



Estimación del índice de sitio como herramienta para el manejo productivo de *Dipteryx ferrea* y *Simarouba amara*

Site index estimation as a tool for the productive management of *Dipteryx ferrea* and *Simarouba amara*

Ymber Flores Bendezú¹

¹ Estación Experimental Agraria Pucallpa, Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Carretera Federico Basadre km 4200, Pucallpa 25004, Perú.

ORCID de los autores

Y. Flores Bendezú: <https://orcid.org/0000-0002-4822-2089>

RESUMEN

La estimación precisa de la calidad del sitio es esencial para la planificación forestal, ya que permite proyectar el crecimiento, seleccionar áreas prioritarias y optimizar decisiones de manejo. En especies tropicales nativas, la disponibilidad de modelos de índice de sitio sigue siendo limitada, lo que dificulta el desarrollo de plantaciones sostenibles. Este estudio estimó el índice de sitio (IS) para *Dipteryx ferrea* y *Simarouba amara* mediante los modelos de Schumacher y Chapman-Richards. Se analizaron 48 árboles de *D. ferrea* (1 – 13 años) y 113 de *S. amara* (1 – 12 años) provenientes de plantaciones experimentales. El modelo Chapman-Richards mostró mejor ajuste para *D. ferrea* ($R^2 = 0,948$; RMSE = 1,007), mientras que el modelo Schumacher fue superior para *S. amara* ($R^2 = 0,949$; RMSE = 1,626). Se generaron curvas anamórficas con edad base de 10 años para la estimación del IS y clasificación de sitios productivos. Los resultados revelan un crecimiento inicial notable en *D. ferrea* pese a su alta densidad de madera, destacando la necesidad de estudios adicionales. Este trabajo constituye la primera estimación formal del IS para *D. ferrea* y aporta una herramienta útil para el manejo sostenible de plantaciones tropicales.

Palabras clave: Índice de sitio; *Dipteryx ferrea*; *Simarouba amara*; modelos de crecimiento; curvas anamórficas; altura dominante.

ABSTRACT

Accurate estimation of site quality is essential for forest planning, as it enables growth projection, prioritization of suitable areas, and optimization of management decisions. For native tropical species, the availability of site index models is still limited, which constrains the development of sustainable plantations. This study estimated the site index (SI) for *Dipteryx ferrea* and *Simarouba amara* using the Schumacher and Chapman-Richards models. A total of 48 *D. ferrea* trees (1 – 13 years) and 113 *S. amara* trees (1 – 12 years) from experimental plantations were analyzed. The Chapman-Richards model provided a better fit for *D. ferrea* ($R^2 = 0.948$; RMSE = 1.007), while the Schumacher model performed best for *S. amara* ($R^2 = 0.949$; RMSE = 1.626). Anamorphic SI curves with a base age of 10 years were developed to estimate SI and classify productive sites. Results indicate notable early growth in *D. ferrea* despite its high wood density, highlighting the need for further research. This study represents the first formal SI estimation for *D. ferrea* and provides a useful tool for the sustainable management of tropical forest plantations.

Keywords: Site index; *Dipteryx ferrea*; *Simarouba amara*; growth models; anamorphic curves; dominant height.

1. Introducción

Dipteryx ferrea (Ducke) Ducke, conocida como "shihuahuaco", es una especie arbórea del género *Dipteryx* Schreb. con creciente interés en producción maderable (Carvalho et al., 2024). En general, las especies de este género destacan por su potencial en plantaciones puras y mixtas, sistemas agroforestales y restauración de áreas degradadas, debido a su rápido crecimiento, bajos requerimientos nutricionales, baja necesidad de mantenimiento, producción de semillas comestibles y medicinales, copa poco densa, fuste recto y alta capacidad de captura de carbono (Selaya et al., 2017; Chávez & Sabogal, 2019; Flores, 2025; Román-Dañobeytia et al., 2021; Caetano-Andrade et al., 2021; Bentes et al., 2021; Mondragón, 2023; de Sousa et al., 2023; Pinnschmidt et al., 2023; Pinto, 2025). Las especies del género *Dipteryx* están siendo sobreexplotadas debido a la alta demanda de su madera en los mercados nacional e internacional. En Estados Unidos, esta madera alcanza precios de entre USD 1204 y 1237 por metro cúbico, mientras que en Asia varía entre USD 989 y 1008 por metro cúbico, lo que la posiciona entre las más valiosas del mundo (ITTO, 2023).

Simarouba amara Aubl., conocida como "marupa" en Perú, es una especie arbórea nativa de América tropical y perteneciente a la familia Simaroubaceae. Se destaca por su rápido crecimiento, la buena calidad de su madera y la versatilidad de su biomasa. Esta especie se adapta a climas con temperaturas entre 22 y 35 °C, precipitaciones anuales de 1778 a 3500 mm y niveles de humedad cercanos al 80%. Su adaptación a diversos tipos de suelo ha facilitado su amplia distribución en regiones tropicales (GRIN, 2024; Scarcelli et al., 2024; Pirani et al., 2021; Devecchi et al., 2024).

Para evaluar el potencial productivo de los bosques en la producción de madera, es fundamental estimar la calidad del sitio, entendida como la capacidad de un lugar para sostener el crecimiento de una especie determinada (Burkhart & Tomé, 2012). Esta calidad está influida por factores como clima, suelo y genética (Lee et al., 2024).

El índice de sitio (IS) tiene múltiples formas de estimarlo, pero se ha estandarizado el uso de altura dominante para ese fin y es una herramienta ampliamente usada a nivel mundial para estimar productividad y proyectar rendimientos futuros (Kędziora et al., 2020). La literatura científica reporta siete definiciones de

altura dominante (en inglés "top height" o "dominant height": (1) altura promedio de los árboles dominantes y codominantes al momento de la medición de la parcela, (2) altura promedio de los árboles que siempre han sido dominantes o codominantes durante toda la vida del rodal, (3) altura media de Lorey, (4) altura promedio de los 100 árboles más gruesos por hectárea en el momento de la medición, (5) altura promedio de los 100 árboles más gruesos por hectárea en el momento de la última medición, (6) la altura promedio de los árboles más gruesos del 20% en el momento de la medición de la parcela, y (7) altura promedio de los árboles más gruesos del 20% en cada medición que también sobrevivieron hasta la última medición (Sharma et al., 2002; Nakai et al., 2010; Ritchie et al., 2012; Mason, 2019; VanderSchaaf, 2023).

Entre los modelos más utilizados para describir el IS destacan el de Schumacher (1939) y el de Chapman-Richards (Richards, 1959; Chapman, 1961), por su capacidad para ajustarse a diferentes especies y condiciones ecológicas (Sharma et al., 2002, 2011; Lumbres et al., 2013; Araújo et al., 2024; Kiviste et al., 2002). La elección de una edad base es clave en la modelación del IS, ya que permite comparar sitios con objetividad, enfocar el modelo en etapas de crecimiento más estables y mejorar la precisión en las predicciones. Además, facilita la comparación entre estudios y regiones, y apoya la planificación y manejo sostenible de los bosques (Weiskittel et al., 2011; Sharma et al., 2002; Panik, 2014).

Estudios recientes destacan el valor del índice de sitio para caracterizar la productividad y apoyar decisiones de manejo en plantaciones y bosques nativos, particularmente en climas tropicales y templados (Antón-Fernández et al., 2023; Kazimirović et al., 2024; Rizzo-Martín et al., 2023; Hernández-Ramos et al., 2022). Estos avances complementan los enfoques clásicos y refuerzan la necesidad de desarrollar modelos específicos para especies nativas de alto valor en la Amazonía.

El objetivo de este estudio fue desarrollar modelos de índice de sitio para *Dipteryx ferrea* y *Simarouba amara* en la región Ucayali que permita la identificación de las mejores áreas para el desarrollo de plantaciones de estas especies.

2. Metodología

El estudio se llevó a cabo en el Centro Experimental Alexander von Humboldt perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y

ubicado en la Región Ucayali, Perú (08°49'37"S, 75°03'17"O), con una superficie de 174 ha y una altitud de 225 m (Figura 1). El área presenta dos estaciones climáticas claramente diferenciadas: una temporada lluviosa, que corresponde al invierno amazónico y se extiende de noviembre a abril, y otra seca, de mayo a octubre. La precipitación anual promedio es de 3600 mm, siendo agosto el mes con menos lluvia y marzo el de mayor cantidad; mientras que la humedad relativa varía entre el 80% y el 90%. De acuerdo con la clasificación de Zonas de Vida de Holdridge, el área se ubica en la Zona de Vida de bosque húmedo tropical (BHT). En términos de topografía, el área presenta suaves ondulaciones y colinas con pendientes entre 5% y 10%. Los suelos, de origen sedimentario, tienen una textura que varía desde arcillosa hasta arcillo-arenosa y limosa, y se destacan por su buena estructura, drenaje, fertilidad y un pH que fluctúa entre 5,4 y 6,7 (Flores, 2025).

Se utilizó la definición de "altura dominante" establecida por Sharma et al. (2002) por considerarse más precisa que otras definiciones y porque se cuenta con la base de datos de las evaluaciones anuales realizadas en el Centro Experimental von Humboldt. Se eligieron individuos procedentes de plantaciones experimentales de *D. ferrea* y *S. amara* en el Centro Experimental Alexander von Humboldt evaluados anualmente. El número total de sitios fue de 11: 5 sitios para *D. ferrea* y 6 sitios para *S. amara*. Los sitios correspondieron a

plantaciones experimentales independientes, establecidas bajo condiciones similares de manejo y evaluación silvicultural, sin tratamientos diferenciados.

En *D. ferrea*, se evaluaron 48 árboles con edades entre 1 y 13 años (media: 6 años; CV: 46,33%) y alturas dominantes entre 2,25 y 22,0 m (media: 13,71 m; CV: 40,04%). Para *S. amara*, se evaluaron 113 árboles con edades de 1 a 12 años (media: 7 años; CV: 57,14%) y alturas dominantes de 1,56 a 25,3 m (media: 17.15 m; CV: 39,83%). Las ecuaciones de altura utilizadas para estimar el IS en este estudio fueron los modelos de Schumacher (Schumacher, 1939) y Chapman-Richards (Richards, 1959; Chapman, 1961; Lumbres et al., 2013). El modelo Schumacher es una ecuación exponencial que relaciona la altura de los árboles con su edad, siendo efectivo para modelar el crecimiento forestal en etapas tempranas e intermedias. En contraste, el modelo Chapman-Richards es una versión generalizada de la ecuación logística, ofrece mayor flexibilidad al capturar patrones de crecimiento complejos, como fases de expansión rápida y estabilización, resultando ideal para bosques maduros.

El modelo de Schumacher se ha empleado en la construcción de curvas guía, especialmente en su forma logarítmica, que se expresa como:

$$\ln(H) = a + bA^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

donde *H* es la altura dominante (m), *A* es la edad del árbol (años), y *a* y *b* son parámetros a estimar.

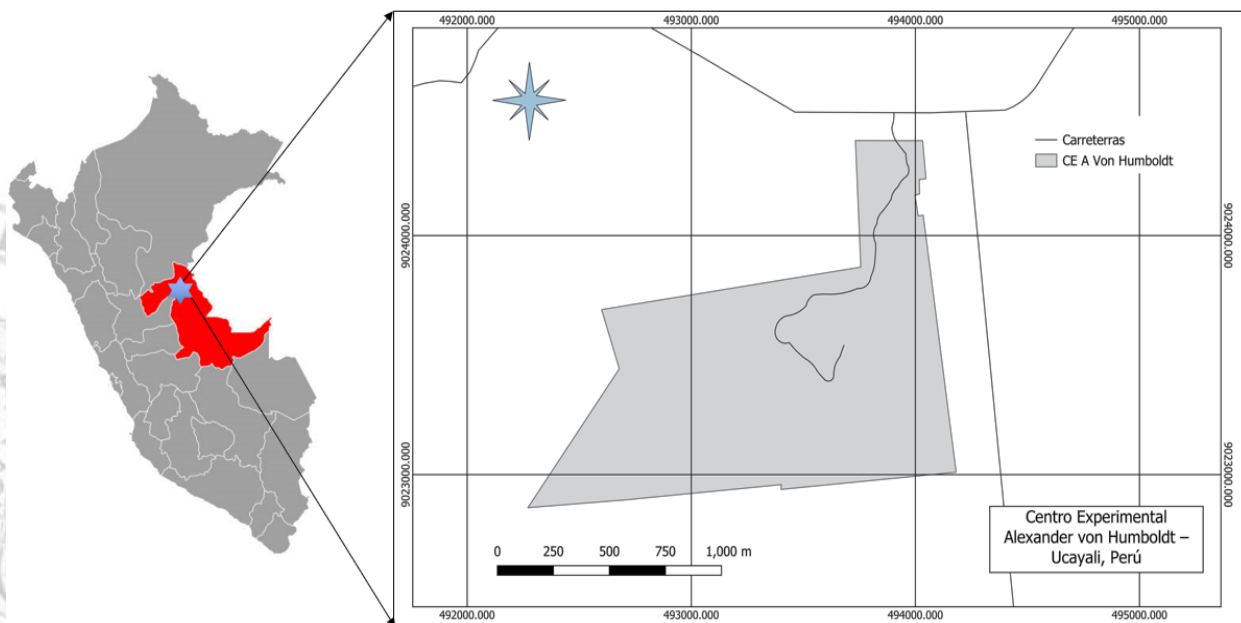


Figura 1. Ubicación del área de estudio en el Centro Experimental Von Humboldt, Ucayali, Perú.

Figure 1. Location of the study area at the Von Humboldt Experimental Center, Ucayali, Peru.

Dentro de esta formulación, el parámetro b cumple una función clave al definir la pendiente de las curvas guía, siendo particularmente útil en la elaboración de modelos de índice de sitio (IS). Cuando la edad del árbol coincide con una edad base de referencia (A_0), la altura estimada corresponde al índice de sitio (S). En tal caso, la ecuación (1) se reduce a:

$$\ln(S) = a + bA_0^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

Restando (2) de (1), se obtiene una expresión que relaciona la altura a cualquier edad con el índice de sitio y el parámetro b :

$$\ln(H) = \ln(S) + b(A^{-1} - A_0^{-1}) \dots\dots\dots (3)$$

Al aplicar la función exponencial a ambos lados de la ecuación (3), se obtiene la versión explícita del modelo, útil para estimaciones prácticas:

$$H = \exp[\ln(S) + b(A^{-1} - A_0^{-1})] \dots\dots\dots (4)$$

Esta formulación permite estimar la altura dominante a distintas edades, siempre que se conozca el índice de sitio y el parámetro b , facilitando así la construcción de curvas anamórficas.

Por su parte, el modelo de Chapman-Richards representa una alternativa ampliamente utilizada por su flexibilidad para describir el crecimiento en altura. Su forma general está dada por:

$$H = a(1 - e^{-(bA)})^c \dots\dots\dots (5)$$

Donde H es la altura dominante (m), A es la edad (años), a , b y c son parámetros del modelo, y e representa la base del logaritmo natural.

Al igual que en el caso anterior, cuando $A = A_0$, se obtiene una expresión para el índice de sitio:

$$S = a(1 - e^{-(bA_0)})^c \dots\dots\dots (6)$$

Dividiendo la ecuación (5) entre la (6), se deriva una relación proporcional entre altura y edad, en función del índice de sitio:

$$H / (1 - e^{-(bA)})^c = S / (1 - e^{-(bA_0)})^c \dots\dots (7)$$

Finalmente, despejando H , se obtiene la forma final del modelo de índice de sitio basado en la ecuación de Chapman-Richards:

$$H = S \times [(1 - e^{-(bA)}) / (1 - e^{-(bA_0)})]^c \dots\dots (8)$$

Este modelo, al igual que el de Schumacher, permite generar curvas guía para distintas clases de sitio, lo que resulta fundamental en estudios de productividad forestal y clasificación de sitios de crecimiento. La estimación de los parámetros se realizó mediante regresión no lineal, utilizando la función nls del entorno R (v.4.4, Posit Software, 2024). Se presentan los coeficientes ajustados según las ecuaciones 1 y 5, junto con los indicadores de ajuste: coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE) y el criterio de

información de Akaike (AIC), útiles para evaluar la precisión y adecuación de los modelos. Además, se aplicó una prueba t para muestras emparejadas a fin de comparar las alturas observadas con las estimadas por los modelos de Schumacher y Chapman-Richards, evaluando diferencias significativas entre ambas. Se ajustó también una curva guía general, generando una familia de curvas anamórficas, caracterizadas por mantener forma y proporción constantes entre sitios, con pendientes similares a cualquier edad y un punto de inflexión común (VanderSchaaf, 2024). Los índices de sitio para *Dipteryx ferrea* y *Simarouba amara* se definieron en intervalos de 1 y 2 metros respectivamente, a una edad base de 10 años.

3. Resultados y discusión

La Tabla 1 presenta los resultados del ajuste de dos modelos de crecimiento aplicados a las especies forestales *D. ferrea* y *S. amara*: el modelo de Schumacher (de forma logarítmica) y el modelo de Chapman-Richards (de crecimiento asintótico flexible). Los parámetros estimados corresponden a los coeficientes de cada modelo: “ a ” representa la altura asintótica o parámetro de escala, “ b ” es el parámetro de forma que controla la tasa de crecimiento, y “ c ” —exclusivo del modelo Chapman-Richards— define la curvatura de la trayectoria de crecimiento. El Error Estándar es una medida de la precisión de la estimación. El “ t valor” es el estadístico t para la prueba de significancia del parámetro (valores absolutos altos indican mayor significancia). R^2 es el coeficiente de determinación ajustado (0 - 1), donde valores cercanos a 1 indican mejor ajuste. RMSE (*Root Mean Square Error*) es el error cuadrático medio (valores bajos indican mayor precisión del modelo). Finalmente, AICc (*Akaike's Information Criterion corrected*) es el criterio de información para comparar modelos (valores más bajos indican mejor equilibrio entre ajuste y parsimonia).

Los modelos de crecimiento evaluados (Schumacher y Chapman-Richards) mostraron diferencias en su capacidad de ajuste para las especies *D. ferrea* y *S. amara*. En el caso del *D. ferrea*, el modelo Chapman-Richards presentó un mejor desempeño, con un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0,948$), un bajo error cuadrático medio (RMSE = 1,007) y un valor de AICc (1420,096). A pesar del mayor número de parámetros, Chapman-Richards tuvo mejor ajuste según R^2 y RMSE, pero no según AICc. Todos sus

parámetros fueron estadísticamente significativos (valores de $|t| > 8,62$), destacando el valor de "a" ($23.525 \pm 1,047$), que sugiere una mayor tasa de crecimiento inicial en comparación con el modelo Schumacher ($R^2 = 0,854$, $RMSE = 1,680$, $AICc = -437,147$).

Para *S. amara*, el modelo Schumacher mostró un mejor ajuste, con un R^2 de 0,949, un RMSE de 1,626 y un AICc más bajo (-139,268), indicando una mayor parsimonia y precisión en la estimación del crecimiento de la altura dominante. Los parámetros de este modelo ("a" = $3,238 \pm 0,017$, "b" = $-2,451 \pm 0,037$) fueron altamente significativos (valores de $|t| > 65,73$), lo que respalda su robustez. Aunque el modelo Chapman-Richards también presentó un buen ajuste ($R^2 = 0,946$, $RMSE = 1,668$), su mayor complejidad (tres parámetros) y un AICc más alto (726,375) lo hacen menos favorable en comparación con Schumacher.

Estos resultados sugieren que el modelo óptimo varía según la especie: Chapman-Richards es más adecuado para *D. ferrea*, posiblemente debido a su patrón de crecimiento más complejo, mientras que Schumacher, más sencillo, es suficiente para describir el crecimiento de altura dominante en *S. amara*. Estas diferencias podrían estar asociadas a variaciones en las estrategias de desarrollo y adaptación ecológica entre ambas especies.

Las ecuaciones de IS obtenidas quedarían como sigue:

Dipteryx ferrea

Schumacher

$$H = \exp [\ln(S) - 1,763419 (A^{-1} \cdot 10^{-1})] \dots (9)$$

Chapman-Richards

$$H = S \left((1 - e^{-0,120507A}) / (1 - e^{-0,120507 \times 10}) \right)^{0,884708} \dots (10)$$

Simarouba amara

Schumacher

$$H = \exp [\ln(S) + 2.450666 (A^{-1} \cdot 10^{-1})] \dots (11)$$

Chapman-Richards

$$H = S \left((1 - e^{-0,37528A}) / (1 - e^{-0,3752 \times 10}) \right)^{1,72556} \dots (12)$$

Donde, H es la altura dominante del árbol (m); A es la edad del árbol (año); S es el índice del sitio; e es la base del logaritmo neperiano; ln es logaritmo natural.

Las curvas de IS para cada modelo y especie revelaron patrones similares en ambos modelos (Figura 2). Los datos de árboles de *S. amara* de este estudio se ajustaron bien a las curvas de IS de los estudios anteriores (Paredes, 2003).

Los modelos seleccionados (ecuaciones 9, 10, 11 y 12) permitieron generar curvas anamórficas de índice de sitio con edad base de 10 años, aplicables al manejo forestal. La Figura 2 presenta estas curvas, construidas a partir de los modelos de Schumacher y Chapman-Richards para *Dipteryx ferrea* y *Simarouba amara*. La superposición de los datos observados con las curvas ajustadas permite validar visualmente la calidad del ajuste y la dispersión, sin recurrir a supuestos estadísticos adicionales. Cada curva representa el crecimiento esperado de la altura dominante en función de la calidad del sitio. Por ejemplo, en un sitio con índice de sitio de 15 m, se espera que los árboles dominantes alcancen esa altura a los 10 años. Las curvas más elevadas, como la de 23 m (línea superior), corresponden a sitios de mayor productividad. En el caso de *S. amara*, las curvas del modelo de Schumacher abarcan adecuadamente el rango observado; mientras que en *D. ferrea*, el modelo de Schumacher tiende a subestimar la altura en edades mayores a 16 años.

Tabla 1

Coefficientes y estadísticas de Schumacher y Chapman y Richards de ecuación para índice de sitio modelo de *Dipteryx ferrea* y *Simarouba amara*

Table 1

Schumacher and Chapman and Richards coefficients and equation statistics for model site index of *Dipteryx ferrea* and *Simarouba amara*

Especie	Modelo	Parámetro	Estimado	Error Estándar	t valor	R ²	RMSE	AICc
<i>Dipteryx ferrea</i>	Schumacher	a	2,861793	0,010382	275,639627	0,854222	1,680455	-437,147024
		b	-1,763419	0,026372	-66,867866			
	Chapman-Richards	a	23,524941	1,046589	22,477733	0,947614	1,007366	1420,096029
		b	0,120507	0,013979	8,620269			
<i>Simarouba amara</i>	Schumacher	a	3,238253	0,017313	187,043601	0,948599	1,625506	-139,267833
		b	-2,450666	0,037283	-65,732011			
	Chapman-Richards	a	20,956573	0,371209	56,454896	0,945881	1,667928	726,374638
		b	0,375281	0,036741	10,214286			
		c	1,725568	0,163527	10,5522			

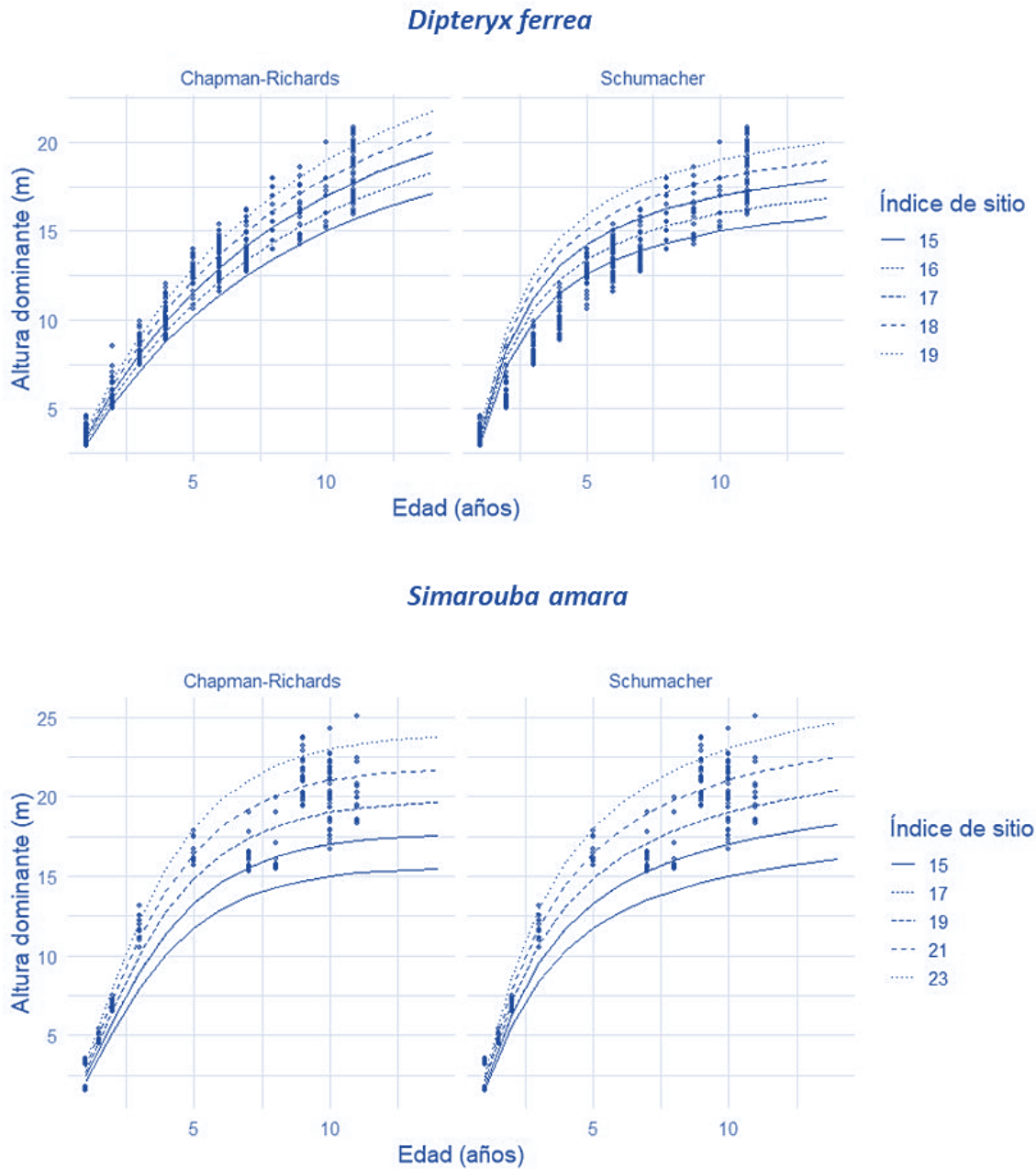


Figura 2. Modelos de índice de sitio usando las ecuaciones de Schumacher y Chapman-Richards para *Dipteryx ferrea* y *Simarouba amara*.

Figure 2. Site index models using the Schumacher and Chapman-Richards equations for *Dipteryx ferrea* and *Simarouba amara*.

Las curvas presentadas son de tipo anamórficas las cuales son precisas solo si el muestreo de la altura dominante se realiza correctamente y suponen que la influencia de la variación del sitio en el crecimiento de la altura dominante es uniforme en todas las edades (Weiskittel et al., 2011; Binkley & Fisher, 2019). En cambio, las curvas polimórficas, basadas en parcelas permanentes o análisis de tallos, consideran que la forma de las curvas de crecimiento varía entre sitios (Kershaw, et al., 2016, Kashian et al., 2022).

Los investigadores coinciden en que las curvas polimórficas son más precisas para estimar el índice de sitio. En este estudio, el método de la curva guía solo permitió elaborar curvas anamórficas, siendo el más simple pero no necesariamente el más recomendado.

La especie *D. ferrea* es notablemente poco estudiada en términos de su desarrollo y características silviculturales, especialmente en lo que respecta al IS (Flores, 2025; Pérez, 2023, Fernández-Angulo et al., 2024). A pesar de su

importancia económica y ecológica en la Amazonía (Carvalho et al., 2024), no existen antecedentes relevantes que aborden la calidad de sitio para esta especie. Otras especies como *Dipteryx odorata* (Aubl.) Forsyth f. y *Dipteryx alata* Vogel han sido objeto de mayor atención en la investigación. Aunque *D. ferrea* comparte ciertos aspectos ecológicos y morfológicos con *D. odorata* y *D. alata*, la mayoría de las investigaciones previas se han centrado en estos últimos, creando un vacío de conocimiento sobre las particularidades de *D. ferrea*, dificultando la comprensión de la ecología y silvicultura de esta especie y planteando la necesidad urgente de generar más estudios para cubrir el vacío existente y permitir una comparación más detallada entre ambas.

Por otro lado, aunque *D. ferrea* presenta una madera densa y pesada ($0,87 \text{ g cm}^{-3}$), los resultados indican un crecimiento inicial relativamente alto, como lo refleja el valor del parámetro "a" en el modelo de Chapman-Richards, contradiciendo la tendencia general que asocia madera densa con especies de crecimiento lento (Rüger et al., 2012). Esta aparente discrepancia podría explicar por qué el modelo asintótico de Chapman-Richards se ajustó mejor a esta especie, capturando adecuadamente su patrón de crecimiento. Si bien en situaciones extremas de densidad del rodal la altura dominante puede verse afectada (Niemistö, 1995; Tymńska-Czabańska et al., 2022), en general esta variable tiende a ser más estable que otras como el DAP (diámetro a la altura del pecho) o la altura total promedio (Siipilehto, 2011), lo cual respalda la utilidad de las curvas de índice de sitio en este análisis.

Considerando el estado actual de las zonas aptas para plantaciones forestales, contar con modelos confiables de índice de sitio (IS) es clave para orientar la inversión de recursos y la planificación del manejo por cuanto permite identificar la calidad del sitio y proyectar el rendimiento potencial de una especie en función de variables ecológicas como suelo, fisiografía o clima.

Aunque en algunos casos puede ser necesario estratificar el área de estudio para mejorar la precisión del IS, disponer de un patrón general del crecimiento de la altura dominante simplifica el análisis y la toma de decisiones. Las curvas anamórficas generadas brindan una herramienta práctica para estimar el IS a partir de la edad y la altura dominante, facilitando la comparación entre sitios y la selección de áreas más productivas. Este estudio, aunque basado en plantaciones

jóvenes y curvas anamórficas, proporciona una herramienta práctica y aplicable para estimar la productividad del sitio. A pesar de sus limitaciones, permite orientar el manejo forestal en ausencia de parcelas permanentes, facilitando decisiones silviculturales en especies poco estudiadas como *D. ferrea* y *S. amara*.

4. Conclusiones

En el presente estudio se desarrolló índices de sitio para las especies *Dipteryx ferrea* y *Simarouba amara* en la Región Ucayali, Perú, utilizando los modelos de Schumacher y Chapman-Richards. Este estudio constituye la primera estimación formal del índice de sitio para *Dipteryx ferrea*. Los modelos de crecimiento evaluados demostraron ser útiles para estimar el índice de sitio (IS) de ambas especies en la región Ucayali. El modelo Chapman-Richards se ajustó mejor a *D. ferrea*, mientras que el modelo de Schumacher fue más adecuado para *S. amara*, por su simplicidad y buen ajuste. Se generaron curvas guía anamórficas con edad base de 10 años, que permiten estimar el IS a partir de la altura dominante y la edad, lo cual facilita clasificar la productividad del sitio y apoyar la planificación forestal. Aunque estas curvas asumen una relación constante entre edad y crecimiento, y no capturan la variabilidad entre sitios que sí reflejan las curvas polimórficas, su uso es apropiado en contextos donde no se dispone de parcelas permanentes o análisis de tallos. Además, los resultados revelan un crecimiento inicial relativamente alto en *D. ferrea*, a pesar de su alta densidad de madera, lo cual contrasta con lo que típicamente se espera en estas especies y resalta la necesidad de más estudios. En conjunto, las curvas generadas constituyen un aporte técnico relevante para el manejo sostenible de plantaciones forestales en la Amazonía peruana. Futuros estudios deberían incorporar parcelas permanentes, análisis de tallos y modelos polimórficos para capturar la variabilidad entre sitios y mejorar la precisión del IS. La integración con información edáfica, fisiográfica y datos LiDAR permitirá fortalecer la planificación forestal y apoyar programas de mejoramiento genético y restauración con especies nativas de alta importancia ecológica y económica.

Agradecimientos

Este estudio se llevó a cabo con el apoyo del Programa Presupuestal 0121 "Mejora de la Articulación de los Pequeños Productores Agropecuarios a los Mercados" del Instituto Nacional de Innovación Agraria del Perú.

Referencias bibliográficas

- Antón-Fernández, C., Hauglin, M., Breidenbach, J., & Astrup, R. (2023). Building a high-resolution site index map using boosted regression trees: The Norwegian case. *Canadian Journal of Forest Research*, 53(6), 416–429. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0198>
- Araújo, E. J. G., Silva, E. V., Vaz, P., Monte, M. A., Morais, V. A., Curto, R. A., Ataíde, D. H. S., & Rosa, T. C. (2024). Regression kriging in the productive capacity of planted forests. *Floresta e Ambiente*, 31(3), e20240034. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2024-0034>
- Bentes-Brasil, N. A., Brasil, N. M. de Q. X., Andrade, P. I. L. de, Sampaio, A. C. F., Noronha, N. C., Carvalho, E. J. M., Silva, A. R., & Schwartz, G. (2021). The commercial tree species *Dipteryx odorata* improves soil physical and biological attributes in abandoned pastures. *Ecological Engineering*, 160, 106143. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106143>
- Binkley, D., & Fisher, R. F. (2019). *Ecology and management of forest soils* (5th ed.). Wiley.
- Burkhardt, H., & Tomé, M. (2012). *Modeling forest trees and stands* (457 pp.). Springer.
- Caetano-Andrade, V., Schöngart, J., Espindola, W., Melinski, R., Silva, F., & Dobrindt, R. (2021). Advances in increment coring system for large tropical trees with high wood densities. *Dendrochronologia*, 68, 125860. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125860>
- Carvalho, C. S., Cardoso, D. B. O. S., & Lima, H. C. (2024). A taxonomic revision of *Dipteryx*, a Neotropical papilionoid legume genus of tonka beans and cumaru giant trees. In E. J. Tepe & T. A. Ranker (Eds.), *Systematic Botany Monographs* (Vol. 115, pp. 1–69). American Society of Plant Taxonomists.
- Chapman, D. G. (1961). Statistical problems in dynamics of exploited fisheries populations. In J. Neyman (Ed.), *Proceedings of the 4th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability* (Vol. 4, pp. 153–168). University of California Press.
- Chávez, J. & Sabogal, C. (2019). Restoring Degraded Forest Land with Native Tree Species: The Experience of “Bosques Amazónicos” in Ucayali, Peru. *Forests*, 10(10), 851. <https://doi.org/10.3390/f10100851>
- de Sousa, L., Pauletto, D., Gómez, E., da Silva, Á. F., de Sousa, T. G., da Silva, P., Baloneque, D. D. & Martorano, L. (2023). Dendrometric relationships and biomass in commercial plantations of *Dipteryx* spp. in the Eastern Amazon. *Forests*, 14(11), 2167. <https://doi.org/10.3390/f14112167>
- Devecchi, M. F., Pirani, J. R. & Thomas, W. W. (2024). Simaroubaceae in *Flora do Brasil* 2024 (continuously updated). Jardim Botânico do Rio de Janeiro. <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB222>
- Fernández Angulo, M. C., & Limache Alonzo, A. (2024). Effect of AIB and substrates on the vegetative propagation of *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke (shihuahuaco) in sub-irrigation chamber. *Research, Society and Development*, 13(12), e16131247510. <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i12.47510>
- Flores, Y. (2025). Crecimiento del “shihuahuaco” *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke en plantaciones bajo diferentes espaciamientos y tipos de suelo en Ucayali, Amazonia peruana. *Revista Forestal del Perú*, 39(2), 238–255. <https://doi.org/10.21704/rfp.v39i2.1829>
- Germplasm Resources Information Network (GRIN). (2024). *National plant germplasm system: Taxonomy for plant resources*. Information Network. Taxon: *Simarouba amara* Aubl. <https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxon/taxonomydetail?id=33956>
- Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., Ordaz-Ruiz, G., García-Espinoza, G. G., García-Magaña, J. J., & García-Cuevas, X. (2022). Índice de sitio para plantaciones forestales de *Pinus patula* en el Estado de México. *Madera y Bosques*, 28(2), e2822308. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822308>
- ITTO (International Tropical Timber Organization). (2023). *Tropical Timber Market Report*. International Tropical Timber Organization 27(3), 1–26. https://www.itto.int/files/user/mis/MIS_1-5_Feb2023.pdf
- Kazimirović, M., Stajić, B., Petrović, N., Stamenković, V., Stojanović, M., Belić, S., ... & Medarević, M. (2024). Dynamic height growth models for highly productive pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands: Explicit mapping of site index classification in Serbia. *Annals of Forest Science*, 81, 15. <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01231-0>
- Kershaw, J. A., Jr., Ducey, M. J., Beers, T. W., & Husch, B. (2016). *Forest mensuration* (5th ed.). Wiley.
- Kędziora, W., Tomusiak, R., & Borecki, T. (2020). Site index research: A literature review. *Forest Research Papers*, 81(2), 91–98. <https://doi.org/10.2478/frp-2020-0010>
- Kashian, D. M., Zak, D. R., Barnes, B. V., & Spurr, S. H. (2022). *Forest ecology* (5th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119476054>
- Kiviste, A., Álvarez, J. G., Rojo, A., & Ruiz, A. D. (2002). *Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal*. Monografías INIA: Forestal No. 4, 190 pp. INIA.
- Lee, D., Siipilehto, J., Miina, J., Niemistö, P., Haapanen, M., Hynynen, J., & Huuskonen, S. (2024). Site index and stand characteristic models for silver birch plantations in southern and central Finland. *Forest Ecology and Management*, 563, 121998. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121998>
- Lumbres, R. I. C., Lee, Y. J., Seo, Y. O., Calora Jr., F. G., & Parao, M. R. (2013). Model fitting and validation of six height–DBH equations for *Pinus kesiya* Royle ex Gordon in Benguet Province, Philippines. *Forest Science and Technology*, 9(1), 45–50. <https://doi.org/10.1080/21580103.2013.772542>
- Mason, E. G. (2019). Influences of mean top height definition and sampling method on errors of estimates in New Zealand’s forest plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 49, 24. <https://doi.org/10.33494/nzjfs492019x24x>
- Mondragón, G. (2023). *Respuesta silvicultural de ocho especies forestales nativas y exóticas de valor comercial instaladas en plantaciones forestales en la Amazonia peruana*. (Tesis de maestría), Universidad Nacional Agraria La Molina. Repositorio Institucional UNALM.
- Nakai, T., Sumida, A., Kodama, Y., Hara, T. & Ohta, T. (2010). A comparison between various definitions of forest stand height and aerodynamic canopy height. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 1225–1233. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.05.005>
- Niemistö, P. (1995). Influence of initial spacing and row-to-row distance on the growth and yield of silver birch (*Betula pendula*). *Scandinavian Journal of Forest Research*, 10(1–4), 245–255. <https://doi.org/10.1080/02827589509382890>
- Panik, M. J. (2014). *Growth curve modelling*. John Wiley & Sons.
- Paredes, F. (2003). *Estimación de la calidad de sitio de las especies Simarouba amara Aubl. (marupa) y Guatteria elata R.E. Fries (carahuasca) en plantaciones del Centro de Investigaciones de Jenaro Herrera (CIJH), Loreto – Perú*. (Tesis de Ingeniería Forestal). Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.
- Pérez, R. (2023). *Análisis comparativo del módulo de elasticidad y densidad básica por dos métodos de evaluación de la madera de Dipteryx ferrea (Ducke) Ducke (shihuahuaco), Pucallpa – Ucayali* (Tesis de ingeniero forestal). Universidad Nacional de Ucayali.
- Pinnschmidt, A., Yousefpour, R., & Nölte, A. (2023). Economic potential and management of tropical mixed-species plantations in Central America. *New Forests*, 54, 565–586. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09937-7>
- Pinto Maldonado, E. L. (2025). *Rendimiento de madera aserrada a pisos de shihuahuaco (Dipteryx ferrea (Ducke) Ducke) en dos plantas de transformación en Lima, Perú* [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional Agraria La Molina].
- Pirani, J. R., Majure, L. C., & Devecchi, M. F. (2021). An updated account of Simaroubaceae with emphasis on American taxa. *Brazilian Journal of Botany*, 44(4), 651–669. <https://doi.org/10.1007/s40415-021-00731-x>
- Richards, F. J. (1959). A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10(2), 290–301. <https://doi.org/10.1093/jxb/10.2.290>
- Ritchie, M., Zhang, J. & Hamilton, T. (2012). Effects of stand density on top height estimation for ponderosa pine. *Western Journal of Applied Forestry*, 27(1), 18–24. <https://doi.org/10.1093/wjaf/27.1.18>
- Rizzo-Martin, I., Hirigoyen-Dominguez, A., Arthus-Bacovich, R., Varo-Martinez, M. A., & Navarro-Cerrillo, R. (2023). Site index estimation using airborne laser scanner data in *Eucalyptus*

- dunnii* Maiden stands in Uruguay. *Forests*, 14(5), 933. <https://doi.org/10.3390/f14050933>
- Román-Dañobeytia, F., Cabanillas, F., & Lefebvre, D. (2020). Survival and early growth of 51 tropical tree species in areas degraded by artisanal gold mining in the Peruvian Amazon. *Ecological Engineering*, 159, 106097. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106097>
- Rüger, N., Wirth, C., Wright, S., & Condit, R. (2012). Functional traits explain light and size response of growth rates in tropical tree species. *Ecology*, 93(12), 2626–2636. <https://doi.org/10.1890/12-0622.1>
- Scarcelli, N., Garcia Davila, C., Couderc, M., Castro Ruiz, D., Estivals, G., Angulo Chavez, C. A. C., Acho Vasquez, H., Alvarado Reategui, J. G., Vizcarra Bentos, T., & Mariac, C. (2024). The complete chloroplast genome of marupa (*Simarouba amara* Aubl., Simaroubaceae). *Ecology and Evolution*, 14, e11688. <https://doi.org/10.1002/ece3.11688>
- Schumacher, F. X. (1939). A new growth curve and its application to timber-yield studies. *Journal of Forestry*, 37, 819–820.
- Selaya, N. G., Zuidema, P. A., Baraloto, C., Vos, V. A., Brienen, R. J. W., Pitman, N., Brown, F., Duchelle, A. E., Araujo-Murakami, A., Oliveira Carillo, L. A., Vasquez Colomo, G. H., Meo Chupinagua, S., Fuentes Nay, H., & Perz, S. (2017). Economically important species dominate aboveground carbon storage in forests of southwestern Amazonia. *Ecology and Society*, 22(2), 40. <https://doi.org/10.5751/ES-09297-220240>
- Sharma, M., Amateis, R., & Burkhart, H. (2002). Top height definition and its effect on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 168, 163–175. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00737-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00737-X)
- Sharma, R., Brunner, A., Eid, T., & Øyen, B. (2011). Modelling dominant height growth from national forest inventory individual tree data with short time series and large age errors. *Forest Ecology and Management*, 262, 2162–2175. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.037>
- Siipilehto, J. (2011). Local prediction of stand structure using linear prediction theory in Scots pine-dominated stands in Finland. *Silva Fennica*, 45, 669–692. <https://doi.org/10.14214/sf.99>
- Tymińska-Czabańska, L., Hawryło, P., & Socha, J. (2022). Assessment of the effect of stand density on the height growth of Scots pine using repeated ALS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108, 102763. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102763>
- Ugarte-Guerra, L. J., & Domínguez-Torrejón, G. (2010). Índice de sitio (IS) de *Calycophyllum spruceanum* Benth. en relación con la altura dominante del rodal en ensayos de plantación en la cuenca del Aguaytia, Ucayali, Perú. *Ecología Aplicada*, 9(2), 101-111.
- VanderSchaaf, C. (2023). Implications of incorrectly determining site index on stand-level management activities and financial returns in older generation loblolly pine plantations. *Reforesta*, 16, 1-15. <https://doi.org/10.21750/REFOR.16.01.106>
- VanderSchaaf, C. L. (2024). Currently available site index equations that use on-site tree measurements for naturally regenerated longleaf pine in its historical range. *Forests*, 15(5), 855. <https://doi.org/10.3390/f15050855>
- Weiskittel, A. R., Hann, D. W., Kershaw, J. A., & Vanclay, J. K. (2011). *Forest growth and yield modeling*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119998518>

