

**RELACIÓN ENTRE LA TOPOGRAFÍA Y EL CRECIMIENTO DE *Retrophyllum  
rospigliosii* (PILG.) C. N. PAGE, EN LA ZONA ANDINA COLOMBIANA**



**EDILBER SEBASTIÁN GUERRERO MARTÍNEZ  
DIANA CAMILA ZUÑIGA BUITRÓN**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA FORESTAL  
POPAYÁN  
2023**

**RELACIÓN ENTRE LA TOPOGRAFÍA Y EL CRECIMIENTO DE *Retrophyllum  
rospigliosii* (PILG.) C. N. PAGE, EN LA ZONA ANDINA COLOMBIANA**



**EDILBER SEBASTIÁN GUERRERO MARTÍNEZ  
DIANA CAMILA ZUÑIGA BUITRÓN**

**Trabajo de grado bajo la modalidad de investigación para optar al  
título de Ingenieros Forestales**

**Director  
PhD JORGE ANDRÉS RAMÍREZ CORREA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA FORESTAL  
POPAYÁN  
2023**

Nota de aceptación

El director y los jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación de este por sus autores y lo encuentran satisfactorio.

---

PhD. JORGE ANDRÉS RAMÍREZ CORREA  
Director

---

M. sc. ALEX ENRIQUE ORDOÑEZ HOYOS  
Presidente del jurado

---

M. sc. EDGAR ALBERTO AGUDELO  
Jurado

Popayán, 11 de abril de 2023

## DEDICATORIA

A Dios, quién nunca me permitió rendirme. A mi padre Edil Guerrero, el silvicultor que con su trabajo me inspiró a formarme como Ingeniero Forestal. A mi madre Isabel Martínez, quien con su amor siempre me inspiró a seguir adelante.

A mis hermanos, Elizabeth, Yalile y Alejandro y mis sobrinos, Santiago, Valerie y Samuel, quienes siempre me brindaron su apoyo y amor durante toda mi carrera universitaria.

A mis amigos incondicionales, en especial a Sara, Jimmy y Mateo, quienes fueron siempre aliados en este proceso.

Sebastián Guerrero

A Dios, por permitirme adquirir todas las capacidades necesarias y no desfallecer en el proceso. A mis padres Milgen Buitrón y Eduardo Zúñiga por brindarme siempre su apoyo incondicional, sus consejos y palabras de aliento y por el amor que siempre me dan y me inspira a ser cada día mejor.

A mi hijo Jhoan por todo su amor y por ser quien me impulsa a lograr todo lo anhelado. A mis hermanos Laura y Cristian quienes siempre han estado para mí.

A mi familia y amigos cercanos que de una u otra forma hicieron parte de este proceso.

Camila Zúñiga

## **AGRADECIMIENTOS**

En especial a Dios, por acompañarnos y brindarnos la sabiduría para culminar nuestro trabajo. A nuestras familias, parte fundamental de este proceso y quienes nos rodearon siempre de amor y apoyo.

Especial agradecimiento a nuestro profesor y director Jorge Andrés Ramírez, quien siempre estuvo atento con sus indicaciones, consejos y correcciones durante este y todos los proyectos que desarrollamos en nuestra carrera universitaria.

Al personal de Planeación de Smurfit Kappa, en especial a Edgar Alberto Agudelo y Adriana Marín Vélez, por su apoyo técnico y logístico para el desarrollo del trabajo de campo.

Al profesor Dylan James Craven de la Universidad Mayor de Chile, quien con sus aportes y sugerencias permitieron mejorar el desarrollo de nuestra investigación.

A todas las personas que de una u otra forma aportaron en desarrollo del presente trabajo de investigación, infinitas gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	3
2. MARCO REFERENCIAL .....	5
2.1. LOCALIZACIÓN .....	5
2.2. MARCO TEÓRICO .....	6
2.2.1. <i>Retrophyllum rospigliosii</i> (Pilger) C.N. Page .....	6
2.2.2. Crecimiento forestal .....	7
2.2.3. Calidad y productividad de sitio forestal .....	7
2.2.4. Evaluación de la productividad del sitio forestal e Índice de sitio .....	8
2.2.5. La topografía como factor de calidad y productividad del sitio .....	10
2.2.6. Modelos digitales de elevación .....	13
2.3. MARCO HISTÓRICO .....	13
3. METODOLOGÍA .....	15
3.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN CAMPO .....	15
3.1.1. Parcelas permanentes de muestreo y selección de árboles dominantes .....	15
3.1.2. Recolección de información topográfica .....	15
3.2. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	16
3.2.1. Obtención de la información topográfica y selección de variables .....	16
3.2.2. Ajuste de ecuaciones de índice de sitio .....	17
3.2.3. Ajuste de ecuaciones de índice de sitio con variables topográficas .....	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	20
4.1. RESULTADOS DEL PROCESO FOTOGRAMÉTRICO .....	20
4.2. PARÁMETROS DEL TERRENO DERIVADOS DEL DEM .....	21
4.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES Y SELECCIÓN DE VARIABLES DE INTERÉS .....	24
4.4. AJUSTE DE ECUACIONES DE ÍNDICE DE SITIO .....	26
4.5. RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE SITIO Y VARIABLES TOPOGRÁFICAS .....	31
5. CONCLUSIONES .....	38

<b>6. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>39</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>40</b>
<b>8. ANEXOS .....</b>	<b>48</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio .....	6
Figura 2. Representación de la curvatura de perfil y en planta .....	12
Figura 3. Combinaciones de curvaturas de perfil y planimétrica .....	12
Figura 4. Flujo de trabajo para la construcción de un modelo de elevación digital .....	16
Figura 5. Flujo de trabajo para la obtención de la información por variable topográfica .....	17
Figura 6. Esquema de actividades generales de la metodología propuesta .....	19
Figura 7. Modelo de Elevación Digital de la plantación experimental de <i>Retrophyllum rospigliosii</i> .....	20
Figura 8. Parámetros del terreno derivados del Modelo de Elevación Digital de la plantación experimental de <i>Retrophyllum rospigliosii</i> .....	22
Figura 9. Matriz de correlación de las ocho variables topográficas obtenida .....	24
Figura 10. Análisis de componentes principales para las cinco variables topográficas y su contribución ( $\cos^2$ ) .....	25
Figura 11. Dispersión de alturas dominantes por medición en 30 parcelas de <i>R. rospigliosii</i> .....	26
Figura 12. Modelos ajustados para la estimación de las alturas dominantes de <i>R. rospigliosii</i> .....	27
Figura 13. Modelos ajustados por parcela para la estimación de alturas dominantes en <i>R. rospigliosii</i> .....	28
Figura 14. Curvas de índice de sitio generados para <i>R. rospigliosii</i> .....	30



**Figura 15. Índice de sitio de *R. rospigliosii* estimado a través de variables topográficas. a) Curvatura de perfil cóncava. b) Curvatura de perfil recta. c) Curvatura de perfil convexa. .... 33**

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1. Definiciones de los parámetros del terreno utilizados en modelación ecológica .....</b>	<b>11</b>
<b>Tabla 2. Resumen de los resultados de los parámetros del terreno de las 30 parcelas estudiadas .....</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 3. Resultados de los parámetros de comparación de los modelos ajustados .....</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 4. Promedios, mínimos y máximos por clase de índice de sitio (m) de <i>R. rospigliosii</i> .....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 5. Porcentaje de parcelas por clase de índice de sitio (m) de <i>R. rospigliosii</i> .....</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 6. Resumen del análisis de varianza generado para el modelo que tiene índice de sitio como respuesta .....</b>	<b>32</b>

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1: Ortomosaico de la plantación experimental de <i>Retrophyllum rospigliosii</i> .....</b>	<b>50</b>
<b>Anexo 2: Establecimiento de los puntos de control para la verificación de las coordenadas .....</b>	<b>51</b>
<b>Anexo 3: Ejemplo de los parámetros del terreno en el área focal de la parcela 21 .....</b>	<b>52</b>

## RESUMEN

*Retrophyllum rospigliosii* es una conífera nativa con características morfológicas que sugieren un uso potencial en la reforestación comercial. Para implementar proyectos de reforestación comercial es importante evaluar la relación entre el crecimiento de la especie y factores ambientales, como la topografía. La topografía es un factor difícil de controlar a través del manejo forestal, limitándose a la elección de las zonas a reforestar, decisión que se puede tomar estimando el índice de sitio mediante variables topográficas. Así, evaluamos la relación de la topografía con el crecimiento de *R. rospigliosii* en la zona andina colombiana, estimando su índice de sitio mediante variables topográficas. Para lograrlo, se utilizaron los datos de crecimiento en altura de 30 parcelas de 19 años de edad y se obtuvo la información topográfica de 8 variables mediante un modelo de elevación digital generado por fotogrametría. Mediante un análisis de componentes principales se seleccionaron el aspecto, la curvatura del perfil y en planta como variables topográficas principales. Se generó la ecuación de índice de sitio usando el modelo de Bertalanffy ( $R^2 > 98\%$ ), estableciendo tres clases de índice de sitio que cubren el rango entre 9,2 y 16,6 m. Las variables topográficas seleccionadas explicaron 86% de la variabilidad del índice de sitio, encontrando un mejor crecimiento en zonas con aspecto en dirección oeste y curvaturas convexas. Un crecimiento deficiente de la especie en comparación con otras especies plantadas comercialmente en la zona y la necesidad de micrositos específicos para su óptimo crecimiento supone inviable el uso de *R. rospigliosii* en la reforestación comercial.

**Palabras clave:** índice de sitio, fotogrametría, pino colombiano, reforestación comercial, topografía.

## ABSTRACT

*Retrophyllum rospigliosii* is a native conifer with morphological characteristics that suggest a potential use in commercial reforestation. To implement commercial reforestation projects, it is important to evaluate the relationship between the growth of the species and environmental factors, such as topography. Topography is a factor that is difficult to control through forest management, being limited to the choice of areas for reforestation, a decision that can be made by estimating the site index through topographic variables. Thus, we evaluated the relationship of topography with the growth of *R. rospigliosii* in the Colombian Andean zone, estimating its site index by means of topographic variables. To achieve this, we used height growth data from 30 19-year-old plots and obtained topographic information for 8 variables using a DEM generated by photogrammetry. Aspect, profile curvature and plan curvature were selected as principal topographic variables by means of principal component analysis. The site index equation was generated using Bertalanffy model ( $R^2 > 98\%$ ), establishing three site index classes covering the range between 9.2 and 16.6 m. The selected topographic variables explained 86% of the variability of the site index, finding better growth in areas with west aspect and convex curvatures. Poor growth of the species compared to other commercially planted species in the area and the need for specific microsites for optimal growth make the use of *R. rospigliosii* in commercial reforestation unviable.

**Keywords:** Colombian pine, commercial reforestation, photogrammetry, site index, topography.

## 1. INTRODUCCIÓN

El bioma Neotropical alberga más del 14% de la cobertura boscosa global y el mayor número de especies de árboles en el mundo (Beech et al., 2017). En Sudamérica se encuentran gran parte de las plantaciones forestales a nivel mundial, las cuales representan el 2% de la cobertura forestal global, las que paradójicamente en el 97% se componen de especies introducidas (FAO y UNEP, 2020). Colombia, aunque cuenta con alrededor de 5776 especies de árboles leñosos nativos, concentradas principalmente en la región de los Andes (Moreno et al., 2016), basa su reforestación comercial mayoritariamente con pinos y eucaliptos provenientes de otros países, los que generan gran rentabilidad y para los que ya han sido desarrollados paquetes tecnológicos adecuados para aumentar su productividad y reducir los periodos de rotación (PROFOR, 2017).

No obstante, el uso de especies exóticas en el desarrollo de proyectos de reforestación comercial en una zona con alta diversidad de árboles maderables nativos genera controversia e incluso animadversión hacia las empresas que adelantan estos proyectos. Por lo anterior, se vienen desarrollando proyectos de investigación que permitan conocer el potencial productivo de las especies maderables nativas para proyectos de reforestación comercial en el futuro (Cardenas, 2014). Así, uno de los proyectos de investigación gira en torno a la especie *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C.N. Page, conocido comúnmente como Pino Colombiano.

*R. rospigliosii* es una especie que en condiciones naturales alcanza gran tamaño (hasta 30 metros de alto y más de 100 cm de diámetro), presenta fuste recto, ramificación reducida (Marín, 1998), la madera tiene características favorables para su uso en carpintería (densidad de  $0.40 \text{ g cm}^{-3}$  y buena estabilidad estructural) (Portillo et al., 2019). Además, aunque esta especie presenta una longitud corta de traqueidas en comparación con otras especies de coníferas (Vásquez, 2010), se ha sugerido el uso de la especie en la producción de celulosa (Cueva et al., 2013). Por lo anterior, Smurfit Kappa Colombia, en colaboración con la Federación Nacional de Cafeteros, estableció plantaciones experimentales de la especie hace más de dos décadas para determinar el potencial de implementar proyectos de reforestación comercial con *R. rospigliosii* en la región andina.

Para implementar con éxito dichos proyectos de reforestación con una especie de interés es necesario evaluar y controlar la influencia de diversos factores en el

crecimiento de los árboles (Bettinger et al., 2009; Weiskittel et al., 2011). Uno de los factores a controlar es la interrelación entre el crecimiento de la especie con las variables ambientales que configuran la calidad del sitio como la topografía (Prodan, 1997). La topografía, después de los factores climatológicos, es el factor menos controlable silviculturalmente (Sewerniak & Puchałka, 2020), limitándose en gran medida al poder de decisión en la elección de la zona a reforestar. Sin embargo, tomar esa decisión de forma adecuada en la práctica sigue siendo un problema para los reforestadores (Tschinkel, 1972; Zhu et al., 2019).

Una alternativa para garantizar la elección de sitios aptos para la reforestación es la predicción del índice de sitio como indicador del crecimiento de la especie de interés. La topografía y las variables que la describen han sido utilizadas para caracterizar sitios de reforestación para otras especies en la zona andina colombiana (Tschinkel, 1972; del Valle Arango, 1975; Barrios et al., 2021), pero aún no se encuentra disponible para *R. rospigliosii*. Por ello, el presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia de la topografía en el crecimiento de *R. rospigliosii* en una plantación experimental ubicada en el departamento del Cauca, relacionando el índice de sitio con variables topográficas.

## 2. MARCO REFERENCIAL

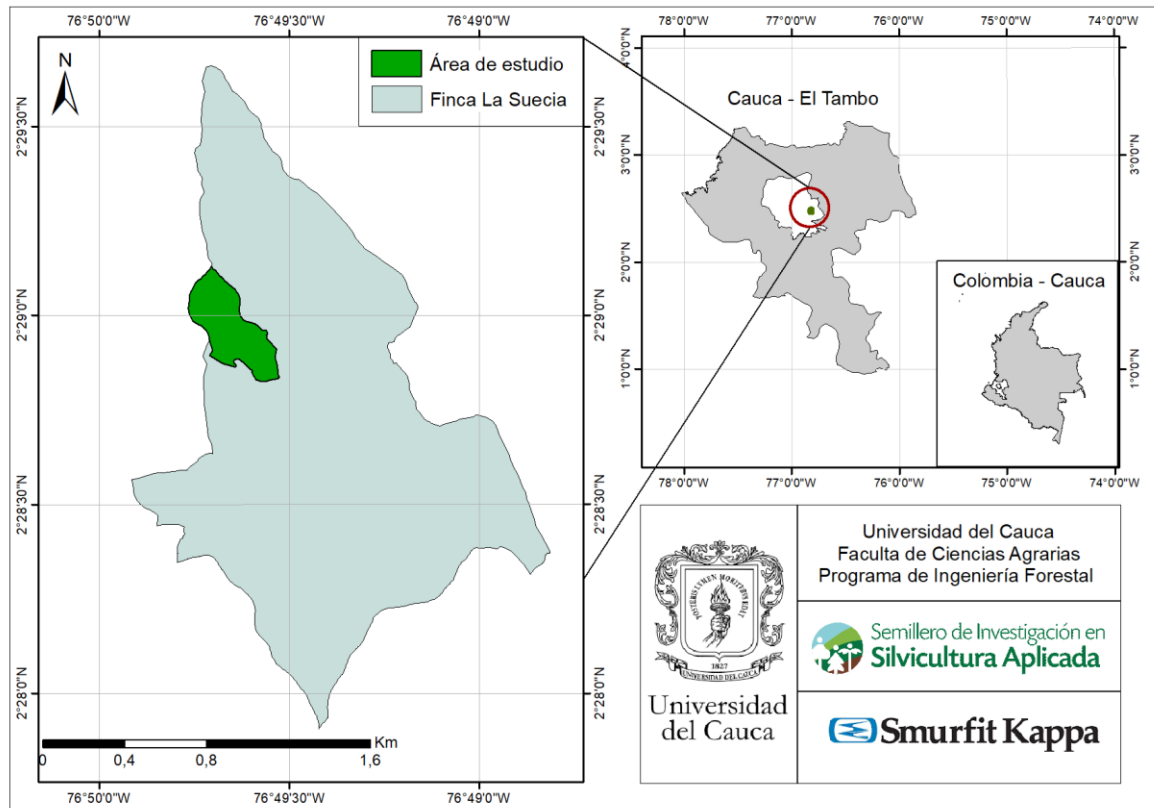
### 2.1. LOCALIZACIÓN

El área de estudio se localiza en la finca La Suecia, en el municipio de El Tambo en el departamento del Cauca (suroccidente colombiano en las estribaciones de la cordillera occidental, Figura 1.). El sitio se ubica entre las coordenadas 2°28'0" y 2°29'40" N, y 76°48'30" y 76°50'0" W a una altitud promedio de 1755 m.s.n.m. La temperatura anual promedio es de 19°C. La precipitación media anual es de 2255 mm, con régimen de distribución unimodal, con menor precipitación entre los meses de junio y septiembre según datos de la estación meteorológica presente en el lugar perteneciente a Smurfit Kappa Cartón de Colombia (Ramírez et al., 2021). El lugar del experimento es una plantación de *Retrophyllum rospigliosii*, que ocupa un área de 6.57 has y esta plantado a una densidad de 1111 árboles ha<sup>-1</sup> (correspondiente a un espaciamiento de 3 x 3 m). La plantación fue establecida en el año 1999 mediante un convenio entre el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) y Smurfit Kappa Colombia.

Según la clasificación de las zonas de vida de Holdridge, el área de estudio corresponde a un bosque húmedo premontano (bh-PM) (Holdridge, 1987). Los suelos del área de estudio están conformados por cenizas volcánicas, con un alto desarrollo pedogenético y que se manifiesta en el desarrollo de varios horizontes Bw y un horizonte Ap con altos contenidos de materia orgánica (Ramírez et al., 2021). Un análisis de estos suelos evidenció texturas franco-arenosas a franco-limosas; la fertilidad es relativamente baja, con mínima concentración de fósforo, contenidos de aluminio cambiante altos y pH muy ácidos (COESAGRO, 2004).



Figura 1. Localización del área de estudio.



## 2.2. MARCO TEÓRICO

**2.2.1. *Retrophyllum rospigliosii* (Pilger) C.N. Page.** *Retrophyllum rospigliosii* es una especie nativa de los bosques altoandinos que actualmente está catalogada como casi amenazada a vulnerable por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (Gardner & Thomas, 2013). *R. rospigliosii* se distribuye en los bosques montanos y premontanos a altitudes entre los 1.470 y 3.300 msnm, en Bolivia, Colombia, Perú y Venezuela (Marín Vélez, 1998; Cueva et al., 2013). Esta especie crece en suelos poco fértiles, de media a alta profundidad, arcillosos o arcillo-arenosos y no es exigente en humedad (Cueva & Trujillo, 2010; Cueva et al., 2013). *R. rospigliosii* forma rodales puros o mixtos disetáneos en los bosques nublados. El crecimiento de la especie es lento, pero alcanza buen desarrollo a largo plazo (Cueva et al., 2013). La especie rara vez se encuentra en áreas expuestas y no hace parte de la composición de los bosques en estados tempranos de sucesión (Cueva et al., 2013).

**2.2.2. Crecimiento forestal.** El crecimiento es el incremento en el tiempo de las variables dasométricas de interés como el diámetro, la altura, el área basal y el volumen (Bettinger, 2009). Técnicamente, el incremento es definido como la diferencia entre las dimensiones de un árbol o masa forestal en un periodo de tiempo, mientras el crecimiento es la dimensión total de un momento del tiempo al siguiente (Weiskittel et al., 2011). o

El crecimiento forestal puede ser abordado desde dos enfoques: el crecimiento de los árboles individuales y el crecimiento de la masa forestal (Kershaw et al., 2017). El crecimiento de los árboles individuales se aborda evaluando el cambio de variables dendrométricas como el diámetro, la altura y el volumen, mientras que el crecimiento de la masa (o rodal) forestal se aborda evaluando el cambio en variables dasométricas como el área basal o volumen, pero expresadas por unidad de área (Torres, 2004).

El crecimiento de los árboles individuales dentro de un rodal está determinado por sus características genéticas y su interrelación con el ambiente y otros seres vivos (Kershaw et al., 2017). Las interrelaciones de los árboles con otros seres vivos pueden clasificarse de manera sencilla en intraespecíficas e interespecíficas (Begon et al., 2014), donde la competencia por recursos se configura como una interrelación fundamental, pero que puede ser controlada mediante el manejo silvicultural (Prodan, 1997). También, los factores ambientales influyen significativamente en el crecimiento forestal y pueden clasificarse en físicos y biológicos, los cuales son particulares para cada locación y son poco controlables a través del manejo forestal (Bettinger, 2009; Albert & Schmidt, 2010). Estos factores son definidos como calidad del sitio forestal (Skovsgaard & Vanclay, 2008).

El crecimiento es de principal interés en proyectos de reforestación comercial ya que determina el tiempo requerido para alcanzar la cantidad o dimensiones requeridas de un producto definido (Torres, 2004). Además, la producción forestal, es decir, la cantidad total de producto (generalmente madera) que puede obtenerse de un rodal en un momento dado, depende del crecimiento acumulado de un rodal particular durante un espacio de tiempo definido (Weiskittel et al., 2011).

**2.2.3. Calidad y productividad del sitio forestal.** La calidad del sitio forestal y productividad del sitio forestal son dos términos que comúnmente son usados como sinónimos pero que tienen definiciones diferentes (Skovsgaard & Vanclay 2008). La calidad del sitio forestal se refiere a la combinación de factores biológicos y físicos que caracterizan a un sitio particular y que se vinculan a una clasificación descriptiva (Skovsgaard & Vanclay, 2008). Dicha clasificación descriptiva hace uso de palabras

en lugar de números (cifras específicas) para definir la capacidad de un área para la producción de un bien forestal específico en términos como inadecuado, pobremente adecuado, moderado y adecuado (Bettinger, 2009).

Por otro lado, la productividad de un sitio es una estimación cuantitativa del potencial de un sitio para producir biomasa vegetal en un determinado espacio de tiempo (Skovsgaard & Vanclay, 2008), donde se espera que dicho potencial sea alcanzado por el rodal forestal para la producción de un bien específico (Kershaw et al., 2017). Así, desde un enfoque de producción de madera, la productividad del sitio puede definirse como el potencial que se espera alcanzar para producir volumen sobre el suelo en un determinado periodo de tiempo (Skovsgaard & Vanclay, 2008). Cabe resaltar que dicha productividad puede ser influenciada por el manejo forestal con decisiones silvícolas como el tipo de preparación del sitio a utilizar, la elección de especies forestales, la procedencia, la densidad utilizada, las podas y aclareos realizados, entre otros, para alcanzar el mayor potencial de producción posible (Bettinger, 2009; Kershaw et al., 2017; Skovsgaard & Vanclay, 2008).

**2.2.4. Evaluación de la productividad del sitio forestal e Índice de sitio.** La evaluación de la productividad del sitio forestal se puede realizar desde un enfoque geocéntrico (Skovsgaard & Vanclay, 2008), basado en la evaluación de la productividad a través de la medición de uno o más de los factores individuales del sitio como el clima, la topografía y los suelos o desde un enfoque dendrocéntrico, mediante la evaluación de características de los árboles que se consideran expresivas de la productividad del sitio (Kershaw et al., 2017). El índice de sitio es una de las evaluaciones dendrocéntricas más comunes de la productividad del sitio forestal (Weiskittel et al., 2011). Es definido como la altura esperada de los árboles dominantes de una especie particular en un rodal a una edad de referencia específica, estimada a partir de datos de crecimiento observados previamente (Skovsgaard & Vanclay, 2008; Weiskittel et al., 2011; Kershaw et al., 2017; Zhu et al., 2019). El índice de sitio se viene desarrollando desde el siglo XIX para su uso en la silvicultura, consolidándose como el indicador de la productividad del sitio más utilizado, aceptado y versátil para rodales forestales de edad uniforme (Skovsgaard & Vanclay, 2008).

El desarrollo del índice de sitio forestal como indicador de la productividad del sitio se encuentra soportado en tres fundamentos principales: la hipótesis del índice de sitio, la regla de Eichhorn y la hipótesis de la respuesta al adelgazamiento (Skovsgaard & Vanclay, 2008). Estas hipótesis sustentan que la productividad de los sitios forestales puede clasificarse con base en las alturas de los árboles dominantes del rodal a una edad determinada puesto que están significativamente correlacionadas con su producción en volumen (Skovsgaard & Vanclay, 2008). Un

segundo sustento a esta hipótesis es que, en rodales de edad uniforme, el crecimiento en altura de los árboles más grandes (árboles dominantes) es menos dependiente que otras variables dendrométricas de la densidad de la plantación, aunque existen excepciones (Skovsgaard & Vanclay, 2008). El tercer sustento está basado en que la altura es una variable más fácil y económica de medir en comparación con el volumen y generalmente esta menos afectada por las prácticas de manejo (Bettinger, 2009).

Así, los modelos de índice de sitio requieren de datos del crecimiento previo de la especie en rodales de edad uniforme y establecer una edad base o de referencia para el cálculo del índice de sitio, la cual es establecida cerca de la edad de rotación promedio para la especie (Skovsgaard & Vanclay, 2008). Dichos modelos pueden dividirse en dos categorías principales: modelos anamórficos y modelos polimórficos (Zhu et al., 2019). Los modelos anamórficos se basan en el método de la curva guía y asumen que la forma de la curva altura-edad es independiente del índice de sitio (Weiskittel et al., 2011). Sin embargo, desde tiempo atrás se ha comprobado que esta suposición generalmente no es válida (Monserud, 1985), por lo que las curvas de índice de sitios anamórficos pueden no representar las formas verdaderas de las curvas para diferentes índices de sitios (Kershaw et al., 2017). Por otra parte, los modelos polimórficos se caracterizan porque la forma de la curva altura-edad depende del índice de sitio (Weiskittel et al., 2011), arrojando diferentes formas de curvas para diferentes índices de sitios (Kershaw et al., 2017). Actualmente se prefieren los modelos polimórficos de índice de sitio pues se consideran mucho más flexibles y representativos de la productividad del sitio; además, pueden comportarse como modelos anamórficos si es lo adecuado para un sitio determinado (Weiskittel et al., 2011; Zhu et al., 2019).

Ahora bien, los modelos de índice de sitio pueden ser usados para evaluar el efecto de factores ambientales en el crecimiento de los árboles. Para esto, se utilizan modelos estadísticos donde el índice de sitio se establece como la variable dependiente de los factores ambientales que se quieren analizar (Kershaw et al. 2017). Este tipo de estudios no solo aportan en la comprensión del efecto de factores ambientales en el crecimiento forestal, sino que también permiten calcular el índice de sitio para lugares donde no se pueda cuantificar directamente, permitiendo el análisis de la productividad de sitios donde aún no se han establecido rodales forestales de referencia (Kershaw et al. 2017). Por ejemplo, en casos donde se pretenda involucrar la topografía como factor de sitio, características topográficas como la altitud, la pendiente, el ángulo de la pendiente y el aspecto (curvatura del relieve) serían relevantes (Kershaw et al. 2017).

**2.2.5. La topografía como factor de calidad y productividad del sitio.** La topografía es un agente indirecto que incide sobre los ecosistemas forestales (Sewerniak y Puchalka 2020). La topografía en general influye en los patrones de drenaje y con ello el flujo de agua en el terreno, la cantidad e intensidad de la radiación solar recibida, la lixiviación y redistribución de los elementos nutritivos y materiales del suelo (especialmente en suelos jóvenes y con geoformas onduladas), generando gran variación a escala local de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, incidiendo indirectamente en la mayoría de los procesos fisiológicos de las plantas y así en su crecimiento (Seibert et al. 2007). La relación entre la topografía y el crecimiento de las especies forestales se ha analizado desde múltiples variables topográficas relacionadas como la pendiente, la concavidad y la convexidad del relieve (Tschinkel, 1972; Amundson et al., 1994; Seibert et al., 2007; Sewerniak & Puchalka, 2020). Las variables topográficas se parametrizan mediante la agrupación de medidas que definen las características del terreno en diferentes dimensiones (Heno Camelo & Gómez Murcia, 2017; Amatulli et al., 2018).

La topografía puede ser parametrizada mediante modelos digitales de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) que permiten identificar cómo las formas del terreno influyen en la hidrología y la geomorfología, y a su vez en los procesos biológicos a escala local y regional (Amatulli et al., 2018). Parámetros como la pendiente, el aspecto y la curvatura del relieve (en planta y del perfil) han sido ampliamente utilizados en el pasado en la modelación ambiental y específicamente del índice de sitio (Tschinkel, 1972; Zhu et al., 2019). Actualmente, a partir de los DEM se han generado nuevos parámetros de descripción topográfica como los recopilados por Amatulli et al. (2018) y que incluyen, entre otros, el índice de posición topográfica (TPI), el índice de rugosidad del terreno (TRI), la rugosidad y la medida de rugosidad vectorial (VRM), que sumados a los parámetros ya mencionados son utilizados ampliamente en la modelación ecológica, como la generación de nichos ecológicos (Craven et al., 2021), el estudio de la variación de rasgos funcionales (Wang et al., 2022), la predicción de variables como el índice de área foliar (Gumede et al., 2022), entre otros. Algunos de los parámetros topográficos del terreno generalmente utilizados se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Definiciones de los parámetros del terreno utilizados en modelación ecológica.

<b>Parámetro del terreno</b>	<b>Definición</b>	<b>Referencia</b>
Pendiente (slope)	Indica el ángulo entre el plano horizontal y el tangencial a la superficie. Puede darse en porcentaje y en grados.	Verdugo Chaura, 2022
Aspecto (aspect)	Es el ángulo entre la dirección del Norte y la proyección horizontal del vector del gradiente contado en sentido horario en cualquier punto de	Verdugo Chaura, 2022

	la superficie. Es un valor no negativo entre 0° y 360°	
Curvatura en planta (planform curvature)	Mide la velocidad de cambio perpendicular al gradiente de la pendiente. Los valores positivos indican que la superficie es lateralmente convexa, mientras que los valores negativos indican que la superficie es lateralmente cóncava (Figuras 2 y 3).	Verdugo Chaura, 2022
Curvatura del perfil (profile curvature)	Mide la tasa de cambio de pendiente a lo largo de una línea de flujo. Los valores negativos indican que la superficie es convexa hacia arriba, mientras que los valores positivos indican que la superficie es cóncava hacia arriba (Figuras 2 y 3).	Amatulli et al., 2018; Verdugo Chaura, 2022
Índice de posición topográfica (TPI)	Mide la diferencia de elevación de un punto central respecto a la elevación media de un entorno de área predeterminada. Valores positivos indican que el punto central tiene una elevación mayor a la elevación promedio del entorno y valores negativos que tiene una elevación menor.	De Reu et al., 2013
Rugosidad (roughness)	Se calcula como la mayor diferencia de elevación entre los puntos de un entorno de área predeterminada, brindando información sobre la heterogeneidad del terreno. Valores cercanos a cero expresan homogeneidad del entorno y valores mayores, heterogeneidad.	Amatulli et al., 2018
Índice de rugosidad del terreno (TRI)	Mide la media de las diferencias absolutas de la elevación de un punto central y los puntos de un entorno de área predeterminada, cuantificando el cambio de la elevación. Valores elevados en este parámetro expresan una rugosidad topográfica elevada y viceversa.	Stambaugh & Guyette, 2008; Amatulli et al., 2018
Medida de rugosidad vectorial (VRM)	Mide la rugosidad del terreno descomponiendo la pendiente y el aspecto en componentes vectoriales de tres dimensiones y midiendo su dispersión. Así, expresa la variación de la pendiente en un área predeterminada, generando valores cercanos a 0 en zonas planas y cercanos a 1 en zonas heterogéneas.	Amatulli et al., 2018

Figura 2. Representación de la curvatura de perfil y en planta, adaptado de Buckley (2010).

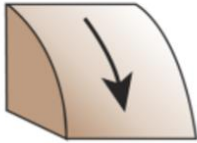
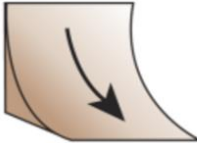
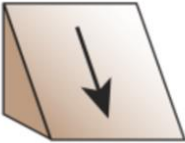



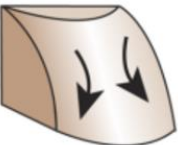
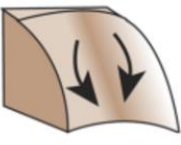
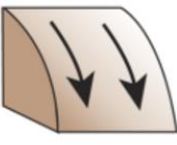
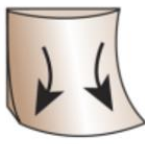
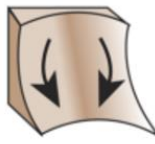
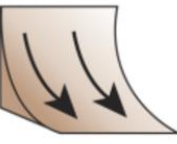


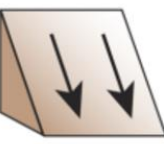
Curvatura del perfil		
Convexo (-1)	Cóncavo (+1)	Rectilíneo (0)
		
Curvatura en planta		
Convexo (+1)	Cóncavo (-1)	Rectilíneo (0)
		

Figura 3. Combinaciones de curvaturas de perfil y planimétrica, adaptado de (Buckley, 2010).

		Curvatura en planta		
		Lateralmente Convexo (+1)	Lateralmente Cóncavo (-1)	Lateralmente Rectilíneo (0)
Curvatura del perfil	Convexo (-1)			
	Cóncavo (+1)			
	Rectilíneo (0)			

**2.2.6. Modelos digitales de elevación (DEM).** Los DEM constituyen una estructura numérica y digital que busca representar la distribución espacial de la elevación de un área particular, siendo la altura una variable escalar (sobre un nivel de referencia) que se distribuye en un espacio bidimensional (Felicísimo, 1994). Los modelos de datos para representar un DEM pueden ser vectoriales o raster. En los primeros se encuentran curvas de nivel, perfiles y la red de triángulos irregulares. En los segundos, se encuentran las matrices de celdas regulares, con los datos de elevación en filas y columnas equidistantes (Burgos & Salcedo, 2014). Las aplicaciones de los DEM incluyen cualquier estudio que requiere como dato la elevación del terreno y su variabilidad (Cortéz, 2008). La construcción de los DEM se puede realizar a través de diversos métodos directos e indirectos. Los directos pueden ser mediante sensores remotos (altimetría) o sobre el terreno (topografía convencional o estaciones topográficas y receptores GNSS); mientras que los métodos indirectos pueden ser mediante la digitalización de curvas de nivel de un mapa o por restitución fotogramétrica o mejor llamada fotogrametría (Felicísimo, 1994). La fotogrametría es considerada una de las técnicas más eficientes, rápidas y económicas para la construcción de los DEM (Casella et al., 2020) y se define como la ciencia encargada de crear modelos en 3D a partir de imágenes 2D y así obtener características geométricas de objetos o locaciones (Tacca, 2015), simplificando las tecnologías que permiten la generación automática de modelos digitales de elevación (Tacca, 2015).

### 2.3. MARCO HISTÓRICO

La topografía y sus parámetros ha sido relacionada con el crecimiento de especies forestales en los siguientes estudios:

Laamrani et al., (2014), evaluaron los efectos de nueve variables topográficas en la productividad de los bosques boreales de abetos negros (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P), entre ellas la pendiente de la región del cinturón de arcilla canadiense, corroborando que esta influye en la productividad forestal de los bosques. Zhu et al. (2019) reportaron que variables topográficas como la pendiente y el aspecto influyeron significativamente en el crecimiento de la altura dominante del Abeto chino (*Cunninghamia lanceolata*) en la provincia de Hunan, China. También, Sewerniak y Puchalka (2020), relacionaron el crecimiento de la vegetación indicadora bajo rodales de *Pinus sylvestris* L. en Polonia, reportando que la forma del relieve influyó significativamente, observando una mayor productividad en dicha



vegetación en las zonas cóncavas del relieve. González-Rodríguez y Diéguez-Aranda (2020) evaluaron la influencia de variables topográficas en el crecimiento de *Pinus radiata* D. Don en plantaciones establecidas en España, encontrando que el aspecto influyó significativamente en el crecimiento de la especie al regular la intensidad de radiación solar que incidía en los diferentes sitios. Por último, Lin et al., (2021) analizó cómo la topografía y la disponibilidad de recursos del suelo afectan el crecimiento de plantaciones de cuatro especies forestales (*Picea crassifolia* Kom., *Betula platyphylla* Suk., *Larix principis-rupprechtii* Mayr, y *Populus cathayana* Rehd.) establecidas en China, concluyendo que la inclinación de la pendiente tiene una influencia directa en el crecimiento de los árboles, incrementándolo cuando las pendientes son cóncavas.

En Colombia, Tschinkel (1972), relacionó el índice de sitio de plantaciones forestales de ciprés (*Cupressus lusitanica* Mill) en el oriente del departamento de Antioquia con la topografía, reportando que la pendiente en conjunto con la curvatura del relieve explica en gran parte la variabilidad del crecimiento en altura de los árboles dominantes de dicha especie. Uribe (2020, documento interno de la División Forestal de Smurfit Kappa) relacionó la pendiente y la curvatura del relieve con el crecimiento de *Eucalyptus grandis* W. Hill en la región andina colombiana, encontrando que existe un menor crecimiento de la especie en zonas de media y alta pendiente. Finalmente, Barrios et al. (2021) reportaron que las variables topográficas no se correlacionaron con en el índice de sitio, obtenido con información proveniente de 160 plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb. establecidas en siete departamentos de Colombia (Tolima, Magdalena, Atlántico, Cesar, Bolívar, Sucre y Chocó).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN CAMPO

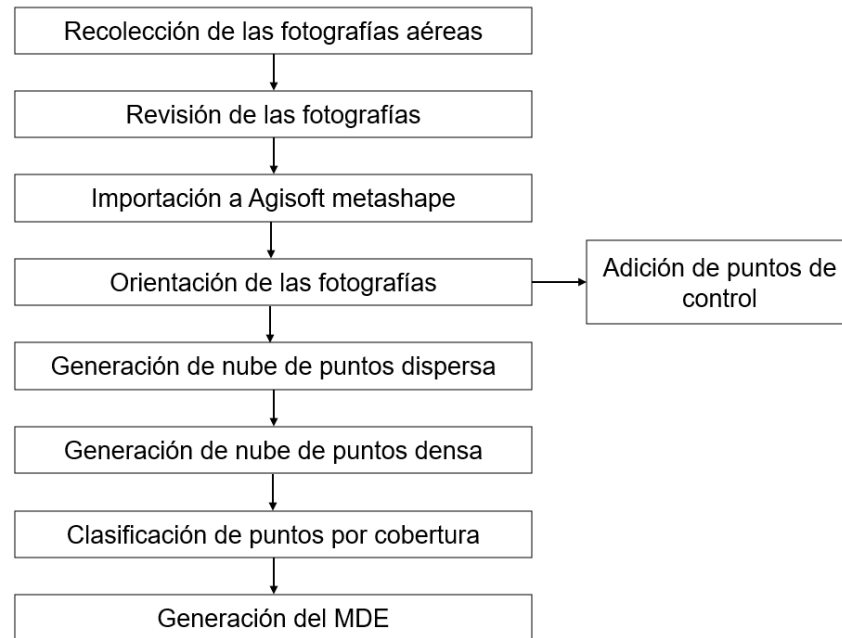
##### 3.1.1. Parcelas permanentes de muestreo y selección de árboles dominantes.

La plantación de *R. rospigliosii* cuenta con 30 parcelas permanentes de muestreo de forma cuadrada con 100 árboles cada una (10x10 árboles). Las parcelas fueron establecidas, junto con la plantación, en 1999 y han sido monitoreadas periódicamente a través de 7 inventarios forestales realizados en los años 2003, 2004, 2006, 2008, 2009, 2010, 2016 y 2018. En cada uno de los inventarios se registró el diámetro y la altura de los 16 árboles centrales de cada parcela. El diámetro se registró con cinta diamétrica y la altura con hipsómetro Vertex. Con los datos de altura registrados se escogieron en cada parcela los dos árboles con mayor altura en cada inventario, de manera que el conjunto de datos equivalga a aproximadamente 100 árboles dominantes por hectárea.

**3.1.2. Recolección de información topográfica.** Se realizó la recolección de fotografías aéreas mediante un vehículo aéreo no tripulado DJI Mavic 2 Pro, el cual hizo un recorrido por la plantación tomando fotografías a 180 metros de altura respecto al terreno y manteniendo un traslape frontal del 90% y lateral del 80% (Agudelo, 2020). Para la verificación de las coordenadas se establecieron cuatro puntos de control en campo señalizados con lonas plásticas de color blanco y negro. Las coordenadas de los puntos de control se recolectaron haciendo uso de un receptor GNSS (Global navigation satellite system) submétrico de marca CHCNAV i50. Adicionalmente, se recolectaron con el mismo receptor GNSS las coordenadas de las parcelas permanentes de muestreo para ubicarlas posteriormente en el DEM construido.

Las fotografías aéreas se orientaron con el software Agisoft Metashape<sup>®</sup>, en el cual también se incluyeron las coordenadas de los puntos de control para asegurar la precisión de la información en las tres dimensiones (latitud, longitud y altitud). El software generó un modelo tridimensional de puntos conocido como nube de puntos dispersa. Luego, con la nube de puntos dispersa el software obtuvo las coordenadas de los puntos visibles en las fotografías y los ubicó en un modelo tridimensional conocido como nube de puntos densa. Finalmente, se clasificaron los puntos de la nube de puntos densa, diferenciando aquellos correspondientes al terreno de las otras coberturas. A partir de los puntos sobre el terreno y su extrapolación a las zonas donde la vegetación impide su identificación se generó el DEM. Finalmente, este se exportó en formato ráster (TIFF) para su procesamiento en el software R. El flujo de trabajo seguido para la elaboración del DEM se presenta en la figura 4.

Figura 4. Flujo de trabajo para la construcción de un modelo de elevación digital. Adaptado de Li et al. (2016).

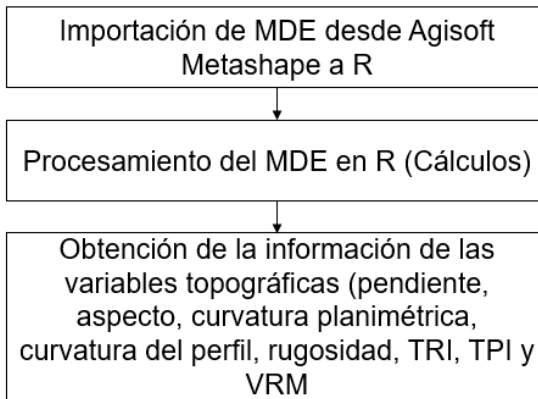


## 3.2. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

### 3.2.1. Obtención de la información topográfica y selección de variables.

Mediante el DEM y través del paquete “raster” (Hijmans, 2022) de R v. 4.2.1 (R Core Team, 2022), se calcularon las siguientes variables topográficas del terreno: pendiente, aspecto, índice de posición topográfico, índice de rugosidad topográfica y rugosidad. Para el cálculo del vector de rugosidad media y las curvaturas en planta y de perfil se utilizaron las herramientas del paquete “spatialEco” (Evans, 2021) de R. En cuanto a las curvaturas, los valores negativos fueron representados con el valor de -1 (equivalente a multiplicar los valores por 1000) y los valores positivos con el valor de 1, esto con el fin de evitar el manejo de valores decimales excesivamente pequeños (Talebi et al., 2016). Cada una de las variables se obtuvo considerando un área focal móvil de 144 m<sup>2</sup> generada para cada parcela con base en sus coordenadas, de tal manera que el píxel central del área focal reunía la información dentro de la parcela, siguiendo lo propuesto por Verdugo Chaura (2022). El flujo de trabajo seguido para la generación de la información topográfica se presenta en la figura 5.

Figura 5. Flujo de trabajo para la obtención de la información por variable topográfica.



Con la información de las variables topográficas obtenidas se realizó un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) para reducir el número de variables topográficas y mantener el poder explicativo. Para ello, se realizó una matriz de correlación con el objetivo de descartar las variables topográficas que exhibieron correlaciones superiores a 65% y así eliminar información redundante. Con las variables topográficas restantes se elaboró el PCA, y se verificó la contribución de las variables topográficas a los componentes principales. Los análisis se realizaron mediante el paquete “vegan” de R (Oksanen et al., 2022).

**3.2.2. Ajuste de ecuaciones de índice de sitio.** Se generaron ecuaciones de índice de sitio a partir de las mediciones de altura de los árboles dominantes seleccionados. Para la obtención de las ecuaciones de índice de sitio se utilizaron los modelos de Bertalanffy (o de Chapman-Richards, ecuación 1) y el modelo Schumacher (o de Korf, ecuación 2) (Burkhardt & Tomé, 2012). Los modelos se expresan como se presenta a continuación:

$$Hd = A[1 - \exp(-\beta_1 t)]^{\beta_2} \quad [1]$$

$$Hd = A \exp\left(-\frac{\beta_1}{t^{\beta_2}}\right) \quad [2]$$

Donde:

Hd es la altura total de cada árbol dominante en metros, A es la asíntota o máximo valor que puede ser alcanzado por Hd,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son parámetros desconocidos, t es

la edad (años) correspondiente a cada Hd y exp es el operador exponencial (Torres et al., 2012).

Posteriormente, cada modelo se ajustó utilizando un modelo mixto no lineal generalizado bayesiano (MMNLGB). El uso de este modelo permite evitar la autocorrelación de los errores que puede generar el uso de datos de mediciones sucesivas (conjunto de datos longitudinal) y la heterocedasticidad (Gregorie, 1987). El modelo utilizado se expresa como:

$$H_{ijk} = f(\Phi_{ij}, t_{ijk}) + \varepsilon_{ijk}, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, M_i, k = 1, \dots, n_{ij} \quad [3]$$

Donde:

M es el número de parcelas dentro del rodal,  $M_i$  es el número de árboles dominantes dentro de la  $i$ -ésima parcela y  $n_{ij}$  es el número total de dominantes.  $H_{ijk}$  es la altura del  $j$ -ésimo dominante de la  $i$ -ésima parcela tomada en la  $k$ -ésima edad,  $t_{ijk}$  es la edad,  $\Phi_{ij}$  es el vector de parámetros,  $f$  es la función de crecimiento (Ecuaciones 1 y 2) y  $\varepsilon_{ijk}$  es el error intragrupo. Para la modelación se utilizó una distribución gaussiana para la distribución del error del modelo y se consideraron las parcelas como factor aleatorio. Finalmente, los modelos se evaluaron en su desempeño y fueron comparados mediante el criterio de información de validación cruzada de exclusión (LOOIC), el criterio de información de Watanabe-Akaike (WAIC), su ajuste a los datos (coeficiente  $R^2$ ) y la revisión de sus residuos (error cuadrático medio – RMSE). El ajuste de los modelos se realizó haciendo uso del paquete “brms” (Bürkner, 2017) de R.

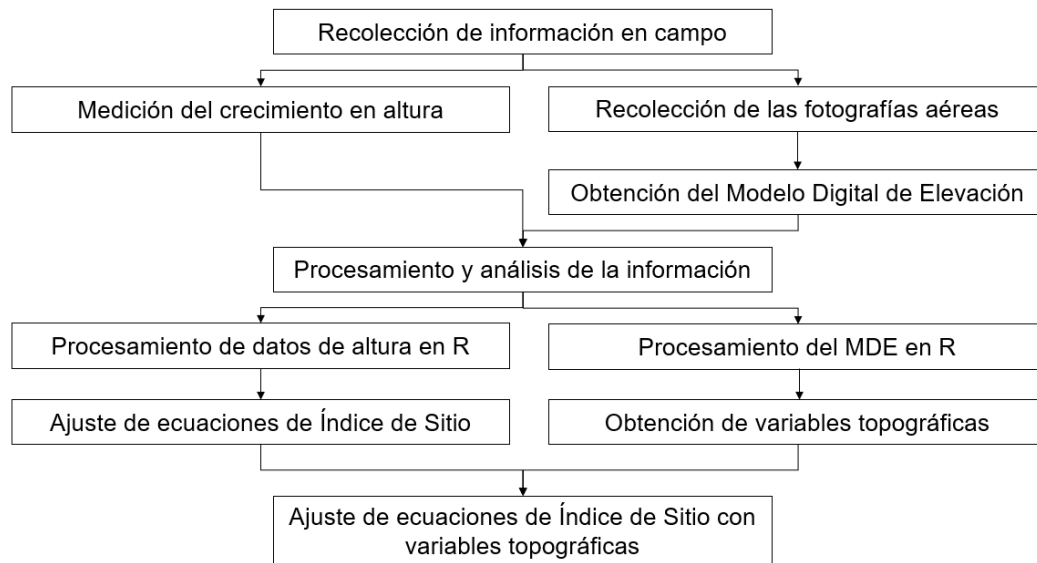
Una vez se seleccionó el mejor modelo se estimó el índice de sitio como la predicción de la altura de los árboles dominantes a una edad base de 18 años. Dicha edad ha sido generalmente utilizada como turno para otras especies de coníferas tropicales (Uribe, 1997; INAB, 2012). Posteriormente, se obtiene la ecuación de índice de sitio despejando el parámetro A del modelo seleccionado. Por último, se categorizan los sitios utilizando intervalos de 4 desviaciones estándar ( $\pm 2$  desviaciones estándar alrededor del sitio promedio) y se ubican las parcelas en cada categoría, estimando así el índice de sitio por parcela con la ecuación obtenida (Torres et al. 2012).

### 3.2.3. Ajuste de ecuaciones de índice de sitio con variables topográficas.

Mediante las estimaciones del índice de sitio por parcela y las variables topográficas obtenidas se realizó un modelo para predecir el índice de sitio en función de las variables topográficas seleccionadas mediante un modelo lineal. El modelo general utilizado consideró el índice de sitio como variable dependiente y las variables topográficas seleccionadas como factores fijos. Los modelos ajustados fueron evaluados en su desempeño mediante la significancia de sus parámetros, la revisión de sus residuos, el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de información Bayesiana (BIC). Por último, el efecto de las distintas variables en el crecimiento en altura se evaluó utilizando análisis de varianza. El desarrollo de los modelos se realizó haciendo uso del paquete “lme4” (Bates et al., 2015) de R.

Todos los cálculos y análisis fueron realizados mediante el software R v. 4.2.1. (R Core Team, 2022). La figura 6 presenta la metodología resumida a través de un esquema de actividades generales.

Figura 6. Esquema de actividades generales de la metodología propuesta.

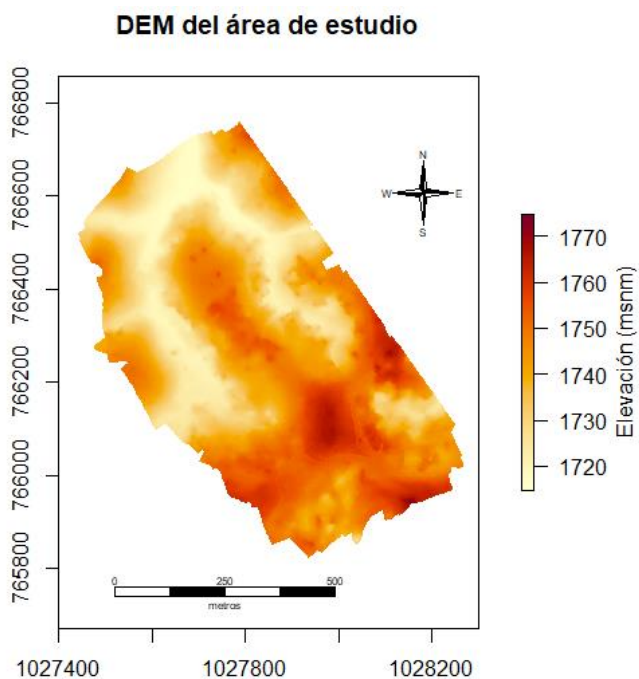


## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. RESULTADOS DEL PROCESO FOTOGRAMÉTRICO

El plan de vuelo generó 327 fotografías que contaron con calidad suficiente (> 80%) para la generación del DEM y que lograron ser alineadas correctamente en una nube de puntos densa de alta calidad. La elaboración de la nube de puntos generó un error total en la altitud de 1,59 cm, en la latitud de 0,71 cm y en la longitud de 0,76 cm. Con base en la nube de puntos densa y la clasificación de los puntos en las distintas coberturas se generó el DEM con una resolución 8,29 cm/píxel. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Agudelo (2020), donde en la elaboración de DEM mediante fotogrametría aérea en una plantación forestal se generaron errores menores a 2,5 cm en las tres dimensiones. De igual manera, coincide con lo reportado por Casella et al. (2020) para entornos homogéneos, quienes obtuvieron errores en la altitud entre 0,6 y 1,6 cm. Estos resultados demuestran la utilidad y eficiencia del uso de fotogrametría para la generación de DEM y como puede ser igualmente útil o incluso más eficiente que otras tecnologías como LiDAR para la generación de DEM en áreas locales y con necesidades de resolución menores a 1m/píxel (Guillaume et al., 2021). Para la obtención de los parámetros del terreno se generó un DEM con una resolución de 0.5 m/píxel que fue exportado en formato TIFF para los posteriores análisis (Figura 7).

Figura 7. Modelo Digital de Elevación (DEM) de la plantación experimental de *R. rospigliosii*.



## 4.2. PARÁMETROS DEL TERRENO DERIVADOS DEL DEM

Se obtuvieron 8 parámetros topográficos del terreno (pendiente, aspecto, curvaturas en planta y de perfil, rugosidad, TRI, VRM y TPI) representativos haciendo uso de un área focal móvil del área de las parcelas (aproximadamente 144 m<sup>2</sup>). Los 8 parámetros calculados se muestran para el total de la plantación en la Figura 8. Por ejemplo, para una parcela específicamente se verían según se muestra en la figura del anexo 3. Mediante la información del área focal de cada parcela se realizó la extracción de la información topográfica, cuyos valores promedios se pueden observar en la tabla 2.

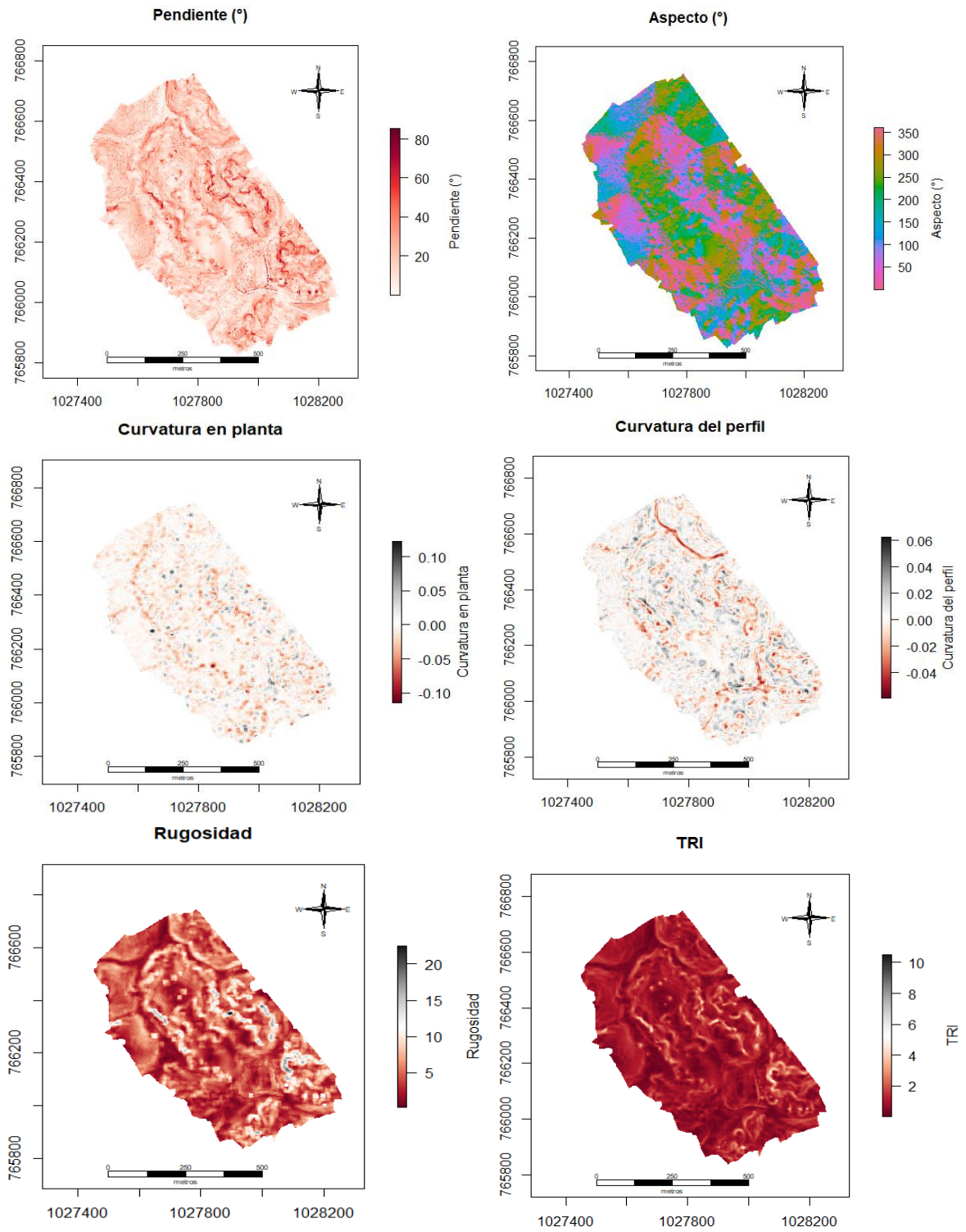
Tabla 2. Resumen de los resultados de los parámetros del terreno de las 30 parcelas estudiadas.

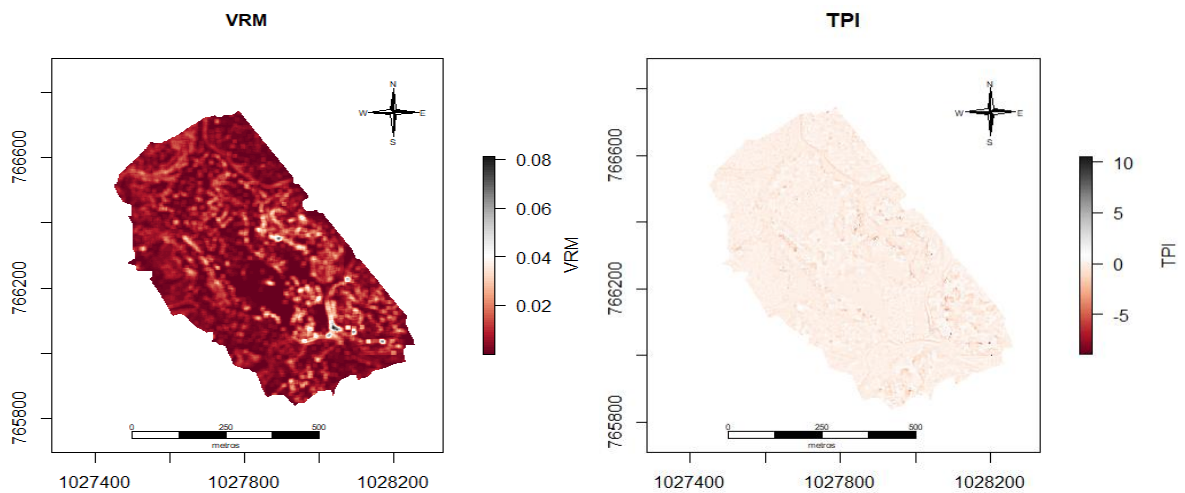
<b>Variables</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>
Pendiente (°)	3,71	26,67	13,71	6,17
Aspecto (°)	44,57	300,34	191,23	79,17
Curvatura en planta*	-1	1	-0,23	0,71
Curvatura del perfil*	-1	1	0,33	0,53
Rugosidad*	0,86	5,98	3,36	1,45
TRI*	0,16	1,24	0,66	0,31
TPI*	-0,22	0,46	0,03	0,15
VRM*	0,00	0,030	0,005	0,01

\*Variables adimensionales



Figura 8. Parámetros del terreno derivados del Modelo de Elevación Digital de la plantación experimental de *R. rospigliosii*.





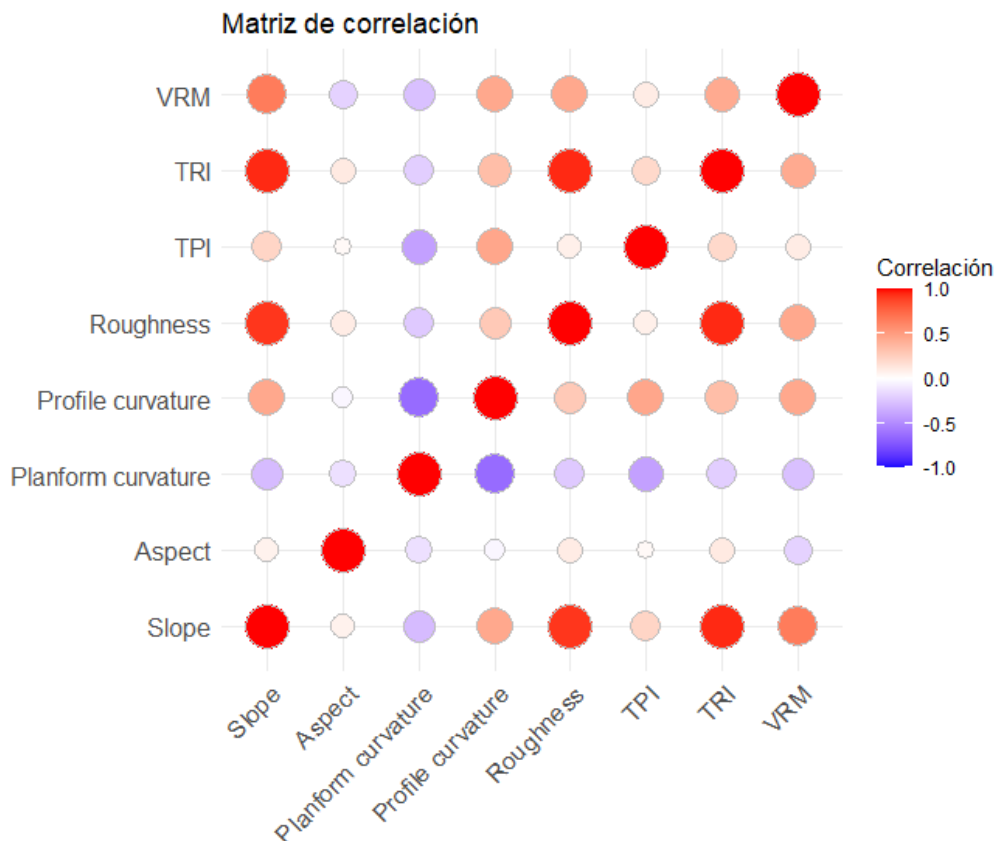
Las pendientes encontradas indican que dentro de esta área hay terrenos ondulados e inclinados, fuertemente ondulados e inclinados y fuertemente quebrados según las categorías del estudio de suelos del departamento del Cauca realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2009). El aspecto es el parámetro con mayor dispersión, indicando que la dirección del gradiente del terreno se distribuye hacia todas las direcciones, con menor participación de la dirección norte (figura 8). En el área de las parcelas el promedio de la curvatura en planta es de -0,23, indicando que gran parte de la superficie es lateralmente cóncava, y pocas áreas presentan curvaturas lateralmente convexas o rectilíneas (SD igual a 0,7). La curvatura del perfil tiene un valor promedio de 0,33, indicando que la mayoría de la superficie es cóncava, con la presencia de algunas zonas rectilíneas y convexas (SD igual a 0,53).

La rugosidad presentó valores que varían desde 0,86 hasta 5,98, con una media de 3,36, evidenciando una baja rugosidad en el terreno ocupado por las parcelas, con los valores más altos influenciados por los cambios de pendiente. El TRI de las parcelas varía desde 0,16 hasta 1,24, indicando al igual que la rugosidad que las parcelas presentan terrenos relativamente homogéneos. Los valores arrojados por el TPI para esta área (ver tabla 2) oscilan entre -0,22 y 0,46 y tiene una media de 0,03, indicando que la diferencia entre la elevación del punto central de las parcelas y su entorno es baja. Finalmente, los resultados del VRM presentan baja dispersión y cuenta con una media de 0,005, coincidiendo con los otros índices al evidenciar que terreno es relativamente homogéneo.

### 4.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES Y SELECCIÓN DE VARIABLES DE INTERÉS

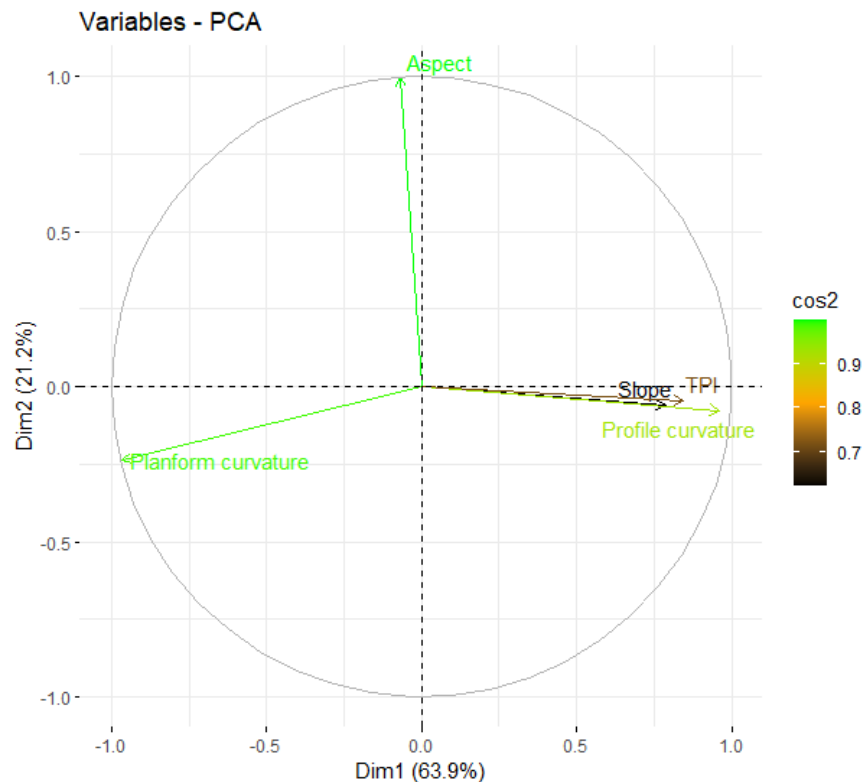
La matriz de correlación con las 8 variables topográficas estandarizada se presenta en la figura 9. Se observa una alta correlación entre la pendiente (slope), TRI, rugosidad (roughness), y VRM. Lo anterior, posiblemente debido a que son índices de rugosidad que explican de manera similar la heterogeneidad presente en la elevación del terreno. Estos índices se relacionan con la pendiente de manera proporcional, puesto que, a mayor pendiente, mayor heterogeneidad. Para evitar la redundancia entre las variables correlacionadas, se seleccionó solo la pendiente, que es la variable menos correlacionada con las otras 4 variables. La correlación entre las variables restantes fue menor al 65%. Así, se seleccionaron cinco variables para realizar el análisis de componentes principales: pendiente, aspecto, curvatura en planta y de perfil y TPI.

Figura 9. Matriz de correlación de las ocho variables topográficas obtenidas.



En el análisis de componentes principales, el primer componente explicó el 63,9% de la varianza total y el segundo componente el 21,2%, explicando entre ambos el 85,1% de la variabilidad total de los datos topográficos. Las variables aspecto, curvatura en planta y curvatura de perfil presentaron el mayor aporte a los dos componentes principales. El vector generado por el aspecto es casi ortogonal a los vectores generados por las curvaturas, evidenciando baja correlación entre estas tres variables. Las variables pendiente y TPI fueron descartadas por su alta correlación con la curvatura de perfil y el menor aporte a los dos primeros componentes principales. Así, se seleccionaron el aspecto, la curvatura en planta y del perfil para relacionar la topografía con el índice de sitio (Figura 10).

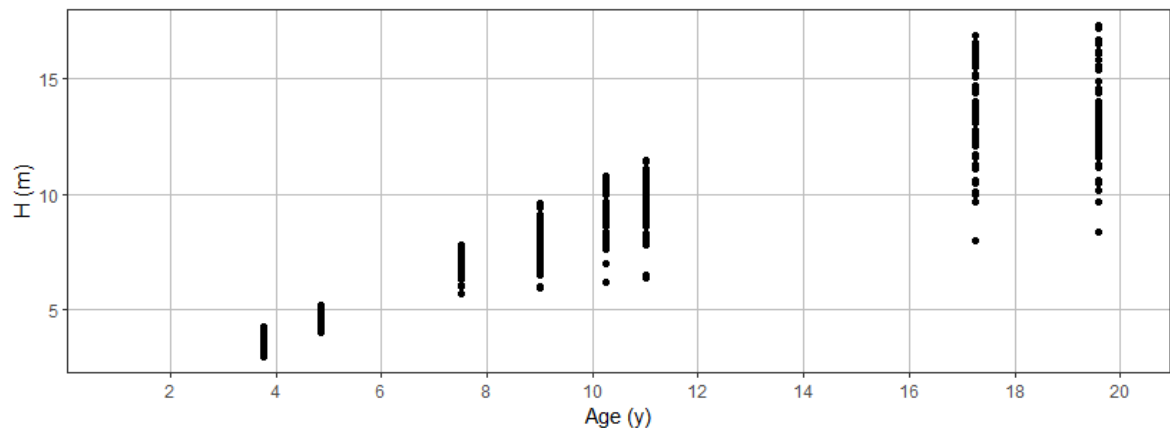
Figura 10. Análisis de componentes principales para las cinco variables topográficas y su contribución (cos2).



#### 4.4. AJUSTE DE ECUACIONES DE ÍNDICE DE SITIO

El conjunto de 478 mediciones de alturas de los árboles dominantes se presenta en la figura 11. Se observa que la variabilidad de las alturas dominantes aumentó con la edad.

Figura 11. Dispersión de alturas dominantes por medición en 30 parcelas de *R. rospigliosii*.



Los modelos de Bertalanffy y Schumacher ajustados mediante MMNLGB se presentan en la figura 12. Ambos modelos presentaron un alto ajuste al conjunto de datos ( $R^2 > 98\%$ ) y un error cuadrático medio reducido ( $< 0,40$ ). No obstante, el modelo de Bertalanffy evidencia un mejor desempeño respecto al modelo de Schumacher debido a los valores más bajos en los parámetros LOOIC y WAIC. Los parámetros de comparación de ambos modelos se presentan en la tabla 3. Adicionalmente, la revisión visual del ajuste de ambos modelos muestra que el modelo de Schumacher tiende a subestimar las alturas dominantes en los primeros años y sobreestimarlas después de los 18 años. Por ello, se seleccionó el modelo de Bertalanffy como el más adecuado para la estimación de la altura de los árboles dominantes de *R. rospigliosii* (Ecuación 4).

$$Hd = 17,21[1 - \exp(-0,09t)]^{1,27} \quad [4]$$

Los modelos señalados han sido con frecuencia comparados en su desempeño para la estimación de la altura dominante. Torres y del Valle (2007) ajustaron dichos modelos para estimar la altura dominante de *Acacia mangium* en Colombia, encontrando un ajuste levemente superior con el modelo de Bertalanffy. Torres et al. (2012) reportaron resultados similares en la modelación de la altura dominante de Teca en Colombia, encontrando un ajuste levemente superior con el modelo de

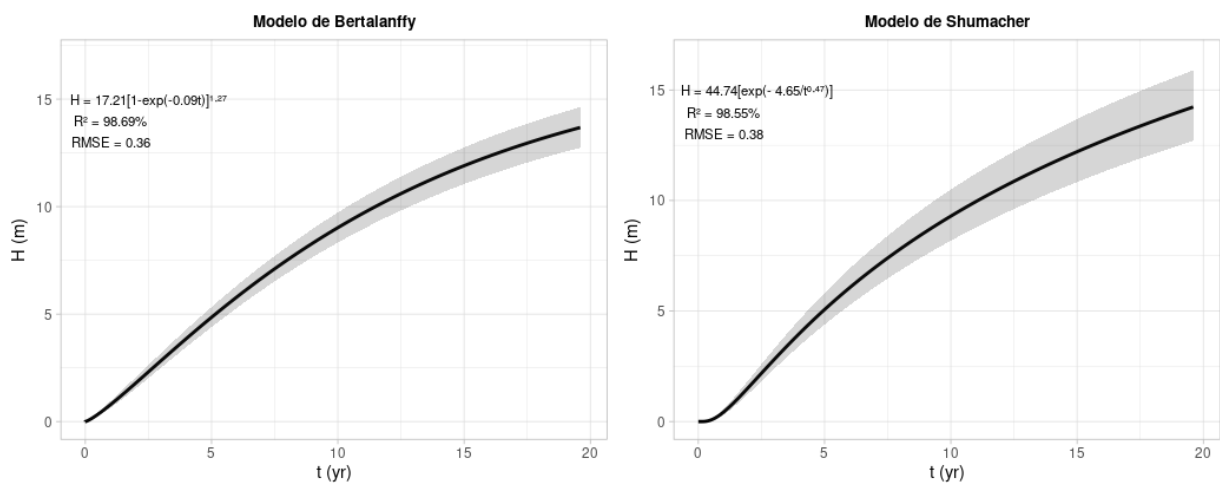
Schumacher en este caso. Garcia-Espinoza et al. (2019) encontraron que ambos modelos se ajustaban adecuadamente para la estimación de la altura dominante de *Pinus pseudostrobus* en España ( $R^2 > 98\%$ ) pero eligieron el modelo de Bertalanffy por presentar un RMSE más bajo. Estos resultados evidencian que ambos modelos pueden alcanzar ajustes adecuados para la estimación de la altura dominante como sucede en este estudio.

Tabla 3. Resultados de los parámetros de comparación de los modelos ajustados.

Modelo/Parámetro	Bertalanffy	Schumacher
LOOIC <sup>a</sup>	734,373	777,776
WAIC <sup>a</sup>	729,041	771,821
R <sup>2</sup>	98,69%	98,55%
RMSE	0,36	0,38

<sup>a</sup> Un valor más bajo evidencia un mejor ajuste del modelo.

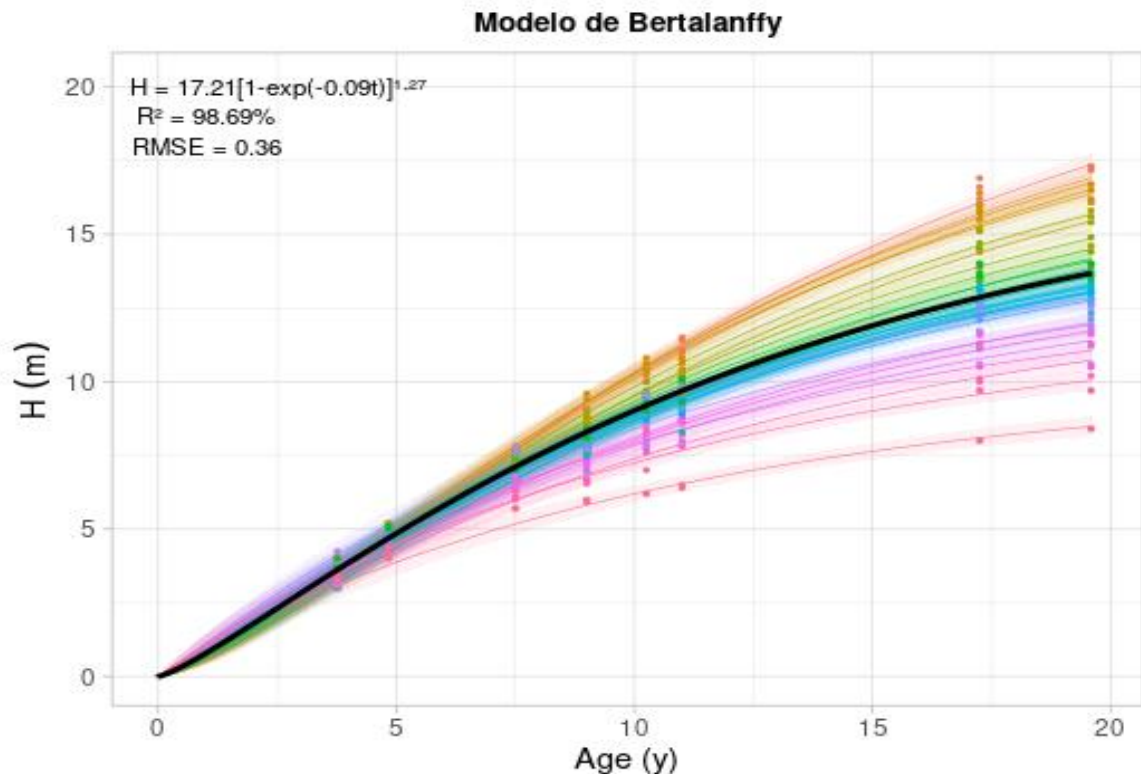
Figura 12. Modelos ajustados para la estimación de las alturas dominantes de *R. rospigliosii*.



La ecuación de Bertalanffy es ampliamente reconocida en la modelación del crecimiento biológico. Su utilidad se debe a características como el inicio desde el punto cero, una tendencia de rápido crecimiento en edades tempranas, un punto de inflexión donde el ritmo de crecimiento se desacelera y la inclusión de una asíntota que refleja el máximo crecimiento que puede alcanzar un individuo (Scolforo et al., 2013). Así, esta ecuación ha sido utilizada en la estimación de la altura de árboles dominantes de *Eucalyptus* (Crechi et al., 2011; Scolforo et al., 2013; Scolforo et al., 2020), *Tectona grandis* (Orrego et al., 2021), *Gmelina arborea* (Barrios et al., 2021), *Acacia mangium* (Torres & Del Valle, 2007), entre otros.

Mediante la ecuación 4 se generaron modelos de altura dominante para cada una de las 30 parcelas utilizando los parámetros aleatorios resultantes de la modelación inicial y que se representan en la Figura 13. En esta figura se presentan las parcelas con crecimiento inferior al promedio en tonos rosados, cercanas al promedio en tonos de azul y por encima del promedio en tonos naranjas. Las curvas generadas cubren el rango de alturas observadas, alcanzando a los 19 años el valor máximo descrito por la asíntota de la ecuación. Lo anterior es importante, pues asegura que no existirán sobreestimaciones de los individuos dominantes que se encuentran en los sitios más productivos. Incluso, se puede observar que los modelos generados subestiman levemente las alturas dominantes superiores observadas a los 17 años. Esta tendencia también había sido descrita en la modelación de alturas dominantes de *Pseudotsuga menziesii* en Portugal, donde se subestimaron en pequeña medida las alturas dominantes en sitios de alta productividad en edades avanzadas, atribuyéndose a una subestimación de la asíntota por la ausencia de datos de altura dominantes a más largo plazo (Fontes, 2003).

Figura 13. Modelos ajustados por parcela para la estimación de alturas dominantes en *R. rospigliosii*.



Las curvas de crecimiento observadas por parcela exhiben un comportamiento generalmente anamórficas. Actualmente, existe discusión sobre el uso de curvas anamórficas o polimórficas en la modelación del índice de sitio. Para diversos autores, el uso de curvas polimórficas permite exhibir de mejor manera el efecto de condiciones locales en el crecimiento (Zhu et al., 2019; Scolforo et al., 2020; Koirala et al., 2021). Sin embargo, la generación de curvas de crecimiento polimórficas utilizando parámetros aleatorios (en el caso del presente estudio aleatorizando por parcela) puede generar igualmente curvas de tendencia anamórfica (Weiskittel et al., 2011). Así, diversos autores han basado la elección del tipo de curva de crecimiento en las que se ajusten de mejor manera al comportamiento de los datos utilizados para la modelación. Por ejemplo, Torres et al. (2012) definieron curvas de crecimiento anamórficas para la altura de *Tectona grandis* en Colombia, pues representaba de mejor manera el ritmo de crecimiento observado en su estudio. Resultados similares fueron reportados para *Acacia mangium* (Torres & Del Valle, 2007), *Cedrela odorata* (García et al., 2021), *Eucalyptus grandis* (Crechi et al., 2011; Retslaff et al., 2015), entre otros. Por lo tanto, se definió utilizar el enfoque de curvas anamórficas para la construcción de las curvas de índice de sitio para *R. rospigliosii*, tomando como base la ecuación que describe la altura dominante a la edad de referencia (18 años), como predictora del índice de sitio (ecuación 5).

$$IS = 17,21[1 - \exp(-0,09(18))]^{1,27} \quad [5]$$

El parámetro A (ecuación 1) fue despejado en las ecuaciones 4 y 5 e igualando se obtuvo la ecuación 6, donde el índice de sitio se predice en función de la altura dominante del rodal en una edad particular (t). Mediante esta ecuación se calculó el índice de sitio para cada parcela muestreada, se promedió para la plantación y se generaron las clases de índice de sitio considerando  $\pm 2$  desviaciones estándar alrededor del promedio. Las curvas de índice de sitio generadas pueden observarse en la figura 14, y los promedios, mínimos y máximos por clase de índice de sitio se muestran en la tabla 4.

$$IS = Hd \left[ \frac{1 - \exp(-0,09(18))}{1 - \exp(-0,09t)} \right]^{1,27} \quad [6]$$



Tabla 4. Promedios, mínimos y máximos por clase de índice de sitio (m) de *R. rospigliosii*.

Clase de sitio	Índice de sitio (m) <sup>a</sup>		
	Mínimo	Promedio	Máximo
1	14,17	15,40	16,64
2	11,70	12,94	14,17
3	9,24	10,47	11,70

<sup>a</sup> índice de sitio con edad de referencia de 18 años.

Figura 14. Curvas de índice de sitio generados para *R. rospigliosii*.

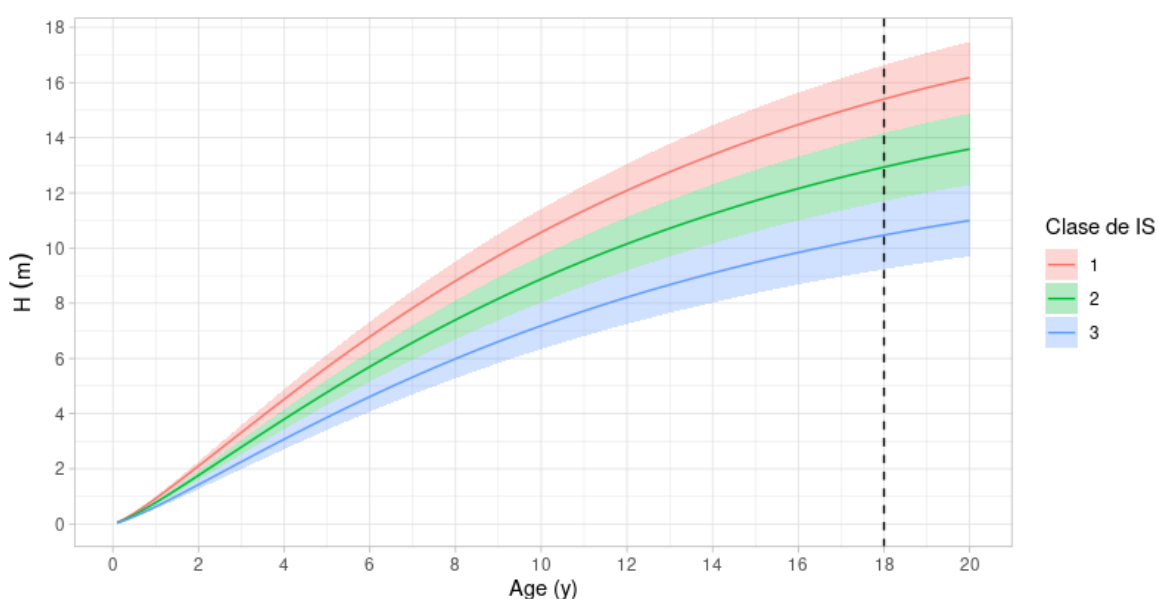


Tabla 5. Porcentaje de parcelas por clase de índice de sitio (m) de *R. rospigliosii*.

Clase de índice de sitio*	Parcelas	
	Número	Porcentaje
1	6	20 %
2	21	70 %
3	3	10 %

\* índice de sitio con edad de referencia de 18 años.

Las clases de índice de sitio generadas para *R. rospigliosii* describen un rango que va desde los 9,24 m hasta los 16,64 m de altura y un promedio de 12,94 m con una edad base de 18 años. El 70% de las parcelas se clasificaron en la clase de índice de sitio promedio (clase 2), solo el 20% de las parcelas se encontraron en la clase de índice de sitio 1 y el 10% de las parcelas estuvo en la clase 3 (ver tabla 5). Así,

el rango más recurrente de índice de sitio para la especie está entre los 11 y 14 m a los 18 años de edad.

Estos valores de índice de sitio contrastan con los valores de altura total reportados para la especie en condiciones naturales, donde alcanzan más de 30 m (Marin, 1998). Aunque esta comparación debe ser cuidadosa pues no se cuenta con una edad base de comparación, muestra la tendencia general de las especies nativas de reducir su crecimiento cuando se establecen en plantaciones puras. Resultados similares se evidenciaron en *Cordia alliodora* en un ensayo de comparación de índices de sitio realizado en Panamá y Costa Rica entre plantaciones puras y sistemas agroforestales, donde las plantaciones puras se clasificaron en las clases de índice de sitio medias y bajas, con alturas entre 14 y 17 metros a los cinco años, en comparación a alturas mayores a 24 m en sistemas agroforestales con la misma edad (Somarriba et al., 2001). La misma tendencia se encontró para plantaciones puras de *Cedrela odorata* en México, donde el índice de sitio varió entre los 14 y 20 m de altura a una edad de 25 años (García et al., 2021) y para plantaciones de *Samanea saman* en Costa Rica, donde el índice de sitio varió entre los 9 y 18 m a los 15 años (Mora-Chacón et al., 2022).

Por otro lado, el rango de índice de sitio de *R. rospigliosii* es considerablemente inferior al reportado para otras especies utilizadas en reforestación comercial en la zona andina colombiana. Uribe (1997) reportó para plantaciones de *Pinus patula* establecidas en esta región un rango de índice de sitio que va de 14 a 30 m de altura a los 15 años de edad. Otras especies utilizadas, aunque no tienen estudios de índice de sitio para esta zona en particular, cuentan con resultados publicados para otras regiones. En Guatemala, el índice de sitio para *Pinus maximinoi* abarca un rango desde los 8,33 hasta los 29,46 m de altura a los 18 años de edad. Estos resultados evidencian que los valores de índice de sitio para *R. rospigliosii* son deficientes en comparación con otras especies de coníferas plantadas comercialmente en la zona andina colombiana, ya que estas generalmente duplican, o hasta triplican, su crecimiento en altura en menor tiempo.

#### **4.5. RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE SITIO Y VARIABLES TOPOGRÁFICAS**

El modelo utilizado para establecer la relación entre el índice de sitio y las variables topográficas seleccionadas (aspecto, curvatura en planta y del perfil) siguió la estructura de la ecuación 7. El modelo generado puede observarse en la ecuación 8.

$$IS = \text{Aspecto} \times \text{Curvatura en planta} \times \text{Curvatura del perfil} \quad [7]$$

$$IS = 0,06(\text{Aspecto}) \times -8,36(\text{Curvatura en planta}) \times 5,21(\text{Curvatura del perfil}) \quad [8]$$

El modelo generado explica un 86,4% de la variabilidad del índice de sitio ( $R^2$ ) y puede considerarse como significativo por su valor  $p < 0.001$ . El análisis de varianza generado para el modelo evidenció que las tres variables generan diferencias altamente significativas en el índice de sitio ( $p < 0,001$ , tabla 6). Lo anterior nos permite concluir que el aspecto, la curvatura del perfil y la curvatura en planta influyen significativamente en el índice de sitio. Adicionalmente, se evidencia que las interacciones entre las variables no son significativas ( $p > 0,05$ ), debido probablemente a que los valores de una variable no son influenciados por los valores de las variables restantes. Esto coincide con lo encontrado en el análisis de componentes principales (ver figura 10), donde se evidenció por la disposición de los vectores de las variables (disposición ortogonal) que se encontraban poco correlacionadas entre sí.

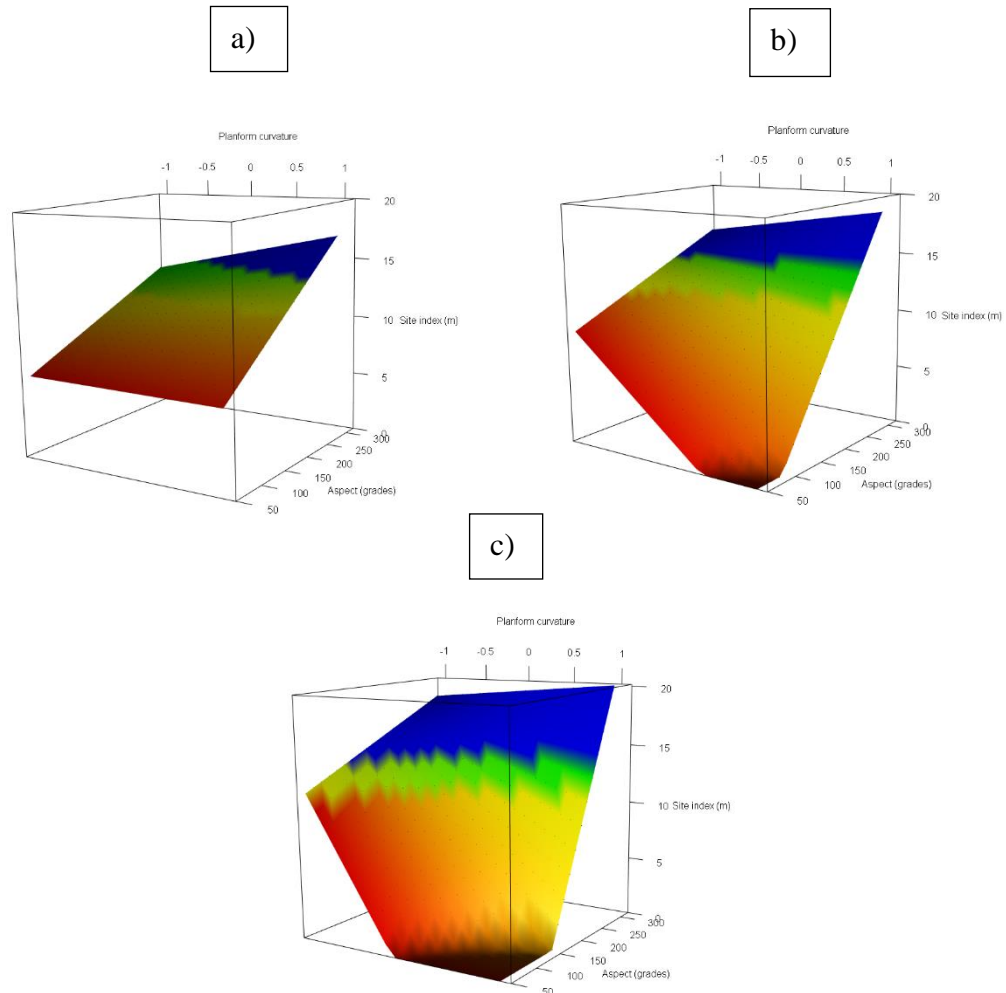
Tabla 6. Resumen del análisis de varianza generado para el modelo que tiene índice de sitio como respuesta.

Predictor	Gl <sup>a</sup>	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Probabilidad de F
Aspecto	1	2881,84	2881,84	117,83	<0,001
Curvatura en planta	1	555,66	555,66	22,72	<0,001
Curvatura del perfil	1	779,06	779,06	31,85	<0,001
Aspecto * Curvatura en planta	1	38,94	38,94	1,59	0,340
Aspecto * Curvatura del perfil	1	23,23	23,23	0,95	0,220
Curvatura del perfil * Curvatura en planta	1	19,81	19,81	0,81	0,378
(Aspecto * Curvatura en planta) * Curvatura del perfil	1	6,85	6,85	0,28	0,602
Residuos	22	538,05	24,46		

<sup>a</sup> Grados de libertad

Con el modelo se generaron las predicciones necesarias para representar gráficamente el efecto de las variables topográficas en el índice de sitio. La representación generó 3 gráficas tridimensionales que utilizan como variables el índice de sitio (y), el aspecto (x) y la curvatura planimétrica (z) y mantienen constante las 3 posibles curvaturas de perfil (1, 0 y -1). El color rojo representa las estimaciones dentro de la clase de sitio 3 o inferiores, el color verde las estimaciones dentro de la clase de sitio 2 y el color azul las estimaciones dentro de la clase de sitio 1 o superiores (Figura 15).

Figura 15. Índice de sitio de *R. rospigliosii* estimado a través de variables topográficas. a) Curvatura de perfil cóncava. b) Curvatura de perfil recta. c) Curvatura de perfil convexa.



En la figura 15 se observa que las zonas con aspectos entre los 200° y 315° aproximadamente o de dirección oeste predominante, favorecen el crecimiento de *R. rospigliosii*, mientras que zonas con aspectos entre los 50° y 150° aproximadamente o de dirección este predominante, restringen su crecimiento. En cuanto a las curvaturas, la especie exhibe un mejor crecimiento en zonas con curvaturas de perfil convexas y curvaturas en planta lateralmente convexas, siempre y cuando se encuentren en el rango adecuado de aspecto. Finalmente, en las zonas donde el aspecto restringe el crecimiento de la especie, las zonas lateralmente cóncavas presentan un crecimiento levemente superior a las zonas lateralmente convexas, pero aun así no adecuado.

Estos resultados muestran que las variables topográficas (curvatura en planta y del perfil y el aspecto) explican gran parte de la variabilidad (86%) del índice de sitio en *R. rospigliosii* en la zona andina colombiana. Estos resultados concuerdan con los resultados reportados por Tschinkel (1972), donde las variables topográficas (curvaturas y pendiente) explicaron al menos el 72% de la variabilidad del índice de sitio de *Cupressus lusitanica* en Antioquia. Resultados similares se reportaron para *Picea abies* y *Pinus sylvestris* en Noruega, cuyo índice de sitio fue explicado por un conjunto de variables topográficas y ambientales que incluyeron el aspecto y la pendiente en un 86% y 72%, respectivamente (Sharma et al., 2012). En Polonia, la variación del índice de sitio de *Picea abies* fue explicada en un 79% por la elevación, la pendiente y el aspecto (Socha, 2008). Estos resultados señalan como la topografía explica en gran medida el crecimiento de las especies forestales.

Ahora bien, el aspecto cobra gran relevancia en la predicción del índice de sitio de *R. rospigliosii*, evidenciando un mejor crecimiento en zonas con aspecto en dirección oeste en contraste a las zonas con aspecto en dirección este. Este contraste está vinculado al hecho de que en el trópico las zonas con aspecto en dirección este reciben una mayor radiación solar en comparación a las zonas con dirección oeste (Ortiz-Pulido & Pavón, 2010). Este fenómeno se acentúa en zonas con altas precipitaciones, donde la radiación solar se presenta mayoritariamente en las horas de la mañana (Bunyan et al., 2015), como en el área de estudio. Así, *R. rospigliosii* tiene un crecimiento óptimo en zonas con menor radiación solar. Esta especie aparece generalmente en bosques montanos bajos donde la presencia de nubosidad es habitual (Marín, 1998; Mill, 2016), siendo esta presencia un requerimiento para la especie (Cueva et al., 2013). Adicionalmente, las estructuras foliares de las podocarpáceas a diferencia de otras coníferas, están relacionadas con una estrategia de resistencia a la sombra, que es fundamental para su competencia y supervivencia en los sotobosques tropicales de dosel cerrado (Brodrribb, 2011; Schmiege et al., 2021). Sin embargo, estas adaptaciones foliares también involucran limitaciones para las podocarpáceas cuando se encuentra a plena exposición en los primeros años de crecimiento (Brodrribb, 2011). La principal limitación es generada por puntos de saturación de luz más bajos, que reducen su tasa fotosintética a plena exposición, ya que en condiciones naturales pocas veces se encuentran sometidas a altos niveles de radiación (Schmiege et al., 2021). Probablemente, el requerimiento de nubosidad constante y las limitaciones adaptativas de la especie expliquen el limitado crecimiento exhibido en zonas que reciben mayor radiación solar.

El aspecto se ha reportado como variable significativa en la predicción del índice de sitio para otras especies forestales. En China, se reportó que la tasa de crecimiento de *Betula platyphylla*, *Populus cathayana*, *Picea crassifolia* y *Larix principis-*

*rupprechtii* fue significativamente menor en zonas con exposición norte (Lin et al., 2021). Resultados similares fueron reportados para *Picea mariana* en Canadá (Laamrani et al., 2014) y *Cunninghamia lanceolata* en China, que presentaron mayor productividad en zonas con exposición sur (Zhu et al., 2019). Estos resultados descritos fueron todos obtenidos en el hemisferio norte, donde aspectos en direcciones norte y sur tiene influencia significativa en el microclima, especialmente en la humedad del suelo y la temperatura del aire (Fekedulegn et al., 2003). En estas zonas, el crecimiento de las especies forestales se ve estimulado en zonas con dirección sur al contar con mayor radiación solar, mejorando la calidad del sitio, en contraste a las zonas con dirección norte, que limitan el crecimiento por una menor radiación (Laamrani et al., 2014). Estos resultados, al igual que los del presente estudio, evidencian la influencia del aspecto en el crecimiento de muchas especies forestales.

Ahora bien, las curvaturas del relieve definen en gran medida el flujo del agua en el suelo, superficial y subterráneamente, influyendo así en el desarrollo del suelo, su textura, composición y la disponibilidad de nutrientes (Tschinkel, 1972; Pachepsky et al., 2001). En zonas con curvaturas de perfil rectilíneas y convexas el flujo del agua es acelerado (Pachepsky et al., 2001) (ver figura 3), favoreciendo una mayor erosión, que se acentúa en lugares donde se producen flujos de escorrentía turbulentos por altas precipitaciones (Sabzevari & Talebi, 2019). Por lo anterior, la tasa de deposición y concentración de sedimentos es más baja en zonas con curvaturas del perfil rectilíneas y convexas y mayor en zonas cóncavas (Talebi et al., 2016). Este fenómeno desencadena en una mayor fertilidad en zonas con curvaturas del perfil cóncavas en comparación a las convexas (Wood et al., 2006). La curvatura en planta determina principalmente la dirección del flujo del agua superficial y subterráneamente en el suelo. Zonas lateralmente convexas presentan flujos divergentes, que favorecen el flujo superficial del agua y mejor drenaje; por otro lado, zonas lateralmente cóncavas presentan flujos convergentes que favorecen la infiltración del agua y reducen la velocidad de drenaje (Talebi et al., 2016) (ver figura 3). Así, la mayoría de las especies forestales optimizan su crecimiento en zonas con curvaturas cóncavas, donde cuentan con una mayor disponibilidad de nutrientes y agua en el suelo. Por ejemplo, una combinación de las curvaturas fue significativa en la predicción del índice de sitio de *Cupressus lusitanica* en Antioquia, evidenciando un mejor crecimiento en zonas con curvatura cóncava (Tschinkel, 1972). De la misma manera, se reportó para *Picea crassifolia* y *Larix principis-rupprechtii* en China y para *Tectona grandis* en Laos, un mejor crecimiento en zonas con curvaturas cóncavas, en contraste a las zonas con curvatura convexa (Lin et al., 2021; Vongkhamho et al., 2022). Sin embargo, este no es el caso de *R. rospigliosii*.

En condiciones naturales, *R. rospigliosii* crece generalmente en zonas de baja fertilidad como se evidencia en sus adaptaciones para ser eficiente en la adquisición y uso de nutrientes (Marín, 1998; Dalling et al., 2011). Estas adaptaciones probablemente están vinculadas a la continua competencia que se presenta entre podocarpáceas y latifoliadas en los bosques montanos tropicales. En estos bosques, las podocarpáceas se ven limitadas en su crecimiento por las latifoliadas en zonas de alta productividad, donde las estructuras foliares de éstas alcanzan mayor tamaño y por ende una eficiencia fotosintética superior. No obstante, en entornos de baja productividad se reduce esta desventaja, pues la tasa de crecimiento de las latifoliadas se reduce favoreciendo una mayor adquisición de luz por las podocarpáceas y por ende un mayor crecimiento (Dalling et al., 2011). Estas condiciones han restringido las podocarpáceas a zonas de productividad marginal donde las latifoliadas no logran competir adecuadamente. Lo que probablemente ha favorecido el desarrollo de condiciones adaptativas diferentes en la adquisición de nutrientes para estas especies (Dalling et al., 2011). Lo anterior respalda los resultados aquí exhibidos, pues se evidenció un mejor crecimiento de la especie en zonas con curvaturas del perfil convexas, donde la fertilidad es reducida. De igual forma explica el hecho de que solo el 20% de las parcelas estén por encima del índice de sitio promedio, puesto que solo cerca del 15% de las parcelas se encontraron en zonas con curvaturas convexas o lateralmente convexas.

Los resultados demuestran que el óptimo crecimiento de *R. rospigliosii* en la plantación experimental solo se alcanzó en micrositos muy particulares y generalmente poco frecuentes. Esto concuerda con el hecho de que en bosques naturales la especie y otras podocarpáceas se encuentren dispersas, con distribución irregular y en bajas densidades en comparación con otras latifoliadas, evidenciando una alta especialización en la selección de su hábitat (Dalling et al., 2011), no solo por sus requerimientos lumínicos (Brodrigg, 2011), también en las características de los suelos donde se encuentra (Marín, 1998). Esto supone una importante limitación para el establecimiento generalizado de la especie en plantaciones forestales. Además, el rango de índice de sitio encontrado para la especie (9,2 a 16,6 m) evidencia que su crecimiento en altura no compite respecto al de otras coníferas ampliamente usadas en la zona andina como *Pinus patula* y *Pinus maximinoi*, que alcanzan índices de sitio superiores a 30 m en 18 años o menos (Uribe, 1997; INAB, 2012). Lo anterior demuestra que *R. rospigliosii* no es una alternativa viable en proyectos de reforestación comercial a mediana y gran escala. No obstante, su capacidad para colonizar sitios de baja productividad y alcanzar un mejor crecimiento en zonas donde las latifoliadas se ven restringidas la convierte en una alternativa viable para su uso en proyectos de restauración ecológica o sistemas agroforestales de baja densidad en sitios con suelos infértiles o degradados. Estrategias similares se han ejecutado con éxito con otras especies nativas como *Cordia alliodora*, evidenciando un crecimiento favorable y superior en sistemas distintos a plantaciones de alta densidad (Somarriba et al., 2001) y pueden

ser la alternativa para garantizar el uso y conservación de la especie en la zona andina colombiana.



## 5. CONCLUSIONES

Se utilizaron con éxito técnicas de fotogrametría para la generación de un modelo de elevación digital de alta resolución (8,29 cm/píxel) y bajo error (< 2 cm en las tres dimensiones), lo que señala la utilidad de estas herramientas para la obtención de información topográfica de alta calidad.

El modelo de Bertalanffy se ajustó correctamente a los datos para la predicción de altura de los árboles dominantes de *R. rospigliosii*, alcanzando un valor de  $R^2$  de 98,66%. El rango de índice de sitio para *R. rospigliosii* en el lugar de plantación en la zona andina colombiana oscila entre los 9,24 y 16,64 m con edad base de 18 años y solo el 20% de las parcelas estuvo por encima de índice de sitio promedio. Estos resultados evidencian que la especie no logra competir adecuadamente en crecimiento con otras especies forestales plantadas comercialmente en la región, que pueden duplicar y hasta triplicar su crecimiento a los 18 años o menos.

Se relacionó la topografía con el crecimiento de *R. rospigliosii*, evidenciando que el aspecto, la curvatura en planta y la curvatura del perfil explican cerca del 86% de la variabilidad de su índice de sitio. El modelo generado exhibe que la especie solo alcanza un óptimo crecimiento en microsítios muy específicos que cuentan con aspecto en dirección oeste y con curvaturas convexas y lateralmente convexas. Estos microsítios son poco frecuentes, lo que se configura como un importante limitante para el establecimiento generalizado de plantaciones forestales con la especie en la región. Estos resultados desestiman la viabilidad del uso de la especie en proyectos de reforestación comercial a mediana y gran escala en la zona andina colombiana.

## 6. RECOMENDACIONES

Lastimosamente no se recomienda utilizar *R. rospigliosii* en proyectos de reforestación comercial, pues los resultados anteriormente expuestos demuestran las limitaciones presentes para el establecimiento de plantaciones forestales con la especie y su bajo rendimiento en comparación a otras especies forestales plantadas en la región andina colombiana.

Se recomienda adelantar investigaciones que permitan aprovechar a futuro las adaptaciones de *R. rospigliosii* a suelos infértiles en procesos de restauración ecológica o sistemas agroforestales.

Se sugiere impulsar la realización de estudios que relacionen la topografía con el crecimiento de otras especies forestales nativas de interés comercial en la zona andina colombiana, que aporten información sobre su viabilidad en la reforestación y mejoren el entendimiento de su ecología. Además, actualmente la deficiencia en el conocimiento de estas relaciones es bastante alta.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

ABDI, Hervé y WILLIAMS, Lynne. Principal component analysis. En: *WIREs Computational Statistics*, 2010. Vol. 2. Núm. 4. p. 433-459.

AGUDELO, Edgar. Generación de una metodología para la estimación del inventario forestal combinando fotogrametría aérea y terrestre en plantaciones de *Eucalyptus grandis*. Trabajo de investigación maestría en teledetección. Universidad Católica de Manizales, 2020. 64 p.

ALBERT, Matthias y SCHMIDT, Matthias. Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). En: *Forest Ecology and Management*, 2010. Vol. 259. Núm. 4. p. 739-749.

AMATULLI, Giuseppe; DOMISCH, Sami; TUANMU, Mao-Ning; PARMENTIER, Benoit; RANIPETA, Ajay; MALCZYK, Jeremy y JETZ, Walter. A suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling. En: *Scientific Data*, 2018. Vol. 5. Núm. 1. p. 1-15.

AMUNDSON, Ronald; HARDEN, Jennifer y SINGER, Michael. Factors of soil formation: A fiftieth anniversary retrospective. En: *Wiley Online Library*, 1994. Vol. 33.

BARRIOS, Alonso; LÓPEZ AGUIRRE, Ana y BÁEZ APARICIO, Camila. Modelamiento de la productividad de *Gmelina arborea* Roxb. Con base en variables biofísicas y de rodal. En: *Colombia Forestal*, 2021. Vol. 24. Núm. 1. p. 71-87.

BATES, Douglas; MÄCHLER, Martin; BOLKER, Ben y WALKER, Steve. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. En: *Journal of Statistical Software*, 2015. Vol. 67. p. 1-48.

BEECH, Emily; RIVERS, Malin; OLDFIELD, S. y SMITH, Paul. Global Tree Search: The first complete global database of tree species and country distributions. En: *Journal of Sustainable Forestry*, 2017 Vol. 36. Núm. 5. p. 454-489.

BEGON, Michael; HOWARTH, Robert y TOWNSEND, Colin. *Essentials of ecology*. En: Wiley Global Education. Hoboken, 2014.

BETTINGER, Pete. *Forest management and planning*. En: Elsevier/AP. Amsterdam, 2009. 339 p. ISBN 978-0-12-374304-6.

BRODRIBB, Timothy. A functional analysis of podocarp ecology. En: *Ecology of the Podocarpaceae in Tropical Forests*, 2011. 9 p.

BUCKLEY, Aileen. Understanding curvature rasters. *ArcGIS Blog*. 2010. Disponible en: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/understanding-curvature-rasters/>

BUNYAN, Milind; BARDHAN; Sougata; SINGH, Aditya y JOSE, Shibu. Effect of Topography on the Distribution of Tropical Montane Forest Fragments: A Predictive Modelling Approach. En: *Journal of Tropical Forest Science*, 2015. Vol. 27. Núm. 1. p. 30-38.

BURGOS, Víctor y SALCEDO, Ana Paula. Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información. En: *Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina, 2014. Vol. 1. Núm. 10.

BURKHART, Harold y TOMÉ, Margarita. Modeling Forest Trees and Stands. En: Springer Netherlands, 2012. ISBN 978-94-007-1597-4.

BÜRKNER, Paul-Christian. brms: An R package for Bayesian multilevel models using Stan. En: *Journal of statistical software*, 2017. Vol. 80. p. 1-28.

CARDENAS, Luis Mario. Biomasa y crecimiento de especies forestales nativas. Revisión de Información Disponible para Colombia. En: Fundación Natura. Bogotá DC Colombia, 2014. 60 p.

CASELLA, Elisa; DRECHSEL, Jan; WINTER, Christian; BENNINGHOFF, Markus y ROVERE, Alessio. Accuracy of sand beach topography surveying by drones and photogrammetry. En: *Geo-Marine Letters*, 2020. Vol. 40. Núm. 2. p. 255-268.

CORREA MUÑOZ, Nixon. Método para la caracterización de las formas del terreno en zonas de montaña utilizando Modelos Digitales de Elevación. Caso: Departamento del Cauca. Trabajo de grado Maestría en geomática. Universidad Nacional de Colombia, 2013. 145 p.

CRAVEN, Dylan; WEIGELT, Patrick; WOLKIS, Dustin y KREFT, Holger. Niche properties constrain occupancy but not abundance patterns of native and alien woody species across Hawaiian forests. En: *Journal of Vegetation Science*, 2021. Vol. 32. Núm. 3.

CRECHI, Ernesto; FASSOLA, Hugo; KELLER, Aldo y BARTH, Sara. R. Desarrollo de funciones de índice de sitio para *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia argentina. En: *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 2011. Vol. 37. Núm. 3. p. 238-248.

CUEVA, Nixon y TRUJILLO, Enrique. Biología reproductiva del pino romerón *Retrophyllum rospigliosii* (Pilger) C.N. Page. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF)–Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR)–

Colegio Integrado Nacional Oriente de Caldas (CINOC). Pensilvania (Caldas), 2010. 46 p.

CUEVA, Nixon; VÉLEZ, Diego; BARRIOS, Alonso y NIETO, Víctor. Pino romerón [*Retrophyllum rospigliosii* (Pilger) C.N. Page], especie nativa potencial para la reforestación en zonas altoandinas de Colombia. 1 ed. Bogotá D.C.: Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF)–Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR)–Colegio Integrado Nacional Oriente de Caldas (CINOC), 2013. 47 p. ISBN 978-958-99597-3-2.

DALLING, James; BARKAN, Phoebe; BELLINGHAM, Peter; HEALEY, John y TANNER, Edmund. Ecology and Distribution of Neotropical Podocarpaceae. En: Ecology of the Podocarpaceae in tropical forests. Smithsonian Contributions to Botany. 2011. Núm. 95. p. 43–56.

DE REU, Jeroen; BOURGEOIS, Jean; BATS, Machteld; ZWERTVAEGHER, Ann; GELORINI, Vanessa; DE SMEDT, Philippe; CHU, Wei; ANTROP, Marc; DE MAEYER, Philippe; FINKE, Peter; VAN MEIRVENNE, Marc; VERNIERS, Jacques y CROMBÉ, Philippe. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. En: Geomorphology, 2013. Vol. 186. p. 39-49.

DEL VALLE ARANGO, Jorge. Crecimiento y rendimiento de *Cupressus lusitanica* Mill. En Antioquía, Colombia, utilizando parcelas permanentes. 1975. 138 p.

EVANS, Jeffrey. SpatialEco. R package version 1.3-6. [R package raster version 3.6-13]. 2021.

Food and Agriculture Organization FAO y United Nations Environment Programme UNEP. El estado de los bosques del mundo 2020: Los bosques, la biodiversidad y las personas. Roma, Italia, 2020. 224 p.

FELICÍSIMO, Ángel. Modelos digitales del terreno. Pentalfa Oviedo, 1994.

FEKEDULEGN, Desta; HICKS, Ray y COLBERT, Jim. Influence of topographic aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an Appalachian watershed. En: Forest Ecology and Management, 2003. Vol. 177. Núm. 1. p. 409-425.

FONTES, Luis. Modelling dominant height growth of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in Portugal. En: Forestry, 2003. Vol. 76. Núm. 5. p. 509-523.

GARCÍA, Xavier; TOLEDO, Carlos; HERNÁNDEZ, Jonathan; MENDOZA, Juan y HERNÁNDEZ, Adrián. Índice de sitio para plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en Quintana Roo, México. En: Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 2021. Vol. 12. Núm. 64.

GARCÍA-ESPINOZA, Guadalupe; AGUIRRE-CALDERÓN, Oscar; Quiñonez-Barraza, Gerónimo; ALANÍS-RODRÍGUEZ, Eduardo; GONZÁLEZ-TAGLE, Marco y GARCÍA-MAGAÑA, Jesús. Local-global and fixed-random parameters to model dominant height growth of *Pinus pseudostrobus* Lindley. En: Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente, 2019. Vol. 25. Núm. 1.

GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, Miguel y DIÉGUEZ-ARANDA, Ulises. Exploring the use of learning techniques for relating the site index of radiata pine stands with climate, soil and physiography. En: Forest Ecology and Management, 2020. Vol. 458.

GREGORIE, Timothy. Generalized error structure for forestry yield models. En: Forest Science, 1987. Vol. 33. Núm. 2. p. 423-444.

GUILLAUME, Annie; LEEMPOEL, Kevin; ROCHAT, Estelle; ROGIVUE, Aude; KASSER, Michel; GUGERLI, Felix; PARISOD, Christian y JOOST, Stéphane. Multiscale Very High-Resolution Topographic Models in Alpine Ecology: Pros and Cons of Airborne LiDAR and Drone-Based Stereo-Photogrammetry Technologies. En: Remote Sensing, 2021. Vol. 13. Núm. 8.

GUMEDE, Nokwanda; MUTANGA, Onesimo y SIBANDA, Mbulisi. Mapping leaf area index of the Yellowwood tree species in an Afromontane mistbelt forest of southern Africa using topographic variables. En: Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2022. Vol. 27.

HENAO CAMELO, Sergio y GÓMEZ MURCIA, Víctor. Parametrización de las variables topográficas utilizando fotografía digital en un suelo degradado por erosión en el municipio de Mosquera Cundinamarca. Trabajo de grado ingeniería en topografía. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017. 116 p.

HIJMANS, Robert. Geographic Data Analysis and Modeling [*R package raster version 3.6-13*]. 2022.

HOLDRIDGE, Leslie. Ecología basada en zonas de vida. Agroamerica, 1987.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Cauca. IGAC, 2009. 556 p.

Instituto Nacional de Bosques. Crecimiento y Productividad de Plantaciones Forestales de Pino Candelillo. INAB, 2012. 24 p.

KERSHAW, John; DUCEY, Mark; BEERS, Thomas y HUSCH, Bertram. Forest mensuration. Ed 5. Wiley/Blackwell, 2017. 613 p.

KOIRALA, Anil; MONTES, Cristian y BULLOCK, Bronson. Modeling dominant height using stand and water balance variables for loblolly pine in the Western Gulf, US. En: Forest Ecology and Management, 2021. Vol. 479.

LAAMRANI, Ahmed; VALERIA, Osvaldo; BERGERON, Yves; FENTON, Nicole; CHENG, Li Zhen y ANYOMI, Kenneth. Effects of topography and thickness of organic layer on productivity of black spruce boreal forests of the Canadian Clay Belt region. En: Forest Ecology and Management, 2014. Vol. 330. p. 144-157.

LIN, Sha; LI, Ying; LI, Yuanhang; CHEN, Qi; WANG, Qionglin y HE, Kangning. (2021). Influence of tree size, local forest structure, topography, and soil resource availability on plantation growth in Qinghai Province, China. En: Ecological Indicators, 2021. Vol. 120.

MARÍN, Adriana. Ecología y silvicultura de las podocarpaceas andinas de Colombia. Medellín: Smurfit Cartón de Colombia S.A., 1998. ISBN 958-95169-1-2.

MILL, Robert. A MONOGRAPHIC REVISION OF RETROPHYLLUM (PODOCARPACEAE). En: Edinburgh Journal of Botany, 2016. Vol. 73. Núm. 2. p. 171-261.

MOHAMED, Adel; REICH, Robin; KHOSLA, Raj; AGUIRRE-BRAVO, C. y BRISEÑO, Martin. Influence of climatic conditions, topography and soil attributes on the spatial distribution of site productivity index of the species rich forests of Jalisco, Mexico. En: Journal of Forestry Research, 2014. Vol. 25. Núm. 1. p. 87-95.

MONSERUD, Robert. Comparison of Douglas-fir site index and height growth curves in the Pacific Northwest. En: Canadian Journal of Forest Research, 1985. Vol. 15. Núm. 4. p. 673-679.

MORA-CHACÓN, Fernando; MEZA-PICADO, Víctor; CHINCHILLA-MORA, Orlando y GUTIÉRREZ-LEITÓN, Milena. Curvas de altura dominante e índice de sitio locales para plantaciones de *Samanea saman* en Liberia, Guanacaste, Costa Rica. En: Revista de Ciencias Ambientales, 2022. Vol. 56. Núm. 2. p. 63-80.

MORENO, Luz; ANDRADE, GI y RUÍZ-CONTRERAS, L. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, DC, Colombia, 2016.

OKSANEN, Jari; BLANCHET, Guillaume; FRIENDLY, Michael; KINDT, Roeland; LEGENDRE, Pierre; MCGLINN, Daniel; MINCHIN, Peter; O'HARA, Rb; SIMPSON, Gavin; SOLYMOS, Peter; STEVENS, Mhh; SZÖCS, Eduard y WAGNER, Helene. Vegan community ecology package version 2.6-4. 2022.

ORREGO, Sergio; MONTES, Cristian; RESTREPO, Héctor; BULLOCK, Bronson y ZAPATA, Mauricio. Modeling height growth for teak plantations in Colombia using the reducible stochastic differential equation approach. En: Journal of Forestry Research, 2021. Vol. 32. Núm. 3. p. 1035-1045.

ORTIZ-PULIDO, Raúl y PAVÓN, Numa. Influence of slope orientation on sex ratio and size distribution in a dioecious plant *Bursera fagaroides* var. *Purpusii* (Brandeg.) McVaugh and Rzed. (Burseraceae). En: Plant Ecology, 2010. Vol. 208. Núm. 2. p. 271-277.

PACHEPSKY, Yakov; TIMLIN, Dennis y RAWLS, Walter. Soil water retention as related to topographic variables. En: Soil Science Society of America Journal, 2001. Vol. 65. Núm. 6. p. 1787-1795.

PALACIO, Facundo; APODACA, María y CRISCI, Jorge. Análisis multivariado para datos biológicos: Teoría y su aplicación utilizando el lenguaje R. 2020.

PORTILLO, Paul. R; CUEVA, Nixon; SIERRA, Juan y VÁSQUEZ, Ángela. Propiedades físico mecánicas del *Retrophyllum rospigliosii* (Pilger) CN Page de 22 años en dos sistemas de plantación en Colombia. En: Revista Forestal del Perú, 2019. Vol. 34. Núm. 1. p. 41-51.

PRODAN, Michail. Mensura forestal (Número 1). Agroamerica. 1997. ISBN 92-9039-304-1.

The Program on Forests PROFOR. Situación actual y potenciales de fomento de plantaciones forestales con fines comerciales en Colombia. Bogotá, Colombia, 2017.

QUAN LI, Xiu; AN CHEN, Z; TING ZHANG, L. y JIA, D. Construction and accuracy test of a 3D model of non-metric camera images using Agisoft PhotoScan. En: Procedia Environmental Sciences, 2016. Vol. 36. p. 184-190.

RAMÍREZ, Jorge; GÓMEZ, Alejandro; MARÍN, Adriana y DEL VALLE, Jorge. Crecimiento diamétrico de *Retrophyllum rospigliosii* en los Andes colombianos. XXV IUFRO Word Congress. Curitiba, State of Paraná, Brazil, 2019. 1 p.

RAMÍREZ, Jorge; MARÍN, Adriana; URREGO, John; CASTAÑO, Álvaro y OSPINA, Román. Efecto de la fertilización en el crecimiento de *Retrophyllum rospigliosii* de la zona andina colombiana. En: Madera y Bosques, 2021. Vol. 27. Núm. 3.

RENDÓN, José; VILLAMIL, Adriana y GÓMEZ, Ximena. Relaciones entre la geomorfometría y las propiedades físicas de los suelos de la zona central del humedal la Florida. En: Revista de Topografía AZIMUT, 2007. Vol. 1. p. 86-107.

RETSLAFF, Fabiane; FILHO, Alonso; DIAS, Andrea; BERNETT, Luiz y FIGURA, Marco. Site index curves and hypsometric relationship for *Eucalyptus grandis* plantations for the campos gerais region, Parana State. En: CERNE, 2015. Vol. 21. Núm. 2.



SABZEVARI, Touraj y TALEBI, Ali. Effect of hillslope topography on soil erosion and sediment yield using USLE model. En: *Acta Geophysica*, 2019. Vol. 67. Núm. 6. p. 1587-1597.

SCHMIEGE, Stephanie; BUCKLEY, Brendan; STEVENSON, Dennis; CUONG, Truong; NAM, Le Canh y GRIFFIN, Kevin. Contrasting physiological traits of shade tolerance in *Pinus* and *Podocarpaceae* native to a tropical Vietnamese forest: Insight from an aberrant flat-leaved pine. En: *Tree Physiology*, 2021. Vol. 41. Núm. 2. p. 223-239.

SCOLFORO, Henrique; MCTAGUE, John; BURKHART, Harold; ROISE, Joseph; ALVARES, Clayton y STAPE, José. Site index estimation for clonal eucalypt plantations in Brazil: A modeling approach refined by environmental variables. En: *Forest Ecology and Management*, 2020. Vol. 466.

SCOLFORO, José; MAESTRI, Romualdo; FERRAZ FILHO, Antonio; DE MELLO, José; DE OLIVEIRA, Antônio y DE ASSIS, Adriana. Dominant Height Model for Site Classification of *Eucalyptus grandis* Incorporating Climatic Variables. En: *International Journal of Forestry Research*, 2013.

SEIBERT, Jan; STENDAHL, Johan y SØRENSEN, Rasmus. Topographical influences on soil properties in boreal forests. En: *Geoderma*, 2007. Vol. 141. Núm. 1. p. 139-148.

SEWERNIAK, Piotr y PUCHAŁKA, Radosław. Topographically induced variation of microclimatic and soil conditions drives ground vegetation diversity in managed Scots pine stands on inland dunes. En: *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020. Vol. 291.

SHARMA, Ramp., BRUNNER, Andreas y EID, Tron. Site index prediction from site and climate variables for *Norway spruce* and *Scots pine* in Norway. En: *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012. Vol. 27. Núm. 7. p. 619-636.

SKOVSGAARD, Jens y VANCLAY, Jerome. Forest site productivity: A review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. En: *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2008. Vol. 81. Núm. 1. p. 13-31.

SOCHA, Jaroslaw. Effect of topography and geology on the site index of *Picea abies* in the West Carpathian, Poland. En: *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2008. Vol. 23. Núm. 3. p. 203-213.

SOMARRIBA, Eduardo; VALDIVIESO, R; VÁSQUEZ, William y GALLOWAY, Glenn. Survival, growth, timber productivity and site index of *Cordia alliodora* in forestry and agroforestry systems. En: *Agroforestry Systems*, 2001. Vol. 51. Núm. 2. p. 111-118.

STAMBAUGH, Michael y GUYETTE, Richard. Predicting spatio-temporal variability in fire return intervals using a topographic roughness index. En: *Forest Ecology and Management*, 2008. Vol. 254. Núm. 3. p. 463-473.

TALEBI, Ali; HAJIABOLGHASEMI, Rasoul; HADIAN, Mohamad y AMANIAN, Nosratollah. Physically based modelling of sheet erosion (detachment and deposition processes) in complex hillslopes. En: *Hydrological Processes*, 2016. Vol. 30. Núm. 12. p. 1968-1977.

TORRES, Danny. Modelación del Crecimiento y Producción en Volumen y Biomasa de la Teca. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín, 2004.

TORRES, Danny y DEL VALLE, Jorge. Growth and yield modelling of *Acacia mangium* in Colombia. En: *New Forests*, 2007. Vol. 34. Núm. 3. p. 293-305.

TORRES, Danny; DEL VALLE, Jorge y RESTREPO, Guillermo. Site index for teak in Colombia. En: *Journal of Forestry Research*, 2012. Vol. 23. Núm. 3. p. 405-411.

TSCHINKEL, Heinrich. La Clasificación de Sitios y el Crecimiento del Cupressus Lusitánica en Antioquia, Colombia. En: *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 1972. Vol. 27. Núm. 1. Art. 1.

URIBE, A. Modelación del crecimiento de *Pinus patula Schlecth et Cham* en la región Andina suroccidental colombiana. En: *Proceedings of the IUFRO Conference on Modelling Growth of Fast-Grown Tree Species*, Valdivia (Chile), 1997. p. 36-51.

VERDUGO CHAURA, Danilo. A. Ráster con R: esto va de filas, columnas, cotas y píxeles. 2022. 693 p.

VONGKHAMHO, Simone; IMAYA, Akihiro; YAMAMOTO, Kazukiyo; TAKENAKA, Chisato y YAMAMOTO, Hiroyuki. Influence of topographic conditions on teak growth performance in mountainous landscapes of Lao PDR. En: *Forests*, 2022. Vol. 13. Núm. 1. Art. 1.

WANG, Qian; WANG, Chun-Jing y WAN, Ji-Zhong. Relationships between topographic variation and plant functional trait distribution across different biomes. En: *Flora*, 2022. Vol. 293.

WEISKITTEL, Aaron; CROOKSTON, Nicholas y RADTKE, Philip. Linking climate, gross primary productivity, and site index across forests of the western United States. En: *Canadian Journal of Forest Research*, 2011. Vol. 41. Núm. 8. p. 1710-1721.

WOOD, Tana; LAWRENCE, Deborah y CLARK, Deborah. A. Determinants of Leaf Litter Nutrient Cycling in a Tropical Rain Forest: Soil Fertility Versus Topography. En: *Ecosystems*, 2006. Vol. 9. Núm. 5. p. 700-710.

ZHU, Guangyu; HU, Song; CHHIN, Sophan; ZHANG, Xiongqing y HE, Peng. Modelling site index of Chinese fir plantations using a random effects model across regional site types in Hunan province, China. En: *Forest Ecology and Management*, 2019. Vol. 446. p. 143-150.

## 8. ANEXOS

**Anexo 1:** Ortomosaico de la plantación experimental de *Retrophyllum rospigliosii*.



**Anexo 2:** Establecimiento de los puntos de control para la verificación de coordenadas.



### Anexo 3: Ejemplo de los parámetros del terreno en el área focal de la parcela 21.

