



Crecimiento del “shihuahuaco” *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke en plantaciones bajo diferentes espaciamientos y tipos de suelo en Ucayali, Amazonía peruana

Growth of “shihuahuaco” *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke in plantations under different spacings and soil types in Ucayali, Peruvian Amazon

Ymber Flores ^{1,*}

Recibido: 23 mayo 2023 | **Aceptado:** 06 diciembre 2024 | **Publicado en línea:** 10 enero 2025

Citación: Flores, Y. 2024. Crecimiento del “shihuahuaco” *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke en plantaciones bajo diferentes espaciamientos y tipos de suelo en Ucayali, Amazonía peruana. Revista Forestal del Perú 39(2): 238-255. DOI: <https://doi.org/10.21704/rfp.v39i2.1829>

Resumen

Se presentan los resultados de los ensayos experimentales con *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke, especie forestal conocida como “shihuahuaco”, establecidas bajo cuatro sistemas forestales y agroforestales diferentes en el Centro Experimental Alexander von Humboldt, Ucayali, a una altitud de 225 m s.n.m, diferenciados por el arreglo espacial implementado, el espaciamiento inicial y tipo de suelo, y con 11 años de edad. Se obtuvieron mediciones de la altura total, el diámetro a la altura del pecho (DAP), el área basal y el volumen maderable de las plantaciones. Los resultados muestran el potencial de *D. ferrea* en términos de crecimiento, supervivencia y productividad en las plantaciones a campo abierto puras y mixtas. El sistema 1, en suelo Plinthic acrisol, fisiografía plana y distanciamiento de 5 × 5 m, presenta el más alto valor de DAP promedio, altura total promedio y altura dominante, con 20.23 cm, 13.9 m y 16.8 m respectivamente. Estos resultados son estadísticamente superiores ($p < 0.05$) a los de otras plantaciones analizadas y muestran un rendimiento prometedor. En productividad, el sistema 3, en suelo Plinthic gleysol, fisiografía plana y distanciamiento de 2 × 2 m, presenta el más alto valor de área basal y volumen de madera rolliza con 38.40 m²/ha y 243.3 m³/ha respectivamente, muy superior estadísticamente a los otros sistemas, pero muy influido también por la alta densidad de la plantación. Estos hallazgos sugieren perspectivas alentadoras para el establecimiento de plantaciones de *D. ferrea* en plantaciones forestales.

Palabras clave: *Dipteryx ferrea*, crecimiento, supervivencia, productividad, competencia, espaciamiento inicial

¹ Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA, Estación Experimental Agraria Pucallpa, Perú.

* Autor de Correspondencia: yflores@inia.gob.pe

Abstract

The results of experimental trials with *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke, a forest species commonly known as "shihuahuaco", established under four different forest and agroforestry systems at the Alexander von Humboldt Experimental Center, Ucayali, at an altitude of 225 meters above sea level, are presented. These systems were differentiated by spatial arrangement, initial spacing, soil type, and were 11 years old. Measurements of total height, diameter at breast height (DBH), basal area, and timber volume of the plantations were obtained. The results demonstrate the growth potential, survival, and productivity of *D. ferrea* in both pure and mixed open-field plantations. System 1, on Plinthic Acrisol soil, flat physiography, and 5 × 5 m spacing, showed the highest average DBH, total height, and dominant height, with values of 20.23 cm, 13.9 m, and 16.8 m, respectively. These results are statistically superior ($p < 0.05$) to those of other analyzed plantations and indicate promising performance. In terms of productivity, system 3, on Plinthic Gleysol soil, flat physiography, and 2 × 2 m spacing, exhibited the highest values of basal area and roundwood volume, with 38.40 m²/ha and 243.3 m³/ha, respectively, statistically superior to the other systems, but also heavily influenced by the high plantation density. These findings suggest encouraging prospects for establishing *D. ferrea* plantations in forestry settings.

Key words: *Dipteryx ferrea*, growth, survival, productivity, competition, initial spacing

Introducción

Con el término "shihuahuaco" se denomina a las tres especies del género *Dipteryx* Schreb. reportados en el Perú: *Dipteryx charapilla* (J.F. Macbr.) Ducke, *Dipteryx micrantha* Harms y *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke. La primera se encuentra solo en la Región Loreto, las otras dos tienen una distribución natural más amplia en la Amazonia peruana (Honorio *et al.* 2018; POWO 2023; Carvalho *et al.* 2023, 2024; Cárdenas *et al.* 2023; SERFOR 2023a). En la Región Ucayali, se han reportado a *D. ferrea* y *D. micrantha*, conocidas respectivamente como "shihuahuaco de hoja grande" y "shihuahuaco de hoja chica", debido a la variación en el tamaño de sus folíolos (Flores 2020). Durante mucho tiempo, los ejemplares de *D. ferrea* fueron identificados erróneamente como *D. odorata* (Aubl.) Forsyth f., debido a la identificación basada principalmente en caracteres morfológicos externos. Investigaciones posteriores, basada en evidencia morfológicas, geográficas y moleculares, probaron la ausencia de *D. odorata* en Perú, y han demostrado que la mayoría de los especímenes corresponderían en realidad a *D. ferrea* (Honorio *et al.* 2018, 2019, 2020; de Carvalho *et al.* 2020; García *et al.* 2019). Asimismo, hasta an-

tes de 2019, varios trabajos sobre "shihuahuaco" indicaban como determinación taxonómica a *D. odorata* o *D. alata* Vogel, con lo cual sus resultados y conclusiones se ven limitados por la incertidumbre, y no deben ser desestimados sino tomados en cuenta con cautela.

Las especies de *Dipteryx* son objeto de sobreexplotación debido a la fuerte demanda de su madera tanto en el mercado nacional como internacional. Esta madera alcanza un valor de mercado de USD 1204-1237/m³ en los Estados Unidos de América (EE. UU.) y USD 989-1008/m³ en Asia, situándola entre las más costosas a nivel mundial (ITTO 2023). En 2022, durante la CoP19, las partes de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) acordaron que la sobreexplotación comercial de *Dipteryx* podría ser una amenaza directa para su supervivencia a largo plazo, decidiendo su inclusión en el Apéndice II (CITES 2023; SERFOR 2023b). Asimismo, al analizar varios escenarios de cambio climático, diversos estudios (Cárdenas *et al.* 2023, Carvalho *et al.* 2024) indican posibles cambios en la idoneidad del hábitat y en los patrones de distribución de *Dipteryx* spp. en respuesta a cambios proyectados en los regímenes de temperatura y precipitación.

La madera de los árboles del género *Dipteryx* es resistente, pesada, densa, con excelente durabilidad, trabajabilidad y alta calidad para construcción civil, pisos, muebles, entre sus principales usos (Carvalho 2008). *Dipteryx odorata*, *D. punctata*, *D. alata*, *D. micrantha* y *D. panamensis* son reconocidas por su utilidad en plantaciones forestales puras y mixtas, sistemas agroforestales y restauración de áreas degradadas debido a su rápido crecimiento, bajos requerimientos de nutrientes, baja exigencia de mantenimiento, producción de semillas comestibles y medicinales, copa poco densa, ausencia de efectos alelopáticos y alta capacidad de almacenar carbono (Schmidt 2009, Selaya *et al.* 2017, Chávez y Sabogal 2019, Silva *et al.* 2020, Flores 2020, Román-Dañobeytia *et al.* 2020, Caetano-Andrade *et al.* 2021, Brasil *et al.* 2021, Piña-Rodrigues y Santana da Silva 2021, Kim y Lida, 2022, Mondragón 2023, de Sousa *et al.* 2023, Pinnschmidt *et al.* 2023).

La disminución de las poblaciones naturales de *D. ferrea*, especie poco estudiada del género, así como la demanda creciente de su madera, impulsó es establecimiento de plantaciones forestales y sistemas agroforestales con fines de suministro de madera y cuyo crecimiento y productividad debe ser monitoreado y estimado bajo un enfoque analítico. La investigación sobre el crecimiento y desempeño de *D. ferrea* en plantaciones forestales se inició en 1995 en Pucallpa, en la Estación Experimental Pucallpa del INIA, y desde 1998 en el Centro Experimental Von Humboldt, provincia de Padre Abad, Ucayali. Los resultados indican que, a una edad menor de 25 años, la madera de *D. ferrea* producida en plantaciones muestra propiedades promisorias para su uso estructural y carpintería (Flores 2020, Huiza 2019, Pérez 2023), cualidad también observada en *D. panamensis* (Pittier) Record & Mell de plantaciones (Rodríguez *et al.* 2022).

Estudiar el crecimiento, la supervivencia y la productividad de *D. ferrea*, en diferentes sistemas de plantaciones forestales en la Amazonía peruana, es crucial para comprender su potencial en la silvicultura sostenible y en los esfuerzos de conservación. Esta evaluación implica

comparar varios métodos de plantación, como monocultivo, plantaciones mixtas, sistemas agroforestales y regeneración de bosques naturales, para determinar qué enfoque optimiza el crecimiento y la supervivencia de *D. ferrea* y al mismo tiempo mejora la productividad forestal general. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue estudiar el comportamiento de las variables dasométricas bajo diferentes arreglos forestales con *D. ferrea* en base a las plantaciones forestales y sistemas agroforestales establecidos en el Centro Experimental Alexander von Humboldt, Ucayali.

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el Centro Alexander von Humboldt de la Estación Experimental Agraria Pucallpa, perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agraria, ubicado a 86 kilómetros al suroeste de Pucallpa, en la Región Ucayali (08°49'37"S, 75°03'17"O) (Figura 1). El área experimental se extiende por 174 hectáreas y se encuentra a una altitud de 225 m s.n.m. La zona experimenta dos estaciones climáticas claramente definidas: una estación lluviosa, durante el invierno amazónico, que abarca de noviembre a abril, y una estación más seca, de mayo a octubre. La precipitación anual es de 3 600 mm en promedio, agosto y marzo son los meses con menor y mayor precipitación respectivamente. La humedad relativa oscila entre el 80 y el 90 %. Según la clasificación de Zonas de Vida de Holdridge, el área de estudio se encuentra en la Zona de Vida Bosque húmedo tropical (BHT) y Bosque húmedo premontano tropical (BHP). En cuanto a la topografía, la zona presenta suaves ondulaciones y colinas, con pendientes que varían entre el 5 % y el 10 %. Los suelos, de origen sedimentario, tienen una textura que va desde arcillosa hasta arcillo-arenosa y limosa, caracterizándose por su buena estructura y drenaje, fertilidad y un pH que oscila entre 4.5 y 6.7. Las diferencias biológicas, físicas y químicas de los suelos crean diversas condiciones para el crecimiento de las

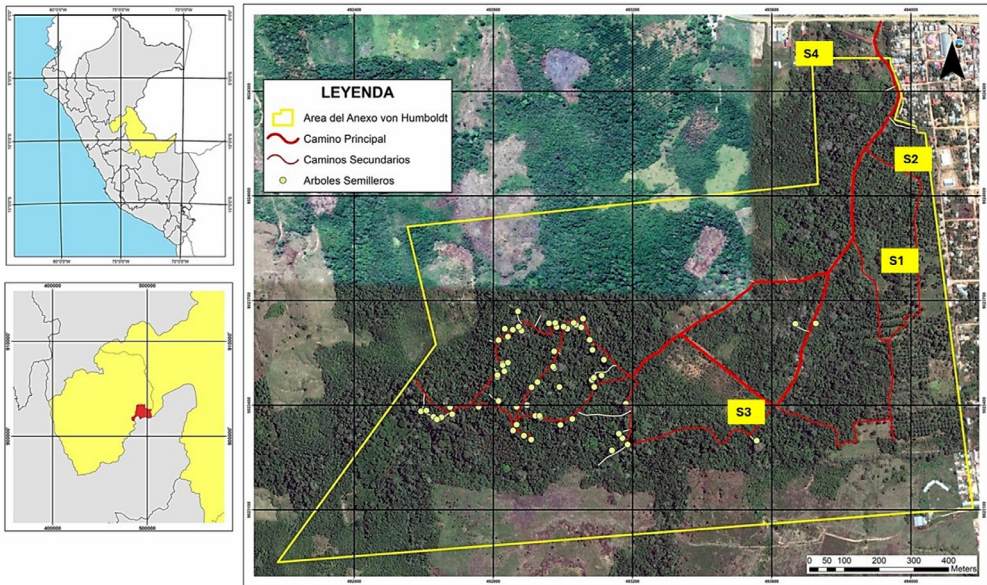


Figura 1. Localización de las parcelas experimentales en el Centro Experimental Von Humboldt, Provincia de Padre Abad, Departamento de Ucayali – Perú (Latitud: 08°49'37"S, Longitud: 75°03'17"O y altitud: 225 m s.n.m.).

plantas, lo que puede duplicar la productividad de los árboles en áreas locales. El tipo de suelo impacta la salud y el crecimiento de las plantas al determinar su acceso a nutrientes y agua. En la zona, se identifican suelos Plinthic acrisol y Plinthic Gleysol según el mapa de suelos de la FAO (INIAA-JICA 1991).

Descripción de la metodología

El material experimental consistió en cuatro las plantaciones forestales con *D. ferrea* establecidas bajo diferentes arreglos por el Programa Nacional Forestal de INIA en el Centro Experimental Alexander von Humboldt (Ucayali, Perú) y cuyas características se resumen en la Cuadro 1.

Se empleó un diseño completamente al azar con cuatro sistemas de plantación y tres repeticiones. Se utilizó este diseño por ser el más básico, las parcelas individuales se asignan al azar dentro de cada población, sin el uso de bloques. Aunque el análisis en sí no presenta dificultades, la estimación de la variación re-

sidual podría verse afectada por la variabilidad sistemática individual, conllevando a que las comparaciones entre poblaciones sean menos precisas que con diseños de bloques correspondientes (Burley y Wood 1979). Los tratamientos consistieron en los cuatro sistemas bajo estudio.

El número total de unidades experimentales fue de 12, tres parcelas temporales rectangulares o lineales por cada uno de los sistemas, cada una con 20 árboles originales. El número de 20 árboles se deriva de las conclusiones de Wright (1964) quien demostró que parcelas de entre 15 y 200 árboles brindaban estimaciones igualmente válidas sobre las variables de crecimiento de los árboles. La utilización de parcelas representada por un número específico de árboles se fundamentó en la necesidad de abarcar la variabilidad en los arreglos de plantación, los cuales presentaban espaciamientos regulares pero distintos (5×5 m, 3×3 m y 2×2 m). Se evaluaron un total de 240 árboles individuales.

Características		Sistema 1 (S1)	Sistema 2 (S2)	Sistema 3 (S3)	Sistema 4 (S4)
Características del lugar	Tipo de suelo	Plinthic acrisol, según FAO-UNESCO (1974)	Plinthic acrisol	Plinthic gleysol, según FAO-UNESCO (1974)	Plinthic gelysol
	pH	4.58	4.9	5.2	5.0
	Fisiografía	Plana	Plana	Plana	Plana
	Extensión	2.0 ha	1.2 ha	0.80 ha	0.75 ha
Características de la plantación	Sistema	Sistema silvopastoril con cobertura forrajera	Plantación pura a campo abierto	Plantación mixta a campo abierto, combinado con otras especies forestales.	Plantación pura a campo abierto
	Distanciamiento	5 × 5 m	3 × 3 m	2 × 2 m	2 × 2 m
	Nº árboles /ha	400	1111	2500	2500
	Cobertura	Centrosema	Centrosema	Centrosema	Ninguna
	Edad	11.5 años	10.5 años	10.7 años	11.3 años
	Historial	Se fertilizó con roca fosfórica. Podas anuales. Sin raleos.	Sin fertilización. Podas anuales. Un raleo al 4ª año.	Sin fertilización química. Podas anuales. Sin raleos.	Sin fertilización. Podas anuales. Un raleo al 4ª año.
Valores dasométricos promedio	DAP promedio (cm)	19.76	10.53	13.38	11.71
	Altura total promedio (m)	13.73	11.86	12.7	10.91

Cuadro 1. Características del lugar, de la plantación y sistemas de plantación estudiados en el Centro Experimental Alexander von Humboldt, Ucayali.

Las dimensiones de cada parcela temporal fueron las siguientes:

S1: Sistema silvopastoril. Se establecieron tres parcelas rectangulares de 500 m² cada una (25 × 20 m), distribuidas de manera aleatoria dentro del área experimental de 2.0 ha.

S2: Plantación pura. Se delimitaron tres parcelas lineales de 180 m² cada una (60 × 3 m), distribuidas al azar dentro del área experimental de 1.2 ha.

S3: Plantación mixta. Se asignaron tres parcelas lineales de 80 m² cada una (40 × 2 m),

distribuidas aleatoriamente dentro del área experimental de 0.80 ha.

S4: Plantación pura. Tres parcelas lineales de 80 m² cada una (40 × 2 m), distribuidas al azar dentro del área experimental de 0.75 ha.

El modelo aditivo lineal es útil para establecer relaciones claras entre variables, hacer predicciones y llevar a cabo un análisis exhaustivo de los datos. El modelo aditivo lineal utilizado es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Respuesta observado en la j-ésima repetición del i-ésimo sistema.

μ = Media del experimento

α_i = Efecto del i-ésimo sistema

ε_{ij} = Error experimental

Se procedió a la medición de las siguientes variables dasométricas: diámetro a la altura del pecho (DAP, cm), utilizando una cinta diamétrica a 1.3 m del suelo; altura total (m), medida hasta el extremo o ápice del árbol con una barra telescópica o un hipsómetro Suunto; y espaciamiento (m) entre los individuos de la plantación. Se calcularon diversos parámetros, incluyendo el número de árboles por hectárea, el porcentaje de árboles remanentes, el DAP promedio (cm), la altura total promedio (m), la altura dominante (m), así como los incrementos medios anuales para el diámetro (IMADAP, cm/año) y la altura total (IMAALT, m/año), además del área basal por hectárea (m^2/ha) y el volumen de madera rolliza con corteza por hectárea (m^3/ha), junto con su respectivo incremento medio anual para el volumen (IMAVOL, $m^3/ha/año$). El volumen de madera rolliza se calculó mediante el programa MIRASILV (Ugalde 2002), utilizando la altura total, el DAP y un factor de forma de 0.45. Esta elección se debió a la ausencia de factores de forma o ecuaciones de volumen específicamente desarrollados para esta especie en las condiciones de la Selva Baja peruana. Los datos de campo fueron registrados en una hoja de cálculo Excel y posteriormente analizados utilizando el software MIRA-SILV (Ugalde 2002), el cual facilita la obtención de promedios para cada sistema de plantación y para cada variable investigada. Luego, para cada parámetro obtenido, se llevó a cabo un análisis de varianza de una vía (ANOVA) mediante RStudio (RStudio Team 2020), con el propósito de comparar los promedios de las variables dasométricas entre los cuatro sistemas y determinar posibles diferencias estadísticas. En caso de encontrarse diferencias significativas, se aplicó la prueba de Tukey. Se presentan gráficos de barras que ex-

hiben los valores de cada parámetro para todos los sistemas, mostrando también la desviación estándar.

Resultados

Los resultados proporcionan evidencias sobre diferencias significativas en crecimiento y productividad de *D. ferrea* establecida bajo cuatro sistemas de plantación. Este es el primer estudio publicado que compara varias plantaciones de *D. ferrea* de una misma edad, aunque en diferentes condiciones de sitio y sistemas de plantación. La edad es una importante fuente de variación e indicadores de productividad, como los incrementos medios anuales varían significativamente entre plantaciones con edades diferentes. El presente estudio no pretende realizar un análisis detallado sobre los factores explicativos de tal o cual comportamiento, siendo el factor que supuestamente tiene el efecto mayoritario el "sistema", aunque debemos tener en cuenta los límites que puede presentar este enfoque. Se pretende proporcionar datos que permitan evaluar la reacción de *D. ferrea* a diferentes condiciones de plantación, 11 años después de su instalación, y extraer lecciones en términos de gestión potencial en ámbitos similares en la Selva Baja peruana.

En el presente estudio, porcentaje de supervivencia (%), es decir el número de árboles actuales con relación al número original, se obtuvo un rango entre 91.67 % a 98.33 %, considerados valores altos (Cuadro 2).

El número de árboles por hectárea, el cual influye sobre las estimaciones del área basal y el volumen de madera rolliza por hectárea, muestra valores muy altos en los sistemas 2, 3 y 4; con cifras de 1 056, 2 458 y 2 417 árboles respectivamente, provocando una alta competencia entre individuos.

En este estudio, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias del DAP de los sistemas analizados ($F = 51.9508$; $p < 0.05$). El sistema 1, con distanciamiento entre plantas de 5×5 m, muestra el

Sistema	S1	Supervivencia (%)		DAP (cm)	IMADAP (cm/año)	Altura total (m)	IMAAALT (m/año)	Altura dominante (m)	Área basal (m²/ha)	Volumen total (m³/ha)	IMAVOL (m³/ha/año)
		Promedio	Desviación estándar								
S2	91.67	95.00		20.13	1.77	13.90	1.20	16.80	11.57	75.57	6.57
				1.12	0.12	1.11	0.10	0.35	0.71	4.29	0.38
S3	98.33	95.00		10.93	1.03	11.87	1.10	15.23	9.90	58.13	5.53
				0.25	0.06	0.06	0.00	0.45	0.78	4.20	0.38
S4	96.67	98.33		14.07	1.33	12.77	1.17	15.77	38.40	243.30	22.80
				1.32	0.15	1.16	0.12	0.45	6.22	42.92	4.01
		96.67		12.33	1.10	10.90	0.97	13.90	29.07	158.80	14.00
				0.86	0.10	0.30	0.06	0.36	4.18	26.67	2.36

Cuadro 2. Promedio de las variables de crecimiento de *D. ferrea* en plantaciones forestales y agroforestales bajo estudio.

más alto valor de DAP promedio, 20.13 cm y el sistema 2, con distanciamiento de 3×3 m, el menor valor, con 10.93 cm (Cuadro 2). Asimismo, el ANOVA indica la existencia de diferencias significativas en el DAP promedio de los sistemas bajo estudio. Según la prueba de Tukey ($p < 0.05$ en todos los casos), estas diferencias en el DAP se observaron entre los sistemas S1 vs S2, S1 vs S3, S1 vs S4 y S2 vs S3 (Figura 2a).

El valor del crecimiento o incremento medio anual (IMA) indica la media del crecimiento total a cierta edad del árbol, se calcula dividiendo el valor total por su edad. El Incremento Medio Anual del DAP (IMADAP) muestra la tasa de crecimiento diamétrico de un árbol y, por tanto, puede utilizarse para planificar el año de rotación de cosecha. En el presente estudio, a la edad de 11 años, el sistema 1 muestra un IMADAP de 1.77 cm/año, el más alto de todas, y el sistema 2 tiene el más bajo IMADAP con 1.03 cm/año (Cuadro 2).

La altura es otro parámetro dasométrico esencial para determinar el volumen y biomasa de árboles individuales y de masas forestales, y se utiliza ampliamente como medida de la calidad del sitio y la productividad del rodal. La distribución de alturas es un factor relevante en muchas prescripciones silviculturales (Kershaw *et al.* 2016). Cuando el fin principal de una plantación es la producción de madera serrada se busca que los árboles sean altos y con fustes rectos. En el presente estudio, se hallaron diferencias significativas entre los promedios de los sistemas analizados ($F = 7.3404$; $p < 0.05$). Según la prueba de Tukey, estas diferencias se observaron entre los sistemas S1 vs S4 (Figura 2c), mostrándose asimismo una tendencia decreciente de la altura promedio a medida que disminuye el espaciamiento entre árboles.

El incremento medio anual de la altura total (IMAALT) muestra la tasa de crecimiento de altura de una masa forestal y suele tener un valor más alto en los primeros años por la necesidad de los individuos jóvenes de colocar su copa en una posición ventajosa con respecto

a la luz. En el presente estudio, a la edad de 11 años, el sistema 1 muestra un IMAALT de 1.2 m/año, el más alto de todas y el sistema 2 tiene el valor más bajo con 0.97 m/año (Cuadro 2).

Por consenso en el ámbito silvicultural, la altura dominante es definida como el promedio de los 100 árboles con mayor diámetro por hectárea (Sharma *et al.* 2002; Meredieu *et al.* 2002). En el presente estudio, el espaciamiento influyó sobre el crecimiento de la altura dominante ($F = 26.6176$; $p < 0.05$), observándose una tendencia decreciente conforme disminuye el espaciamiento entre árboles. A la edad de 11 años, el sistema 1 presenta una altura dominante de 16.8 m, la más alta de todas y el sistema 4 tiene el valor más bajo con 13.9 m (Cuadro 2). Según la prueba de Tukey, existen diferencias significativas entre la altura dominante de los sistemas S1 vs S2, S1 vs S4, S2 vs S4 y S3 vs S4 (Figura 2e), mostrándose un valor decreciente a medida que disminuye el espaciamiento entre árboles.

Una medida que captura de manera precisa el potencial productivo de los sitios forestales es el área basal, que representa la suma total de las secciones transversales de los árboles a una altura de 1.3 metros, expresada en metros cuadrados por hectárea. Cuanto mayor sea el potencial productivo de un sitio, mayor será su área basal. En este estudio, el espaciamiento tuvo un efecto sobre el área basal ($F = 40.0613$; $p < 0.05$), observándose una tendencia creciente conforme disminuye el espaciamiento entre árboles. El sistema 3 presenta un área basal de 38.40 m²/ha, el más alto de todos, y el sistema 2 tiene el valor más bajo con 9.9 m²/ha (Cuadro 2). Según la prueba de Tukey ($p < 0.05$ en todos los casos), existen diferencias significativas entre los sistemas S1 vs S3, S1 vs S4, S2 vs S3 y S2 vs S4 (Figura 2f).

El sistema 3 mostró el mayor resultado en volumen, alcanzando un valor de 243.3 m³/ha y el sistema 2 el menor volumen con 58.13 m³/ha (Cuadro 2). El sistema 3 tuvo el mejor IMAVOL con 22.8 m³/ha/año y el menor valor se obtuvo en el sistema 2 con solo 5.5 m³/ha/año (Cuadro 2), con diferencias es-

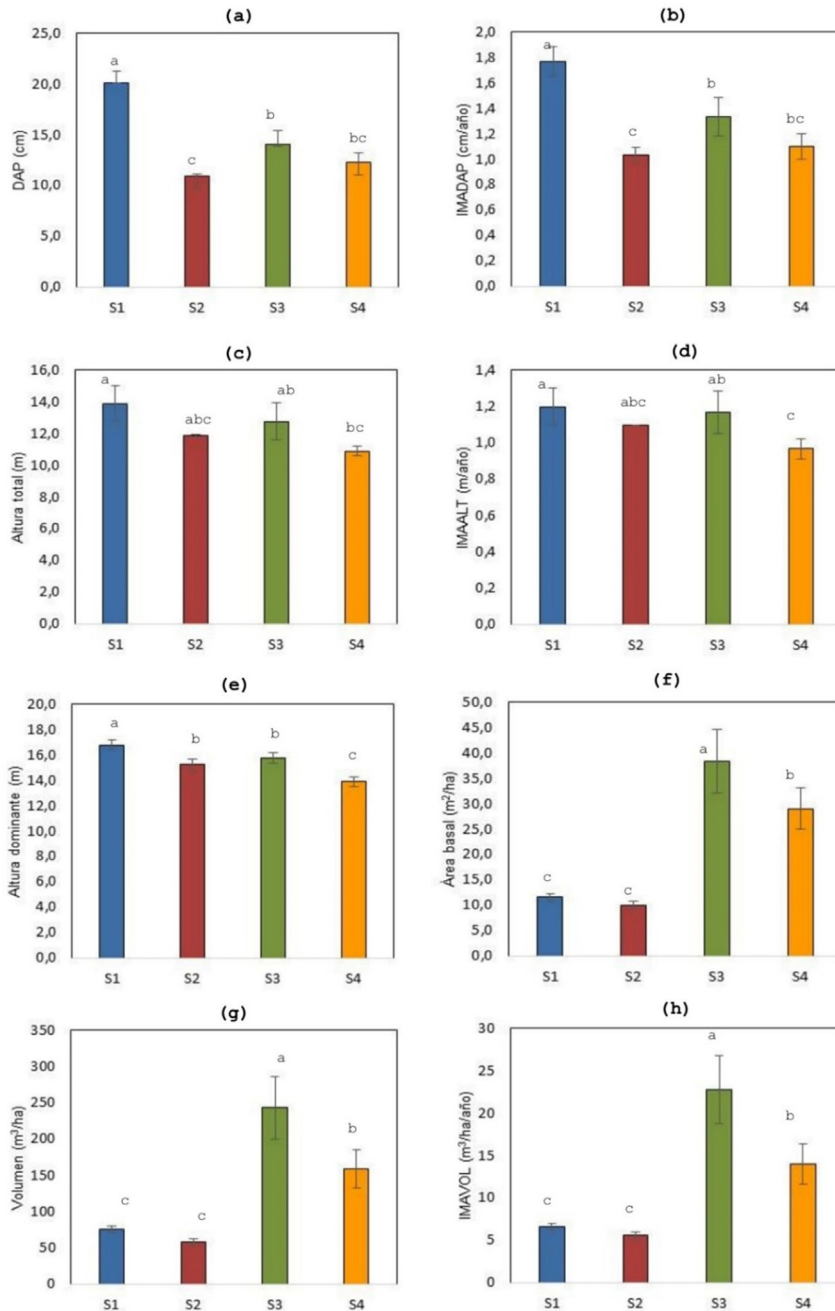


Figura 2. Valores de las variables dasométricas de *Dipteryx ferrea* bajo cuatro sistemas de plantación en el Centro Experimental Von Humboldt, Ucayali. Valores promedios $\pm$ error estándar. Letras diferentes (a, b, c) indican diferencia significativa (Prueba de Tukey: $p < 0.05$). S1 = sistema silvopastoril; S2 = plantación mixta a 5×5 m; S3 = plantación mixta a 2×2 m; S4=plantación pura a 2×2 m.

tadísticas bastante significativas entre sistemas (Figura 2h).

Discusión

La razón por la que algunas plantaciones de este estudio tienen un bajo distanciamiento entre árboles fue obtener una mejor forma del fuste, al evitar que se formen ramas epicórmicas, dado que observaciones de experiencias previas mostraron que *D. ferrea* tiene una baja tendencia a la autopoda en espacios muy abiertos, ocasionando que los árboles tengan fuste con mala forma o muy ramificados, disminuyendo la producción de madera de calidad. Por tanto, cuanto menor sea el espaciamiento entre los árboles de la plantación, más se verán obligados a adoptar un hábito de crecimiento rector y erguido. Asimismo, en ciertas especies, por ejemplo, del género *Pinus* se ha demostrado que la modificación del espaciamiento inicial programado también tiene un impacto en la forma del fuste o en las propiedades mecánicas de la madera (Erasmus *et al.* 2020, Hébert *et al.* 2016). Por otro lado, en sistemas agroforestales generalmente se prefieren espaciamientos mayores, ya que es fundamental que las copas no bloqueen la luz necesaria para los cultivos que se encuentran establecidos como parte del sistema.

El alto nivel de supervivencia mostrado en este estudio también ha sido observado en *Dipteryx odorata* (Córdova 2018), con valores que varían de 100 % a 78.4 % para plantaciones entre 6–8 años, a pesar de ubicarse en áreas degradadas de Campo Verde, Ucayali (Chávez y Sabogal 2019). Por otro lado, un experimento con *D. panamensis* a los 24 años en Costa Rica mostró solo 14 % de supervivencia, debido a la mortalidad y a los tratamientos silviculturales aplicados, aunque hubo buenos resultados en DAP y volumen por hectárea (Schmidt 2009).

La estimación del DAP es esencial para caracterizar el éxito y/o calidad de una plantación forestal, ya que está estrechamente ligada tanto a la disponibilidad de recursos del sitio como a la calidad del manejo silvicultural aplicado. En plantaciones establecidas en sitios de baja

calidad o sujeto a intervenciones silviculturales inadecuadas o inoportunas, es común observar árboles cuyo DAP ha dejado de incrementarse, pero que continúan creciendo en altura, lo que puede originar una alta variabilidad en los datos obtenidos a nivel individual y una baja producción de madera (Oliver y Larson 1990). La información recopilada de diversas fuentes sobre las tasas de crecimiento del DAP de los árboles de *Dipteryx* revela que generalmente presentan un crecimiento de medio a alto. Para *D. panamensis* (Schmidt 2009) en Costa Rica, se ha obtenido valores que varían desde de 14.7 cm de DAP promedio a 13 años (Redondo y Montagnini 2006) hasta 2.07 cm en 75 meses (Alves-Milho 2018). En Pará, Brasil, en una plantación pura de *D. odorata* con distanciamiento de 6 × 6 m, a la edad de 10 años solo se obtuvo un DAP promedio de 8.8 cm, probablemente por la falta de manejo y fertilización según los autores (Silva *et al.* 2020). Asimismo, en el presente estudio, todos los valores de IM-ADAP superan el valor de 0.75 cm/año el cual, según Rolim y Piotto (2018), caracteriza a las especies con tasa de crecimiento de media a alta. En una plantación de 23 años en Pucallpa, Mondragón (2023) estimó un IMADAP de 1.25 cm/año; 0.98 cm/año y 0.68 cm/año en tres parcelas de evaluación respectivamente, en plantación con una densidad inicial de 2 × 2 m. Para *D. panamensis*, un ensayo llevado a cabo en Costa Rica presentó a los 13 años un IM-ADAP de 1.1 cm/año (Redondo y Montagnini 2006). Debe tenerse en cuenta que, los incrementos medios anuales tienden a decrecer con la edad (Rolim y Piotto 2018).

Con respecto a la altura total promedio, el sistema 1 presenta el más alto valor con 13.9 m, mientras que el sistema 4 muestra el menor resultado con 10.9 m (Cuadro 2). Este resultado es esperable, ya que esta última plantación posee una mayor densidad de plantación lo cual conduce a una mayor competencia entre árboles, comportamiento también reportado en otras especies forestales (Gonçalves 2022). Este comportamiento sugiere que *D. ferrea* inicialmente prioriza su crecimiento en altura sobre su diámetro, posiblemente para alcanzar una

posición ventajosa respecto a otros individuos y optimizar la captación de radiación solar, lo cual coincide con lo observado en otras especies de *Dipteryx* en varias partes de América tropical (Carvalho 2008, Angulo 2014, Román-Dañobeytia *et al.* 2020, de Sousa *et al.* 2023, Sousa *et al.* 2023). Por ejemplo, un ensayo con *D. panamensis* llevado a cabo en Costa Rica presentó a los 13 años 18.8 m de altura total promedio (Redondo y Montagnini 2006). Otro ensayo en Pará, Brasil, en una plantación pura de *D. odorata* con distanciamiento de 6 × 6 m y a la edad de 10 años solo se obtuvo una altura total promedio de 7.0 m, probablemente por la falta de manejo y fertilización según los autores (Silva *et al.* 2020).

Generalmente, el crecimiento en altura es prioritario para el árbol, más que el incremento diamétrico, en consecuencia, en situaciones de competencia intensa, el crecimiento en diámetro puede disminuir o detenerse antes que la altura (Oliver y Larson 1990; Galloway 2004; Piotto 2008; Kershaw *et al.* 2016). Esto se acentúa en plantaciones homogéneas con especies de rápido crecimiento, es decir, la composición del rodal tiene un efecto significativo sobre el crecimiento de los árboles. En tal sentido, la mezcla de especies podría ser importante para incentivar el crecimiento en altura, dado que las masas mixtas tienden a tener copas más ampliamente distribuidas en el plano vertical (Guariguata *et al.* 1995, Piotto 2008, Pancel y Köhl 2016, Tilman *et al.* 1997). En un entorno competitivo, los árboles jóvenes buscarán posicionarse en la copa en el lugar más alto posible de la masa forestal, donde reciba la mayor cantidad de luz, dominando o suprimiendo a sus competidores, sean o no de su misma especie. Los individuos que más rápido lo consigan tendrán mayor probabilidad, no solo de sobrevivir, sino de alcanzar un mayor desarrollo en crecimiento y en estado fitosanitario (Pancel y Köhl 2016, Gonçalves 2022). En este estudio no se evaluó la altura comercial, siendo probable que sus mayores valores hayan estado en las parcelas con mayor densidad de plantación, condiciones bajo las cuales, las ramas inferiores de las copas suelen morir pronto, derivando en una mayor

longitud y limpieza del fuste principal (Oliver y Larson 1990, Galloway 2004). Debe enfatizarse también que, en algunas especies forestales, la densidad de la plantación puede afectar el crecimiento en altura incluso para los árboles dominantes (Meredieu *et al.* 2002).

En las plantaciones forestales, el tamaño de los árboles individuales difiere entre sí porque estos compiten por los recursos disponibles para su desarrollo, es decir, por luz, agua, y nutrientes del suelo. Los árboles más exitosos aumentan de tamaño al suprimiendo a los árboles más pequeños y menos competitivos, y son denominados como árboles dominantes (West 2015, Binkley 2021). Generalmente, la altura dominante de los árboles no se ve influenciada por la densidad de la plantación, sin embargo, en este ensayo experimental se evidencia tal efecto, lo que sugiere que el espaciamiento de 2 × 2 m es demasiado estrecho, afectando el crecimiento en altura de los árboles de *D. ferrea*. Por lo tanto, se desaconseja su aplicación, a pesar de que, en otras especies y otros contextos, como por ejemplo *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden (Myrtaceae), si se recomienda dicho valor (Bahru *et al.* 2023). En estos casos, y con el fin de obtener una mayor productividad maderable, se recomienda hacer los raleos oportunamente para evitar la excesiva competencia por recursos (Oliver y Larson 1990).

El área basal en el sistema 3 es la más elevada, pero esto no necesariamente implica una calidad de sitio alta (Cuadro 2). Más bien, estaría evidenciando una densidad arbórea bastante elevada, con alta competencia entre los árboles, lo cual, a largo plazo, puede resultar en una reducción del crecimiento en diámetro. En estos casos, se sugiere un raleo o una cosecha intermedia pronto para favorecer el desarrollo de los árboles de mejor calidad. A modo de ilustración adicional para fortalecer los conceptos expuestos, se pueden considerar los siguientes valores representativos del área basal máxima para *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. (Lamiaceae) en Guanacaste, Costa Rica: más de 25 m²/ha en áreas con alta productividad, de 15 a 25 m²/ha en zonas de productividad intermedia, y menos de 15 m²/ha en áreas de baja pro-



Figura 3. Individuos de *Dipteryx ferrea* en el Sistema 3, plantación mixta en líneas.

ductividad (Vásquez y Ugalde 1994). Para *D. panamensis* en Costa Rica Schmidt (2009) determinó en una plantación de 24 años un área basal de 27.6 m²/ha para una densidad de 357 árboles por hectárea.

El cálculo de volumen con corteza fue realizado a través del programa MIRASILV (Ugalde 2002), utilizando la altura total, el DAP y un factor de forma de 0.45, por la inexistencia en la literatura de factores de forma o ecuaciones de volumen desarrollados para esta especie en las condiciones del Bosque Alexander von Humboldt. Se observó una variabilidad en el rendimiento a nivel de cada una de las tres repeticiones de las plantaciones, la cual podría atribuirse tanto a la densidad de individuos como a la capacidad productiva del sitio, evidenciada por las variaciones relativas en el suelo y la fisiografía observadas en el campo. A pesar de las variaciones atribuidas al sitio, el sistema 3 muestra una productividad notablemente superior a la de los otros sistemas en este experimento. El sistema 4, con 158.8 m³/ha, mostró valores superiores a los demás, mientras que ninguno de los otros sistemas superó en promedio los 80 m³/ha. Los sistemas 2, 3 y 4 tienen 1 056, 2 458 y 2 417 árboles por hectárea respectivamente, según resultados obtenidos en MIRASILV, lo que podría explicar en parte, que el volumen total y el incremento medio anual en volumen tengan valores altos. Por otro lado, un experimento con *D. panamensis* en Costa Rica, con distanciamiento inicial de 2 × 2 m, mostró a los 24 años un volumen de 410 m³/ha con 357 árboles/ha, todos rectos y de buena forma (Schmidt 2009). Es importante aclarar que el volumen de madera rolliza presentado en este estudio se expresa en términos de hectáreas para fines comparativos dentro del contexto de la investigación. En el ensayo de campo, en el sistema 3 (Figura 3), *D. ferrea* representa únicamente el 7.8 % de los individuos muestreados, mientras que el restante 92.2 % corresponde a otras 22 especies forestales nativas, entre ellas *Cedrelinga cateniformis* y *Swietenia macrophylla*. Por lo tanto, los resultados obtenidos deben interpretarse con cautela, ya que el autor reconoce esta proporción como

una limitación potencial del estudio. En este sentido, es necesario realizar un análisis del volumen total de madera del ensayo para evaluar de manera precisa la contribución real de *D. ferrea* a los resultados globales.

El sistema 3 tuvo el mejor IMAVOL con 22.8 m³/ha/año y el menor valor se obtuvo en el sistema 2 con solo 5.5 m³/ha/año (Cuadro 2), con diferencias estadísticas bastante significativas entre sistemas (Figura 2h). Las diferencias, aunque sean pequeñas en crecimiento volumétrico pueden hacer grandes diferencias en retorno financiero (Pancel y Köhl 2016). En contraste, un ensayo llevado en Brasil con *Dipteryx odorata* mostró solo 4,25 m³/ha/año también en una plantación de 11 años (Carvalho 2008). Ensayos con *D. panamensis* llevados a cabo en Costa Rica mostraron a los 13 años un IMAVOL de 11,0 m³/ha/año (Redondo y Montagnini 2006), y a los 75 meses de edad se obtuvo un crecimiento anual en volumen comercial de 7.8 m³/ha ± 0.43 (Alves-Milho 2018).

Las maderas pertenecientes al género *Dipteryx* son conocidas por su alta densidad (Carvalho 2008, Rodríguez *et al.* 2022, Santos *et al.* 2021), y *D. ferrea* no es una excepción (Flores 2020, Huiza 2019). Tradicionalmente, las especies de madera pesada o densa tienden a tener un ritmo de crecimiento medio o lento, como se observa en géneros como *Handroanthus* (Bignoniaceae) o *Manilkara* (Sapotaceae) (Cruz 2022). Sin embargo, los resultados de este estudio sugieren que *D. ferrea* no sigue esta tendencia, su crecimiento puede caracterizarse como medio a alto, lo que confiere una ventaja adicional a esta especie. Esto se debe a que las especies de madera densa y rápido crecimiento suelen poseer propiedades físicas superiores y una mayor capacidad de captura de carbono.

Conclusiones

Se presentan los resultados de cuatro ensayos experimentales con *Dipteryx ferrea* establecidos bajo diferentes arreglos forestales y agroforestales en el Centro Experimental Alexander von Humboldt, Ucaali. Los ensayos, con edades entre 10.5 y 11.5 años, ofre-

cen valiosa información sobre el crecimiento y productividad de esta especie maderable, bajo condiciones de selva baja amazónica. Se obtuvieron datos de medición de las variables dasométricas. Los resultados muestran que el espaciamiento inicial tiene un efecto significativo sobre el DAP, la altura total, la altura dominante y el volumen de madera. Se concluye que, a mayor distanciamiento inicial de la plantación, se obtiene un mayor DAP, altura total y altura dominante, pero una menor área basal y volumen de madera por hectárea. En altura dominante, que es la variable que mejor indica la calidad de un sitio forestal, se obtuvieron valores ligeramente superiores en los sistemas instalados en suelo Plinthic acrisol. El estudio debe ser complementado con otro que determine los efectos del distanciamiento y el tipo de suelo sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de plantaciones de *D. ferrea*. Los resultados obtenidos adicionan valor a *D. ferrea* y su cultivo en plantaciones y sistemas agroforestales, haciéndola una alternativa viable para mejorar la calidad de vida y los ingresos del productor amazónico.

Agradecimientos

El autor agradece al Programa Nacional de Estudios e Investigación para el Desarrollo Forestal y Cambio Climático del INIA, por el apoyo financiero y logístico a través del Programa presupuestal 0130 "Competitividad y Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Forestales y de Fauna silvestre".

Contribución de los autores

YF: conceptualización y diseño, evaluaciones y cálculos numéricos para el experimento propuesto, verificación de los resultados numéricos y redacción del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores no incurren en conflictos de intereses.

Fuentes de financiamiento

Esta investigación no recibió ninguna subvención específica de ninguna agencia de financiación, sector gubernamental ni comercial o sin fines de lucro.

Aspectos éticos / legales

Los autores declaran no haber incurrido en aspectos antiéticos ni haber omitido normas legales.

ID ORCID

Ymber Flores

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

Referencias

- Alves-Milho, S. 2018. Potencial de mejoramiento genético en *Dipteryx panamensis* Pittier (Fabaceae). Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. 166 p.
- Angulo, D. 2014. Factores edáficos que influyen en el crecimiento de las plantaciones de "Shihuahuaco" *Dipteryx odorata* (Aublet Willd) de 04 años, establecido en un suelo degradado, región Ucayali. Tesis Ingeniería Forestal Universidad Nacional de Ucayali. 100 p.
- Bahru, T; Eshete, N; Woldemariam, Z. 2023. Effect of spacing on survival and growth performance of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden at Holeta Research Site, Central Ethiopia. International Journal of Forestry Research 2023: 9957776. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/ijfr/2023/9957776/>.
- Binkley, D. 2021. Forest Ecology: An Evidence-Based Approach, 1st ed.; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA. 266 p.
- Brasil, AB; de Queiroz Xavier Brasil, NM; Lima, PI; Falcão, AC; Cornejo, N; Maklouf, EJ; Resende, A; Schwartz, G. 2021. The commercial tree species *Dipteryx odorata* improves soil physical and biological attributes in abandoned pastures. Ecological Engineering 160: 106143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2020.106143>.

- Burley, J; Wood, PJ. 1979. Manual sobre investigaciones de especies y procedencias con referencia especial a los trópicos. In Burley, J; Wood, P.J. (eds.). CFI Tropical Forestry n° 10. Universidad de Oxford. p. 1-233.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125860>.
- Cárdenas, GP; Bravo, N.; Barboza, E; Salazar, W; Ocaña, J; Vázquez, M; Lobato, R; Injante, P; Arbizu, CI. 2023. Current and future distribution of shihuahuaco (*Dipteryx* Spp.) under climate change scenarios in the Central-Eastern Amazon of Peru. *Sustainability* 15: 7789. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15107789>.
- Carvalho, P. 2008. Espécies arbóreas brasileiras. Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras, v. 3. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas. 593 p.
- Carvalho, C; Cavalcante de Lima, H; Lemes, M; Zartman, C; van den Berg, C; García-Dávila, C; Honorio, E; Mader, M; Paredes-Villanueva, K; Tysklind, N; Cardoso, D. 2023. A dated phylogeny of the Neotropical Dipterygeae clade reveals 30 million years of winged papilionate floral conservatism in the otherwise florally labile early-branching papilionoid legumes, *Botanical Journal of the Linnean Society* 202(4):449–475. DOI: <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boad003>.
- Carvalho, C; Lima, H; Lemes, M; Cardoso, D. 2024. Andean uplift, climatic events, and rain-forest bridges determined the spatiotemporal evolution of the cumaru and tonka beans (Dipterygeae: Leguminosae). *Botanical Journal of the Linnean Society*: boae015. DOI: <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boae015>.
- 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. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/10/851>.
- CITES. 2023. Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora: Appendices I, II and III: valid from 25 November 2023. Geneva: CITES Secretariat. Disponible en: <https://bvearmb.do/handle/123456789/3777>.
- Córdova, JL. 2018. Influencia de la edad de los árboles en la calidad de la plantación de shihuahuaco (*Dipteryx odorata* Aublet Willd.), ubicado en el distrito de Campo Verde, Provincia de Coronel Portillo, Departamento de Ucayali. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad Nacional de Ucayali. 70 p.
- Cruz, RE. 2022. Growth and survival of juvenile trees of primary forest species in enrichment plantings in novel forests of north-western Puerto Rico. Master of Science in Agronomy. University of Puerto Rico. Mayaguez, Puerto Rico. 94 p. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11801/2977>.
- da Silva, J; Pauletto, D; da Silva, AF; Carvalho, CDSdS; Nascimento, H. 2020. Morfometría de plantíos de *Dipteryx odorata* Aubl Willd (Cumaru) no Oeste do Pará. *Advances in Forestry Science* 7(3): 1171–1180. DOI: <https://doi.org/10.34062/afs.v7i3.9263>.
- de Carvalho, CS., de Fraga, CN., Cardoso, DBOS; Lia, HC. 2020. Tonka, baru and cumaru: Nomenclatural overview, typification and updated checklist of *Dipteryx* (Leguminosae). *Taxon* 69(3): 582–592. DOI: <https://doi.org/10.1002/tax.12238>.
- de Sousa, L; Pauletto, D; Gómez, E; da Silva, ÁF; de Sousa, TG; da Silva, P; Baloneque, DD; Martorano, L. 2023. Dendrometric relationships and biomass in commercial plantations of *Dipteryx* spp. in the Eastern Amazon. *Forests* 14(11):2167. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14112167>.
- Erasmus, J; Drew, M; Wessels, C. 2020. The flexural lumber properties of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. improve with decreasing initial tree spacing. *Annals of Forest Science* 77: 73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00975-9>.

- FAO - UNESCO (Food and Agriculture Organization - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). 1974. Soil Map of the World 1:1 000 000. Vol. I. Legend. UNESCO. Paris, France.
- Flores, Y. 2020. Ecología, silvicultura y productividad de *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke. INIA - Programa Nacional Forestal. Lima, Perú. 35 p.
- Galloway, G. 2004. Dinámica de rodales. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 20 p.
- García, C; Aldana, D; Renno, J-F; Diaz, R; Hidalgo, G; Flores, G; Honorio, E. 2019. Molecular evidence for three genetic species of *Dipteryx* in the Peruvian Amazon. *Genética* 148(1):1-11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10709-019-00082-2>.
- Gonçalves, A. 2022. Stand Structure Impacts on Forest Modelling. *Applied Sciences* 12(14): 6963. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12146963>.
- Guariguata, M; Rheingans, R; Montagnini, F. 1995. Early woody invasion under tree plantations in Costa Rica: implications for forest restoration. *Restoration Ecology* 3(4): 252-260.
- Hébert, F; Krause, C; Plourde, P-Y; Achim, A; Prigent, G; Ménétrier, J. 2016. Effect of tree spacing on tree level volume growth, morphology, and wood properties in a 25-Year-Old *Pinus banksiana* Plantation in the Boreal Forest of Quebec. *Forests* 7(11): 276. DOI: <https://doi.org/10.3390/f7110276>.
- Honorio, E; Aldana, D; Flores, G; Hidalgo, G; Mejía, E; Del Castillo, D; García, C. 2018. Fichas de identificación de las especies de *Dipteryx* de la Amazonía peruana. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana. Disponible en <https://repositorio.iiap.gob.pe/handle/20.500.12921/370>.
- Honorio, E; Jolivet, C; Mader, M; García-Dávila, C; Sebbenn, A. 2019. Development of nuclear and plastid SNP markers for genetic studies of *Dipteryx* tree species in Amazonia. *Conservation Genetics Resources* 11(37):1-4. Disponible en <https://hal.science/hal-02215841v1>
- Honorio, E; Blanc-Jolivet, C; Mader, M; García, C; Aldana, D; del Castillo, D; Flores, G; Hidalgo, G; Sebbenn, A; Meyer, B; Paredes, K; Tysk-lind, N; Troispoux, V; Massot, M; Carvalho, C; de Lima, HC; Cardoso, D; Degen, B. 2020. SNP markers as a successful molecular tool for assessing species identity and geographic origin of trees in the economically important South American legume genus *Dipteryx*. *Journal of Heredity* 111(4):346-356. DOI: <https://doi.org/10.1093/jhered/esaa011>.
- Huiza, J. 2019. Comportamiento a la trabajabilidad de la madera de *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke, (shihuahuaco), de una plantación de 16 años de edad y su variación en los diferentes niveles longitudinales del fuste, proveniente de la provincia de Padre Abad, Ucayali. Tesis Ing. For. Pucallpa, Perú, Universidad Nacional de Ucayali. 81 p.
- INIAA-JICA (Instituto Nacional de Investigación Agraria y Agroindustrial, Perú). 1991. Manual silvicultural. Informe final del Proyecto Estudio Conjunto sobre Investigación y Experimentación en Regeneración de Bosques en la Región Amazónica de la República del Perú. Japón. 260 p.
- ITTO (International Tropical Timber Organization, Japón). 2023. Tropical Timber Market Report. International Tropical Timber Organization 27(3): 1-26. Disponible en https://www.itto.int/files/user/mis/MIS_1-15_Feb2023.pdf.
- Kershaw, JA; Ducey, MJ; Beers, TW; Husch, B. 2016. Forest Mensuration; John Wiley y Sons, Ltd.: Chichester, UK. 633 p.
- Kim, DS; Iida, F. 2022. Nutritional composition of Tonka Bean (*Dipteryx odorata*) and its application as an elder-friendly food with gelling agent. *Gels* 8(11):704. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9689476/>.
- Meredieu, C; Perret, S; Dreyfus, P. 2002. Modelling dominant height growth: effect of stand density. In Workshop on Reality models and parameters estimation: the forestry scenario, Sesimbra, Portugal, 2-5 June 2002. pp.111-121. DOI: <https://doi.org/10.1079/9780851996936.0111>.

- Mondragón, G. 2023. Respuesta silvicultural de ocho especies forestales nativas y exóticas de valor comercial instaladas en plantaciones forestales en la Amazonia peruana. Tesis M. Sc. Bosques y Gestión de Recursos Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina. 207 p.
- Oliver, C; Larson, B. 1990. Forest Stand Dynamics. McGraw-Hill, Inc., 467 p.
- Pancel, L; Köhl, M. 2016. Tropical Forestry Handbook, Second Edition. Springer-Verlag. 3633 p.
- 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. Ing. For. Pucallpa, Ucayali, Universidad Nacional de Ucayali. 76 p.
- Pinnschmidt, A; Yousefpour, R; Nölte, A. 2023. Economic potential and management of tropical mixed-species plantations in Central America. New Forests 54: 565–586. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09937-7>.
- Piña-Rodrigues, F; Santana da Silva, J. 2021. Silvicultura tropical [livro eletrônico]: o potencial madeireiro e não madeireiro das espécies tropicais. Sorocaba, SP, Brasil: Ed. dos Autores. 596 p. Consultado 20 mayo 2024. Disponible en: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7603481/mod_resource/content/1/Silvicultura%20Tropical%20-%20o%20potencial%20madeireiro%20e%20n%C3%A3o%20madeireiro%20das%20esp%C3%A9cies%20tropicais.pdf.
- Piotto, D. 2008. A meta-analysis comparing tree growth in monocultures and mixed plantations. Forest Ecology and Management 255(3–4):781–786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.065>.
- POWO (Plants of the World Online). 2023. Royal Botanic Gardens, Kew. Consultado 10 marzo 2024. Disponible en <http://www.plantsoftheworldonline.org>.
- Redondo-Brenes, A; Montagnini, F. 2006. Growth, productivity, aboveground biomass, and carbon sequestration of pure and mixed tree plantations in the Caribbean lowlands of Costa Rica. Forest Ecology and Management 232(1-3): 168–178. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112706003872>.
- Rodríguez, D; Moya, R; Murillo, O; Gaitán, J; Badilla, Y. 2022. Variation and genetic control of the heartwood, sapwood, bark, wood color parameter, and physical and mechanical properties of *Dipteryx panamensis* in Costa Rica. Forests 13(1):106. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13010106>.
- Rolim, SG; Piotto, D. 2018. Silviculture and Wood Properties of Natives Species of the Atlantic Forest of Brazil. Ed. Rupestre, Belo Horizonte, 164 p.
- 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. Ecology Engineering 159:106097. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106097>.
- RStudio Team. 2020. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA. Disponible en <http://www.rstudio.com/>.
- Santos, T; Martins, K; Aguiar, A; Baptista Filho, J; Menucelli, J; Faria, R; Moura, R; Machado, J; Longui, J. 2021. Growth and Wood Quality Traits in a *Dipteryx alata* Vog. (Fabaceae) Progeny and Provenance Test. Forest Science 67(4):468–477. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxab010>.
- Schmidt, F. 2009. The effect of site selection on the growth of *Dipteryx panamensis* in timber plantations in Costa Rica and Panama. Master Of Science in Tropical Forestry and Management. Dresden, Alemania: University of Technology, Faculty of Forestry, Geo and Hydro Sciences. Institute of Forest Growth and Forest Computer Sciences. 108 p
- Selaya, N; Zuidema, P; Baraloto, C; Vicent, A; Brien, R; Pitman, N; Brown, F; Duchelle, A; Araujo-Murakami, A; Oliveira, L; Vasquez, G. 2017. Economically important species dominate aboveground carbon storage in forests of

- southwestern Amazonia. *Ecology and Society* 22(2):40. DOI: <https://doi.org/10.5751/ES-09297-220240>.
- SERFOR (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, Perú). 2023a. Cartilla para la identificación botánica de las especies de los géneros *Dipteryx* (shihuahuaco) y *Handroanthus* (tahuari) en el Perú. Lima. 34 p.
- SERFOR (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, Perú). 2023b. Reporte preliminar sobre el estado poblacional de los géneros *Dipteryx* y *Handroanthus* en el Perú. SERFOR - Dirección de Inventario y Valoración. Lima. 77 p.
- Sharma, M; Amateis, RL; Burkhardt, HE. 2002. Top height definition and its effect on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management* 168(1-3): 163-175.
- Silva, F; Costa, A; Müller, C. 2020. *Dipteryx alata*, a tree native to the Brazilian Cerrado, is sensitive to the herbicide nicosulfuron. *Ecotoxicology* 29: 217-225. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-019-02154-7>.
- Sousa, B; Gomes, A; Viana, S; Silva, B; Barata, L; Sartoratto, A; Lustosa, D; Vieira, T. 2023. Phytochemical analysis and antioxidant activity of ethanolic extracts from different parts of *Dipteryx punctata* (S. F. Blake) Amshoff. *Applied Sciences* 13(17): 9600. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13179600>.
- Tilman, D; Knops, J; Wedin, D; Reich, P; Siemann, E. 1997. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science* 277: 1300-1302. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.277.5330.1300>.
- Ugalde, L. 2002. El sistema MIRA-SILV (Manejo de Información sobre Recursos Arboóreos), Componente de Silvicultura. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 110 p.
- Vásquez, W; Ugalde, L. 1994. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinata* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. Informe Final Convenio de Cooperación, Proyecto Forestal Chorotega (IDA/FAO) y Proyecto Madeleña-3/CATIE. 42 p.
- West, PW. 2015. *Tree and Forest Measurement*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14708-6> 2015.
- Wright, JW. 1964. Mejoramiento genético de los árboles forestales. FAO, Roma. 437 p.