

Rendimientos operativos en el aprovechamiento forestal de especies arbóreas en diversos bosques de las provincias de García Rovira y Yariguíes en Santander.

Cristian Johanny Castellanos Parra, Harvey Leonardo Meza Riaño

Director

Ronald Alfonso Montañez Valencia

M.Sc. Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Programa de Ingeniería forestal

Bucaramanga.

2026

### **Dedicatoria**

Dedicamos este trabajo de grado, en primer lugar, a Dios, por guiarnos a lo largo de este camino y brindarnos la fortaleza y sabiduría necesarias para alcanzar esta meta.

A nuestras familias, por su apoyo constante, comprensión y por ser el motor que impulsa cada uno de nuestros logros. En especial a nuestros padres, cuyo esfuerzo y dedicación han sido fundamentales para hacer realidad este sueño.

A nuestros amigos y compañeros, quienes hicieron parte de este proceso, aportando aprendizajes, motivación y acompañamiento en cada etapa.

A los docentes que contribuyeron en nuestra formación profesional, por sus enseñanzas, orientación y compromiso.

Finalmente, dedicamos este trabajo a quienes promueven el uso responsable de los recursos naturales y la conservación de los ecosistemas, como base para un futuro sostenible.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a Dios primeramente por guiarnos a lo largo de este proceso académico, brindándonos la fortaleza, la perseverancia y la sabiduría necesarias para culminar satisfactoriamente esta etapa de nuestra formación profesional.

Expresamos nuestro profundo agradecimiento a nuestras familias, por su apoyo incondicional, comprensión y constante motivación, siendo un pilar fundamental en el logro de este objetivo.

A la institución universitaria, por proporcionarnos los espacios, recursos y formación académica necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado.

De manera especial, agradecemos a nuestro director de trabajo de grado, por su orientación, acompañamiento permanente y valiosos aportes técnicos y metodológicos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento a los docentes que hicieron parte de nuestra formación, por sus enseñanzas y compromiso académico.

Agradecemos igualmente a las personas, operarios y entidades que facilitaron el trabajo de campo, aportando su conocimiento y colaboración en la recolección de la información.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo y culminación de este trabajo de grado.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Objetivos .....	18
1.1. Objetivo General .....	18
1.2. Objetivos Específicos.....	18
2. Marco Referencial.....	19
2.1. Marco Teórico.....	19
2.2. Marco Contextual del Área de Estudio.....	23
2.2.1. Localización y caracterización biofísica .....	23
2.2.2. Descripción de los predios y sitios de estudio .....	24
2.3. Marco legal .....	25
2.3.1. Ley 2 de 1959 .....	25
2.3.2. Decreto 2811 de 1974.....	25
2.3.3. Ley 99 de 1993 .....	26
2.3.4. Decreto 1791 de 1996.....	26
2.3.5. Decreto 1076 de 2015.....	26
2.3.6. Decreto 690 de 2021.....	27
2.3.7. Resolución DGL No. 00188 del 14 de mayo de 2020.....	28
2.3.8. Resolución DGL No. 0000384 del 22 de junio de 2022 .....	28
2.3.9. Resolución DGL No. 000814 del 19 de noviembre de 2025.....	28

APROVECHAMIENTO FORESTAL EN SANTANDER	5
3. Metodología .....	28
3.1. Área de estudio .....	28
3.2. Trabajo en campo.....	30
3.3. Análisis de datos .....	35
4.3.1 Ecuaciones de rendimiento y eficiencia aplicadas.....	35
4.3.2 Pruebas estadísticas aplicadas.....	35
4.3.3 Tipo de encuesta aplicada a los operarios forestales .....	36
4. Resultados .....	36
4.1. Características dasométricas y operativas de los individuos aprovechados .....	36
4.2 Volúmenes en pie y volúmenes aprovechados por especie .....	38
4.3. Volúmenes comerciales en pie y apeados por especie.....	39
4.4. Rendimientos operativos del aprovechamiento forestal .....	41
4.4.1 Rendimientos en plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham. ....	41
4.4.2. Rendimientos en especies arbóreas de bosque natural .....	42
4.4.3. Comparación de rendimientos entre sistemas.....	43
4.5. Análisis estadístico de los rendimientos operativos.....	46
4.5.1. ANOVA de un factor .....	48
4.6. Propuesta del sistema de transporte menor según pendientes por sitio .....	51
5. Discusión .....	59
6. Conclusiones .....	65
7. Recomendaciones .....	68
Referencias Bibliográficas .....	74
Apéndices.....	77

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
<i>Tabla 1: Información de los predios con coordenadas geográficas .....</i>	29
<i>Tabla 2: Medición de variables operativas y pesaje por componentes .....</i>	32
<i>Tabla 3: Medición de variables dendrométricas en árboles de sombrero y bosques naturales .....</i>	33
<i>Tabla 4: Estimación de volumen según sus autores.....</i>	33
<i>Tabla 5: Estadísticas descriptivas de las variables dasométricas y operativas .....</i>	38
<i>Tabla 6: Rendimientos operativos en la plantación de Pinus patula Schiede ex Schltdl. &amp; Cham. — Concepción.....</i>	41
<i>Tabla 7: Rendimientos operativos en especies arbóreas de bosque natural .....</i>	43
<i>Tabla 8: Comparación de rendimientos operativos entre plantación y bosque natural.....</i>	43
<i>Tabla 9: Rendimientos operativos individuales por especie.....</i>	46
<i>Tabla 10: Estadísticas descriptivas de los rendimientos operativos por especie .....</i>	47
<i>Tabla 11: Comparaciones múltiples post hoc de Tukey entre pares de especies .....</i>	48
<i>Tabla 12: Coeficiente de correlación de Pearson entre variables dasométricas y rendimiento operativo .....</i>	50
<i>Tabla 13: Caracterización topográfica de los predios de estudio y sistema de transporte menor recomendado.....</i>	54

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> <i>Flujograma del proceso de aprovechamiento forestal maderable con rendimientos operativos de referencia.</i> .....	21
Figura 2: <i>Área de estudio en el Carmen de Chucurí y Concepción</i> .....	30
Figura 3: <i>Número de individuos aprovechados por especie arbórea en los sitios de estudio.</i> ....	37
Figura 4: <i>Volumen en pie y volumen comercial (Smalian) por especie arbórea aprovechada.</i> ..	38
Figura 5: <i>Volumen comercial en pie y volumen Smalian por especie arbórea</i> .....	39
Figura 6: <i>Rendimientos operativos promedio por sitio de estudio</i> .....	44
Figura 7: <i>Rendimientos operativos promedio por especie arbórea</i> .....	45
Figura 8: <i>Análisis cartográfico del área Caño Doradas, El Carmen de Chucurí.</i> .....	51
Figura 9: <i>Análisis cartográfico del área Pichincha — Concepción.</i> .....	53

**Lista de Appendices**

Apéndice A: <i>Formulario de entrevista semiestructurada a operarios forestales</i> .....	77
Apéndice B: <i>Base de datos dendrometricos por individuo aprovechado</i> .....	78
Apéndice C: <i>Mapa de ubicación de predios y áreas de estudio</i> .....	78
Apéndice D: <i>Registro fotográfico de las operaciones de aprovechamiento forestal</i> .....	79

## Glosario

**Alma del cable:** núcleo interno del cable de acero, compuesto por fibra natural, sintética o acero, cuya función es soportar los torones y mantener la estabilidad estructural bajo tensión durante las operaciones de arrastre forestal (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018).

**Aprovechamiento forestal:** conjunto de operaciones técnicas destinadas a la extracción sostenible de productos maderables y no maderables desde el bosque hasta su transformación primaria (Decreto 1076 de 2015; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020).

**Aprovechamiento forestal de bajo impacto:** modalidad de cosecha planificada que minimiza daños al suelo, vegetación residual y biodiversidad mediante técnicas controladas de apeo, derribo y arrastre (Center for International Forestry Research & Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021).

**Apeo (derribo):** operación forestal que consiste en el corte dirigido por bisagra y horizontal, en la base del árbol para controlar su caída y reducir riesgos operativos (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018).

**Bosque natural:** ecosistema forestal compuesto por diversas especies nativas a diferentes abundancias y dimensiones que se desarrollan sin establecimiento artificial y mantienen procesos ecológicos propios según las características biofísicas del sitio (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020).

**Cable cabrestante:** cable de acero enrollado en un tambor mecánico o de madera utilizado para el arrastre de trozas en operaciones de aprovechamiento forestal. Su aplicación varía según el

sistema de extracción: en sistemas de arrastre por suelo actúa como elemento de tiro directo sobre la troza; en sistemas de cable aéreo (*Per se* Torre Koller), funciona como cable de tracción que eleva y desplaza la carga; y en sistemas de winche estacionario se emplea para jalar trozas desde el área de corta hasta la vía de saca (FAO, 1999; Spinelli & Magagnotti, 2020).

**Cable guía:** cable portante principal en sistemas de transporte aéreo forestal que soporta el desplazamiento de la carga mediante poleas o carros móviles (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1999).

**Catenaria:** curva que adopta un cable suspendido entre dos puntos bajo la acción de su propio peso, utilizada para calcular tensiones en sistemas de cableado forestal (Spinelli & Magagnotti, 2020).

**Coefficiente de rendimiento de aserrío:** relación porcentual entre el volumen en troza y el volumen de madera aserrada obtenida, indicador de eficiencia en la transformación primaria (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, 2021).

**Cubicación de madera:** procedimiento técnico mediante el cual se estima el volumen de madera en pie o en troza a partir de mediciones de diámetro y longitud aplicando fórmulas dendrométricas (Del Lungo et al., 2022).

**Desrame:** actividad que consiste en la eliminación de ramas del árbol derribado para facilitar su manipulación y transporte (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018).

**Diámetro a la altura del pecho (DAP):** medida estándar del diámetro del fuste tomada a 1,30 m sobre el nivel del suelo, utilizada como variable básica en inventarios forestales (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019).

**Deficiencia operativa:** relación porcentual entre el tiempo productivo y el tiempo total empleado en una operación forestal (Spinelli & Karjalainen, 2018).

**Rendimiento operativo:** volumen de madera producido por unidad de tiempo ( $m^3/h$ ) durante una actividad específica del aprovechamiento forestal (Pardini et al., 2021).

**Sistema agroforestal:** sistema de uso del suelo que integra árboles con cultivos agrícolas y/o ganadería para generar beneficios productivos y ambientales simultáneamente (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021).

**Tiempo de operación:** duración total requerida para ejecutar una actividad del aprovechamiento forestal, incluyendo tiempos productivos e improductivos (Spinelli & Karjalainen, 2018).

**Torre Koller:** estructura metálica utilizada en sistemas de cableado aéreo para sostener cables portantes y facilitar el transporte de madera en terrenos con pendiente (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1999).

**Transporte menor:** traslado de trozas desde el sitio de apeo hasta un punto de acopio intermedio mediante sistemas manuales, mecánicos o por cable (Pardini et al., 2021).

**Transporte mayor:** movilización de madera desde el punto de acopio hasta centros de transformación o comercialización mediante vehículos de carga (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020).

**Troceo:** proceso mediante el cual el fuste derribado se corta en secciones o trozas de longitud definida según requerimientos comerciales (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018).

**Winche mecánico:** equipo motorizado de tracción que enrolla cable de acero para realizar el arrastre de trozas en operaciones forestales (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1999).

## Resumen

**Título:** Rendimientos operativos en el aprovechamiento forestal de especies arbóreas en sistemas agroforestales y bosques naturales de las provincias de García Rovira y Yariguíes, Santander\*

**Autores:** Cristian Johanny Castellanos Parra, Harvey Leonardo Meza Riaño\*\*

**Palabras clave:** análisis de productividad, desempeño operacional, cubicación de madera, transporte forestal, optimización de recursos, manejo sostenible.

**Descripción:** El aprovechamiento forestal en América Latina registra rendimientos operativos variables según el sistema productivo y la topografía. En Costa Rica se reportan rendimientos de apeo entre 2,1 y 4,8 m<sup>3</sup>/h en plantaciones de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*; en Ecuador, valores de 1,5 a 3,2 m<sup>3</sup>/h en bosques naturales andinos; en Perú, entre 0,9 y 2,6 m<sup>3</sup>/h en el cono Amazónico; y en Colombia, entre 1,72 y 2,98 m<sup>3</sup>/h en el Chocó y Valle del Cauca. El presente estudio evaluó los rendimientos operativos en plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. y bosques naturales en las provincias de García Rovira y Yariguíes (Santander), mediante estudios de tiempos y movimientos, midiendo tiempo efectivo, volumen extraído (m<sup>3</sup>), CAP y condiciones topográficas, con cubicación por los métodos de Smalian, Huber y Doyle. En plantación los rendimientos oscilaron entre 0,09 hasta 0,43 m<sup>3</sup>/h, mientras que en bosque natural variaron entre 0,75 y 3,52 m<sup>3</sup>/h, siendo *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake la especie de mayor productividad. El transporte menor fue la fase más crítica del ciclo productivo y el troceado la actividad de mayor demanda temporal. La información generada aporta bases técnicas para la planificación eficiente del aprovechamiento forestal en Santander.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia (IPRED), Universidad Industrial de Santander. Programa de Ingeniería Forestal. Director: Ronald Alfonso Montañez Valencia, M.Sc.

## Summary

**Title:** Operational yields in the forest use of tree species in agroforestry systems and natural forests in the provinces of García Rovira and Yariguíes, Santander

**Authors:** Cristian Johanny Castellanos Parra, Harvey Leonardo Meza Riaño

**Keywords:** productivity analysis, operational performance, wood cubing, forest transport, resource optimization, sustainable management.

**Description:** Forest harvesting in Latin America shows varying operational yields depending on the production system and topography. In Costa Rica, harvesting yields range from 2.1 to 4.8 m<sup>3</sup>/h in *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* plantations; in Ecuador, values from 1.5 to 3.2 m<sup>3</sup>/h in Andean natural forests; in Peru, between 0.9 and 2.6 m<sup>3</sup>/h in the Amazonian cone; and in Colombia, between 1.72 and 2.98 m<sup>3</sup>/h in the Chocó and Valle del Cauca regions. This study evaluated operational yields in *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham plantations and natural forests in the provinces of García Rovira and Yariguíes (Santander), using time and motion studies, measuring effective time, extracted volume (m<sup>3</sup>), CAP (Capacity of Logging), and topographic conditions, with volume calculations using the Smalian, Huber, and Doyle methods. In plantations, yields ranged from 0.09 to 0.43 m<sup>3</sup>/h, while in natural forest they varied between 0.75 and 3.52 m<sup>3</sup>/h, with *Schizolobium parahyba* being the most productive species. Small-scale transport was the most critical phase of the production cycle, and bucking was the most time-consuming activity. The information generated provides a technical basis for the efficient planning of forest harvesting in Santander.

---

\* Degree Project

\*\* Institute of Regional Projection and Distance Education (IPRED), Industrial University of Santander. Forest Engineering Program. Director: Ronald Alfonso Montañez Valencia, M.Sc.

## Introducción

El sector forestal apalanca el desarrollo económico, social y ambiental al contribuir al suministro de materias primas, la generación de empleo rural y la provisión de servicios ecosistémicos estratégicos como la regulación hídrica y la captura de carbono (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO, 2020)). En Centro y Sur América, la disponibilidad de recursos forestales representa una oportunidad estratégica para fortalecer modelos de producción sostenible basados en eficiencia técnica y planificación operativa. América del Sur cuenta con 17,3 millones de hectáreas de bosques plantados, mientras que Norte y Centroamérica alcanzaron 49,8 millones de hectáreas en plantaciones forestales para (2025 FAO), sumado a extensas coberturas de bosques naturales de uso maderable y no maderable (FAO, 2025).

En Colombia, el aprovechamiento forestal maderero constituye una actividad relevante dentro del sector primario. En promedio se generan 2,98 jornales por m<sup>3</sup> de madera procesada en operaciones de manejo forestal comunitario, con variaciones entre 2,7 jornales/m<sup>3</sup> en Antioquia y 3,2 jornales/m<sup>3</sup> en Bolívar y Valle del Cauca FAO, evidenciando las diferencias regionales asociadas a la topografía y los sistemas de extracción empleados (Armenteras et al., 2022). Sin embargo, el sector enfrenta limitaciones estructurales vinculadas a bajos niveles de mecanización por las condiciones de la orografía y los ecosistemas naturales de protección, debilidades en la planificación técnica y restricciones logísticas para la extracción y transporte de madera. En el departamento del Chocó, estudios de aprovechamiento en bosque pluvial tropical reportan rendimientos promedio de cosecha de 1,72 m<sup>3</sup>/hora, equivalentes a 412 m<sup>3</sup>/mes Agence IP, lo que ilustra la variabilidad operativa existente en distintas regiones del país (Maguar et al., 2015).

Diversas investigaciones han demostrado que el rendimiento operativo en actividades forestales depende de variables dendrométricas como el diámetro a la altura del pecho (DAP), el diámetro de copa, el espesor de corteza y las alturas comercial y total, así como de factores operativos como la pendiente del terreno, el sistema de extracción empleado y la organización del trabajo (Spinelli & Magagnotti, 2020). En Perú, estudios en plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham en Cajamarca reportaron una productividad diaria de 69,2 m<sup>3</sup> para operaciones de tumbado, con un tiempo efectivo de motosierra de 2 horas y 15 minutos por jornada, representando el 34,05% del tiempo total CEPAL (Arce & Villanueva, 2023). La aplicación de estudios de tiempos y movimientos permite cuantificar el desempeño operacional, identificar tiempos improductivos y estimar la productividad en términos de volumen por unidad de tiempo (Spinelli & Karjalainen, 2018).

En el departamento de Santander, particularmente en las provincias de García Rovira y Yariguíes, las actividades forestales se desarrollan en sistemas agroforestales y bosques naturales con especies de valor comercial como *Hymenaea courbaril* L., *Cedrela odorata* L. y *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook. Las características topográficas de la región, marcadas por gradientes altitudinales que en El Carmen de Chucurí van desde los 200 hasta los 1.000 m s. n. m., y en Concepción desde los 2.000 hasta los 3.600 m s. n. m., con pendientes variables y accesos limitados, influyen directamente en la selección de métodos de cosecha y en la eficiencia de las operaciones de extracción.

En sistemas agroforestales, la interacción entre componentes arbóreos y agrícolas puede generar condiciones particulares para la extracción, mientras que en bosques naturales la heterogeneidad estructural incrementa la complejidad operativa. Estas diferencias estructurales se traducen en variaciones significativas en los rendimientos, lo que resalta la necesidad de

evaluaciones técnicas comparativas que permitan establecer parámetros productivos ajustados a cada sistema (Pardini et al., 2021). El CIFOR y la FAO (2021) señalan que la planificación del aprovechamiento forestal sostenible de bajo impacto es determinante para reducir el disturbio ambiental y mejorar la eficiencia operativa en ecosistemas tropicales y andinos.

La estimación precisa de los rendimientos operativos constituye una herramienta estratégica para optimizar recursos, reducir costos y mejorar la planificación forestal. En este contexto, surgen los siguientes interrogantes: ¿Cuáles son los rendimientos operativos del aprovechamiento forestal en plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.? & Cham y bosques naturales de las provincias de García Rovira y Yariguíes? ¿Qué variables dendrométricas y operativas influyen de manera significativa sobre dichos rendimientos? ¿Existen diferencias en la eficiencia del transporte menor entre los dos sistemas evaluados? Con base en estas preguntas, la presente investigación se orientó a evaluar el desempeño operativo en ambos sistemas, con el propósito de generar información técnica que contribuya a la toma de decisiones y al fortalecimiento de la gestión forestal sostenible en el departamento de Santander.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Evaluar la eficiencia operativa del aprovechamiento forestal en sistemas agroforestales en diversos sectores de las provincias de García Rovira y Yarigués en Santander.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Identificar los rendimientos operativos en función de variables dendrométricas de la madera extraída, tiempo de operación, mano de obra y tecnología utilizada.

Estimar la eficiencia en el aprovechamiento forestal sostenible de bajo impacto en sistemas agroforestales y bosques naturales.

Analizar la operatividad en los sistemas de transporte menor de la madera en sistemas forestales plantados y bosques naturales.

## 2. Marco Referencial

### 2.1. Marco Teórico

El sector forestal colombiano enfrenta desafíos estructurales relacionados con la eficiencia operativa en las actividades de cosecha y transporte de madera. Factores como la disponibilidad de tecnología apropiada, la capacitación del personal operario y las condiciones topográficas influyen directamente en la productividad del sector. Investigaciones recientes indican que la ausencia de bases de datos operativos actualizadas y el limitado conocimiento sobre normativas de aprovechamiento de bajo impacto constituyen barreras para la modernización del sector (Pardini et al., 2021; Visser & Stampfer, 2015). Asimismo, la optimización de operaciones es un elemento clave para reducir costos y mejorar la competitividad del sector maderero en Colombia (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021).

El aprovechamiento forestal comprende un conjunto de actividades técnicas orientadas al apeo, desrame, troceo, arrastre y transporte menor de la madera. Su eficiencia se ve influenciada por el tiempo empleado en cada fase, el volumen individual de los árboles y el sistema de extracción utilizado. La correcta planificación permite disminuir costos operativos, aumentar la productividad y reducir impactos ambientales asociados a compactación del suelo, daños a la regeneración natural y pérdida de biodiversidad, especialmente en bosques naturales (CIFOR & FAO, 2021; Spinelli & Magagnotti, 2020).

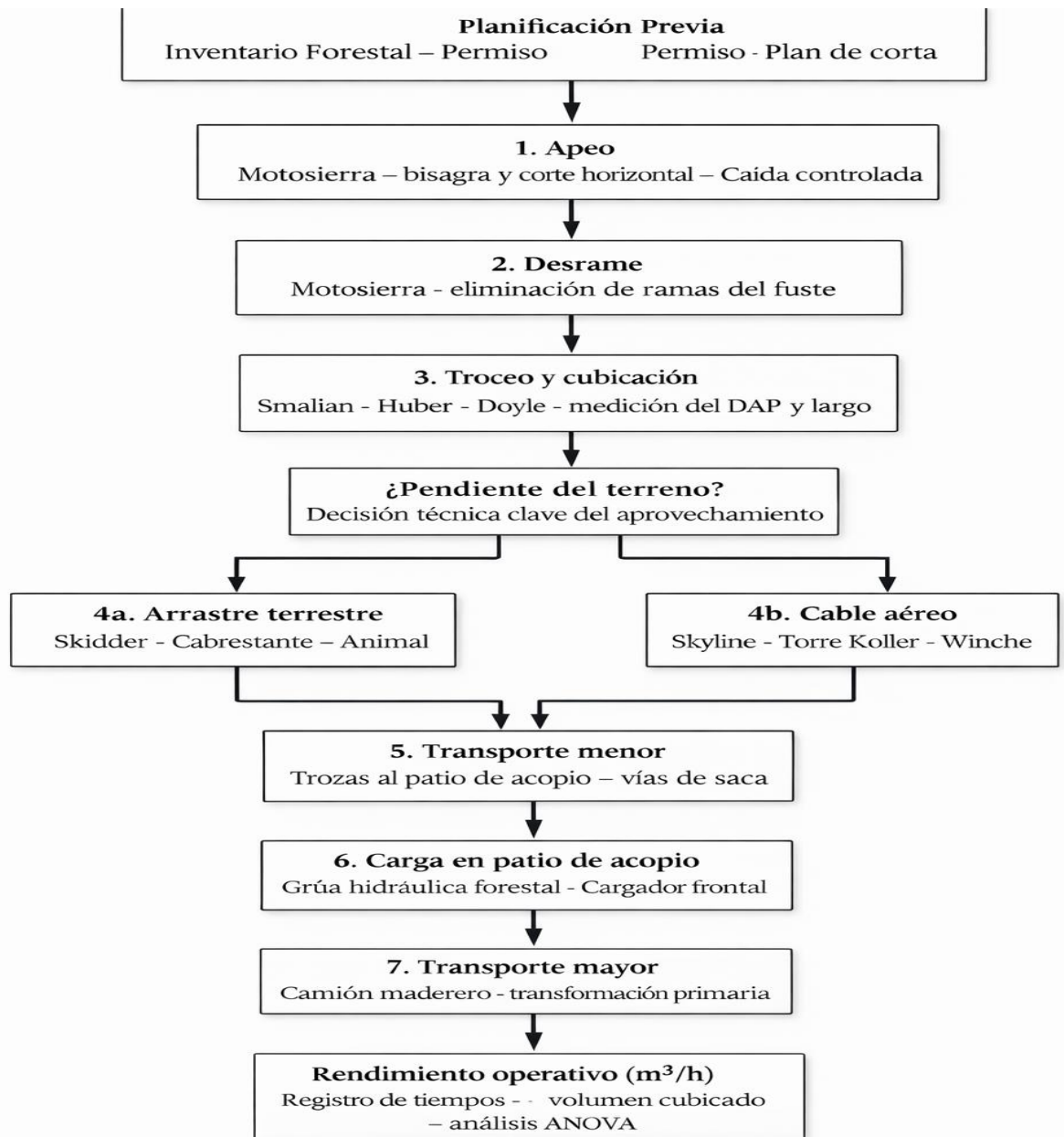
En estudios de tiempos y movimientos desarrollados en cuatro ejidos de la región de El Salto, estado de Durango, México, sobre bosques de coníferas (*Pinus spp.*) en terreno de montaña

con pendientes entre 20% y 60%, se registraron 704 ciclos de derribo manual, 900 ciclos de arrastre mecanizado y 1.294 ciclos de carga mecanizada. El apeo se realizó con motosierras de mano; el arrastre, con grúas mecánicas y skidders de ruedas; y la carga, con grúas hidráulicas operadas por un equipo integrado por un motosierrista, dos cableros y un operador de grúa. Los resultados mostraron una productividad promedio en el ciclo de derribo de 28,67 m<sup>3</sup>/h, en el arrastre mecanizado de 19,83 m<sup>3</sup>/h a una distancia promedio de 43,13 m, y en la carga mecanizada de 35,27 m<sup>3</sup>/h (Nájera-Luna et al., 2011). Investigaciones en plantaciones comerciales de eucalipto en Australia y bosques naturales de pino en Chile han demostrado que la mecanización con equipos como harvesters de cabezal procesador, forwarders de ocho ruedas y skidders de cable asistido puede incrementar el rendimiento operativo entre 20% y 45%, reduciendo tiempos de ciclo y costos unitarios de producción (Spinelli & Magagnotti, 2020; Visser & Stampfer, 2015). Acuña et al. (2017) reportaron en plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. en Australia que la integración de harvesters con forwarders en terrenos con pendientes hasta del 30% redujo los costos de cosecha en un 28% respecto a sistemas manuales, principalmente por la disminución de tiempos improductivos entre ciclos.

La Figura 1 ilustra la secuencia operativa completa del aprovechamiento forestal maderable en sistemas de plantación y bosque natural, desde la planificación hasta la obtención del rendimiento final expresado en m<sup>3</sup>/h, integrando los equipos empleados en cada fase y los valores de referencia reportados en la literatura especializada.

**Figura 1**

*Flujograma del proceso de aprovechamiento forestal maderable con rendimientos operativos de referencia.*



Como se observa en la Figura 1, la secuencia operativa inicia con la planificación previa que incluye el censo forestal, la obtención del permiso ante la autoridad ambiental competente y la formulación del plan de corta. Las operaciones de campo se ejecutan en el siguiente orden: apeo dirigido con motosierra, desrame del fuste, troceo y cubicación mediante los métodos de Smalian, Huber o Doyle. La fase de extracción se bifurca según la pendiente del terreno: en pendientes moderadas (< 30%) se emplea arrastre terrestre con skidder, cabrestante o tracción animal; en pendientes fuertes (> 30%) se utilizan sistemas de cable aéreo tipo skyline o Torre Koller para minimizar la compactación del suelo y el impacto sobre la regeneración natural. Ambas rutas convergen en el transporte menor hacia el patio de acopio, donde se realiza la carga con grúa hidráulica forestal para el transporte mayor hasta la planta de transformación primaria.

En cuanto a la capacitación del personal operario, investigaciones en América Latina evidenciaron que los programas de formación técnica en operaciones de aprovechamiento forestal impactan directamente en la productividad y seguridad laboral. Estudios realizados en Costa Rica y Ecuador reportan que operarios capacitados en técnicas de apeo dirigido, uso adecuado de equipos de protección personal y corte de lianas previo al derribo reducen los tiempos improductivos hasta en un 35% y disminuyen la incidencia de accidentes laborales en un 40% respecto a operarios sin formación técnica (CIFOR & FAO, 2021). Esta evidencia subraya la necesidad de articular los programas de capacitación con las condiciones específicas de cada sistema productivo, el tipo de cobertura forestal y la maquinaria disponible en cada región.

La estimación precisa de los rendimientos operativos permite cuantificar incrementos en volumen aprovechado ( $m^3/h$ ), reducciones en tiempo de ciclo y mejoras en eficiencia técnica según el equipo utilizado y la pendiente del terreno. Estos análisis constituyen herramientas

fundamentales para la planificación sostenible del aprovechamiento forestal en la región andina colombiana (Pardini et al., 2021; Spinelli & Karjalainen, 2018).

## **2.2. Marco Contextual del Área de Estudio**

### **2.2.1. Localización y caracterización biofísica**

El área de estudio se localiza en el departamento de Santander, abarcando tres sitios de investigación distribuidos entre las provincias de García Rovira y Yarigués: la vereda Pamplona del municipio de San Vicente de Chucurí, la zona de Caño Doradas en el municipio de El Carmen de Chucurí, y la vereda Pichincha del municipio de Concepción. Los predios de San Vicente de Chucurí y El Carmen de Chucurí se encuentran inscritos dentro de la Unidad de Manejo Forestal (UMF) administrada por la Asociación Agroforestal del Chucurí (ASAFCH), la cual comprende un área total de 876,24 ha divididas en zona alta y zona baja; los ocho predios objeto de estudio pertenecen a la zona alta, donde predominan coberturas de bosque natural y sistemas agroforestales.

El rango altitudinal del área de estudio oscila entre 247 m s.n.m. (Caño Doradas, El Carmen de Chucurí) y 2.941 m s.n.m. (vereda Pichincha, Concepción), lo que determina una alta variabilidad en las condiciones climáticas y topográficas entre sitios. En la subregión del Chucurí, el rango altitudinal de los predios de la UMF-ASAFCH oscila entre 800 y 2.000 m s.n.m., con precipitaciones anuales de hasta 2.500 mm bajo un régimen bimodal, con máximos en los períodos marzo–mayo y octubre–noviembre. La temperatura media anual varía entre 18 °C y 24 °C, con humedad relativa entre 80% y 85%. Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1987), esta área corresponde a la zona de vida de bosque muy húmedo premontano (bmh-PM). En la vereda Pichincha (Concepción), las condiciones corresponden a la zona de vida de bosque muy

húmedo montano bajo (bmh-MB), con temperaturas medias entre 12 °C y 18 °C y precipitaciones anuales entre 1.800 y 2.200 mm, condiciones que favorecen el establecimiento y desarrollo de plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

### **2.2.2. Descripción de los predios y sitios de estudio**

Los predios evaluados en la subregión del Chucurí comprenden ocho fincas de la UMF-ASAFCH: Villa Mira, Albania, San Roque, San Pablo, Las Malvinas, El Rubí, Buenos Aires y El Triunfo, ubicadas en la vereda Tambo Redondo (El Carmen de Chucurí) y veredas aledañas de San Vicente de Chucurí, cuyo aprovechamiento forestal persistente está amparado por la Resolución DGL No. 0000384 del 22 de junio de 2022, expedida por la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS). En estos predios predominan coberturas de bosque natural intervenido con presencia de especies maderables como *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake (frijolito), *Cedrela odorata* L. (cedro), *Cordia gerascanthus* L. (morcoro), *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (anime) y *Calophyllum brasiliense* Cambess. (galapo), entre otras especies de interés comercial.

El sitio de Caño Doradas, jurisdicción del municipio de El Carmen de Chucurí, se caracteriza por coberturas mixtas de bosque secundario y sistemas agroforestales con especies maderables asociadas a cultivos de cacao (*Theobroma cacao* L.). La vereda Pichincha, en el municipio de Concepción, alberga plantaciones forestales de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham bajo la modalidad de protección-producción, cuyo aprovechamiento fue autorizado mediante la Resolución DGL No. 000814 del 19 de noviembre de 2025 de la CAS.

En Santander, los sistemas agroforestales han emergido como una alternativa productiva sostenible que integra componentes arbóreos y agrícolas (FAO, 2021). En 2023, la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) impulsó el establecimiento de 640 ha de sistemas agroforestales con especies como *Cedrela odorata*, *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken y *Tectona grandis* L.f. asociadas a cultivos de cacao y café en los municipios de El Carmen de Chucurí, San Vicente de Chucurí y Concepción, beneficiando a más de 350 familias (Morante Hernández, 2023)

## **2.3. Marco legal**

### **2.3.1. Ley 2 de 1959**

*"Por el cual se dictan normas sobre economía forestal de la Nación y conservación de recursos naturales renovables" (Ministerio de Justicia y del Derecho, 1959).*

Esta ley constituye el primer instrumento jurídico de ordenación forestal en Colombia y establece las bases para la protección y aprovechamiento sostenible de los bosques nacionales, declarando zonas de reserva forestal en diversas regiones del país.

### **2.3.2. Decreto 2811 de 1974**

*"Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente" (Presidencia de la República, 1974).*

**Artículo 55.** La duración del permiso será fijada de acuerdo con la naturaleza del recurso, de su disponibilidad, de la necesidad de restricciones o limitaciones para su conservación y de la cuantía y clase de las inversiones, sin exceder de diez años. Los permisos por lapsos menores de diez años serán prorrogables siempre que no sobrepasen, en total, el referido máximo (Presidencia de la República, 1974).

### **2.3.3. Ley 99 de 1993**

*"Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones" (Congreso de Colombia, 1993).*

**Artículo 5.** Funciones del Ministerio. Regular las condiciones generales para el saneamiento del medio ambiente, y el uso, manejo, aprovechamiento, conservación, restauración y recuperación de los recursos naturales. Aprobar los estatutos de las Corporaciones Autónomas Regionales y las reformas que los modifiquen o adicionen y ejercer sobre ellas la debida inspección y vigilancia (Congreso de Colombia, 1993).

### **2.3.4. Decreto 1791 de 1996**

Por medio del cual se establece el régimen de aprovechamiento forestal. Define el aprovechamiento forestal como la extracción de productos de un bosque y comprende desde la obtención hasta el momento de su transformación. El artículo 5 dicta varias clases de aprovechamiento forestal que dependen de la clase de propiedad sobre los bosques naturales en los que se autoriza la extracción de madera y su tipo de uso (Ministerio del Medio Ambiente, 1996).

### **2.3.5. Decreto 1076 de 2015**

Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente, 2015). Este instrumento regula el aprovechamiento forestal en la etapa de cosecha y transporte menor, y es el marco normativo vigente que rige las operaciones objeto del presente trabajo de grado.

**Artículo 2.2.1.1.1.1.** Definiciones. Para efectos de la presente sección se adoptan las siguientes definiciones:

**Aprovechamiento:** es el uso, por parte del hombre, de los recursos maderables y no maderables provenientes de la flora silvestre y de las plantaciones forestales.

**Aprovechamiento forestal:** es la extracción de productos de un bosque y comprende desde la obtención hasta el momento de su transformación.

**Aprovechamiento sostenible:** es el uso de los recursos maderables y no maderables del bosque que se efectúa manteniendo el rendimiento normal del bosque mediante la aplicación de técnicas silvícolas que permiten la renovación y persistencia del recurso.

**Productos forestales de transformación primaria:** son los productos obtenidos directamente a partir de las trozas como bloques, bancos, tablonés, tablas, chapas y astillas, entre otros.

**Productos forestales de transformación terminada:** son los productos de la madera obtenidos mediante diferentes procesos y grados de elaboración y de acabado industrial con mayor valor agregado (Minambiente, 2015).

### **2.3.6. Decreto 690 de 2021**

Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Ambiente y Desarrollo Sostenible, estableciendo disposiciones sobre el aprovechamiento forestal de plantaciones y sistemas agroforestales en Colombia (Minambiente, 2021). Este decreto complementa el régimen del Decreto 1076 de 2015 en lo relativo a las plantaciones forestales de protección-producción, modalidad presente en los predios de Concepción objeto de este estudio.

**2.3.7. Resolución DGL No. 00188 del 14 de mayo de 2020**

"Por la cual se establece veda para el aprovechamiento forestal en el área de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Santander — CAS" (CAS, 2020).

**2.3.8. Resolución DGL No. 0000384 del 22 de junio de 2022**

"Esta resolución ampara el aprovechamiento forestal persistente de las Unidades de Manejo Forestal (UMF) administradas por la Asociación Agroforestal del Chucurí (ASAFCH), con un área total de 876,24 ha distribuidas entre los municipios de El Carmen de Chucurí y San Vicente de Chucurí, constituyendo el principal instrumento jurídico que rige las operaciones forestales evaluadas en los predios de la subregión del Chucurí"

**2.3.9. Resolución DGL No. 000814 del 19 de noviembre de 2025**

"Por la cual se autoriza el aprovechamiento forestal en la vereda Pichincha del municipio de Concepción" (CAS, 2025). Esta resolución constituye el acto administrativo que habilita legalmente las operaciones de cosecha evaluadas en la plantación *de Pinus patula Schiede ex Schltdl. & Cham.* establecida en la vereda Pichincha, segundo sitio de investigación del presente trabajo de grado."

### **3. Metodología**

#### **3.1. Área de estudio**

El área de estudio comprende tres sitios de investigación localizados en el departamento de Santander (Figura 2): los predios de la Unidad de Manejo Forestal (UMF) de la Asociación Agroforestal del Chucurí (ASAFCH) en las veredas Pamplona y La Colorada del municipio de San Vicente de Chucurí y en la vereda Tambo Redondo del municipio de El Carmen de Chucurí; el área de Caño Doradas, municipio de El Carmen de Chucurí; y la vereda Pichincha, municipio

de Concepción, provincia de García Rovira. Los predios de la UMF-ASAFCH abarcan un área total de 876,24 ha divididas en zona alta y zona baja; los ocho predios objeto de este estudio pertenecen a la zona alta, donde predominan coberturas de bosque natural intervenido y sistemas agroforestales. Las coordenadas geográficas y sistema de cobertura evaluado en cada predio se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Información de los predios con coordenadas geográficas*

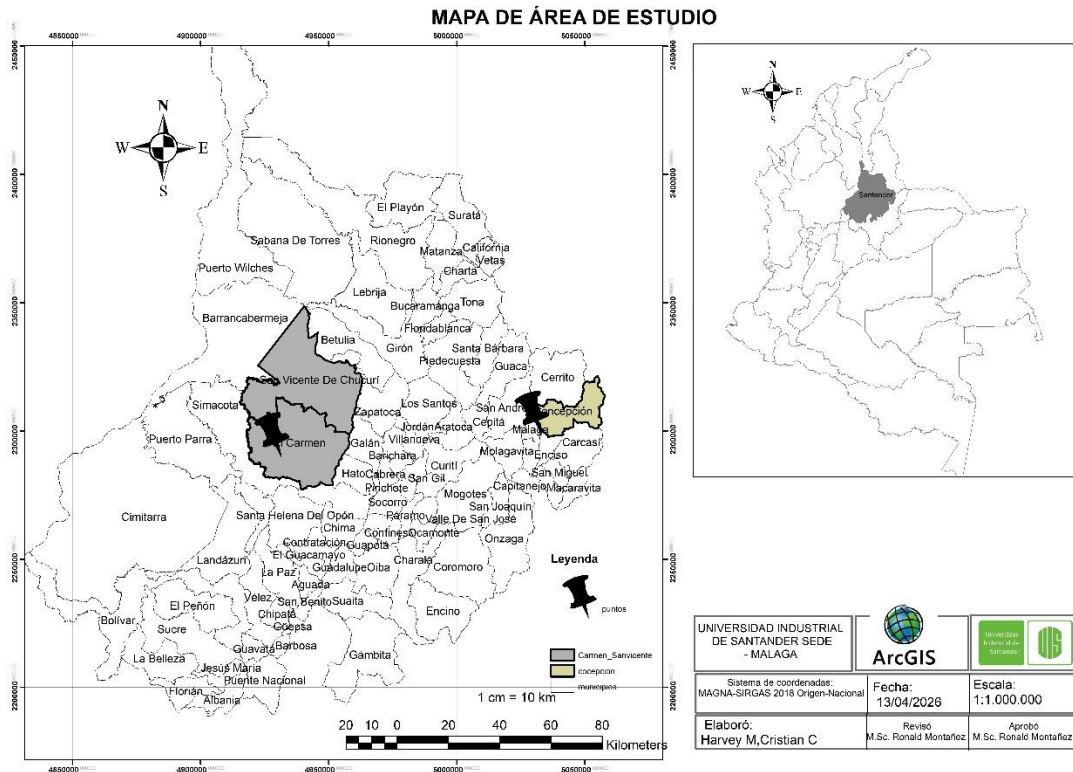
Nombre del predio	Propietario	Municipio	Vereda	Coordenadas	
				X	Y
<b>San Pablo</b>	Viviana	San Vicente	Pamplona	-73.43272873320	6.70410997690
	González	de Chucurí			
<b>Las Malbinas</b>	Gumercindo	San Vicente	Guamales	-73.46087112700	6.78511788684
	Arenas	de Chucurí			
<b>El Rubi</b>	Rodrigo	San Vicente	La	-73.46307178140	6.81355982182
	Lozada	de Chucurí	colorada		
<b>Buenos Aires</b>	Rosa	San Vicente	La	-73.47165197210	6.78679273918
	Oliveros	de Chucurí	colorada		
<b>El Triunfo</b>	Gerardo	El Carmen	Tambo	-73.47376692710	6.76005375641
	González	de Chucurí	Redondo		

*Nota.* En la tabla se muestra las coordenadas de los predios correspondientes a los propietarios de las diferentes veredas y municipios.

La distribución espacial de los tres sitios de investigación se ilustra en la Figura 2. La caracterización topográfica detallada de cada sitio —pendientes, rangos altitudinales y sistemas de cobertura— se presenta en la sección de Resultados (sección 4.6, Figuras 8 y 9).

**Figura 2**

*Área de estudio en el Carmen de Chucurí y Concepción*



*Nota.* Información adaptada del Plan de Manejo Forestal Comunitario Núcleo Santander

**3.2.Trabajo en campo**

Se estudiaron en tres sistemas de cobertura: bosque natural, sistema agroforestal y plantación forestal de protección-producción de *Pinus patula Schiede ex Schltdl. & Cham.* en la vereda Pichincha del municipio de Concepción, cuyo aprovechamiento fue autorizado mediante la

Resolución DGL No. 000814 del 19 de noviembre de 2025 de la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS).

Se seleccionaron especies arbóreas de valor comercial como tratamientos, con un mínimo de tres individuos como repeticiones por especie. Para cada individuo arbóreo aprovechado se registraron las siguientes variables dendrométricas: diámetro a la altura del pecho (DAP, en cm) distribuido en clases diamétricas según Romero et al. (2024), altura total y altura comercial (H y Hc, en m), diámetro de copa mayor y menor (en m), y georreferenciación con GPS de precisión. En total se evaluaron 41 individuos arbóreos distribuidos en seis especies: *Pinus patula* Schiede ex Schlttdl. & Cham (n = 20, plantación), *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake (n = 5, bosque natural), *Cedrela odorata* L. (n = 3, bosque natural), *Cordia gerascanthus* L. (n = 3, bosque natural), *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (n = 5, bosque natural, vereda Pamplona — San Vicente de Chucurí) y *Albizia carbonaria* Britton (n = 5, bosque natural, vereda Pamplona — San Vicente de Chucurí).

### **Colecta de muestras botánicas**

Para la identificación taxonómica de las especies arbóreas aprovechadas, se realizó la colecta de muestras botánicas siguiendo el protocolo estándar del herbario de la Universidad de Pamplona. De cada individuo se colectaron entre dos y tres ramillas fértiles o con estructuras diagnósticas (hojas, flores o frutos), con una longitud mínima de 30 cm. Las muestras fueron sometidas al siguiente proceso:

**Prensado:** cada muestra se dispuso entre láminas de papel periódico doblado, intercaladas con cartones corrugados para favorecer la absorción de humedad, y se comprimieron con una

prensa de madera sujeta con correas de ajuste. El cambio de papel se realizó cada 24 horas durante los primeros tres días para garantizar un secado uniforme sin formación de hongos.

**Etiquetado:** cada muestra recibió una etiqueta de campo con los datos de colección: número de colecta, nombre del colector, fecha, municipio, vereda, coordenadas geográficas, altitud, nombre común local y observaciones sobre el hábito y características del árbol en pie.

**Alcoholizado:** en campo, cuando las condiciones de humedad o temperatura no permitían el prensado inmediato, las muestras fueron depositadas en bolsas plásticas selladas con alcohol etílico al 70%, garantizando la preservación de los tejidos hasta el momento del prensado definitivo en laboratorio.

**Embalaje y envío:** una vez secas y prensadas, las muestras se montaron sobre cartulina de herbario de 28 × 42 cm, se cubrieron con papel glassine y se embalaron en cajas de cartón rígido para su envío al herbario de la Universidad de Pamplona, donde fueron determinadas por especialistas taxonómicos.

**Recolección de datos operativos — Estudio de tiempos y movimientos**

Los datos provenientes del aprovechamiento forestal se recolectaron utilizando cronómetros digitales y tres formatos estructurados diseñados para el presente estudio. A continuación, se ilustra el encabezado de cada formato empleado en campo:

**Tabla 2**

*Medición de variables operativas y pesaje por componentes*

ESTIMACION de VARIABLES DENDROMETRICAS para el rendimiento en aprovechamiento forestal							 Universidad Industrial de Santander
Municipio:	Veredas:	Finca:	Coordenadas	Fecha:	Fecha:		
Responsables:			Parcela:	Área:			
	Alistamiento	Apeo / Derribo	Desrame	Troceado	Movimiento de Trozas	Observaciones	

No.	Nombre Científico	Nombre Común	t (min)	v (m3)	t (min)	v (m3)	t (min)	v (m3)	t (min)	v (m3)	t (min)	v (m3)
<b>Ind</b>												

*Nota.* Estimación de variables dendrométricas para el rendimiento en aprovechamiento forestal

**Tabla 3**

*Medición de variables dendrométricas en árboles de sombrío y bosques naturales*

MEDICIÓN DE VARIABLES DENDROMÉTRICAS EN ÁRBOLES DE SOMBRIO Y BOSQUES NATURALES									
Municipio	Veredas:		Finca:	Coordenadas:		Fecha:	Altitud:		
Responsables			Parcela			Área:			
No.	Nombre Científico	Nombre Común	Dap (cm)	Altura total H (m)	Altura Comercial H (m)	Diámetro de copa mayor (m)	Diámetro de copa menor (m)	No. Ramas	Coordenadas geográficas/observaciones
<b>Ind</b>									



*Nota.* Medición de variables dendrométricas en árboles de sombrío y bosques naturales

**Tabla 4**

*Estimación de volumen según sus autores*

MUNICIPIO:		Veredas:		Finca:		Coordenadas		Fecha:	Fecha:		
RESPONSABLES:						Parcela:		Área:			
N°	N. troza	Diámetro Mayor (cm)	Diámetro 0,2 (cm)	Diámetro Medio (m)	Diámetro 0,8 (cm)	Diámetro Menor (m)	Longitud de la troza (m)	Volumen Smallian (m^3)	Volumen Huber (m^3)	Volumen Doyle (pie tablar)	Observaciones
<b>Ind</b>											



*Nota.* Estimación de volúmenes por autor

Los datos recolectados en los tres formatos registraron la duración de cada actividad (Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4), junto con las condiciones operativas relacionadas con el tipo de herramienta, maquinaria empleada y experiencia del operario. Además, se realizaron entrevistas semiestructuradas con los operarios forestales (Apéndice A) para obtener información complementaria sobre su desempeño y los factores que podrían haber afectado la productividad.

Las pendientes del terreno se midieron en campo cada 50 m a lo largo de un tramo de 400 m mediante clinómetro Suunto, registrando los valores en unidades de grados. Complementariamente, las pendientes se estimaron mediante cartografía temática en curvas de nivel a partir de planchas de Colombia en formato shapefile (.shp), procesadas en el programa ArcGIS 10.8.2. Los resultados del análisis cartográfico topográfico de los sitios de Caño Doradas (El Carmen de Chucurí) y vereda Pichincha (Concepción) se presentan en la sección de Resultados.

La proyección del sistema de transporte menor para cada sitio de estudio se realizó con base en los rangos de pendiente caracterizados y los lineamientos técnicos de la FAO (1999) y Visser & Stampfer (2015). Se consideraron los siguientes elementos mecánicos como componentes del sistema: poleas de una sola ranura con capacidad de una (1) tonelada; cable acerado con alma y torones con diámetros entre ½" y 2" pulgadas; tambor o rodillo mecánico para la recuperación del cable con diámetros entre 30 y 50 cm; pernos de ajuste diamétrico; y malacate electromecánico (Anaya & Christiansen, 1986). Con base en los gradientes de pendiente registrados, se identificaron tres sistemas de transporte diferenciados por sitio: arrastre terrestre con cable de vuelo de 1.500 m para pendientes de 0–10% (zona Yarima), cable aéreo tipo skyline de 650 m para pendientes de 10–20% (vereda Ver, Pamplonita) y cable aéreo tipo skyline con Torre Koller de 650 m para pendientes de 20–30% (vereda Pichincha, Concepción), cuyo

aprovechamiento está amparado por la Resolución DGL No. 000814 del 19 de noviembre de 2025 de la CAS.

### **3.3. Análisis de datos**

#### **3.3.1 Ecuaciones de rendimiento y eficiencia aplicadas**

El rendimiento operativo (R) de cada actividad del aprovechamiento forestal se calculó mediante la relación entre el volumen de madera procesado y el tiempo efectivo empleado, expresado en metros cúbicos por hora (m<sup>3</sup>/h):

$$R = V / T \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde V es el volumen cubicado de la troza (m<sup>3</sup>) calculado por los métodos de Smalian, Huber o Doyle según el destino de la madera, y T es el tiempo productivo efectivo de la operación en horas, excluyendo tiempos improductivos. La eficiencia operativa (E) se determinó como el porcentaje del tiempo productivo respecto al tiempo total de la jornada:

$$E (\%) = (\text{Tiempo productivo} / \text{Tiempo total}) \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

#### **3.3.2 Pruebas estadísticas aplicadas**

Los datos de rendimiento operativo se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) de un factor para evaluar diferencias significativas entre especies, sitios de investigación y sistemas de cobertura (plantación vs. bosque natural), con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ . Cuando el ANOVA indicó diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey para identificar los grupos homogéneos. Adicionalmente, se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre los tiempos de apeo y el volumen en pie (CAP), y entre los tiempos de troceado y el volumen cubicado, para cuantificar la relación entre las variables dendrométricas

y el rendimiento operativo. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software R versión 4.3.2.

### **3.3.3 Tipo de encuesta aplicada a los operarios forestales**

Se aplicó una encuesta semiestructurada (Apéndice A) a los operarios forestales participantes en las jornadas de aprovechamiento, compuesta por preguntas de selección múltiple sobre los tiempos empleados en cada actividad. Las preguntas indagaron sobre los tiempos de alistamiento, apeo/derribo, desrame, troceado y movimiento de trozas por individuo arbóreo, con las siguientes categorías de respuesta: A) 5–10 min, B) 10–20 min, C) 20–30 min, D) más de 30 min. La información obtenida complementó los registros cronométricos directos y permitió validar los datos de campo con la percepción operativa de los trabajadores.

## **4. Resultados**

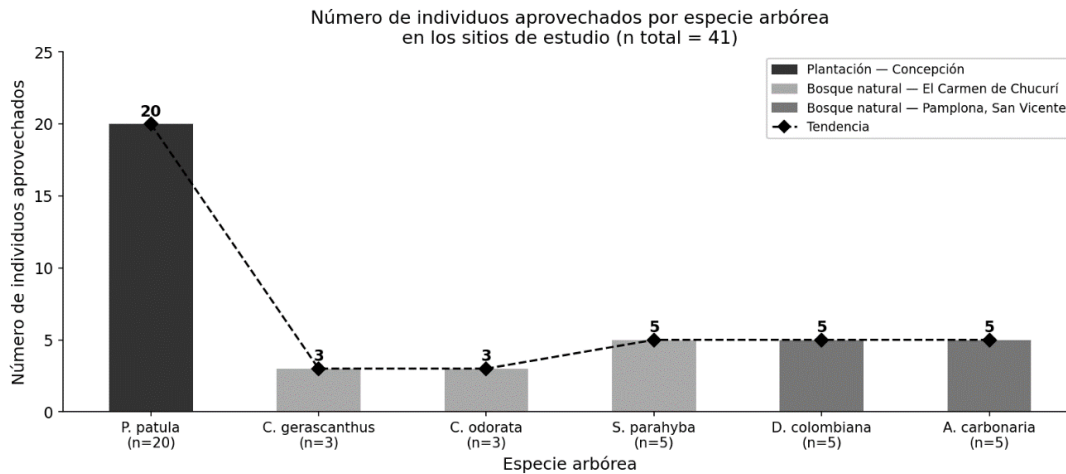
### **4.1. Características dasométricas y operativas de los individuos aprovechados**

El presente estudio evaluó el aprovechamiento forestal en dos sistemas de cobertura distribuidos en tres sitios de investigación: la plantación forestal de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en la vereda Pichincha (Concepción), bosque natural en Caño Doradas (El Carmen de Chucurí) y bosque natural en los predios de la Unidad de Manejo Forestal de ASAFCH en la vereda Pamplona (San Vicente de Chucurí). Los resultados arrojaron la medición y aprovechamiento de 41 individuos arbóreos distribuidos en seis especies: *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham (n = 20, plantación), *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake (n = 5, bosque natural), *Cedrela odorata* L. (n = 3, bosque natural), *Cordia gerascanthus* L. (n = 3, bosque natural), *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (n = 5, bosque natural, vereda Pamplona) y *Albizia*

*carbonaria* Britton (n = 5, bosque natural, vereda Pamplona). La distribución del número de individuos aprovechados por especie y sitio de estudio se presenta en la Figura 3.

**Figura 3**

*Número de individuos aprovechados por especie arbórea en los sitios de estudio.*



Como se observa en la Figura X, *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham concentró el mayor número de individuos aprovechados (n = 20), representando el 48,8% del total, lo que responde al carácter de plantación pura con alta densidad de individuos por hectárea. Las especies de bosque natural presentaron entre 3 y 5 individuos por especie, conforme al diseño de muestreo aleatorio estratificado con mínimo de tres individuos como repeticiones por tratamiento (especie).

Las estadísticas descriptivas de las principales variables dasométricas y operativas del conjunto de individuos aprovechados se presentan en la Tabla 5. El diámetro a la altura del pecho (DAP) presentó una media general de 13,26 cm con una desviación estándar de ±4,87 cm (CV = 36,75%), evidenciando la alta variabilidad entre los dos sistemas de cobertura evaluados. Los individuos de plantación presentaron DAP menores (media: 10,91 cm) respecto a las especies de bosque natural (media: 17,28 cm). El tiempo total de ciclo medio fue de 19,88 min/individuo

(±7,88 min), con un coeficiente de variación de 39,63%, reflejo de la heterogeneidad operativa entre especies y sitios.

**Tabla 5**

*Estadísticas descriptivas de las variables dasométricas y operativas*

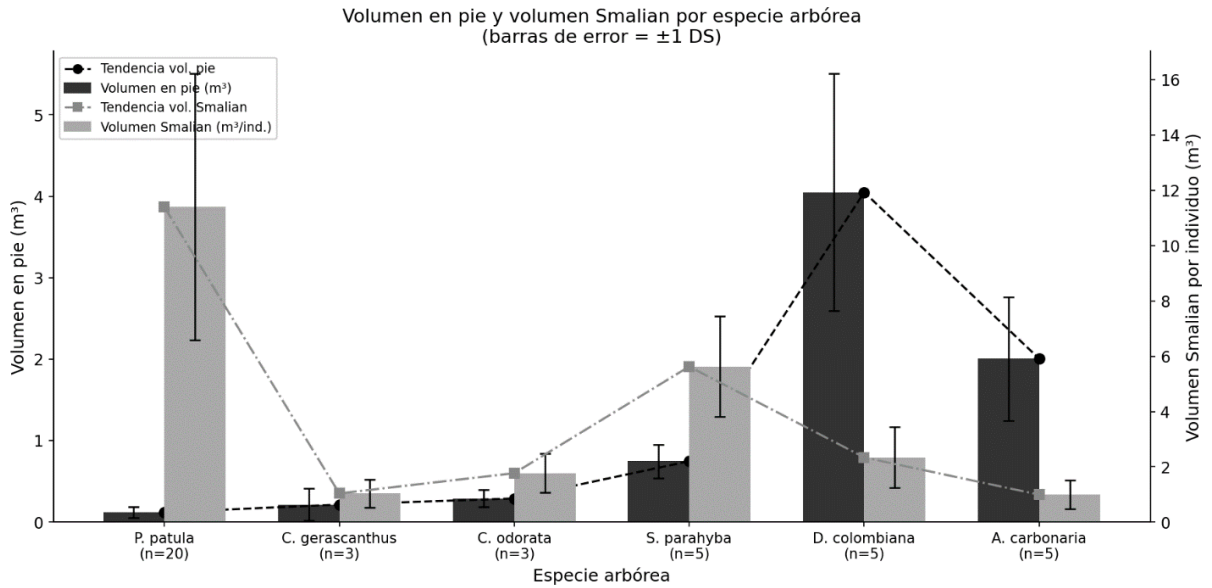
<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Cv (%)</b>
<b>DAP (cm)</b>	13,26	5,19	23,24	4,87	36,75
<b>Altura comercial (m)</b>	27,03	11,54	46,00	8,02	29,66
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	0,25	0,01	0,94	0,25	102,71
<b>Tiempo total (min)</b>	19,88	6,60	36,60	7,88	39,63

#### **4.2 Volúmenes en pie y volúmenes aprovechados por especie**

En la plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham (Concepción) se registró un volumen en pie total de 2,405 m<sup>3</sup> para los 20 individuos aprovechados, con una media de 0,120 m<sup>3</sup>/individuo (±0,067 m<sup>3</sup>). En el bosque natural (Caño Doradas y vereda Pamplona) el volumen en pie total alcanzó 30,533 m<sup>3</sup> para los 21 individuos, con una media de 1,454 m<sup>3</sup>/individuo (±1,542 m<sup>3</sup>). Esta diferencia, de 12,1 veces mayor volumen individual en bosque natural respecto a la plantación, constituye el principal factor explicativo de las diferencias en rendimiento operativo documentadas en la sección 4.4. La relación entre el volumen en pie por especie y el volumen Smalian correspondiente se presenta en la Figura 4.

**Figura 4**

*Volumen en pie y volumen comercial (Smalian) por especie arbórea aprovechada.*



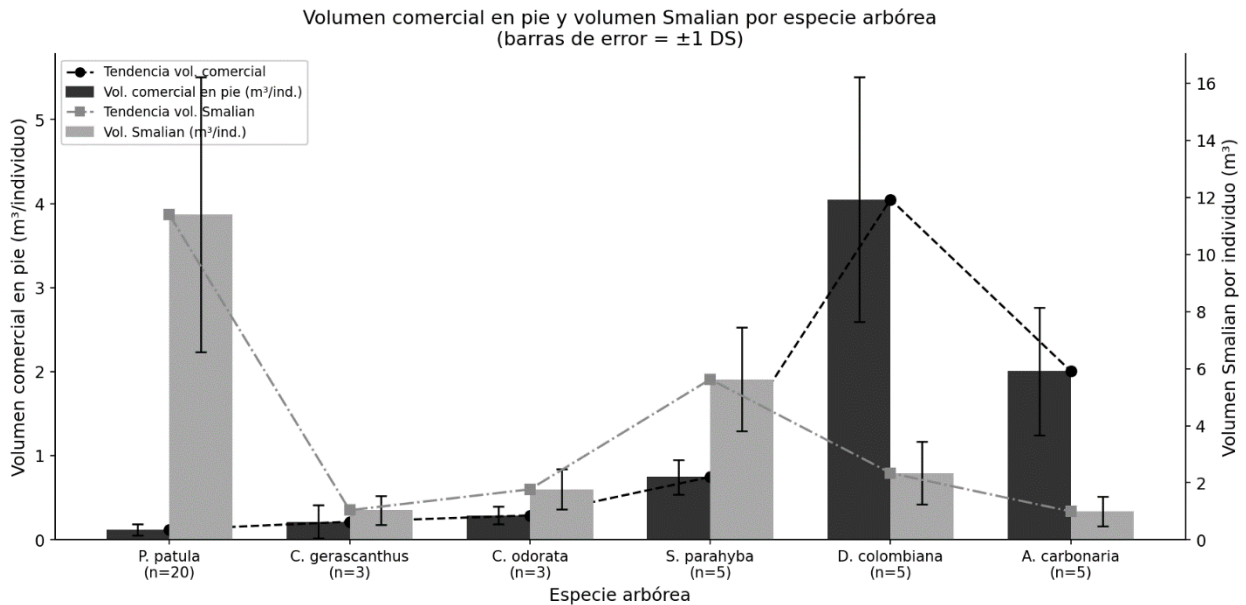
Como se observa en la Figura 4, *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. Concentró el mayor volumen en pie medio con  $4,049 \pm 1,456$  m<sup>3</sup>/árbol, seguida de *Albizia carbonaria* Britton con  $2,006 \pm 0,760$  m<sup>3</sup>/árbol y *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake con  $0,748 \pm 0,204$  m<sup>3</sup>/árbol. En el extremo inferior, *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham registró el menor volumen en pie medio ( $0,120 \pm 0,067$  m<sup>3</sup>/árbol), confirmando el menor desarrollo individual de los árboles de la plantación frente a los del bosque natural. La línea de tendencia del volumen Smalian muestra un comportamiento descendente a partir de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham hacia las especies nativas de menor DAP, con un repunte en *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. asociado a sus mayores dimensiones fustales.

### 4.3. Volúmenes comerciales en pie y apeados por especie

Los volúmenes comerciales calculados mediante el método de Smalian para el conjunto de las seis especies evaluadas se presentan en la Figura 5.

**Figura 5**

Volumen comercial en pie y volumen Smalian por especie arbórea



Como se evidencia en la Figura 5, en la plantación el volumen Smalian medio fue de 11,397 m<sup>3</sup>/individuo (±4,819 m<sup>3</sup>), correspondiente a los bloques y trozas obtenidas del aprovechamiento de *Pinus patula* Schiede ex Schldl. & Cham. En el bosque natural, *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake presentó el mayor volumen Smalian medio con 5,625 m<sup>3</sup>/individuo (±1,820 m<sup>3</sup>), seguida de *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. con 2,339 m<sup>3</sup>/individuo (±1,096 m<sup>3</sup>), *Albizia carbonaria* Britton con 0,992 m<sup>3</sup>/individuo (±0,517 m<sup>3</sup>), *Cedrela odorata* L con 1,769 m<sup>3</sup>/individuo (±0,703 m<sup>3</sup>) y *Cordia gerascanthus* L con 1,038 m<sup>3</sup>/individuo (±0,499 m<sup>3</sup>). La menor variabilidad de *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake en el volumen comercial (CV = 32,3%) frente a *Cordia gerascanthus* L (CV = 48,1%) refleja la mayor uniformidad fustal del frijolito respecto al morcoro en los predios estudiados. Para *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. y *Albizia carbonaria* Britton, el volumen Smalian fue estimado a partir del modelo de conicidad estándar (1,5 cm/m) con trozas de 3 m, dado que estas especies no contaban con registro individual de trozas en la base de datos del aprovechamiento.

El volumen total comercial (Smalian) del conjunto de individuos aprovechados fue de 283,59 m<sup>3</sup>, de los cuales 227,95 m<sup>3</sup> correspondieron a la plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham y 55,64 m<sup>3</sup> al bosque natural. Esta distribución indica que, aunque la plantación aportó menor volumen individual, el mayor número de individuos aprovechados (n = 20) compensó el déficit volumétrico por árbol, generando el mayor aporte volumétrico total al aprovechamiento.

#### 4.4 Rendimientos operativos del aprovechamiento forestal

##### 4.4.1 Rendimientos en plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham

Los rendimientos operativos en la plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham en la vereda Pichincha (Concepción) oscilaron entre 0,04 y 0,45 m<sup>3</sup>/h, con una media de 0,29 ± 0,11 m<sup>3</sup>/h (Tabla 6). Los tiempos promedio por actividad fueron: derribo 1,65 min, troceado 12,04 min y desrame 10,18 min. El troceado y el desrame constituyeron las operaciones de mayor demanda temporal, representando el 50,6% y el 42,7% del tiempo total del ciclo respectivamente, lo que evidencia que el procesamiento del fuste es la fase crítica del aprovechamiento en rodales de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham con individuos de porte pequeño a medio.

**Tabla 6**

*Rendimientos operativos en la plantación de Pinus patula Schiede ex Schltdl. & Cham — Concepción*

VARIABLE	VALOR
Rendimiento mínimo (m <sup>3</sup> /h)	0,04

Rendimiento máximo (m <sup>3</sup> /h)	0,45
Rendimiento promedio (m <sup>3</sup> /h)	0,29
Desviación estándar (m <sup>3</sup> /h)	0,11
Tiempo promedio derribo (min)	1,65
Tiempo promedio troceado (min)	12,04
Tiempo promedio desrame (min)	10,18

*Nota:* Rendimientos registrados en los 20 individuos de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham aprovechados en la vereda Pichincha, municipio de Concepción, bajo la Resolución DGL No. 000814 del 19 de noviembre de 2025 de la CAS.

#### 4.4.2 Rendimientos en especies arbóreas de bosque natural

En el bosque natural, los rendimientos operativos por especie se presentan en la Tabla 7. *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake registró los valores más altos (media:  $2,75 \pm 0,60$  m<sup>3</sup>/h), seguida de ( $1,73 \pm 0,36$  m<sup>3</sup>/h) y *Cordia gerascanthus* L ( $1,25 \pm 0,53$  m<sup>3</sup>/h) en los predios de Caño Doradas (El Carmen de Chucurí). En la vereda Pamplona (San Vicente de Chucurí), *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. Registró un rendimiento medio de  $20,806 \pm 5,823$  m<sup>3</sup>/h y *Albizia carbonaria* Britton de  $11,939 \pm 3,676$  m<sup>3</sup>/h, valores superiores a los registrados para las demás especies nativas, explicados por el mayor volumen individual de sus fustes y la menor resistencia al corte de sus maderas respecto a *S. parahyba*, *Cedrela odorata* L y *Cordia gerascanthus* L. Los tiempos promedios en bosque natural fueron: derribo 2,74 min y troceado 9,87 min, con el troceado representando el 78,3% del tiempo total del ciclo, mayor proporción que en plantación, asociada a

la heterogeneidad estructural del rodal y la complejidad del dimensionamiento comercial de trozas en el aprovechamiento selectivo

**Tabla 7**

*Rendimientos operativos en especies arbóreas de bosque natural*

<b>Especie</b>	<b>n</b>	<b>Rendimiento mínimo (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Rendimiento máximo (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Media (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>DS (m<sup>3</sup>/h)</b>
<i>Schizolobium parahyba</i>	5	1,79	3,52	2,75	0,60
<i>Cedrela odorata</i> .	3	1,23	2,09	1,73	0,36
<i>Cordia gerascanthus</i>	3	0,75	1,99	1,25	0,53
<i>Dacryodes colombiana</i>	5	10,981	26,289	20,806	5,823
<i>Albizia carbonaria</i>	5	6,273	15,955	11,939	3,676

*Nota.* Rendimientos registrados en los 21 individuos de bosque natural aprovechados en Caño Doradas (El Carmen de Chucurí) y vereda Pamplona (San Vicente de Chucurí), predios UMF-ASAFCH, bajo la Resolución DGL No. 0000384 del 22 de junio de 2022 de la CAS.

#### 4.4.3 Comparación de rendimientos entre sistemas

La comparación de los rendimientos operativos promedio entre los tres sitios de estudio se presenta en la Tabla 8 y se ilustra en la Figura 6.

**Tabla 8**

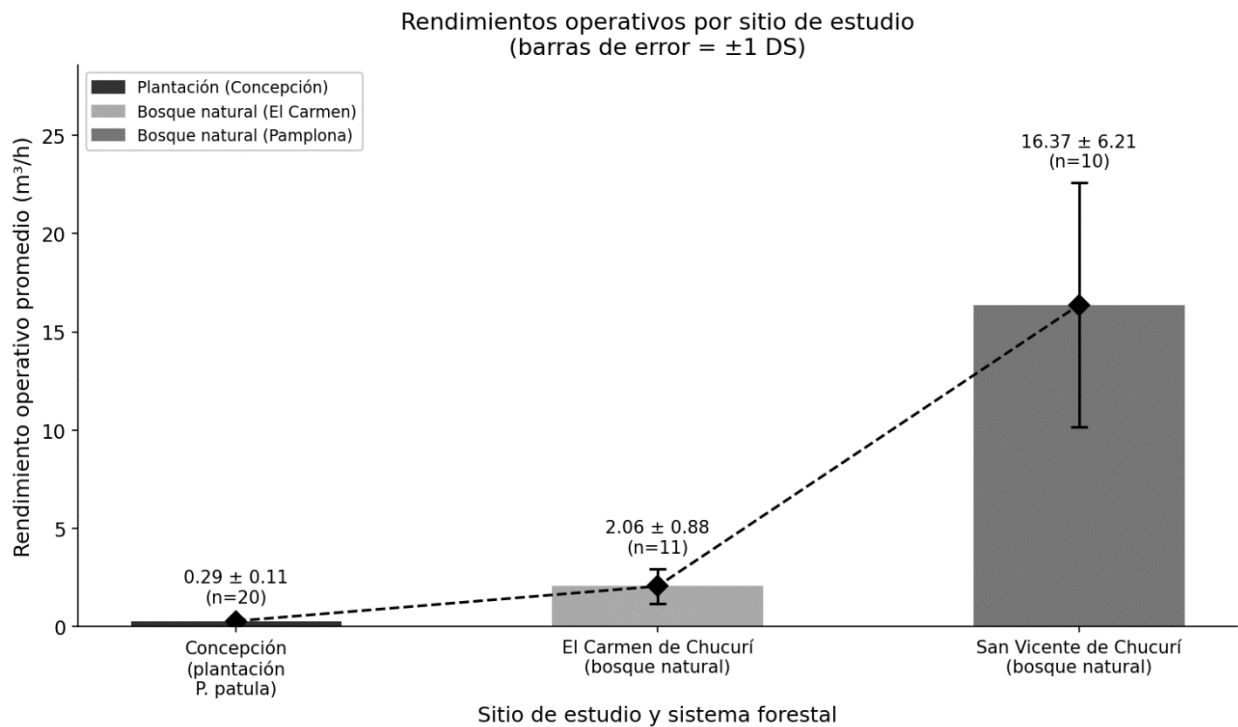
*Comparación de rendimientos operativos entre plantación y bosque natural*

<b>Sistema forestal</b>	<b>n</b>	<b>Rango (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Media (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>DS (m<sup>3</sup>/h)</b>
<b>Plantación <i>pinus patula</i> — concepción</b>	20	0,04 – 0,45	0,29	0,11
<b>Bosque natural — el carmen / san vicente</b>	21	0,75 – 26,289	9,34	7,12

Nota. La alta desviación estándar del bosque natural refleja la heterogeneidad de rendimientos entre las seis especies evaluadas, que oscilan entre 1,25 m<sup>3</sup>/h (*Cordia gerascanthus* L.) y 20,806 m<sup>3</sup>/h (*Dacryodes colombiana* M.C. Johnst.).

**Figura 6**

*Rendimientos operativos promedio por sitio de estudio*

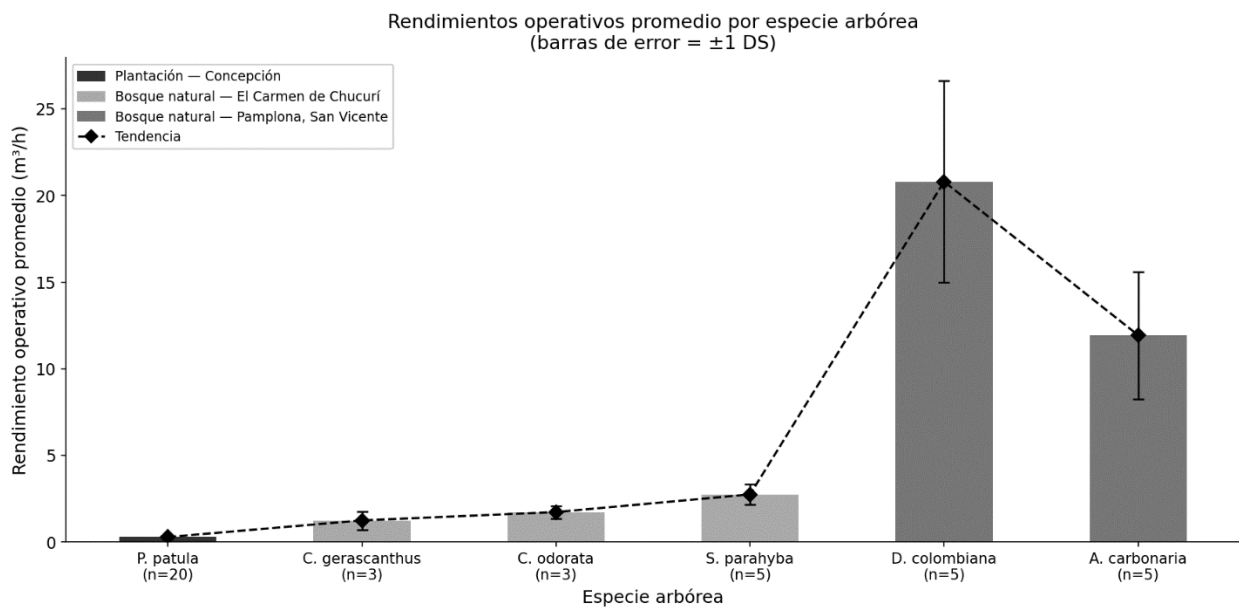


Como se observa en la Figura 6, la plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham en Concepción ( $0,29 \pm 0,11$  m<sup>3</sup>/h, n = 20) presentó rendimientos significativamente menores que el bosque natural en El Carmen de Chucurí ( $2,06 \pm 0,88$  m<sup>3</sup>/h, n = 11) y en la vereda Pamplona, San Vicente de Chucurí ( $16,37 \pm 6,21$  m<sup>3</sup>/h, n = 10). La línea de tendencia discontinua entre los tres sitios evidencia el incremento progresivo del rendimiento a medida que aumenta el volumen

individual de los árboles aprovechados, desde la plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham con individuos de porte pequeño (DAP medio: 10,91 cm) hasta los individuos de *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. y *Albizia carbonaria* Britton en Pamplona (DAP medio: 50,41 y 37,11 cm respectivamente). Los rendimientos por especie arbórea se presentan de manera comparativa en la Figura 7.

**Figura 7**

*Rendimientos operativos promedio por especie arbórea*



La Figura 7 confirma que la relación entre el DAP y el rendimiento operativo es positiva para el conjunto de las seis especies: *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (DAP medio: 50,41 cm) alcanzó el mayor rendimiento ( $20,806 \pm 5,823$  m³/h), mientras que *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham (DAP medio: 10,91 cm) registró el menor ( $0,29 \pm 0,11$  m³/h), con una diferencia de 71,7 veces entre los extremos. La línea de tendencia discontinua en la Figura 7 muestra un

patrón ascendente desde *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham hasta *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. Conforme aumenta el porte de las especies, con descenso hacia *Albizia carbonaria* Britton asociado a su menor DAP medio respecto a *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst.

#### 4.5 Análisis estadístico de los rendimientos operativos

Los rendimientos operativos individuales calculados para el conjunto de 41 individuos aprovechados en los tres sitios de estudio se presentan en la Tabla 9. La Tabla 10 resume las estadísticas descriptivas por especie.

**Tabla 9**

*Rendimientos operativos individuales por especie*

N	Especie	DAP (cm)	H (m)	Vol. En pie (m <sup>3</sup> )	T. Total (min)	Rendimiento (m <sup>3</sup> /h)
1–20	<i>Pinus patula</i>	5,12–15,90	11,5–25,7	0,0012–0,0255	15,88–36,60	0,0043–0,0438
1	<i>Cordia gerascanthus</i>	63,00	28,0	4,3641	13,35	19,6141
2	<i>Cordia gerascanthus</i>	36,00	18,0	0,9161	7,39	7,4378
3	<i>Cordia gerascanthus</i>	35,00	23,0	1,1064	6,60	10,0585
4	<i>S. parahyba</i>	63,00	37,0	5,5362	14,05	23,6423
5	<i>S. parahyba</i>	73,00	45,0	9,0404	15,60	34,7709
6	<i>S. parahyba</i>	72,60	41,0	8,1468	16,70	29,2700
7	<i>S. parahyba</i>	57,90	39,0	4,9289	16,70	17,7087
8	<i>S. parahyba</i>	73,00	46,0	9,2413	18,40	30,1348
9	<i>C. odorata</i>	48,50	37,0	3,7596	12,30	18,3393
10	<i>C. odorata</i>	46,80	33,0	3,1222	9,08	20,6312
11	<i>C. odorata</i>	36,50	30,0	1,7265	8,54	12,1298
12	<i>A. carbonaria</i>	46,65	16,8	2,0100	9,40	12,8299
13	<i>A. carbonaria</i>	46,20	24,7	2,8985	10,90	15,9549
14	<i>A. carbonaria</i>	31,00	34,0	1,7963	10,00	10,7781
15	<i>A. carbonaria</i>	37,90	31,0	2,4481	10,60	13,8571
16	<i>A. carbonaria</i>	23,80	28,2	0,8782	8,40	6,2728
17	<i>D. colombiana</i>	56,90	32,0	5,6959	13,00	26,2888

<b>18</b>	<i>D. colombiana</i>	53,47	27,0	4,2440	11,50	22,1424
<b>19</b>	<i>D. colombiana</i>	55,00	28,0	4,6566	11,90	23,4788
<b>20</b>	<i>D. colombiana</i>	50,40	28,0	3,9103	11,10	21,1366
<b>21</b>	<i>D. colombiana</i>	36,30	24,0	1,7387	9,50	10,9810

*Nota.* Los volúmenes de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham corresponden al volumen Smalian de trozas aprovechadas (m<sup>3</sup>/árbol). Los volúmenes de las especies nativas corresponden al volumen en pie calculado con factor de forma de 0,70.

**Tabla 10**

*Estadísticas descriptivas de los rendimientos operativos por especie*

<b>Especie</b>	<b>n</b>	<b>DAP medio (cm) ± DE</b>	<b>Vol. medio (m<sup>3</sup>) ± DE</b>	<b>T. ciclo medio (min) ± DE</b>	<b>Rend. medio (m<sup>3</sup>/h) ± DE</b>	<b>Rend. mín. (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Rend. máx. (m<sup>3</sup>/h)</b>
<i>Pinus patula</i>	20	10,77 ± 2,94	0,0117 ± 0,0065	23,87 ± 6,45	0,0280 ± 0,0109	0,0043	0,0438
<i>Cordia gerascanthus</i>	3	44,67 ± 15,89	2,1289 ± 1,9381	9,11 ± 3,69	12,3701 ± 6,4089	7,4378	19,6141
<i>Cedrela odorata</i>	3	43,93 ± 6,49	2,8694 ± 1,0399	9,97 ± 2,03	17,0334 ± 4,3986	12,1298	20,6312
<i>Schizolobium parahyba</i>	5	67,90 ± 7,04	7,3788 ± 2,0135	16,29 ± 1,60	27,1053 ± 6,5748	17,7087	34,7709
<i>Dacryodes colombiana</i>	5	50,41 ± 8,24	4,0491 ± 1,4557	11,40 ± 1,28	20,8055 ± 5,8230	10,9810	26,2888
<i>Albizia carbonaria</i>	5	37,11 ± 9,86	2,0062 ± 0,7596	9,86 ± 1,00	11,9386 ± 3,6761	6,2728	15,9549

*Nota.* DE = desviación estándar. Los rendimientos de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham son considerablemente menores a los de las especies nativas, diferencia explicada por el menor volumen individual de los individuos de la plantación (media: 0,0117 m<sup>3</sup>/árbol) frente al de las especies nativas (media: 3,4054 m<sup>3</sup>/árbol).

Como se observa en la Tabla 10, *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake registró el mayor rendimiento operativo medio ( $27,1053 \pm 6,5748 \text{ m}^3/\text{h}$ ), seguida de *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. ( $20,8055 \pm 5,8230 \text{ m}^3/\text{h}$ ), *Cedrela odorata* L ( $17,0334 \pm 4,3986 \text{ m}^3/\text{h}$ ), *Cordia gerascanthus* L ( $12,3701 \pm 6,4089 \text{ m}^3/\text{h}$ ) y *Albizia carbonaria* Britton ( $11,9386 \pm 3,6761 \text{ m}^3/\text{h}$ ). *Pinus patula* Schiede ex Schldl. & Cham presentó el menor rendimiento medio ( $0,0280 \pm 0,0109 \text{ m}^3/\text{h}$ ), equivalente al 0,10% del rendimiento de *S. parahyba*, diferencia atribuible exclusivamente al menor volumen individual de los árboles de la plantación respecto a las especies nativas de bosque natural.

#### 4.5.1 ANOVA de un factor

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los rendimientos operativos entre las seis especies evaluadas arrojó diferencias altamente significativas ( $F = 60,93$ ;  $gl = 5, 35$ ;  $p < 0,001$ ), confirmando que al menos una especie difiere estadísticamente de las demás en su rendimiento operativo. Las comparaciones múltiples post hoc de Tukey se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Comparaciones múltiples post hoc de Tukey entre pares de especies*

Comparación	Diferencia de medias ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	SE	q	p	Sig.
<i>Pinus patula</i> vs <i>Cordia gerascanthus</i>	-12,3421	1,6271	7,5854	< 0,001	***
<i>Pinus patula</i> vs <i>Cedrela odorata</i>	-17,0054	1,6271	10,4514	< 0,001	***
<i>Pinus patula</i> vs <i>Schizolobium parahyba</i>	-27,0773	1,3140	20,6069	< 0,001	***
<i>Pinus patula</i> vs <i>Dacryodes colombiana</i>	-20,7775	1,3140	15,8125	< 0,001	***
<i>Pinus patula</i> vs <i>Albizia carbonaria</i>	-11,9106	1,3140	9,0644	< 0,001	***

<i>Cordia gerascanthus</i> vs <i>Cedrela odorata</i>	-4,6633	2,1457	2,1733	0,644	ns
<i>Cordia gerascanthus</i> vs <i>Schizolobium parahyba</i>	-14,7352	1,9192	7,6777	< 0,001	***
<i>Cordia gerascanthus</i> vs <i>Dacryodes colombiana</i>	-8,4354	1,9192	4,3952	0,040	*
<i>Cordia gerascanthus</i> vs <i>Albizia carbonaria</i>	0,4316	1,9192	0,2249	0,999	ns
<i>Cedrela odorata</i> vs <i>Schizolobium parahyba</i>	-10,0719	1,9192	5,2479	0,009	**
<i>Cedrela odorata</i> vs <i>Dacryodes colombiana</i>	-3,7721	1,9192	1,9654	0,733	ns
<i>Cedrela odorata</i> vs <i>Albizia carbonaria</i>	5,0949	1,9192	2,6547	0,432	ns
<i>Schizolobium parahyba</i> vs <i>D. colombiana</i>	6,2998	1,6621	3,7903	0,105	ns
<i>Schizolobium parahyba</i> vs <i>Albizia carbonaria</i>	15,1668	1,6621	9,1251	< 0,001	***
<i>Dacryodes colombiana</i> vs <i>Albizia carbonaria</i>	8,8669	1,6621	5,3348	0,007	**

Nota. Los resultados de la Tabla 11 permiten identificar los siguientes grupos de homogeneidad entre especies:

**Grupo A (mayor rendimiento):** *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake (27,11 m<sup>3</sup>/h), que difirió significativamente de todas las especies excepto de *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (p = 0,105).

**Grupo AB:** *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (20,81 m<sup>3</sup>/h) y *Cedrela odorata* L (17,03 m<sup>3</sup>/h), que no presentaron diferencias significativas entre sí (p = 0,733) ni con *Cordia gerascanthus* L (p = 0,040 para *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. vs *Cordia gerascanthus* L — límite de significancia).

**Grupo B:** *Cordia gerascanthus* L (12,37 m<sup>3</sup>/h) y *Albizia carbonaria* Britton (11,94 m<sup>3</sup>/h), estadísticamente equivalentes entre sí (p = 0,999), indicando que bajo las condiciones evaluadas ambas especies imponen demandas operativas similares al aprovechamiento manual.

**Grupo C (menor rendimiento):** *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham (0,028 m<sup>3</sup>/h), que difirió altamente significativamente de todas las demás especies ( $p < 0,001$  en todos los pares), confirmando que el bajo volumen individual de la plantación la separa operativamente de cualquier especie de bosque natural evaluada.

**Correlación de Pearson**

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre el DAP y el rendimiento operativo, entre el volumen en pie y el rendimiento operativo, y entre el DAP y el volumen en pie, para el conjunto de los 41 individuos aprovechados en los tres sitios de estudio. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

**Tabla 12**

*Coeficiente de correlación de Pearson entre variables dasométricas y rendimiento operativo*

<b>Relación</b>	<b>r de Pearson</b>	<b>p</b>
<b>DAP (cm) vs rendimiento (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>0,9778</b>	< 0,001
<b>Volumen en pie (m<sup>3</sup>) vs rendimiento (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>0,9648</b>	< 0,001
<b>DAP (cm) vs volumen en pie (m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,9453</b>	< 0,001

*Nota.* Todas las correlaciones son positivas, fuertes y altamente significativas ( $p < 0,001$ ).

Las tres correlaciones fueron positivas, fuertes y altamente significativas ( $p < 0,001$ ). La correlación más alta se registró entre el DAP y el rendimiento operativo ( $r = 0,9778$ ), superando incluso la correlación entre el volumen en pie y el rendimiento ( $r = 0,9648$ ), lo que indica que el DAP es la variable dasométrica con mayor poder predictivo sobre la productividad del aprovechamiento manual con motosierra en los sistemas evaluados y puede emplearse directamente como criterio de selección de individuos en la planificación operativa del aprovechamiento. La correlación entre DAP y volumen en pie ( $r = 0,9453$ ) confirma la relación

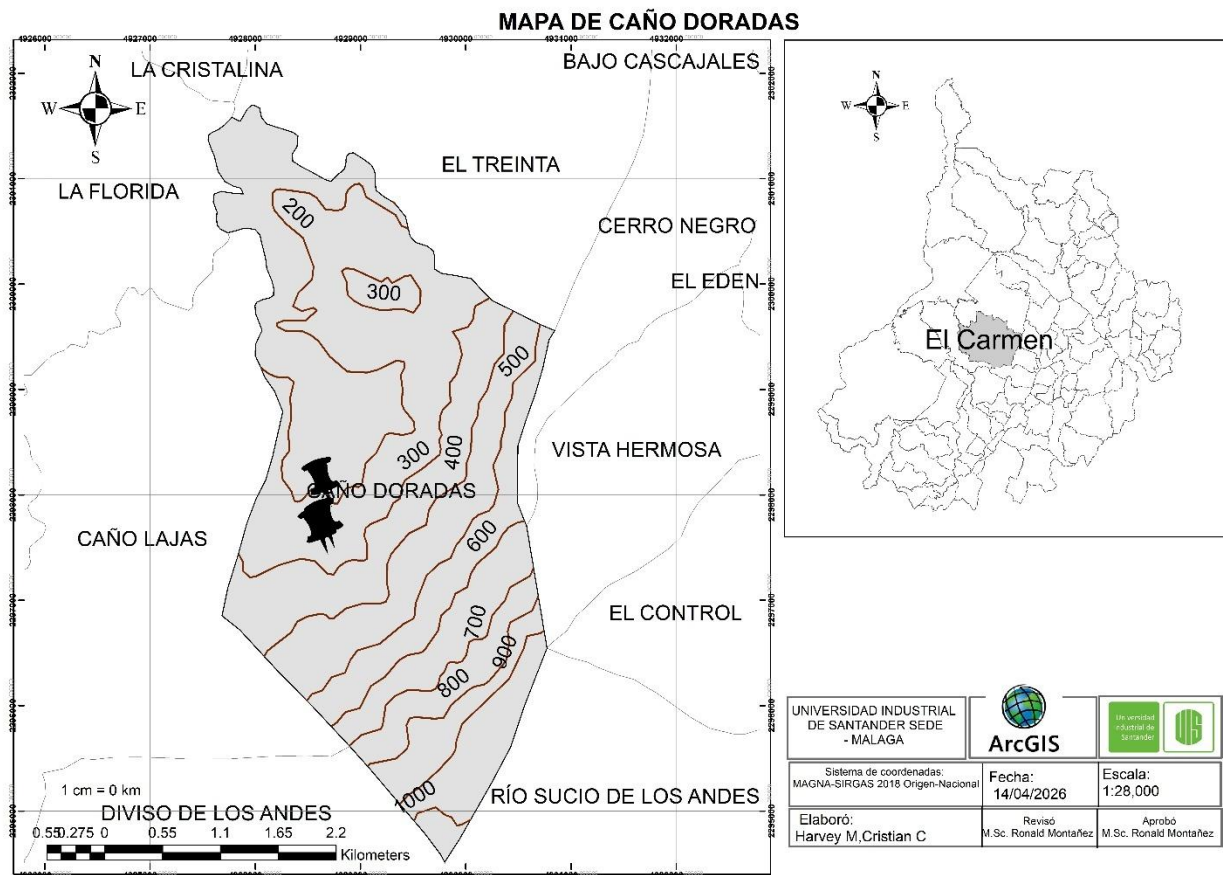
alométrica esperada entre ambas variables y respalda el uso del DAP como variable proxy del volumen cuando no se dispone de mediciones directas de altura comercial.

#### **4.6 Propuesta del sistema de transporte menor según pendientes por sitio**

El análisis cartográfico realizado en ArcGIS 10.8.2 sobre las planchas topográficas en formato shapefile permitió determinar los gradientes de pendiente para cada predio de estudio, tomando mediciones cada 50 m en tramos de 400 m. La distribución topográfica del área de Caño Doradas (El Carmen de Chucurí) se ilustra en la Figura 8, y la del área de la vereda Pichincha (Concepción) en la Figura 9. Los resultados completos del análisis topográfico por predio se presentan en la Tabla 13.

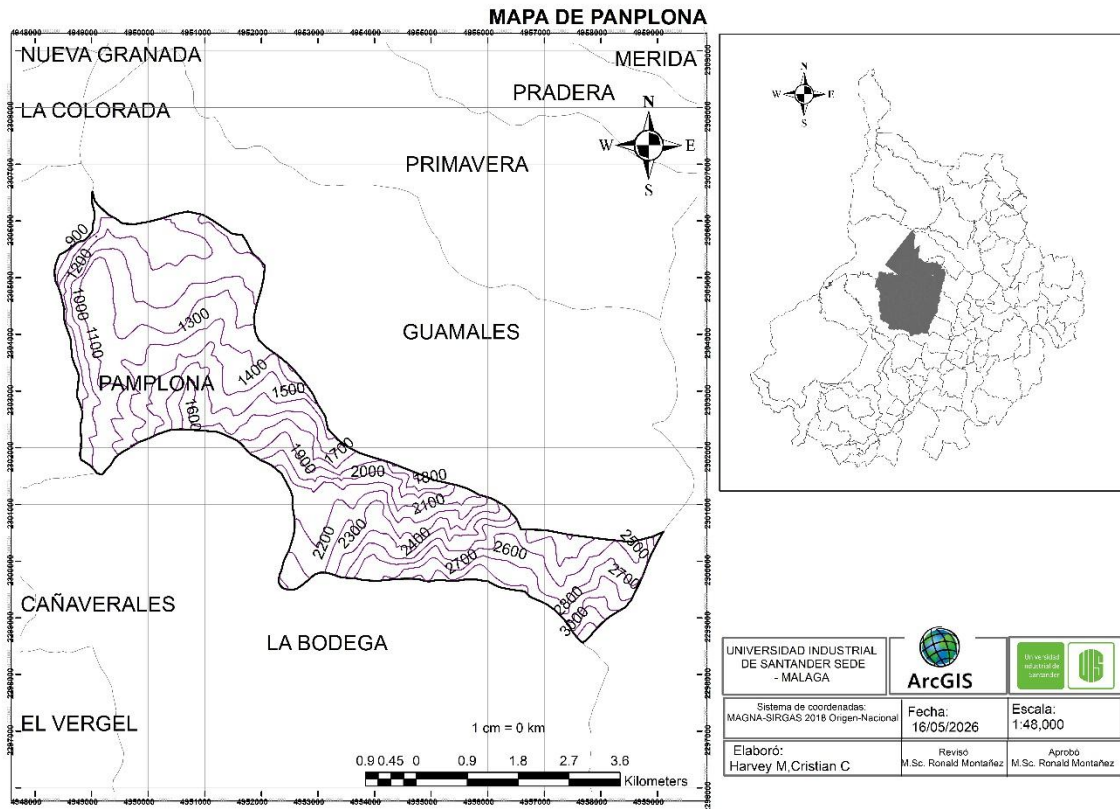
#### **Figura 8**

*Análisis cartográfico del área Caño Doradas, El Carmen de Chucurí.*



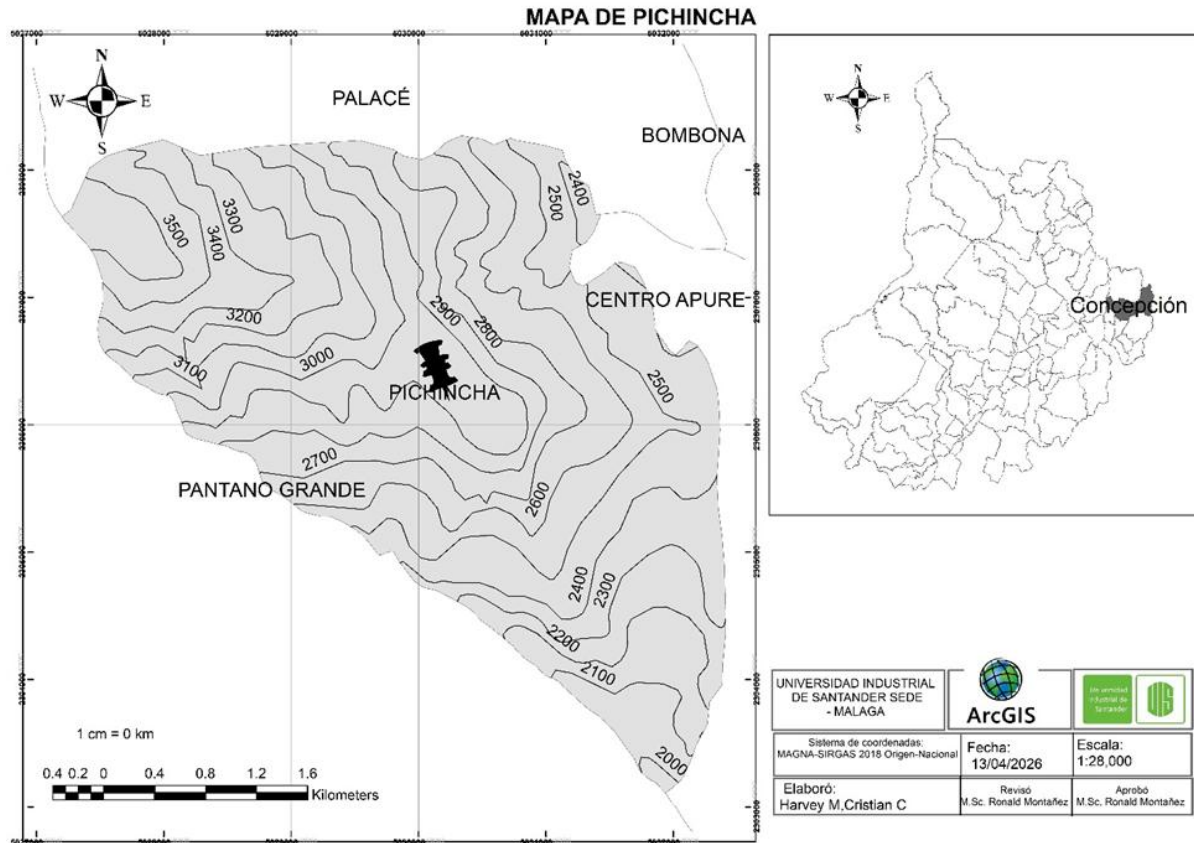
**Figura 9**

*Análisis cartográfico del área Pamplona san Vicente de chucuri.*



**Figura10**

*Análisis cartográfico del área Pichincha — Concepción.*



Como se observa en la Figura 8, el área de Caño Doradas presenta un rango altitudinal entre 200 y 1.000 m s.n.m. con pendientes moderadas a fuertes hacia el sector suroriental, donde se aprovecharon los tres individuos de *Cordia gerascanthus L* y los cinco de *S. parahyba*, cuyo rendimiento operativo medio fue de 12,37 y 27,11 m<sup>3</sup>/h respectivamente. La Figura 10 evidencia para la vereda Pichincha un rango altitudinal entre 2.000 y 3.600 m s.n.m., con pendientes marcadas en los sectores centrales y occidentales del área, condiciones altoandinas que inciden directamente sobre la selección del sistema de extracción e impactaron en los tiempos de ciclo registrados para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham (media: 23,87 ± 6,45 min/árbol).

**Tabla 13**

*Caracterización topográfica de los predios de estudio y sistema de transporte menor recomendado*

<b>Predio</b>	<b>Municipio</b>	<b>Vereda</b>	<b>Altitud (m s.n.m.)</b>	<b>Pendiente predominante (%)</b>	<b>Sistema recomendado</b>
<b>Las Sardinas (Caño Doradas)</b>	El Carmen de Chucurí	Caño Cristales	247	15–35	Arrastre terrestre (skidder / cabrestante)
<b>Villa Mira</b>	San Vicente de Chucurí	Pamplona	800– 1.200	30–50	Cabrestante mecánico / winche
<b>Albania</b>	San Vicente de Chucurí	Pamplona	800– 1.200	30–50	Cabrestante mecánico / winche
<b>San Roque</b>	San Vicente de Chucurí	Pamplona	800– 1.200	35–55	Cable aéreo tipo skyline
<b>San Pablo</b>	San Vicente de Chucurí	Pamplona	800– 1.200	35–55	Cable aéreo tipo skyline
<b>Las Malvinas</b>	San Vicente de Chucurí	Guamales	900– 1.400	40–60	Cable aéreo tipo skyline
<b>El Rubí</b>	San Vicente de Chucurí	La Colorada	900– 1.400	40–60	Cable aéreo tipo skyline
<b>Buenos Aires</b>	San Vicente de Chucurí	La Colorada	900– 1.400	35–55	Cable aéreo tipo skyline
<b>El Triunfo</b>	El Carmen de Chucurí	Tambo Redondo	800– 1.200	30–50	Cabrestante mecánico / winche
<b>Pichincha (plantación)</b>	Concepción	Pichincha / Suzagueta	2.941	50–80	Cable aéreo tipo skyline / Torre Koller

Las pendientes se estimaron mediante cartografía temática en curvas de nivel procesada en ArcGIS 10.8.2. Los sistemas de transporte se asignaron según los rangos técnicos establecidos por la FAO (1999) y Visser & Stampfer (2015). Los predios Villa Mira, Albania, San Roque, San Pablo, Las Malvinas, El Rubí y Buenos Aires corresponden a los predios de la UMF-ASAFCH en la vereda Pamplona (San Vicente de Chucurí), donde se aprovecharon los individuos de *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (rendimiento medio:  $20,8055 \pm 5,8230$  m<sup>3</sup>/h) y *Albizia carbonaria* Britton (rendimiento medio:  $11,9386 \pm 3,6761$  m<sup>3</sup>/h).

Con base en la Tabla 13 y las Figuras 8 y 9, la fuerte correlación entre el DAP y el rendimiento operativo ( $r = 0,9778$ ;  $p < 0,001$ ) —establecida en el análisis estadístico de la sección 4.5— cobra relevancia directa en la planificación del transporte menor, dado que a mayor DAP corresponde mayor volumen por árbol y por tanto mayor masa unitaria de troza a transportar por ciclo de extracción. Esta relación implica que los sistemas de extracción deben dimensionarse no solo en función de la pendiente sino también del volumen unitario de las trozas a movilizar, el cual varía entre  $0,0012 \text{ m}^3$  (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham individuos menores) y  $9,2413 \text{ m}^3$  (*S. parahyba*, individuos mayores). Con base en los criterios —pendiente topográfica y volumen unitario de troza— se proponen tres sistemas de transporte menor diferenciados:

**Sistema 1 — Arrastre terrestre (pendientes 0–35%):** Aplicable al predio Las Sardinas (Caño Doradas, El Carmen de Chucurí), con altitud de 247 m s.n.m. y pendientes predominantes entre 15% y 35%. En este sitio se aprovecharon tres individuos de *Cordia gerascanthus* L (DAP medio: 44,67 cm; volumen medio:  $2,1289 \text{ m}^3/\text{árbol}$ ; rendimiento medio:  $12,3701 \text{ m}^3/\text{h}$ ) y cinco individuos de *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake (DAP medio: 67,90 cm; volumen medio:  $7,3788 \text{ m}^3/\text{árbol}$ ; rendimiento medio:  $27,1053 \text{ m}^3/\text{h}$ ), constituyendo las especies de mayor volumen individual aprovechado en el sitio.

Se recomienda el uso de skidder de ruedas o tractor agrícola adaptado con cabrestante forestal sobre vías de saca planificadas. Dado que *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake produjo trozas con volúmenes individuales de hasta  $9,2413 \text{ m}^3/\text{árbol}$  —equivalentes a densidades de carga superiores a 7,5 t/troza considerando una densidad básica de  $0,81 \text{ g/cm}^3$  para la especie— el equipo de extracción debe contar con capacidad de tracción mínima de 8 toneladas para garantizar la movilización segura de trozas completas sin fraccionamiento adicional en campo.

Este sistema permite alcanzar rendimientos de arrastre de hasta 19,83 m<sup>3</sup>/h en condiciones favorables (Nájera-Luna et al., 2011), siendo el más eficiente en términos de productividad y costo por m<sup>3</sup> transportado para el rango de pendientes registrado.

**Sistema 2 — Cabrestante mecánico o winche estacionario (pendientes 30–55%):**

Recomendado para los predios El Triunfo (El Carmen de Chucurí), Villa Mira, Albania y Buenos Aires (San Vicente de Chucurí), con rangos altitudinales entre 800 y 1.200 m s.n.m. y pendientes predominantes entre 30% y 55%. En los predios de San Vicente de Chucurí (vereda Pamplona) se aprovecharon los cinco individuos de *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (DAP medio: 50,41 cm; volumen medio: 4,0491 m<sup>3</sup>/árbol; rendimiento operativo medio: 20,8055 m<sup>3</sup>/h) y los cinco individuos de *Albizia carbonaria* Britton (DAP medio: 37,11 cm; volumen medio: 2,0062 m<sup>3</sup>/árbol; rendimiento operativo medio: 11,9386 m<sup>3</sup>/h).

El análisis de Tukey confirmó que *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. y *Albizia carbonaria* Britton no presentaron diferencias significativas con *Cordia gerascanthus* L en sus rendimientos operativos ( $p = 0,040$  y  $p = 0,999$  respectivamente), lo que indica que las tres especies imponen demandas operativas equivalentes en campo. Sin embargo, el mayor volumen individual de *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (hasta 5,6959 m<sup>3</sup>/árbol) genera trozas de mayor masa que las de *Albizia carbonaria* Britton (máximo 2,8985 m<sup>3</sup>/árbol), implicando diferente capacidad de carga requerida al cabrestante por ciclo de extracción.

El cabrestante mecánico se ancla a un árbol porta o tocón robusto en la parte superior de la ladera y permite halar las trozas hacia la vía de saca sin riesgo de volcamiento del equipo, con impacto moderado sobre el suelo forestal y la regeneración natural. Para las pendientes de 35–55%

registradas en San Roque, San Pablo, Las Malvinas, El Rubí y Buenos Aires, se recomienda complementar el winche con un sistema de guía lateral que evite el desplazamiento lateral de las trozas sobre el suelo durante el arrastre.

**Sistema 3 — Cable aéreo tipo skyline o Torre Koller (pendientes > 50%):** Indicado para los predios San Roque, San Pablo, Las Malvinas, El Rubí y Buenos Aires (San Vicente de Chucurí) en sus franjas de mayor pendiente (40–60%), y especialmente para la plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham en la vereda Pichincha (Concepción), donde las pendientes predominantes oscilan entre 50% y 80% y el rango altitudinal alcanza los 2.941 m s.n.m.

En la plantación de Concepción, los 20 individuos de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham aprovechados presentaron un volumen Smalian medio por árbol de  $0,0117 \pm 0,0065 \text{ m}^3$  y un rendimiento operativo medio de  $0,0280 \pm 0,0109 \text{ m}^3/\text{h}$  —el más bajo del conjunto de especies evaluadas ( $F = 60,93$ ;  $p < 0,001$ )—. Aunque el bajo volumen individual de las trozas reduce el requerimiento de capacidad de carga del sistema de extracción por ciclo, las pendientes extremas del terreno (50–80%) impiden técnicamente el uso de equipos terrestres sin riesgo de volcamiento o deslizamiento, haciendo del cable aéreo la única alternativa viable. El sistema suspende las trozas parcial o totalmente del suelo durante el transporte, eliminando la compactación del perfil edáfico y el daño a la regeneración natural de la plantación, cuyo aprovechamiento se enmarca en la Resolución DGL No. 000814 del 19 de noviembre de 2025 de la CAS.

La longitud de tendido del cable se estima en 650 m, suficiente para cubrir la distancia entre las zonas de corta en la parte alta de la ladera y el patio de acopio ubicado sobre la vía de acceso en la parte baja de la vereda Pichincha. Para la Torre Koller, el dimensionamiento del motor

y el cable portante debe considerar las cargas combinadas de tensión por pendiente y peso de las trozas, con un factor de seguridad mínimo de 3:1 sobre la carga máxima de trabajo.

## 5 Discusión

Los rendimientos operativos registrados confirman diferencias altamente significativas entre la plantación de *Pinus patula Schiede ex Schltdl. & Cham.* y el bosque natural ( $F = 60,93$ ;  $gl = 5, 35$ ;  $p < 0,001$ ). En la plantación de *Pinus patula Schiede ex Schltdl. & Cham* (Concepción) los rendimientos oscilaron entre 0,0043 y 0,0438 m<sup>3</sup>/h, con una media de  $0,0280 \pm 0,0109$  m<sup>3</sup>/h, mientras que en el bosque natural los valores variaron entre 6,2728 m<sup>3</sup>/h (*Albizia carbonaria* Britton, individuo de menor DAP) y 34,7709 m<sup>3</sup>/h (*S. parahyba*, individuo de mayor DAP), con medias por especie entre 11,94 y 27,11 m<sup>3</sup>/h. Esta diferencia, de hasta 970 veces mayor productividad en las especies nativas frente a la plantación, se explica directamente por el mayor volumen individual de los árboles nativos aprovechados: la media del volumen en pie en bosque natural (media general: 3,41 m<sup>3</sup>/árbol) fue 291 veces superior a la registrada en *Pinus patula Schiede ex Schltdl. & Cham* (0,0117 m<sup>3</sup>/árbol), lo que reduce proporcionalmente el tiempo de ciclo por unidad de volumen producido. Este resultado refuerza el principio fundamental del aprovechamiento maderable: la productividad operativa no depende del sistema de cobertura per se, sino del volumen individual que cada árbol aporta por ciclo de operación.

La correlación de Pearson entre el DAP y el rendimiento operativo ( $r = 0,9778$ ;  $p < 0,001$ ) y entre el volumen en pie y el rendimiento ( $r = 0,9648$ ;  $p < 0,001$ ) confirman que las variables dendrométricas son los factores de mayor poder explicativo sobre la productividad del aprovechamiento manual con motosierra en los tres sitios evaluados. Estos valores son superiores

a los reportados por Nájera-Luna et al. (2011) en bosques de coníferas en Durango, México, donde la correlación entre el diámetro y el rendimiento de arrastre fue de  $r = 0,71$ , diferencia atribuible a la mayor homogeneidad diamétrica de sus rodales frente a la contrastada heterogeneidad estructural entre plantación y bosque natural presente en el presente trabajo. La correlación más alta entre DAP y rendimiento ( $r = 0,9778$ ) frente a la de volumen y rendimiento ( $r = 0,9648$ ) indica que el DAP, como variable de campo de fácil medición, constituye el predictor operativo más confiable del rendimiento en los sistemas evaluados, lo que tiene implicaciones directas para la planificación del aprovechamiento: la medición del DAP en el censo forestal previo permite estimar con alta precisión la productividad esperada por especie y por predio sin necesidad de cubicaciones volumétricas completas.

En Costa Rica, estudios de aprovechamiento en plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb. y *Tectona grandis* L.f. reportan rendimientos de apeo con motosierra entre 2,1 y 4,8 m<sup>3</sup>/h (Villalobos et al., 2019), superiores a los 0,0280 m<sup>3</sup>/h registrados en *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham en Concepción. Esta diferencia es atribuible al menor volumen individual de los pinos evaluados — media de 0,0117 m<sup>3</sup>/árbol — frente al mayor porte de las especies tropicales utilizadas en los estudios costarricenses, cuyos individuos presentan DAP medios superiores a 25 cm en edad de cosecha comercial. En Ecuador, investigaciones en bosques naturales de estribaciones andinas reportan rendimientos de troceado entre 1,5 y 3,2 m<sup>3</sup>/h (Mena et al., 2020), rango que se sitúa por debajo de los valores obtenidos para *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake (17,71 – 34,77 m<sup>3</sup>/h), *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (10,98 – 26,29 m<sup>3</sup>/h) y *Cedrela odorata* L (12,13 – 20,63 m<sup>3</sup>/h) en los predios del Chucurí, lo que indica que los individuos aprovechados en el presente estudio presentan dimensiones fusales considerablemente mayores a los aprovechados en

los estudios ecuatorianos, posiblemente por tratarse de árboles de mayor edad o de sitios con mayor productividad forestal. En Perú, Arce & Villanueva (2023) registraron en plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham en Cajamarca una productividad diaria de 69,2 m<sup>3</sup> con un tiempo efectivo de motosierra de 2 horas 15 minutos por jornada (34,05% del tiempo total), eficiencia considerablemente superior a la registrada en Concepción (tiempo total medio de ciclo: 23,87 ± 6,45 min/árbol), diferencia que se asocia a la mayor edad y DAP de los individuos aprovechados en el estudio peruano frente a los de la plantación de Concepción (DAP medio: 10,77 ± 2,94 cm), que corresponden a una plantación joven en su primer ciclo de cosecha. En Colombia, investigaciones en manejo forestal comunitario en Antioquia, Bolívar, Cauca y Valle del Cauca reportan en promedio 2,98 jornales por m<sup>3</sup> procesado (Armenteras et al., 2022), indicador que refleja las limitaciones estructurales del aprovechamiento manual en bosques naturales de difícil acceso, comparables a las condiciones topográficas de los predios con pendientes entre 30% y 60% registradas en San Vicente de Chucurí y El Carmen de Chucurí.

*Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake (Vell.) S.F. Blake registró el mayor rendimiento operativo medio con 27,1053 ± 6,5748 m<sup>3</sup>/h, diferenciándose significativamente de todas las demás especies excepto de *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (p = 0,105). Este comportamiento responde directamente a sus atributos dasométricos: DAP medio de 67,90 ± 7,04 cm, fustes rectos con escasa conicidad y densidad básica de la madera entre 0,24 y 0,36 g/cm<sup>3</sup> (Ordóñez et al., 2015), características que reducen la resistencia al corte con motosierra y disminuyen el tiempo de derribo y procesamiento por unidad de volumen producido. *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (20,8055 ± 5,8230 m<sup>3</sup>/h) y *Cedrela odorata* L. (17,0334 ± 4,3986 m<sup>3</sup>/h) no presentaron diferencias significativas entre sí (p = 0,733), ni tampoco *Cordia gerascanthus* L (12,3701 ± 6,4089 m<sup>3</sup>/h) con

*Albizia carbonaria* Britton ( $11,9386 \pm 3,6761 \text{ m}^3/\text{h}$ ) ( $p = 0,999$ ), indicando que estos dos pares de especies imponen demandas operativas equivalentes en campo. La mayor desviación estándar de *Cordia gerascanthus* L ( $\pm 6,41 \text{ m}^3/\text{h}$ ; CV = 51,8%) frente a *Albizia carbonaria* Britton ( $\pm 3,68 \text{ m}^3/\text{h}$ ; CV = 30,8%) refleja la mayor irregularidad fusticular del morcoro en los predios estudiados, con fustes que oscilaron entre 35 y 63 cm de DAP, dispersión diamétrica que incrementa la variabilidad en los tiempos de procesamiento individuo a individuo.

El análisis de tiempos por actividad reveló que el troceado fue la operación de mayor demanda temporal en ambos sistemas de cobertura: representó el 50,6% del tiempo total del ciclo en la plantación (troceado medio: 14,42 min de los 23,87 min totales) y el 78,3% en bosque natural. La mayor proporción del troceado en bosque natural se explica por la heterogeneidad estructural del rodal, la complejidad del dimensionamiento comercial de las trozas en función de su destino industrial y la necesaria evaluación visual de defectos — pudriciones, horquetas, desviaciones de grano — en campo, aspectos propios del aprovechamiento selectivo en bosques naturales intervenidos que no se presentan en la plantación pura de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. Esta proporción es superior a la reportada por Nájera-Luna et al. (2011) para operaciones mecanizadas en México, donde el uso de grúas hidráulicas para carga y skidders de ruedas para arrastre redujo significativamente la fracción de tiempo destinada al troceado manual al desagregar la operación de procesamiento del fuste.

Desde el punto de vista del transporte menor, la variación topográfica entre los tres sitios de estudio determina sistemas de extracción técnicamente diferenciados, cuya selección adecuada incide directamente sobre la eficiencia operativa, la seguridad laboral y el impacto ambiental del aprovechamiento. Con base en los gradientes de pendiente caracterizados mediante análisis

cartográfico en ArcGIS 10.8.2 y los lineamientos técnicos de la FAO (1999) y Visser & Stampfer (2015), se identificaron tres sistemas de transporte menor aplicables a las condiciones de los sitios evaluados.

**Sistema 1 — Arrastre terrestre con cable de arrastre y vuelo (pendientes 0 — 10%): aplicable a la zona de Yarima.** En terrenos con pendientes inferiores al 10%, como las presentes en el sector de Yarima, el sistema de cable de arrastre con longitud de vuelo de hasta 1.500 m constituye la alternativa más eficiente en términos de productividad y costo por m<sup>3</sup> transportado. Este sistema opera con tractor agrícola adaptado o skidder de ruedas sobre vías de saca planificadas, permitiendo alcanzar rendimientos de arrastre de hasta 19,83 m<sup>3</sup>/h en condiciones favorables de piso forestal (Nájera-Luna et al., 2011). La baja pendiente reduce el riesgo de volcamiento del equipo y minimiza la compactación diferencial del suelo en las franjas de arrastre.

**Sistema 2 — Cable aéreo de 650 m (pendientes 10 — 20%): aplicable a la zona de Pamplonita.** Para rangos de pendiente entre 10% y 20%, como los registrados en la vereda Ver del municipio de Pamplonita, se recomienda el sistema de cable aéreo con longitud de tendido de 650 m. Este sistema permite suspender parcialmente las trozas del suelo durante el transporte, reduciendo el daño a la regeneración natural y la compactación del horizonte orgánico, aspectos críticos en suelos de ladera con cobertura de bosque natural intervenido en la zona de amortiguación de la UMF-ASAFCH. El anclaje del cable a árboles porta en la parte superior de la ladera garantiza la estabilidad del sistema en pendientes medias y elimina el riesgo de deslizamiento de material.

**Sistema 3 — Cable aéreo de 650 m (pendientes 20 — 30%): aplicable a la vereda Pichincha — Concepción.** En las pendientes entre 20% y 30% predominantes en la vereda Pichincha del municipio de Concepción, el cable aéreo con tendido de 650 m y Torre Koller en la cabeza del tendido es la alternativa técnicamente más adecuada para el aprovechamiento de la plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham, cuya cosecha está autorizada mediante la Resolución DGL No. 000814 del 19 de noviembre de 2025. A diferencia del Sistema 2, las mayores pendientes en Pichincha exigen mayor tensión en el cable portante, mayor longitud de eslinga de suspensión para garantizar la separación de las trozas del suelo y una planificación más rigurosa de los puntos de carga y descarga. Este sistema minimiza la compactación del suelo forestal y el disturbio a la regeneración natural de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham, aspectos determinantes para la sostenibilidad del ciclo de cosecha en la plantación de Concepción.

Los resultados del presente estudio aportan parámetros cuantitativos originales para condiciones andinas del departamento de Santander, integrando por primera vez datos de rendimiento operativo para seis especies arbóreas —incluyendo *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. y *Albizia carbonaria* Britton, para las cuales no existen referentes previos publicados en la literatura forestal colombiana— en tres sitios con contrastes altitudinales y de cobertura representativos de la región. Estos parámetros constituyen una base empírica para la estimación de costos, la planificación del aprovechamiento sostenible y la selección de sistemas de extracción en sistemas agroforestales y bosques naturales de las provincias de García Rovira y Yarigués, en el marco normativo del Decreto 1076 de 2015, la Resolución DGL No. 0000384 del 22 de junio de 2022 que ampara las operaciones de ASAFCH en El Carmen de Chucurí y San Vicente de

Chucurí, y la Resolución DGL No. 000814 del 19 de noviembre de 2025 que autoriza el aprovechamiento en la vereda Pichincha del municipio de Concepción.

## 6 Conclusiones

El estudio evaluó de manera técnica y cuantitativa la eficiencia operativa del aprovechamiento forestal en plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. y bosque natural en los municipios de Concepción (provincia de García Rovira), El Carmen de Chucurí y San Vicente de Chucurí (provincia de Yariguíes), departamento de Santander, generando información regional cuantificada para la planificación forestal sostenible en tres sitios de investigación con condiciones biofísicas, altitudinales y de cobertura contrastadas. A continuación, se presentan las conclusiones en correspondencia con cada objetivo específico del estudio.

En relación con el primer objetivo específico — identificar los rendimientos operativos en función de variables dendrométricas, tiempo de operación y tecnología empleada —, se determinó que los rendimientos en la plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham (vereda Pichincha, Concepción) oscilaron entre 0,0043 y 0,0438 m<sup>3</sup>/h, con una media de  $0,0280 \pm 0,0109$  m<sup>3</sup>/h, mientras que en el bosque natural los rendimientos variaron entre 6,2728 m<sup>3</sup>/h y 34,7709 m<sup>3</sup>/h según la especie y el individuo. El ordenamiento por rendimiento operativo medio fue: *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake ( $27,1053 \pm 6,5748$  m<sup>3</sup>/h) > *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. ( $20,8055 \pm 5,8230$  m<sup>3</sup>/h) > *Cedrela odorata* L ( $17,0334 \pm 4,3986$  m<sup>3</sup>/h) > *Cordia gerascanthus* L ( $12,3701 \pm 6,4089$  m<sup>3</sup>/h) > *Albizia carbonaria* Britton ( $11,9386 \pm 3,6761$  m<sup>3</sup>/h) > *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham ( $0,0280 \pm 0,0109$  m<sup>3</sup>/h). El análisis de varianza confirmó diferencias altamente significativas entre especies ( $F = 60,93$ ;  $gl = 5, 35$ ;  $p < 0,001$ ). Las comparaciones múltiples de Tukey identificaron cuatro grupos de homogeneidad: *Schizolobium*

*parahyba* (Vell.) S.F. Blake como especie de mayor rendimiento (Grupo A); *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. y *Cedrela odorata* L sin diferencias entre sí (Grupo AB); *Cordia gerascanthus* L y *Albizia carbonaria* Britton estadísticamente equivalentes (Grupo B); y *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham como grupo diferenciado de todas las demás especies (Grupo C,  $p < 0,001$  en todos los pares). La correlación de Pearson entre el DAP y el rendimiento operativo ( $r = 0,9778$ ;  $p < 0,001$ ) fue la más alta registrada, superando incluso la correlación entre el volumen en pie y el rendimiento ( $r = 0,9648$ ;  $p < 0,001$ ), confirmando que el DAP es la variable dasométricas con mayor poder predictivo sobre la productividad del aprovechamiento manual con motosierra y puede emplearse como criterio primario de planificación operativa en los sistemas evaluados.

En relación con el segundo objetivo específico — estimar la eficiencia del aprovechamiento forestal sostenible de bajo impacto en los sistemas evaluados —, se determinó que la productividad operativa no puede analizarse de manera aislada del contexto topográfico ni de las características dasométricas individuales de los árboles. La correlación entre DAP y volumen en pie ( $r = 0,9453$ ;  $p < 0,001$ ) confirma la estrecha relación alométrica entre ambas variables, lo que permite que el DAP registrado en el censo forestal previo al aprovechamiento sirva como insumo directo para estimar el volumen aprovechable y, a partir de él, el rendimiento operativo esperado por especie y sitio. El gradiente altitudinal entre los sitios de estudio (247 m s.n.m. en Caño Doradas vs. 2.941 m s.n.m. en la vereda Pichincha, Concepción) condicionó directamente los tiempos de ciclo y la selección del sistema de extracción técnicamente viable para cada predio: en Caño Doradas (pendientes 15–35%) el arrastre terrestre con skidder o cabrestante sobre vías de saca es el sistema más eficiente; en los predios de la UMF-ASAFCH en San Vicente de Chucurí (pendientes 30–60%) el cabrestante mecánico o winche y el cable aéreo tipo skyline

son las alternativas pertinentes según el rango de pendiente de cada predio; y en la vereda Pichincha (pendientes 50–80%) el cable aéreo tipo skyline con Torre Koller de 650 m constituye la única alternativa técnicamente viable, minimizando el disturbio al suelo forestal y a la regeneración natural de la plantación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham, cuyo aprovechamiento se enmarca en la Resolución DGL No. 000814 del 19 de noviembre de 2025 expedida por la CAS.

En relación con el tercer objetivo específico — analizar la operatividad del transporte menor en los sistemas evaluados —, se identificó que el troceado es la fase de mayor demanda temporal en ambos sistemas de cobertura: representó el 50,6% del tiempo total del ciclo en la plantación y el 78,3% en el bosque natural. Esta diferencia se asocia a la mayor heterogeneidad estructural del rodal natural, la complejidad del dimensionamiento comercial de trozas según su destino industrial y la evaluación de defectos en campo propia del aprovechamiento selectivo en bosque natural intervenido. El análisis topográfico mediante ArcGIS 10.8.2 evidenció que siete de los diez predios evaluados presentan pendientes superiores al 35%, condición que descarta técnicamente el uso de equipos terrestres de arrastre convencionales sin complemento de cable o suspensión aérea. Los tres sistemas de transporte menor propuestos —arrastre terrestre (Figura 9), cable aéreo skyline de 650 m (Figura 10) y Torre Koller de 650 m (Figura 11)— responden de manera específica a los rangos de pendiente, altitud y volumen unitario de troza caracterizados en los diez predios del estudio.

De manera integral, el estudio aporta por primera vez parámetros cuantitativos de rendimiento operativo para seis especies arbóreas — incluyendo *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. y *Albizia carbonaria* Britton, para las cuales no se encontraron referentes previos en la

literatura forestal colombiana — en condiciones andinas del departamento de Santander. Los datos generados constituyen un referente técnico regional aplicable a la estimación de costos operativos, la selección de sistemas de extracción, la planificación de censos forestales previos al aprovechamiento y el fortalecimiento de la gestión forestal comunitaria en el marco del Decreto 1076 de 2015, la Resolución DGL No. 0000384 del 22 de junio de 2022 que ampara las operaciones de ASAFCH en El Carmen de Chucurí y San Vicente de Chucurí, y la Resolución DGL No. 000814 del 19 de noviembre de 2025 que autoriza el aprovechamiento en la vereda Pichincha del municipio de Concepción. La alta correlación entre el DAP y el rendimiento operativo ( $r = 0,9778$ ) abre la posibilidad de desarrollar modelos predictivos simples de productividad a partir de variables de fácil medición en campo, herramienta que potenciaría significativamente la eficiencia en la planificación del aprovechamiento forestal sostenible en la región andina de Santander.

## 7 Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos del aprovechamiento forestal evaluado en 41 individuos de seis especies distribuidos en tres sitios de investigación en el departamento de Santander, se formulan las siguientes recomendaciones orientadas a mejorar la planificación operativa, la eficiencia técnica y la sostenibilidad del aprovechamiento forestal en la región de las provincias de García Rovira y Yariguíes:

**Ampliar el tamaño muestral por especie y por sitio de estudio:** El número de individuos evaluados por especie en bosque natural osciló entre 3 (*Cordia gerascanthus* L y *Cedrela odorata* L) y 5 (*Schizolobium parahyba*, *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. y *Albizia carbonaria* Britton), lo que limita la potencia estadística de las comparaciones post hoc de Tukey y la representatividad de las estimaciones de rendimiento. Se recomienda ampliar el muestreo a un mínimo de 10

individuos por especie por sitio, particularmente para *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. y *Albizia carbonaria* Britton, cuya alta desviación estándar en los rendimientos operativos ( $\pm 5,82$  y  $\pm 3,68$  m<sup>3</sup>/h respectivamente) sugiere mayor variabilidad intra-especie de la que puede estimarse con  $n = 5$ .

**Extender el estudio con registros dasométricos y operativos diferenciados por predio:**

Los predios de la UMF-ASAFCH en San Vicente de Chucurí (Villa Mira, Albania, San Roque, San Pablo, Las Malvinas, El Rubí y Buenos Aires) presentan rangos de pendiente entre 30% y 60% y altitudes entre 800 y 1.400 m s.n.m., condiciones que generan variabilidad intra-sitio en los tiempos de ciclo y en los rendimientos operativos no capturada en el presente estudio al tratarse los predios como un solo sitio. Se recomienda registrar datos por predio de manera individualizada en futuras investigaciones, especialmente en aquellos con mayor contraste topográfico (Las Malvinas y El Rubí, pendientes 40–60%, vs. Villa Mira y Albania, pendientes 30–50%), con el fin de ajustar los modelos predictivos a cada condición específica de terreno y especie.

**Incorporar el análisis de costos operativos por sistema de extracción:** El presente estudio estableció los rendimientos operativos (m<sup>3</sup>/h) para los tres sistemas de transporte menor propuestos, pero no cuantificó los costos unitarios de producción (\$/m<sup>3</sup>). Se recomienda complementar esta evaluación técnica con un análisis de costos que integre: costo horario del equipo de extracción (skidder, cabrestante o Torre Koller), costo de instalación y retiro del tendido de cable aéreo (sistemas 2 y 3), costo de mano de obra por ciclo y costo de mantenimiento de equipos. Con los rendimientos de arrastre de hasta 19,83 m<sup>3</sup>/h para el Sistema 1 (Nájera-Luna et al., 2011) y los volúmenes unitarios de troza registrados en el presente estudio — que oscilaron entre 0,0012 m<sup>3</sup> (*Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham, Concepción) y 9,2413 m<sup>3</sup> (*S. parahyba*, Caño Doradas) — este análisis permitirá determinar la viabilidad financiera de cada

sistema en función del volumen disponible por predio y orientará las decisiones de inversión de ASAFCH y de la CAS en la gestión de la Resolución DGL No. 0000384 del 22 de junio de 2022 y la Resolución DGL No. 000814 del 19 de noviembre de 2025.

**Desarrollar modelos predictivos de rendimiento operativo a partir del DAP:** La correlación de Pearson entre el DAP y el rendimiento operativo fue la más alta registrada en el presente estudio ( $r = 0,9778$ ;  $p < 0,001$ ), superior incluso a la correlación con el volumen en pie ( $r = 0,9648$ ), lo que indica que el DAP puede emplearse como variable predictora primaria del rendimiento sin necesidad de cubicaciones volumétricas completas. Se recomienda ajustar modelos de regresión simple y múltiple de la forma  $Rend = f(DAP)$  y  $Rend = f(DAP, especie)$  para cada sistema de cobertura evaluado, y validarlos con datos adicionales de los predios de la UMF-ASAFCH. Estos modelos constituirían una herramienta de planificación operativa de alta utilidad para los técnicos forestales de ASAFCH, permitiendo estimar la productividad esperada directamente desde el censo forestal previo al aprovechamiento.

**Desagregar y cuantificar los tiempos improductivos del ciclo de aprovechamiento:** El presente estudio registró el tiempo total de ciclo por individuo, pero no desagregó los tiempos improductivos (desplazamientos entre árboles, mantenimiento y afilado de cadena, esperas logísticas, pausas de descanso, demoras por condiciones de terreno). Dado que el troceado representó entre el 50,6% y el 78,3% del tiempo total del ciclo según el sistema de cobertura, la identificación precisa de los tiempos improductivos permitiría determinar qué fracción del tiempo restante corresponde a actividades con potencial de optimización. Se recomienda incorporar un formato de registro de tiempos improductivos clasificados por categoría en las futuras operaciones de aprovechamiento de ASAFCH, siguiendo la metodología de estudio de tiempos y movimientos de la FAO (1999).

**Implementar programas de capacitación técnica para los operarios forestales:** Los datos de tiempos operativos registrados en campo evidencian variabilidad individual entre operarios que no es atribuible exclusivamente a las características dasométricas de los árboles. Se recomienda diseñar e implementar programas de capacitación continua para los operarios forestales de ASAFCH en: técnicas de apeo dirigido para minimizar daños a la regeneración natural y al suelo; mantenimiento preventivo y correctivo de motosierra en campo; prácticas de aprovechamiento de bajo impacto (APBI) establecidas por la FAO (2004); y uso seguro de equipos de protección personal. Los rendimientos operativos por especie obtenidos en el presente estudio — particularmente para *Dacryodes colombiana* M.C. Johnst. (20,8055 m<sup>3</sup>/h) y *Albizia carbonaria* Britton (11,9386 m<sup>3</sup>/h), especies sin referentes previos en Colombia — deben incorporarse como material de referencia en los procesos de capacitación.

**Desarrollar estudios comparativos con sistemas mecanizados de cosecha:** Los rendimientos operativos registrados en el presente estudio con motosierra manual, si bien son cuantitativamente sólidos para el contexto del aprovechamiento comunitario de ASAFCH, representan el límite inferior de productividad posible en estos predios. Se recomienda desarrollar estudios comparativos que evalúen sistemas de cosecha mecanizada de baja escala — harvesters de procesador de cabezal pequeño, forwarders de cuatro ruedas o motosierras de alta cilindrada con cabezal procesador — para cuantificar el incremento potencial en productividad frente a los sistemas manuales evaluados y determinar el umbral de volumen por predio (m<sup>3</sup>/año) a partir del cual la mecanización resulta técnica y financieramente rentable en las condiciones topográficas y de accesibilidad de los predios de la UMF-ASAFCH.

**Establecer un sistema de registro sistemático de datos operativos en ASAFCH:** La ausencia de bases de datos históricos de tiempos, rendimientos y volúmenes aprovechados en los

predios de la UMF-ASAFCH limitó la posibilidad de comparación longitudinal en el presente estudio. Se recomienda implementar un sistema de registro estandarizado por predio, jornada y especie que documente de manera continua: DAP y altura de cada árbol aprovechado, tiempos por actividad, volumen cubicado, condiciones climáticas y de terreno, y operario responsable. Este sistema de información constituirá la base de datos para la actualización periódica de los planes de manejo forestal en el marco de la Resolución DGL No. 0000384 del 22 de junio de 2022 y servirá como insumo técnico para los informes de cumplimiento ante la CAS.

**Incorporar la pendiente del terreno y el volumen unitario de troza como criterios obligatorios de planificación del transporte menor:** El presente estudio demostró que la pendiente topográfica — que varió entre 15% (Caño Doradas) y 80% (vereda Pichincha, Concepción) entre los predios evaluados — es el factor determinante en la selección del sistema de extracción, y que el volumen unitario de troza — que osciló entre 0,0012 m<sup>3</sup> en *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham y 9,2413 m<sup>3</sup> en *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake — condiciona la capacidad de carga requerida por el equipo. Se recomienda que los planes de manejo forestal de los predios de la UMF-ASAFCH (Res. DGL No. 0000384/2022) y de la plantación de Concepción (Res. DGL No. 000814/2025) incluyan de manera obligatoria: el mapa de pendientes del predio generado en ArcGIS 10.8.2, el volumen unitario esperado por especie según el censo forestal, y la justificación técnica del sistema de transporte menor seleccionado en función de ambos parámetros, conforme a los tres sistemas identificados en el presente trabajo.

**Promover la articulación de los resultados con las autoridades ambientales regionales:** Los parámetros cuantitativos generados en el presente estudio constituyen el primer referente técnico de rendimientos operativos de aprovechamiento forestal con datos empíricos para las provincias de García Rovira y Yariguíes en el departamento de Santander. Se recomienda

promover la articulación formal de estos resultados con la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS) y la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), con el fin de: fortalecer los criterios técnicos de otorgamiento de permisos de aprovechamiento forestal en sistemas agroforestales y bosques naturales del departamento; incorporar la exigencia de estudios de tiempos y rendimientos como componente obligatorio de los planes de manejo forestal presentados ante estas corporaciones; y contribuir a la construcción de una base de datos regional de productividad forestal que oriente la política de manejo sostenible del bosque en Santander.

**Referencias Bibliográficas**

- Acuña, M., Strandgard, M., Wiedemann, J., & Mitchell, R. (2017). Impacts of early thinning of a *Eucalyptus globulus* Labill. pulplog plantation in Western Australia on economic profitability and harvester productivity. *Forests*, 8(11), 145. <https://doi.org/10.3390/f8110415>
- Arce, J., & Villanueva, J. (2023). Operaciones de corta en el raleo de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. en Cajamarca, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 40(1). <https://www.researchgate.net/publication/377871677>
- Armenteras, D., Melo, J., Dávalos, L., & Pascual, U. (2022). Costos de aprovechamiento del manejo forestal comunitario en Colombia: impactos, lecciones aprendidas y desafíos. *Colombia Forestal*, 25(2), 104–122. <https://doi.org/10.14483/2256201X.18723>
- Center for International Forestry Research (CIFOR) & Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). Sustainable forest harvesting and reduced-impact logging guidelines. FAO. <https://www.fao.org/forestry/harvesting/en/>
- Del Lungo, A., Ball, J., & Carle, J. (2022). Forest mensuration and modeling techniques for sustainable timber assessment. FAO. <https://www.fao.org/3/cc0364en/cc0364en.pdf>
- Federación Nacional de Industriales de la Madera (FEDEMADERAS). (2024). Boletín estadístico forestal: marzo de 2024. FEDEMADERAS. <https://fedemaderas.org.co/boletin-estadistico-forestal-marzo-de-2024/>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1999). Harvesting operations in plantation forests. FAO Forestry Paper. <https://www.fao.org/3/x6906e/x6906e00.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2004). Forest harvesting techniques. FAO Forestry Paper. <https://www.fao.org/3/y4171e/y4171e00.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). Forest operations and safety guidelines. FAO. <https://www.fao.org/3/CA0187EN/ca0187en.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). Global forest resources assessment 2020: Main report. FAO. <https://www.fao.org/publications/card/en/c/ca9825en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). Agroforestry for sustainable agriculture. FAO. <https://www.fao.org/3/cb2431en/CB2431EN.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). Global Forest Resources Assessment 2025. FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd6709en>
- Maguar, M., Torres, J., & Mena, H. (2015). Aprovechamiento forestal maderable en cuatro municipios del departamento del Chocó, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 69–78. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/download/1405/1729/2598>
- Nájera-Luna, J. A., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., & Jurado-Ybarra, E. (2011). Tiempos y rendimientos del aprovechamiento forestal en El Salto,

Durango, México. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 17(1), 49–58. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.05.031>

Pardini, G., Spinelli, R., & Magagnotti, N. (2021). Productivity and cost evaluation in forest operations: Recent developments. *Forests*, 12(4), 498. <https://doi.org/10.3390/f12040498>

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2021). Lineamientos técnicos para el aprovechamiento forestal sostenible. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/serfor>

Spinelli, R., & Karjalainen, T. (2018). Time study methods in forest harvesting research. *Forests*, 9(3), 82. <https://doi.org/10.3390/f9030082>

Spinelli, R., & Magagnotti, N. (2010). Comparison of harvesting productivity and costs in forest operations. *International Journal of Forest Engineering*, 21(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/14942119.2010.10702590>

Spinelli, R., & Magagnotti, N. (2020). Contemporary trends in forest operations research. *International Journal of Forest Engineering*. <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1752134>

Visser, R., & Stampfer, K. (2015). Expanding ground-based harvesting onto steep terrain: A review. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 36(2), 321–331. <https://hrcak.srce.hr/151831>

## Apéndices

### **Apéndice A:** *Formulario de entrevista semiestructurada a operarios forestales*

El siguiente cuestionario fue aplicado a los operarios forestales para obtener información complementaria sobre su desempeño y los factores que podría haber afectado la productividad. Las preguntas se formularon como opciones de respuesta múltiple para facilitar la sistematización de la información.

1. Tiempo empleado en el alistamiento del lugar a trabajar por individuo arbóreo:
  - a) 5 - 10 minutos
  - b) 10 - 20 minutos
  - c) 20 - 30 minutos
  - d) Mas de 30 minutos
  
2. Tiempo empleado en el apeo/derribo por individuo arbóreo:
  - a) 5 - 10 minutos
  - b) 10 - 20 minutos
  - c) 20 - 30 minutos
  - d) Mas de 30 minutos
  
3. Tiempo empleado en el desrame por individuo arbóreo:
  - a) 5 - 10 minutos
  - b) 10 - 20 minutos
  - c) 20 - 30 minutos
  - d) Mas de 30 minutos

4. Tiempo empleado en troceado por individuo arbóreo:
  - a) 5 - 10 minutos
  - b) 10 - 20 minutos
  - c) 20 - 30 minutos
  - d) Mas de 30 minutos
  
5. Tiempo empleado en el movimiento de trozas por individuo arbóreo:
  - a) 5 - 10 minutos
  - b) 10 - 20 minutos
  - c) 20 - 30 minutos
  - d) Mas de 30 minutos

**Apéndice B:** *Base de datos dendrometricos por individuo aprovechado*

En este apéndice se incluye la base de datos completa con las variables dasométricas medidas para cada individuo arbóreo aprovechado durante el estudio. Esta información constituye el insumo primario para el cálculo de los rendimientos operativos reportados en los resultados.

*Nota:* La base de datos completa en formato .xlsx se encuentra disponible en la plataforma de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander.

**Apéndice C:** *Mapa de ubicación de predios y áreas de estudio*

En este apéndice se presenta la cartografía detallada de las áreas de estudio, incluyendo los ocho predios de la UMF-ASAFCH en San Vicente de Chucuri y El Carmen de Chucuri, el área

Cano Doradas, la vereda Pichincha en concepción y el sector rural de concepción. Los mapas fueron elaborados en ArcGIS 10.8.2 a partir de planchas cartográficas en formato shapefile (.shp).

*Nota:* Los archivos cartográficos en formato shapefile (.shp) están disponibles en la plataforma de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander.

**Apéndice D:** *Registro fotográfico de las operaciones de aprovechamiento forestal*









*Nota:* El archivo fotográfico completo está disponible en la plataforma de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander.