurú, vol. 15, no. 36, pp. 46-58, 2017. DOI:10.18845/rfmk.v15i36.3420
- [15] M. González-Rojas, R. Murillo-Cruz y C. Ávila-Arias. "Rentabilidad financiera de *Cedrela odorata* L. en sistemas agroforestales con café en Pérez Zeledón, Costa Rica". Revista de Ciencias Ambientales, vol. 52, no. 1, pp. 129-144, 2018. <https://doi.org/10.15359/rca.52-1.7>
- [16] S. Calvé Jarque, O. Murillo, L. Salazar y D. Córdoba. "Aporte económico de la madera de cedro (*Cedrela odorata* L.) como árbol de sombra en cafetales de Pérez Zeledón, Costa Rica". Revista Forestal Mesoamericana Kurú, vol. 17, no. 41, pp. 68-77. 2020 <https://doi.org/10.18845/rfmk.v17i41.5287>
- [17] R. Bolaños, V. Watson y J. Tosi. 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. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica: 2005.
- [18] INDER (Instituto de Desarrollo Rural). "Caracterización del territorio de Pérez Zeledón". Dirección Región Brunca Oficina Subregional San Isidro, 2016. [Online]. Disponible en: <https://www.inder.go.cr/perez-zeledon/Caracterizacion-territorio-Perez-Zeledon.pdf> [20 de enero 2021]
- [19] INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos). VI Censo Nacional Agropecuario. San José, Costa Rica. INEC, 2015.
- [20] F. Mora, F y V. Meza. "Curvas de índice de sitio para Teca (*Tectona grandis* Linn.) en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica". Presentado en Plantaciones de Teca (*Tectona grandis*): Posibilidades y perspectivas para su desarrollo. Seminario y Grupo de Discusión Virtual. (Disco compacto), 26 al 28 de noviembre de 2003, Heredia, Costa Rica, pp. 16.
- [21] E. Somarriba, R. Valdivieso, W. Vásquez y G. Galloway. "Survival, growth, timber productivity and site index of *Cordia alliodora* in forestry and agroforestry systems". Agroforestry Systems, vol. 51, no. 2, pp. 111-118, 2001. Doi: 10.1023/A:1010699019745



- [22] I. Mejía-Cuevas. "Sistema de crecimiento y rendimiento maderable de dos especies arbóreas en una plantación forestal en la costa de Oaxaca". Tesis de licenciatura en Ingeniería Forestal, Universidad del Mar, Puerto escondido, Oaxaca, México, 2013.
- [23] R. Sandoval-García. "Crecimiento en diámetro y altura de tres especies tropicales de plantaciones comerciales en Pochutla, Oaxaca". Tesis de licenciatura en Ingeniería Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Coahuila, México, 2010.