

POTENCIAL DENDROCRONOLÓGICO DE TRES ESPECIES DE
PODOCARPÁCEAS EN EL SUROCCIDENTE COLOMBIANO

PRESENTADO POR
MILTON JAVIER ESCOBAR CHIMBACO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA FORESTAL
POPAYÁN
2022

POTENCIAL DENDROCRONOLÓGICO DE TRES ESPECIES DE
PODOCARPÁCEAS EN EL SUROCCIDENTE COLOMBIANO

MILTON JAVIER ESCOBAR CHIMBACO

Trabajo de grado en la modalidad de investigación para optar el título de Ingeniero
Forestal

Director

Ph. D. JORGE ANDRÉS RAMIREZ CORREA

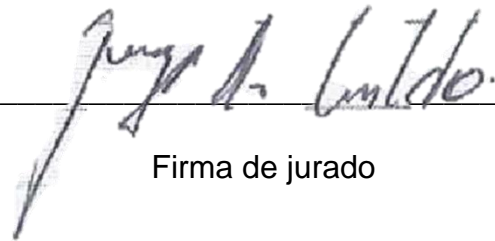
UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA FORESTAL
POPAYÁN
2022

Nota de aceptación

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

Ph. D. JORGE ANDRÉS RAMÍREZ CORREA
Director

Firma de jurado



Firma de jurado

DEDICATORIA

A mi familia, quien con su apoyo y motivación fueron un pilar importante para alcanzar esta nueva meta, en especial a mi madre "Leonor Escobar" quien es mi gran motivación y que con su comprensión incondicional y sacrificio consiguió que este logro fuera posible.

A mis hermanos que son mis dos apoyos en la vida y mis sobrinos que nunca dejaron de creer en mí y que son para mí otra de mis grandes motivaciones.

AGRADECIMIENTO

Expreso mis sinceros agradecimientos

A mi director Jorge Andrés Ramírez, por dirigirme, apoyarme y contar en este proceso y también, por darme la confianza para realizar esta investigación.

A Adriana Marín, líder de producción de Material Vegetal Forestal de la compañía Smurfit Kappa Cartón Colombia por la oportunidad de poder llevar a cabo este proceso en conjunto con la Universidad del Cauca.

También, a todo el personal humano de EFAGRAM (Empresa Forestal y Agroambiental) por todo el apoyo que nos brindaron en la fase del trabajo de campo, transporte y procesamiento de los materiales.

De igual manera a todos los profesores de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad, que de una u otra manera ayudaron a que este trabajo de grado se pudiera desarrollar de la mejor manera. Además, a mis compañeros que con sus experiencias y apoyo ayudaron al desarrollo de este trabajo de investigación y a mi formación personal.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
1. MARCO REFERENCIAL.....	17
1.1 MARCO HISTÓRICO.....	17
1.1.1 Historia de la dendrocronología.....	17
1.1.2 Desarrollo en zonas templadas.....	17
1.1.3 Desarrollo en zonas tropicales.....	18
1.1.4 Dendrocronología en podocarpaceas.....	19
1.2 MARCO TEÓRICO.....	20
1.2.1 Familia podocarpaceae.....	20
1.2.2 Principios básicos de la dendrocronología.....	21
1.2.3 Formación y anatomía de los anillos.....	22
1.2.4 Dendrocronología tropical y aplicaciones.....	23
2. METODOLOGÍA.....	25
2.1 ÁREA DE ESTUDIO Y MUESTREO DE ESPECIES.....	25
2.2 MONTAJE Y PULIDO DE LAS MUESTRAS.....	29
2.3 ANÁLISIS ANATÓMICO DE LOS ANILLOS.....	30
2.4 MEDICIÓN DE ANCHO DE ANILLOS.....	31

2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO	33
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
3.1 CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO	34
3.2. CRONOLOGÍAS DE ANCHO DE ANILLOS DE CRECIMIENTO	39
3.2.1. <i>Retrophyllum rospigliosii</i>	39
3.2.2. <i>Podocarpus oleifolius var macrostachyus</i>	45
3.2.3. <i>Prumnopitys harmsiana</i>	50
4. CONCLUSIONES	52
5. RECOMENDACIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	54
ANEXOS	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Generalidades de los sitios de muestreo y particularidades del muestreo.	27
Tabla 2. Estadísticas descriptivas para las 29 series de ancho de anillos de árboles de <i>Retrophyllum rospigliosii</i> al suroccidente colombiano.....	41
Tabla 3. Valores de correlación para las 29 series individuales estandarizadas cofechadas para <i>Retrophyllum rospigliosii</i>	43
Tabla 4. Estadísticas descriptivas de las 12 series de ancho de anillos de árboles de <i>Podocarpus oleifolius</i> en el suroccidente colombiano.....	47
Tabla 5. Valores de correlación para las 12 series individuales estandarizadas obtenidas para <i>Podocarpus oleifolius</i>	48

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Ubicación de la zona de estudio para las especies estudiadas: *Retrophyllum rospigliosii*, *Podocarpus oleifolius* y *Prumnopitys harmsiana*.26
- Figura 2. Clima-diagramas de los sitios de muestreo. Datos obtenidos de las estaciones: A. La Suecia (2004 a 2017), B. Aeropuerto Guillermo León Valencia (1941 a 2018), C. Paispamba (1971 a 1994).27
- Figura 3. Extracción de muestras: A. Sección transversal, B. Núcleos.28
- Figura 4. Sección transversal de *Retrophyllum rospigliosii* (A) y núcleos de *Podocarpus oleifolius* (B) y *Prumnopitys harmsiana* (C). Muestras previamente pulidas y preparadas para el análisis anatómico y medición de los anillos de crecimiento.29
- Figura 5. Microtomo utilizado para obtener los cortes del plano transversal de *Retrophyllum rospigliosii*, *Podocarpus oleifolius* y *Prumnopitys harmsiana*. Proceso desarrollado en el laboratorio de dendrocronología de la Universidad Nacional sede Medellín.30
- Figura 6. Metodología utilizada para la medición y consolidación de los anillos de crecimiento para las tres especies con la ayuda de un estereoscopio con lente de aumento de 4x.31
- Figura 7. Procesamiento de imágenes digitales en el software ImageJ para la creación de las series de ancho de anillos que posteriormente fueron utilizados como rwl (ring width list) en el software R.32
- Figura 8. Características macroscópicas de los anillos de crecimiento de (A) *Retrophyllum rospigliosii*, (B) *Podocarpus oleifolius* y (C) *Prumnopitys harmsiana* obtenidas de la cámara Leica MC170 HD con aumento de 4x. Las flechas negras indican el límite de un anillo de crecimiento.35
- Figura 9. Anatomía de los anillos de crecimiento tomados de los micro cortes de (A) *Retrophyllum rospigliosii*, (B) *Podocarpus oleifolius* y (C) *Prumnopitys harmsiana* obtenidas de la cámara Leica MC170 HD con aumento de 10x. Las flechas negras indican el límite de un anillo de crecimiento.35

Figura 10. Características microscópicas de la anatomía de la madera temprana (MT) y madera tardía (Mt) de los anillos de crecimiento obtenidos de los micro cortes de las muestras de <i>Retrophyllum rospigliosii</i> a 10x (A) y <i>Podocarpus oleifolius</i> a 40x (B).....	36
Figura 11. Detalles de la anatomía de los anillos de crecimiento en <i>Retrophyllum rospigliosii</i> con aumento de 4x. Las flechas negras indican el límite del anillo y la flecha blanca indica un anillo falso. Madera temprana (MT), madera tardía (Mt). .	37
Figura 12. Gráfico espagueti de las series de ancho de anillos de crecimiento de <i>Retrophyllum rospigliosii</i> para un periodo de 21 años.	40
Figura 13. Series de correlación por segmentos de 10 años superpuesto en 5 años obtenidos con el coeficiente de Pearson para la serie de anillos de <i>Retrophyllum rospigliosii</i>	42
Figura 14. Cronología construida de la media de los valores estandarizados de las 29 series para un periodo de 21 años para <i>Retrophyllum rospigliosii</i>	44
Figura 15. Gráfico espagueti de las series de ancho de anillos de crecimiento de <i>Podocarpus oleifolius</i> para un periodo de 22 años.	46
Figura 16. Series de correlación por segmentos de 10 años superpuestos en 5 años realizados con el método de Pearson para la serie de anillos de <i>Podocarpus oleifolius</i>	47
Figura 17. Cronología construida de la media de los valores estandarizados de las 12 series para un periodo de 22 años para <i>Podocarpus oleifolius</i>	49

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Estadísticos para las 29 series individuales creadas en el software estadístico R con la función summary para los datos de anchos de anillos de <i>Retrophyllum rospigliosii</i>	63
Anexo 2. Estadísticos de las 12 series individuales creadas en el software R-studio con la función summary para los datos de anchos de anillos de <i>Podocarpus oleifolius</i>	64

RESUMEN

Las Podocarpáceas son una familia de coníferas endémicas presente en los ecosistemas de alta montaña del suroccidente colombiano, sus árboles son comúnmente conocidos como pino romero, romerón, romerillo, chaquiro, pino macho, entre otros. En este trabajo se realizó la descripción macroscópica y microscópica de los anillos de crecimiento de la madera de tres especies de árboles de dicha familia: *Retrophyllum rospigliosii*, *Podocarpus oleifolius* var *macrostachyus* y *Prumnopitys harmsiana*. Se obtuvieron secciones transversales de la base del tronco de 30 árboles de *R. rospigliosii*, mientras que para *P. oleifolius* y *P. harmsiana* se extrajeron núcleos con barreno de incremento del tronco de 30 y 28 árboles respectivamente. Se midieron los anillos de crecimiento y se llevó a cabo la datación cruzada del ancho de los anillos medidos. En general, las características anatómicas de los anillos de crecimiento son similares para las tres especies, con una anatomía simple de traqueidas alineadas radialmente por tratarse de coníferas, las células están compuestas de lumen ancho y pared delgada que forman madera temprana y traqueidas de lumen aplanado y pared ancha demarcando la madera tardía. Por su parte, los anillos de crecimiento en las muestras de *P. harmsiana* fueron poco diferenciables con respecto a las otras dos especies. Después de un proceso de selección de las mejores muestras de las secciones transversales de *R. rospigliosii* se utilizaron 9 árboles para el cofechado, las cuales mostraron una intercorrelación promedio de 0,66 con el coeficiente de Pearson. El cofechado de las series de ancho de anillos de *P. oleifolius* var *macrostachyus* presentó una intercorrelación promedio de 0,54, mientras que *P. harmsiana* no fue posible concretar una serie de ancho de anillos de las muestras colectadas. Dichos resultados sugieren que la investigación dendrocronología con especies de podocarpáceas podría realizarse exitosamente con algunas especies de esta familia, siempre y cuando se utilicen secciones transversales del tronco completo y especímenes adecuados.

Palabras claves: datación cruzada, cofechado, dendrocronología, podocarpáceas, sección transversal, núcleos.

ABSTRACT

The Podocarpaceae are a family of endemic conifers present in the high mountain ecosystems of southwestern Colombia, their trees are known as *romero* pine, *romerón*, *romerillo*, *chaquiro*, *macho* pine, among others. In this work, the macroscopic and microscopic description of the growth rings of the wood of three species of trees of this family: *Retrophyllum rospigliosii*, *Podocarpus oleifolius* var *macrostachyus* and *Prumnopitys harmsiana*. Cross-sections of the base of the trunk of 30 *R. rospigliosii* trees were found, while for *P. oleifolius* and *P. harmsiana*, cores were obtained with trunk increment boring from 30 and 28 trees, respectively. Growth rings were measured and cross-dating of the width of the measured rings was carried out. In general, the anatomical characteristics of the growth rings are similar for the three species, with a simple anatomy of radially aligned tracheids because they are conifers, the cells are composed of wide lumen and thin wall that form early wood and tracheids with flattened lumen and wide wall demarcating the late wood. On the other hand, the growth rings in the *P. harmsiana* samples were not very distinguishable with respect to the other two species. After a selection process of the best samples of the cross sections of *R. rospigliosii*, 9 trees were used for cross-dating, which showed an average intercorrelation of 0.66 with the Pearson coefficient. The cross-dating of the ring width series of *P. oleifolius* var *macrostachyus* showed an average intercorrelation of 0.54, while for *P. harmsiana* it was not possible to specify a ring width series of the collected samples. These results suggest that dendrochronological research with podocarp species could be successful with some species of this family, as long as cross sections of the entire trunk and adequate specimens are used.

Keywords: cross-dating, dendrochronology, podocarpaceae, cross-section, cores.

INTRODUCCIÓN

Los anillos de crecimiento de los árboles guardan información medioambiental del pasado como la variación de la temperatura, precipitación y otros factores ambientales durante el tiempo en que los árboles crecen y desarrollan sus estructuras (Giraldo, 2012). La dendrocronología y la dendroclimatología son dos áreas de la ciencia que se dedican al estudio de la formación de los anillos (Worbes, 2004) y a la reconstrucción de los parámetros climáticos mediante la medición de los anillos de crecimiento de los árboles (Pucha-Cofrep et al., 2015; Björklund et al., 2020).

En zonas tropicales existen evidencias concretas de la formación de anillos de crecimiento en diversas especies, los cuales son sensibles a las características ambientales de la zona donde crecen (Rozendaal y Zuidema, 2011; Krepkowski et al., 2012; Giraldo y del Valle, 2021; Poussart et al., 2004; Worbes, 2002). Ello se ha evidenciado principalmente en los últimos 20 años gracias al importante número de investigaciones en esta zona del mundo, las cuales señalan que los anillos de crecimiento de especies de árboles tropicales permiten la datación cruzada y la elaboración de cronologías que permiten la reconstrucción del clima, en muchos casos más allá de los registros pre-instrumentales (Speer et al., 2004; Alvarez et al., 2012; Rozendaal y Zuidema, 2011; Brienen y Zuidema, 2005; Marcelo Peña et al., 2020).

Específicamente, en los bosques de alta montaña tropicales, hay también diversos estudios dendrocronológicos y un número importante de especies con formación de anillos de crecimiento, para los cuales su ancho se ha relacionado principalmente con la variación de la temperatura y la precipitación (Worbes y Fichtler, 2010; Bräuning et al., 2009; 2008). Por ejemplo, con la especie *Cedrela nebulosa* en los bosques de montaña de Perú, se logró crear una cronología de 133 años con anillos

de crecimiento que se correlacionó con la temperatura y precipitación de la zona (Layme-Huaman et al., 2018). Así mismo, con *Pinus taiwanensis* y *Pinus massoniana*, en las montañas Dabie en China, se determinó que la temperatura fue el factor clave para el crecimiento y la formación de los anillos de los árboles de dichas especies (Cai et al., 2020). También, en el altiplano boliviano se han establecido cronologías con anillos de árboles de *Polylepis tarapacana* en un rango entre 110 y 705 años de antigüedad, las cuales tienen el potencial de proporcionar una reconstrucción de la precipitación en periodos anuales en esta región de los Andes (Solíz et al., 2009).

Dentro de la diversidad de especies arbóreas de los ecosistemas de alta montaña de la región Andina esta la familia Podocarpaceae. La continua presión por el cambio del uso de la tierra en dichas zonas de los Andes tropicales ha disminuido drásticamente dichos ecosistemas y los individuos de esta familia. Dada la longevidad de los individuos de dicha familia, los procesos de deforestación podrían poner en riesgo no solo los individuos, sino también la posibilidad de realizar una reconstrucción del clima en dichas zonas con registros climáticos escasos y de mala calidad mediante los anillos de crecimiento de estos árboles.

Estudios sobre la anatomía de la madera y dendrocronológicos en especies de la familia Podocarpaceae han demostrado la existencia de anillos de crecimiento (Vásquez et al., 2010) así como también la posibilidad de desarrollar cronologías con series de anillos de árboles de estas especies, como lo fue para *Prumnopitys andina* en los bosques de montaña en la región andina Chilena, donde se realizaron cronologías de más de cien años de longitud (Álvarez et al., 2021). Además, hay diversos estudios dendrocronológicos alrededor del mundo sobre podocarpáceas que han mostrado resultados positivos para la reconstrucción del clima pasado. Algunos de estos estudios se han desarrollado en Sudáfrica (February y Stock, 1998), en México (Roig et al., 2005), Brasil (Locoseilli et al., 2015) y Ecuador (Bräuning et al., 2007).

En este trabajo de investigación nos enfocamos en evaluar el potencial dendrocronológico de tres especies de podocarpáceas localizadas al suroccidente colombiano: *Retrophyllum rospigliosii*, *Podocarpus oleifolius* y *Prumnopitys harmsiana*. Se espera que los resultados obtenidos permitan posteriormente desarrollar largas cronologías con las especies y la reconstrucción del clima de una zona con relevancia hidrológica para el país.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 MARCO HISTÓRICO

1.1.1 Historia de la dendrocronología. El análisis de los anillos de crecimiento de los árboles (dendrocronología) viene del griego: *dendros* = árbol; *chronos* = tiempo y *logos* = ciencia. Etimológicamente, es la ciencia de datar o fechar (determinar la edad) los árboles para analizar patrones temporales y espaciales (Póvoa de Mattos y Botosso, 2003). Tiene sus inicios en el siglo XVI, cuando Leonardo da Vinci reconoció la relación entre el ancho de los anillos y el clima (Worbes, 2004). Esta ciencia comenzó en Alemania a mediados del siglo XIX con Theodor y Robert Hartig, quienes postularon su teoría sobre la formación de anillos de árboles como consecuencia de la disminución de la temperatura en invierno en las zonas templadas (Tomazello et al., 2009). Posteriormente, a inicios del siglo XX, el astrónomo norteamericano Andrew Elliot Douglass observó la relación de las manchas solares y su efecto en el clima, particularmente en la precipitación. Precisamente fue Douglass quien desarrolló las técnicas de la dendrocronología, por lo que se le considera el padre de dicha ciencia (Douglass, 1946).

1.1.2 Desarrollo en zonas templadas. En 1937 se fundó el laboratorio de investigación de anillos de crecimiento (*Tree ring research lab*) en Tucson, Arizona (Estados Unidos), lo que impulsó la investigación dendrocronológica de las zonas templadas. Douglass elaboró, con los registros de anillos de árboles de *Pinus ponderosa* en las áreas secas de Arizona, las primeras cronologías de anillos de crecimiento, las cuales tuvieron una duración de más de quinientos años (Fritts, 1976). Posteriormente, Edmund Schulman estudiante de Douglass, desarrolló una cronología con pino Bristlecone (*Pinus longaeva*) de las montañas Blancas de Arizona que se extendió hasta el año 320 A.C. Dicha especie es el árbol vivo conocido

más longevo, con hasta 4767 años de vida (Schweingruber, 1988). Después, Harold Fritts, en 1976 introdujo métodos estadísticos para analizar señales climáticas como base para la reconstrucción del clima con los anillos de crecimiento de árboles, lo que se conoce como la dendroclimatología (Worbes, 2004). Además, con las especies *P. longeava* y *P. aristata* provenientes del Centro-Este de California se han construido cronologías resultantes de árboles vivos y muertos que datan más de siete mil años de antigüedad (Ferguson, 1968).

Con respecto al desarrollo dendrocronológico en las zonas templadas de Europa, Becker y Kromer (1993), desarrollaron al sur de Alemania una cronología con anillos de árboles de más de once mil años de duración con robles (*Quercus robur* y *Q. petraea*). Dicho estudio ha tenido una relevancia importante para el entendimiento del cambio climático en el Holoceno temprano. Por otro lado, en la región templada de Suramérica los estudios iniciaron con Schulman, quien desarrolló la primera cronología de anillos de árboles de *Austrocedrus chilensis* en Cerro Leon entre Chile y Argentina (Boninsegna et al., 2009). Además, LaMarche et al., (1979), desarrolló el primer conjunto de cronologías de anillos de árboles utilizando las coníferas *Araucaria araucana* y *A. chilensis*. Asimismo, con las especies *A. chilensis* y Alerce (*Fitzroya cupressoides*) se establecieron cronologías de más de cinco mil años, las cuales sirvieron para reconstruir la variación de la precipitación en la región de la Patagonia (Boninsegna, 2002).

1.1.3 Desarrollo en zonas tropicales. En la región tropical, los primeros estudios dendrocronológicos se desarrollaron hace más de un siglo en India (Pumijumnong et al., 1995). Entre 1915 y 1928 se estudió la relación entre el ancho de los anillos de árboles de teca (*Tectona grandis*) y los datos del clima en la isla de Java, Sudeste de Asia (Worbes, 1995). Posteriormente, Coster estudió la periodicidad del crecimiento diamétrico en más de 200 especies del sur y sudeste asiático (Pumijumnong, 2013). Soportado en el trabajo de Coster, en 1931 Berlage generó la primera cronología con anillos de crecimiento de teca en Java con 400 años de

duración, y fue el pionero en dar evidencia de la formación de anillos anuales en árboles tropicales (Worbes, 2002).

El éxito de los resultados sobre el análisis de anillos de árboles en los diversos ecosistemas en la región tropical ha podido demostrarse en las últimas décadas, por ejemplo, el estudio de Schöngart et al., (2005), quien desarrolló cronologías con anillos de árboles de *Macaranga acaciifolia* en dos bosques inundables de la Amazonia, las cuales comprenden periodos de 200 y 500 años, donde se encontró relación en el aumento del crecimiento de la madera durante el fenómeno climático de El Niño. También, Brienen y Zuidema (2005), trabajaron con seis especies, entre ellas *Cedrela odorata*, las que mostraron una relación positiva entre el crecimiento y las precipitaciones en ciertos periodos del año en la región amazónica del norte de Bolivia. Así mismo, en los bosques de montaña al sur de Ecuador, se construyeron cronologías de más de 150 años con anillos de árboles de *Cedrela montana*, encontrando una relación estadísticamente significativa entre las cronologías y el clima de la región (Bräuning et al., 2009).

1.1.4 Dendrocronología en podocarpáceas. En las últimas décadas se han realizado diversos estudios dendrocronológicos con especies de la familia Podocarpaceae, entre ellos está el trabajo de Buckley et al., (1995), donde se construyeron cronologías con *Podocarpus neriifolius* de más de 200 años. Además, Suwanpatra (2006) citado por (Pumijumnong, 2013), presenta la relación entre la actividad cambial y los factores ambientales como la precipitación, temperatura y humedad del suelo con esta misma especie para el sudeste asiático. Por otro lado, se desarrollaron cronologías con árboles de *Prumnopitys montana* con edades de 418 años en las montañas del sur de Ecuador, las cuales correlacionaron con cronologías de otras especies, indicando una relación significativa entre el crecimiento de los árboles con la temperatura (Bräuning et al., 2009). En el estado de Bahía en Brasil, se realizó una cronología de 138 años con *Podocarpus lambertii*,

la cual mostró la relación entre la disminución del crecimiento de los árboles y la temperatura y la precipitación (Locoseelli et al., 2015).

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 Familia podocarpaceae. Los miembros de esta familia abundaban en los sitios más australes de Asia, África y América, mientras permanecían ausentes en Europa y Norte América, por lo tanto, que su origen proviene del sur de Gondwana hace cerca de 180 millones de años (Marín, 1998). Es morfológica y ecológicamente la familia más diversa (Kelch, 1998; Vásquez et al., 2010) y, según Farjon (2001) citado por (Knopf et al., 2012), es la segunda familia más grande del grupo de las coníferas con 19 géneros, 194 especies y nueve variantes. Las especies de esta familia están distribuidas principalmente en hábitats de montaña tropicales y subtropicales, en hábitats que van desde América Central hasta América del Sur, África (incluido Madagascar), Indochina a través de Malasia hasta Australia y Oceanía (Knopf et al., 2012).

Las podocarpáceas en el Centro y Sur de América albergan gran parte de la diversidad global de esta familia y están representadas por cinco géneros: *Podocarpus*, *Prumnopitys*, *Retrophyllum*, *Saxegothaea*, y *Lepidothamnus* (Vicuña-Miñano, 2005). En Colombia se encuentran tres géneros representados por las especies *Retrophyllum rospigliosii*, *Podocarpus oleifolius*, *Podocarpus oleifolius* var *macristachis*, *Podocarpus magnifolius*, *Podocarpus guatemalensis*, *Prumnopitys harmsiana*, *Prumnopitys montana*. Estas especies son las únicas coníferas endémicas localizadas en las cordilleras Central y Oriental. Predominan tanto en climas húmedos y muy húmedos, en sitios que van desde 1400 a los 3700 m de altitud. La única especie de las podocarpáceas que habita el zonas tropicales bajas

es el *P. guatemalensis*, que se encuentra en altitudes que están entre los 0 y 1100 m (Vásquez et al., 2010).

1.2.2 Principios básicos de la dendrocronología. La dendrocronología se fundamenta en la uniformidad de la señal recibida por los árboles, la cual establece que los procesos ambientales se relacionan con los patrones de crecimiento de los árboles (Zegarra Agüero, 2018).

También, el principio de la agregación de los factores ambientales establece que cualquier serie individual que modela el crecimiento de los árboles en el tiempo puede ser “descompuesta” en un conjunto de factores ambientales (Ecuación 1). Esta ecuación expresa que el ancho de cualquier anillo de crecimiento (R), formado en un determinado año (t), es una función de la tendencia de crecimiento relacionada con la edad (A), las condiciones climáticas (C), los factores internos del bosque que puedan afectar el crecimiento ($D1$), los factores externos del bosque que puedan afectar el crecimiento ($D2$) y la acción de cualquier otro factor aleatorio (E) que no sea tomado en consideración por los anteriores (Campos y Tomazello, 2009).

$$R_t = A_t + C_t + D1_t + D2_t + E_t \quad \text{Ecuación 1.}$$

También, las condiciones del sitio influyen en la intensidad de la reacción a estos factores. Así, las especies sensibles suelen mostrar grandes variaciones en el ancho de los anillos de un año a otro (Worbes, 2004). Mientras mayor sea la limitación al crecimiento ocasionada por factores ambientales, especialmente la temperatura, la radiación y la precipitación mayor será la variación del ancho de los anillos de crecimiento dentro de un mismo árbol (Rozendaal y Zuidema, 2011). Contrario a la sensibilidad, la carencia de variaciones recibe el nombre de complacencia (Campos y Tomazello, 2009; Póvoa de Mattos y Botosso, 2003).

En relación a lo anterior, el principio de amplitud ecológica señala que las especies pueden crecer, reproducirse y propagarse a través de un rango de hábitat que puede ser amplio, estrecho o restringido (Campos y Tomazello, 2009). El principio de replicación indica que se deben tomar varias muestras del radio de los árboles y varios árboles por sitio, ello con el fin de alcanzar una muestra significativa del lugar y determinar el grado de semejanza dado por la distancia entre sitios de crecimiento, la variabilidad del clima en una región y el rango ecológico de una especie de árbol (Worbes, 2004).

El principio de la datación cruzada (*crossdating* en inglés), es quizás el principio más importante de la dendrocronología. Este principio consiste en asignar a cada anillo el año exacto de su formación mediante un proceso de “superposición” de la variación del ancho y otras características estructurales de los anillos de crecimiento (Campos y Tomazello, 2009). Es por esta razón que es posible atribuirle a un anillos de crecimiento un año específico y determinar exactamente la edad del individuo (Ogden, 1981; Roig et al., 2001; Worbes, 2004).

1.2.3 Formación y anatomía de los anillos. La formación de los anillos de crecimiento es influenciada por la estacionalidad climática anual y se puede ver reflejada en: 1. Las variaciones anuales de la temperatura cerca o lejos del punto de congelación en las zonas templadas y boreales. 2. Las inundaciones anuales de los grandes sistemas acuáticos, que anegan el suelo del bosque por largos periodos de tiempo (de seis meses o más). 3. La variación de la precipitación entre las temporadas de lluvia y de sequía, como sucede en gran parte de la región tropical (Worbes, 2004; Worbes y Fichtler, 2010).

En especies con crecimiento secundario, la estructura anatómica de la madera se clasifica en cuatro tipos según la formación del límite del anillo (Worbes, 2004; Marcelo Peña et al., 2020). 1. Especies de leño con una constitución anatómica

simple, homogénea y con ausencia de vasos. Estas características son únicas en las gimnospermas, por ejemplo, en coníferas como las Podocarpaceas. El límite del anillo de crecimiento se diferencia por el estrechamiento en el tamaño de las traquéidas desde la madera temprana a la madera tardía (Beltrán Gutiérrez y Valencia Ramos, 2013; Bauch et al., 2006). 2. Especies con formaciones de bandas marginales de parénquima alrededor de toda la circunferencia de la sección transversal. Generalmente consisten en una o pocas filas de células y se hallan en familias como Annonaceae, Bignoniaceae, Fabaceae y Meliaceae (Bräuning et al., 2009; Marcelo-Peña et al., 2019). 3. Especies con anillos que se caracterizan por patrones periódicos de parénquima y tejido fibroso. Las bandas generalmente se vuelven más estrechas hacia el final de una zona de crecimiento, presentando un cierto patrón que delinea el límite del anillo. Esto particularmente se presenta en Euphorbiaceae, Moraceae y Sapotaceae (Worbes y Fichtler, 2010). 4. Especies que tienen una distribución de vasos en la zona de crecimiento. La porosidad anular está ampliamente distribuida en las zonas templadas (por ejemplo en *Quercus*), pero se presenta solo en unos pocos ejemplos en los trópicos (por ejemplo en *Tectona grandis* y algunas Meliaceae) (Villalba et al., 1985).

1.2.4 Dendrocronología tropical y aplicaciones. En la región tropical la dendrocronología comprende diferentes sub-disciplinas dependiendo del objetivo de la investigación, entre ellas están la dendroclimatología, dendroglaciología, dendropirocronología, dendroarqueología, dendrogeomorfología y dendrohidrología (Amoroso y Suárez, 2015; López y Villalba, 2016). Específicamente, la dendroclimatología es una de las aplicaciones más utilizadas y se define como el uso de los anillos de crecimiento para estudiar y reconstruir el clima de tiempos pasados (Póvoa de Mattos y Botosso, 2003; Tomazello et al., 2009).

La dendroecología es uno de los sub-campos de mayor complejidad en la dendrocronología y trata de resolver problemas ecológicos y del ambiente; es decir,

que involucra todas aquellas ciencias que incluyen algún tipo de información ambiental a partir de los anillos de crecimiento (Campos y Tomazello, 2009). La dendroecología brinda información sobre la edad de los árboles y las tasas de crecimiento, lo que se puede aplicar al estudio de la ecología de las especies arbóreas, las relaciones clima-crecimiento, la dinámica de la población a largo plazo de los bosques tropicales relacionada con los regímenes de perturbaciones. También, trata sobre la productividad en la biomasa permitiendo estimaciones confiables de los ciclos de corta, los diámetros mínimos de corta y las proyecciones de rendimiento, las cuales son la base de las prácticas de manejo forestal sostenible y adaptativo en los trópicos (Worbes, 2002; Worbes y Fichtler, 2010; Rozendaal y Zuidema, 2011; Schöngart et al., 2017).

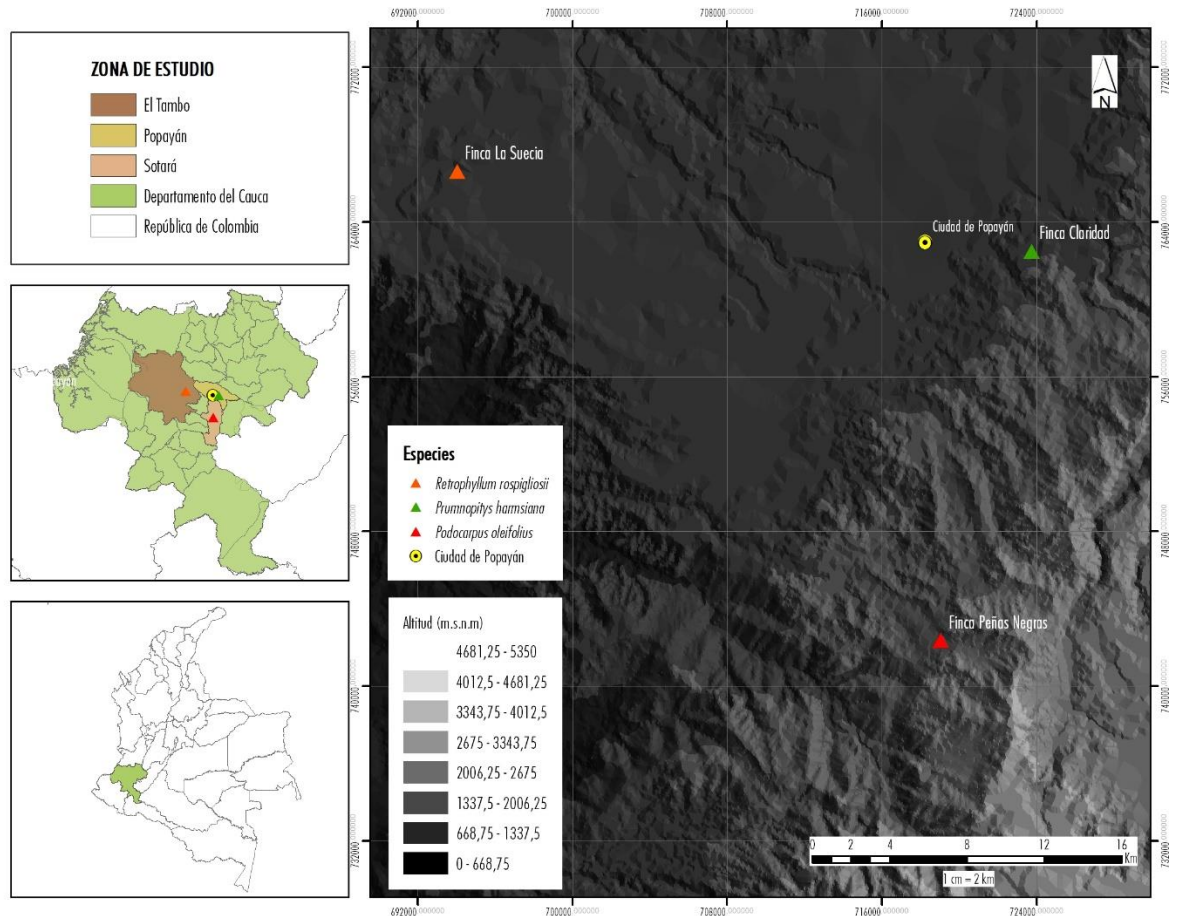
2. METODOLOGÍA

2.1 ÁREA DE ESTUDIO Y MUESTREO DE ESPECIES

El estudio se llevó a cabo al suroccidente colombiano, en una zona que comprendió tres municipios del departamento del Cauca: El Tambo, Sotará y Popayán ubicados entre la cordillera central y la cordillera occidental de los Andes (Figura 1). Los sitios de muestreo fueron plantaciones experimentales establecidas por Smurfit-Kappa Cartón de Colombia con especies de podocarpáceas. Las especies estudiadas fueron *Podocarpus oleifolius* var *macrostachyus* (Parl.) Buchholz & Gray, *Prumnopitys harmsiana* Phil y *Retrophyllum rospigliosii* C.N.Page.

Las muestras de las tres especies fueron colectadas en el transcurso del año 2020, las muestras de *R. rospigliosii* fueron colectadas en marzo en la finca La Suecia (municipio de El Tambo), las muestras de *P. harmsiana* fueron colectadas en octubre en la finca Claridad (Municipio de Popayán), y las muestras de *P. oleifolius* fueron colectadas en octubre en la finca Peñas Negras (municipio de Sotará). El régimen de lluvias para las tres zonas de estudio está definido por un patrón unimodal, con un periodo seco entre junio y septiembre, y un periodo lluvioso largo desde octubre hasta mayo. Los datos de precipitación y temperatura de cada uno de los sitios de muestreo se presentan en la Tabla 1 y Figura 2.

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio para las especies estudiadas: *Retrophyllum rospigliosii*, *Podocarpus oleifolius* y *Prumnopitys harmsiana*.

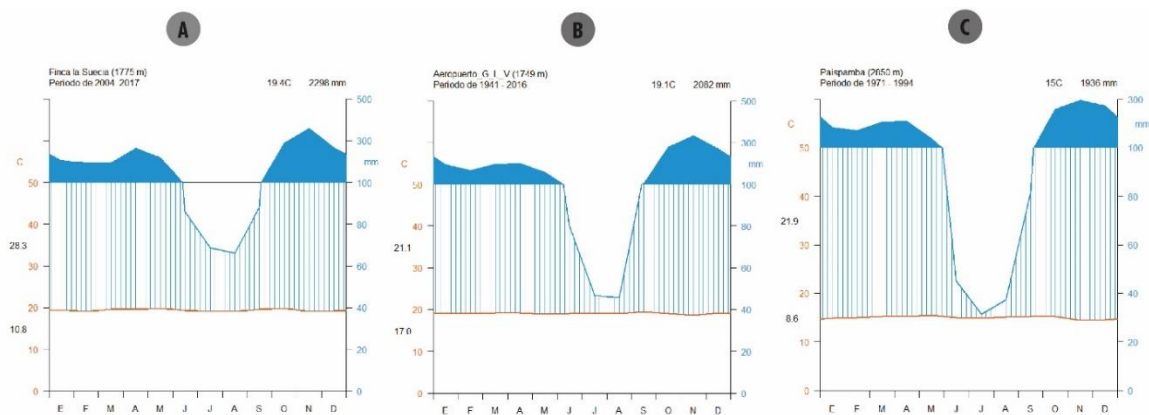


Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Generalidades de los sitios de muestreo y particularidades del muestreo.

Nombre del sitio de muestreo	La Suecia	Claridad	Peñas Negras
Longitud (O)	-76,83	-76,56	-76,60
Latitud (N)	2,48	2,44	2,26
Precipitación promedio (mm)	2298	2082	1936
Temperatura promedio (°C)	19,4	19,1	15
Estación climática más cercana	La Suecia	Aeropuerto Guillermo León Valencia	Paispamba
Zona de vida	bh-PM	bh-PM	bh-MB
Altitud (m)	1755	1800	2580
Área de plantación (ha)	12	0,41	0,97
Árboles muestreados	30	28	30
Especie	<i>Retrophyllum rospigliosii</i>	<i>Prumnopitys harmsiana</i>	<i>Podocarpus oleifolius</i>
Edad de plantación	21	21	22
Tipo de muestreo de árboles	Colección secciones transversales	Colección de núcleos	Colección de núcleos

Figura 2. Clima-diagramas de los sitios de muestreo. Datos obtenidos de las estaciones: A. La Suecia (2004 a 2017), B. Aeropuerto Guillermo León Valencia (1941 a 2018), C. Paispamba (1971 a 1994).



Fuente: Elaboración propia

En total se colectaron muestras de 88 árboles entre las 3 especies (Tabla 1). De *R. rospigliosii* se obtuvieron secciones transversales del tronco aprovechadas en coordinación con un estudio de biomasa para esta especie (Figura 3). Para *P. oleifolius* y *P. harmsiana* el muestreo se hizo extrayendo núcleos con la ayuda de un barreno de Pressler de 5 mm de diámetro. Tanto para las secciones transversales como para los núcleos la altura de muestreo no superó los 1,30 metros de altura desde la base del árbol con el fin de alcanzar todos los anillos formados durante el crecimiento de la especie (Figura 3). Posteriormente, las muestras fueron transportadas al Laboratorio de Maderas de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca para su secado, preservación y pulido.

Figura 3. Extracción de muestras: A. Sección transversal, B. Núcleos.



Fuente: Propia.

2.2 MONTAJE Y PULIDO DE LAS MUESTRAS.

Las muestras radiales de *P. harmsiana* y *P. oleifolius* fueron fijadas a un soporte de madera para evitar su deformación, permitir su pulido y posterior análisis. Luego, las muestras radiales como las secciones transversales fueron lijadas progresivamente bajo diferentes gránulos (100, 180, 360, 400, 600 y 1000 granos/pulgada²) para permitir la mayor visibilidad de los anillos (Figura 4).

Figura 4. Sección transversal de *Retrophyllum rospigliosii* (A) y núcleos de *Podocarpus oleifolius* (B) y *Prumnopitys harmsiana* (C). Muestras previamente pulidas y preparadas para el análisis anatómico y medición de los anillos de crecimiento.



Fuente: propia.

2.3 ANÁLISIS ANATÓMICO DE LOS ANILLOS

Se realizaron cortes con un micrótopo de muestras de las secciones transversales de *R. rospigliosii*, *P. oleifolius* y *P. harmsiana* (Figura 5). Posterior a ello, a los micro cortes se les realizó un proceso de tinción con safranina y astrablue para mejorar el contraste de las imágenes para su descripción. Los anillos de crecimiento de cada una de las especies se caracterizaron mediante imágenes digitales de alta resolución tomadas con una cámara Leica MC170 HD integrada a microscopio Leica Dm500, utilizando los lentes de aumento de 10x y 40x. Para la descripción anatómica de los anillos de crecimiento de las tres especies se utilizó la lista de características microscópicas para la identificación de maderas blandas del IAWA (Baas et al., 2004).

Figura 5. Microtopo utilizado para obtener los cortes del plano transversal de *Retrophyllum rospigliosii*, *Podocarpus oleifolius* y *Prumnopitys harmsiana*. Proceso desarrollado en el laboratorio de dendrocronología de la Universidad Nacional sede Medellín.



Fuente: Propia.

2.4 MEDICIÓN DE ANCHO DE ANILLOS

Con el fin de medir el crecimiento anual en cada una de las especies se trazaron radios desde la medula hasta la corteza de las muestras transversales y radiales para señalar los anillos y medir el ancho de cada uno de estos. En las secciones transversales los anillos de crecimiento fueron remarcados alrededor de la circunferencia del árbol para consolidar mejor la información (February y Stock, 1998). Para definir los límites de los anillos de crecimiento se utilizó un estereoscopio ZEISS con lente de aumento de 4X (Figura 6). Se descartaron muestras con excesiva formación de nudos para de las tres especies debido a que se generaba un crecimiento lobulado del tronco que afectaba las mediciones.

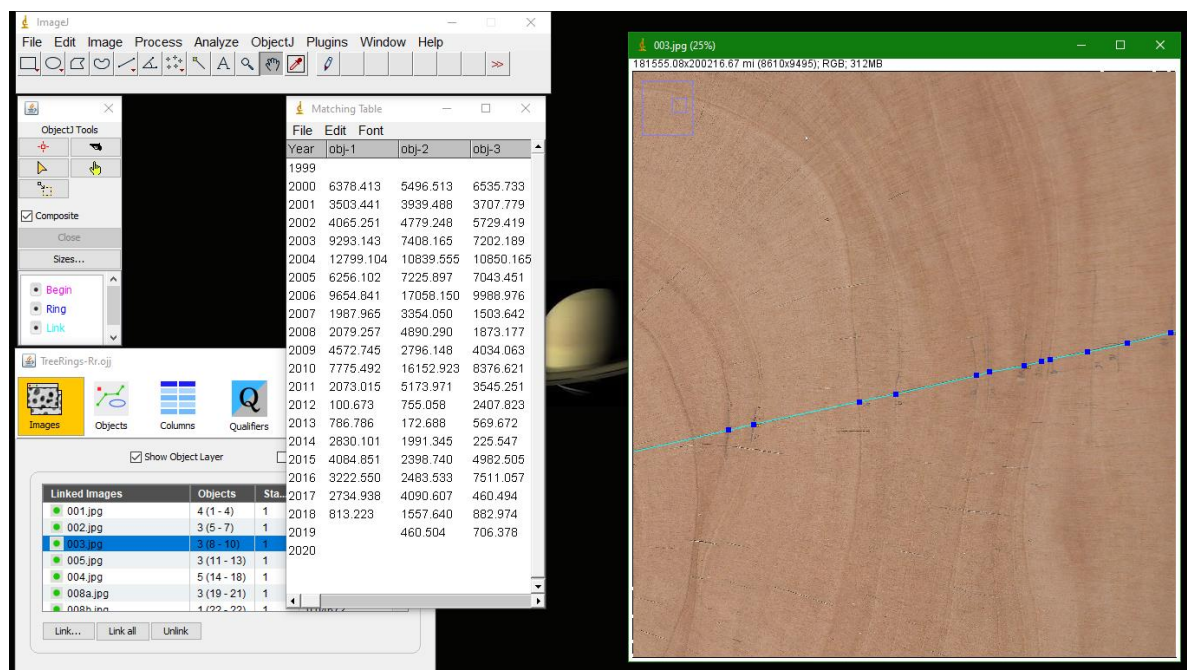
Figura 6. Metodología utilizada para la medición y consolidación de los anillos de crecimiento para las tres especies con la ayuda de un estereoscopio con lente de aumento de 4x.



Fuente: propia.

Posteriormente, las secciones transversales (con tres o cuatro radios por árbol) y los núcleos (con dos radios por árbol) fueron digitalizados para obtener imágenes con resolución de 1200 ppp (puntos por pulgada cuadrada) usando un escáner HP Deskjet F4280. Las imágenes fueron cargadas al software *ImageJ* y adaptadas a la herramienta *ObjectJ*, la cual sirvió para el conteo de anillos y para asignar valores de longitud al ancho de cada uno de los anillos. Esta metodología fue desarrollada por el Centro de Recursos de Educación Científica en Carleton College (2017) (Estados Unidos) (Figura 7).

Figura 7. Procesamiento de imágenes digitales en el software *ImageJ* para la creación de las series de ancho de anillos que posteriormente fueron utilizados como *rwI* (*ring width list*) en el software R.



Fuente: propia.

2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO

Inicialmente se realizaron diagramas de Yamaguchi para encontrar una señal común en el ancho de los anillos de todas las muestras de una misma especie de manera visual (Andreu-Hayles et al., 2015). Posteriormente, se utilizó el paquete *dplR* del software R para el cofechado de las series de ancho de anillos (Bunn, 2008). Para el cofechado se utilizaron las funciones de Pearson, Kendall y Spearman para el coeficiente de correlación, las funciones correlacionan cada serie de anillos proveniente de un árbol particular con una cronología maestra construida a partir de todas las demás series de árboles de la especie. Las correlaciones se calcularon en segmentos superpuestos de 10 años que se superpusieron en segmentos de 5 años. El conjunto de datos correlacionado fue estandarizado usando las funciones “Spline, ModExpNeg, Mean o Friedman” y luego promediada para lograr proyectar una cronología estándar de anillos de árboles. Este proceso se desarrolló con el software R, utilizando el paquete *dplR* desarrollado por Bunn y Korpela (2018). El procedimiento de estandarización se realizó con el fin de eliminar los efectos de la disminución del ancho del anillo debido a la edad de los árboles, las perturbaciones y la competencia, al tiempo que se conserva la variabilidad de baja frecuencia en la serie según la metodología sugerida por Álvarez et al (2021).

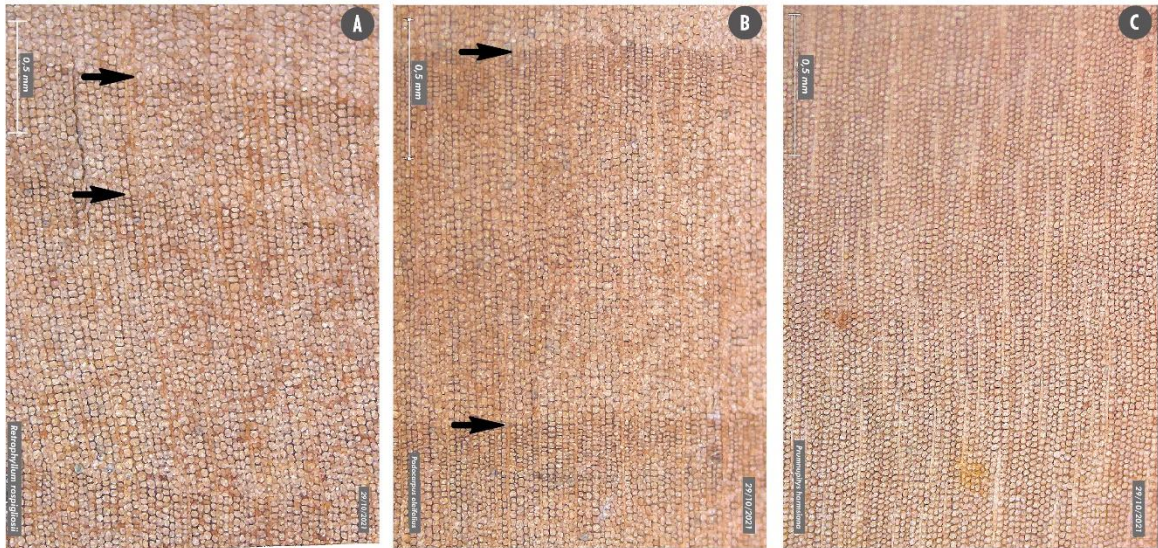
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO

La anatomía de las maderas de las podocarpáceas estudiadas es distintiva de las coníferas, con traqueidas alineadas en filas radiales, ausencia de poros y presencia de parénquima axial difuso. *R. rospigliosii* y *P. oleifolius* presentaron límites de anillos de crecimientos distintos, es decir, los anillos de crecimientos son claros y bien definidos. En el caso de *P. harmsiana*, la anatomía se caracterizó por anillos de crecimiento con límites indistintos y ausentes, en los pocos anillos que alcanzaron cierto grado de definición la transición entre la madera temprana y la madera tardía estuvo dada de manera muy gradual, por lo que los anillos son poco diferenciables o pobremente definidos.

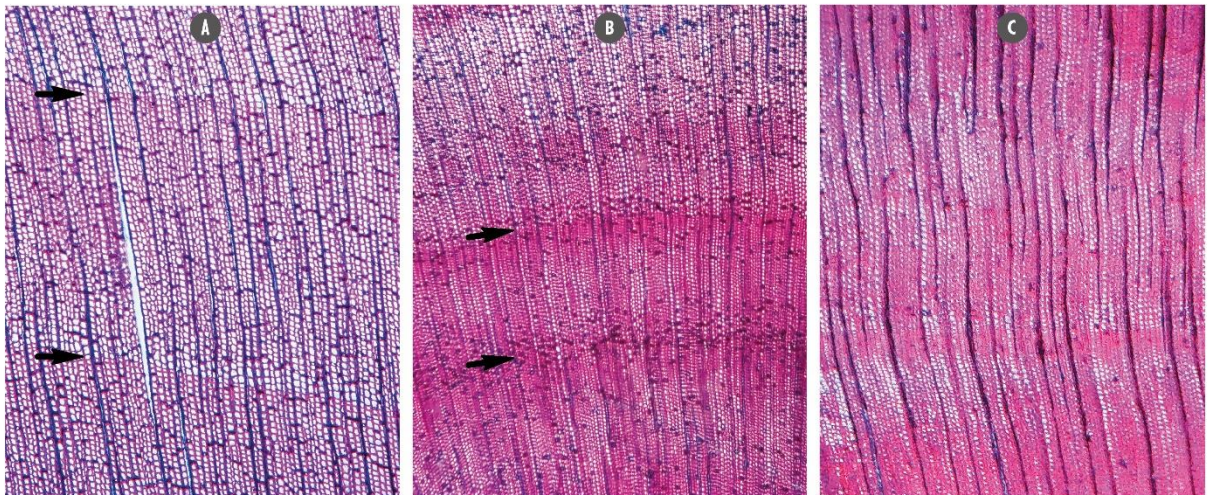
A nivel macroscópico, *R. rospigliosii* y *P. oleifolius* presentaron límite del anillo marcado por un cambio de color claro y oscuro dado por el cambio de espesor de la pared celular de las traqueidas (Figura 8). Los anillos de crecimiento en dichas especies están constituidos por el engrosamiento de tres o cuatro filas de traqueidas que definen el límite entre anillos. La madera temprana está definida por paredes delgadas y lúmenes anchos, mientras la madera tardía está definida por traqueidas de paredes gruesas con lúmenes angostos (Figuras 9 y 10). La transición de madera temprana a madera tardía se presentó en general de forma gradual y en ocasiones de forma abrupta para estas dos especies.

Figura 8. Características macroscópicas de los anillos de crecimiento de (A) *Retrophyllum rospigliosii*, (B) *Podocarpus oleifolius* y (C) *Prumnopitys harmsiana* obtenidas de la cámara Leica MC170 HD con aumento de 4x. Las flechas negras indican el límite de un anillo de crecimiento.



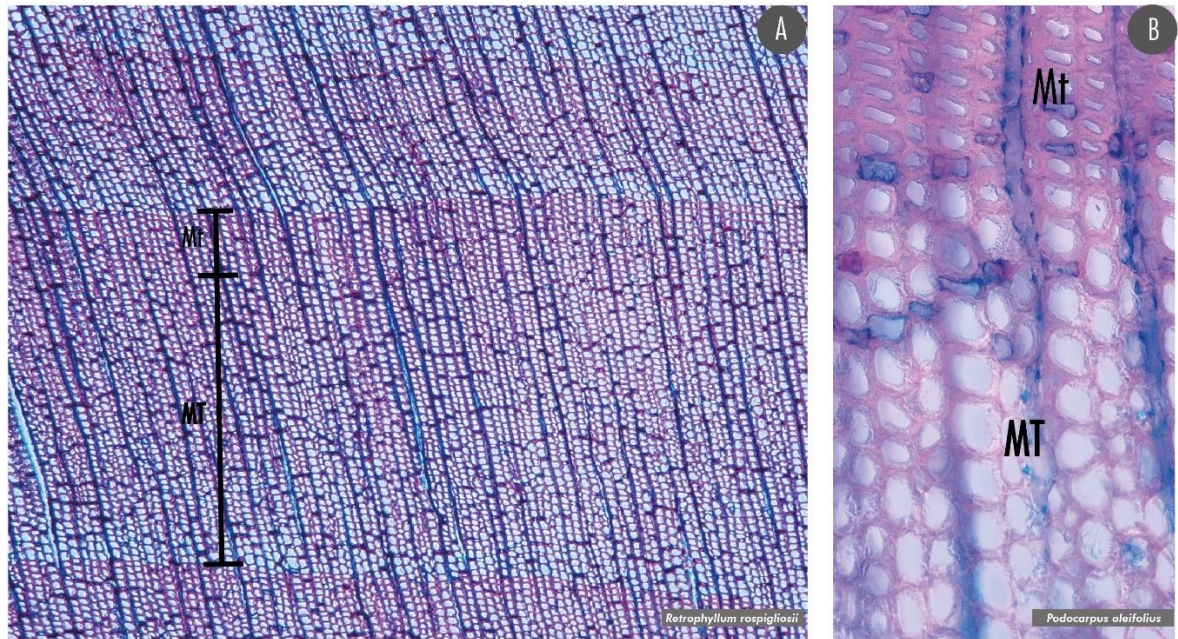
Fuente: propia.

Figura 9. Anatomía de los anillos de crecimiento tomados de los micro cortes de (A) *Retrophyllum rospigliosii*, (B) *Podocarpus oleifolius* y (C) *Prumnopitys harmsiana* obtenidas de la cámara Leica MC170 HD con aumento de 10x. Las flechas negras indican el límite de un anillo de crecimiento.



Fuente: propia.

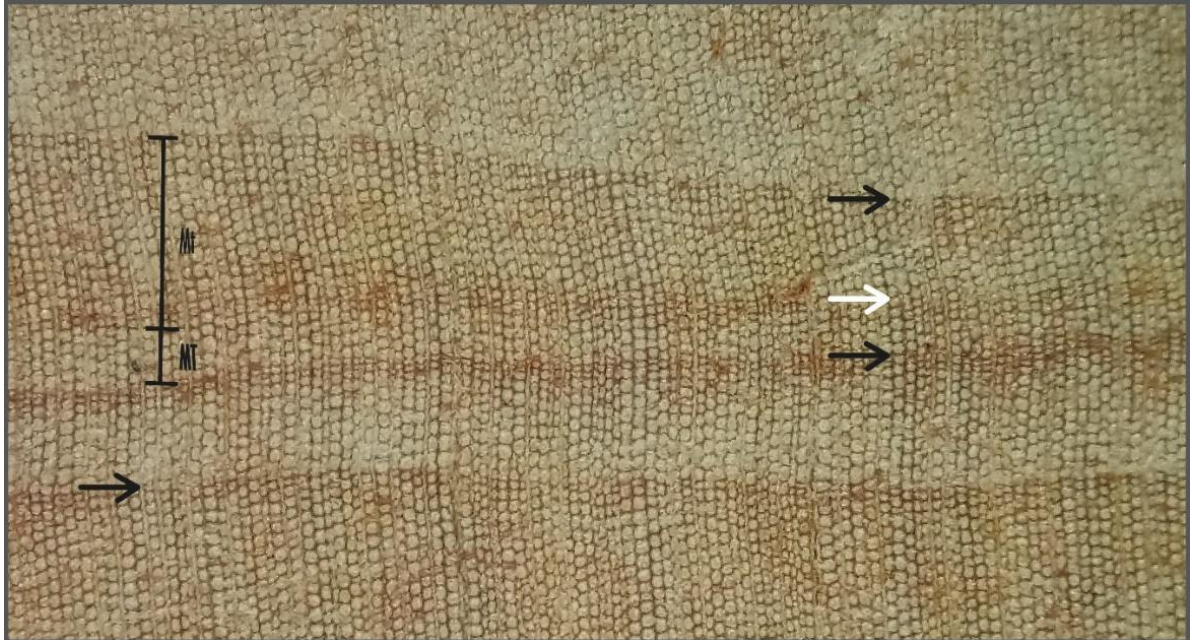
Figura 10. Características microscópicas de la anatomía de la madera temprana (MT) y madera tardía (Mt) de los anillos de crecimiento obtenidos de los micro cortes de las muestras de *Retrophyllum rospigliosii* a 10x (A) y *Podocarpus oleifolius* a 40x (B).



Fuente: propia.

En algunos casos, los anillos de crecimiento en *R. rospigliosii* se pudieron determinar gracias a disponer la sección completa del árbol, ya que se presentaron anillos discontinuos a nivel macroscópico o anillos falsos (Figura 11). En Etiopia, se describen anillos falsos de *Podocarpus falcatus* causados por la variaciones de densidad intra-anual (Krepkowski et al., 2012), un caso similar podría suceder con las características encontradas para *R. rospigliosii*.

Figura 11. Detalles de la anatomía de los anillos de crecimiento en *Retrophyllum rospigliosii* con aumento de 4x. Las flechas negras indican el límite del anillo y la flecha blanca indica un anillo falso. Madera temprana (MT), madera tardía (Mt).



Fuente: propia.

Se reportaron condiciones similares en la anatomía de la madera y anillos de crecimiento de *R. rospigliosii* en el centro del país (Vásquez et al., 2010). También, en un estudio sobre anatomía de la madera para podocarpáceas realizado al sur de Ecuador bajo un clima Ecuatorial Mesotérmico (semi-húmedo) a una altitud de 2.100 msnm, se establecieron estas mismas características de anillos de crecimiento distintos, poco borrosos y con transición abrupta (Martinez-Matamoros et al., 2020). Sin embargo, otros estudios sobre la anatomía de anillos de crecimiento en el norte y en la selva central de Perú mencionan que *R. rospigliosii* muestra anillos de crecimiento con transición gradual. Ello conlleva a anillos indistintos macroscópicamente, contrastantes con los encontrados en este estudio (Marcelo Peña et al., 2020; Beltrán Gutiérrez y Valencia Ramos, 2013).

Sobre la anatomía de los anillos de crecimiento de *P. oleifolius*, en el centro de Colombia se encontraron anillos de crecimiento indistintos o ligeramente definidos, similares a los encontrados para este estudio (Vásquez et al., 2010). Resultados similares fueron encontrados también al sur de Ecuador, donde se encontró una transición ligera y abrupta en los anillos de crecimiento de esta especie, lo que permitió diferenciarlos de manera clara (Martinez-Matamoros et al., 2020; Armijos Montaña, 2019). En Costa Rica se encontró que los anillos de crecimiento de esta especie fueron indistintos, a pesar de ello, se encontraron variaciones de densidad intra-anual en las muestras (Bauch et al., 2006).

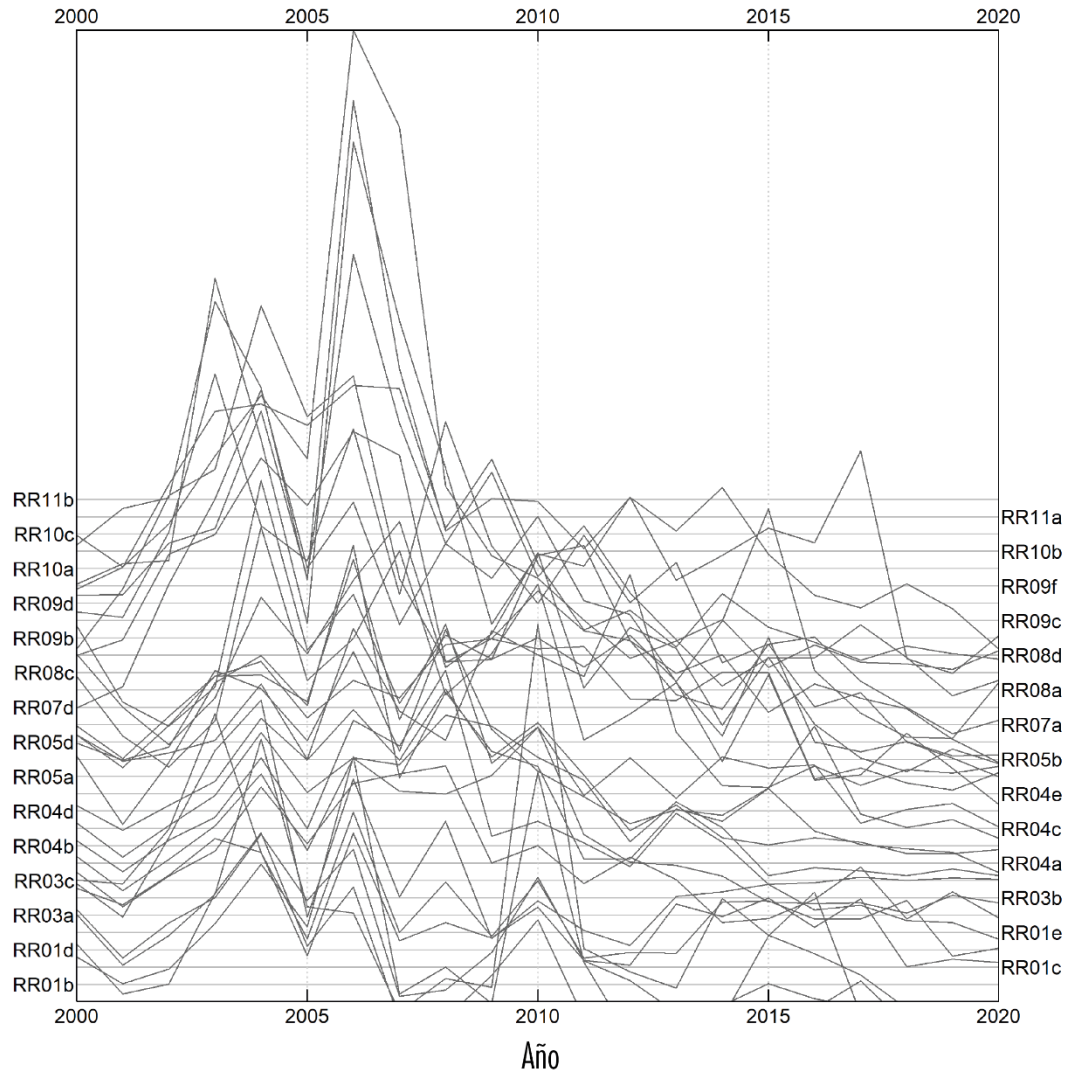
En *P. harmsiana* se encontraron al norte de Perú anillos de crecimiento con límites pobremente definidos, similares a los mencionados en este estudio y, por los cuales los autores denominan esta especie con un potencial bajo para estudios dendroecológicos (Marcelo Peña et al., 2020). Una especie hermana, *Prumnopitys montana*, también presente en el sur de Ecuador, presentó límites de anillos de crecimiento borrosos o ausentes con transición de la madera temprana a la madera tardía de forma gradual similares a los obtenidos en este estudio (Armijos Montaña, 2019). Por el contrario, al sur de Ecuador, *P. harmsiana*, presentó anillos de crecimiento bien definidos y con transición de madera temprana a madera tardía abrupta, diferente a los resultados obtenidos para este estudio (Martinez-Matamoros et al., 2020).

3.2. CRONOLOGÍAS DE ANCHO DE ANILLOS DE CRECIMIENTO

3.2.1. *Retrophyllum rospigliosii*

Se tomaron nueve de las treinta muestras de árboles obtenidos de *Retrophyllum rospigliosii* y se cofecharon 29 series de ancho de anillos con mediciones de 609 anillos (Figura 12). Las muestras de árboles restantes de esta especie fueron descartadas por la formación de nudos excesivos y por anillos pobremente definidos, los cuales conllevan un problema en la correlación de las series. El crecimiento discontinuo de los anillos de crecimiento está influenciado principalmente por la formación lobular del tronco, la cual es generada por nudos muertos en la muestra de la especie. Las muestras obtenidas cubrieron un periodo de 21 años (1999 – 2020). Los anillos ausentes en las series seleccionadas fueron poco frecuentes y representaron solo el 1,97 % del número total de anillos cofechados. Los parámetros obtenidos para las 29 series de anillos de *R. rospigliosii* cofechadas revelan un crecimiento promedio radial de 6,17 mm por año, con valores entre 3,45 y 11,05 mm por año. La desviación estándar promedio para todas las series de ancho de anillos fue de 4,64 mm (Anexo 1).

Figura 12. Gráfico espagueti de las series de ancho de anillos de crecimiento de *Retrophyllum rospigliosii* para un periodo de 21 años.



Fuente: elaboración propia.

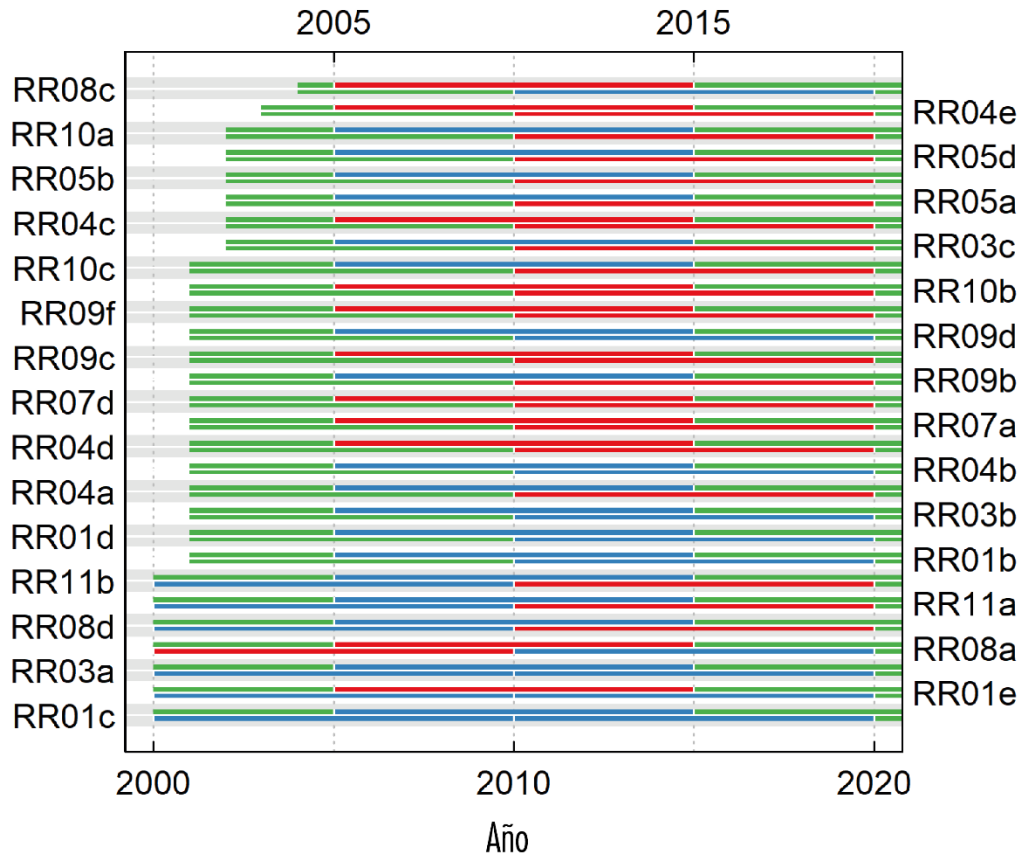
La inter-correlación media de las series estandarizadas de ancho de anillo con un modelo exponencial negativo (*ModNegExp*) fue de 0,58 (coeficiente de Pearson), lo cual indica una similitud significativa entre las series de anillos de los árboles cofechados. La auto regresión de primer orden (AR1) fue de 0,47, es decir, que la variable del ancho de anillo depende en gran parte de los valores pasados de la propia variable. La sensibilidad media de 0,87 demostró asimetría positiva en las

series de ancho de anillos (Tabla 2). Es de resaltar que existe la presencia de anillos anclados o acuñaos que se unen al anillo anterior en una o varias partes de la sección transversal en algunos individuos, lo que conlleva a una alta variabilidad en las medidas del ancho de los anillos. Según Worbes (2002), los individuos con anillos anclados se caracterizan por crecer en condiciones de poca luz y competencia, condiciones similares a las presentes en el sistema de plantación estudiado. En algunas series de anillos se presentó baja correlación con la serie maestra durante el periodo 2005 – 2015, ello influenciado principalmente por los procesos de raleo en algunas parcelas dentro de la plantación de estudio durante este espacio de tiempo (Figura 13).

Tabla 2. Estadísticas descriptivas para las 29 series de ancho de anillos de árboles de *Retrophyllum rospigliosii* al suroccidente colombiano.

Parámetros	
Número de series de datos	29
Número de mediciones	609
Promedio longitud de las series (años)	21
Rango de edad (años)	21
Lapso	2000 - 2020
Desviación estándar (mm)	4,64
Media (Desv. Estándar) Inter-correlación series	0.58 (0.13)
Media (Desv. Estándar) AR1	0.47 (0.22)
Sensibilidad media	0.87
Promedio crecimiento radial (mm.año ⁻¹)	6.17

Figura 13. Series de correlación por segmentos de 10 años superpuesto en 5 años obtenidos con el coeficiente de Pearson para la serie de anillos de *Retrophyllum rospigliosii*.



Segmentos: Longitud = 10, retraso = 5

Fuente: elaboración propia.

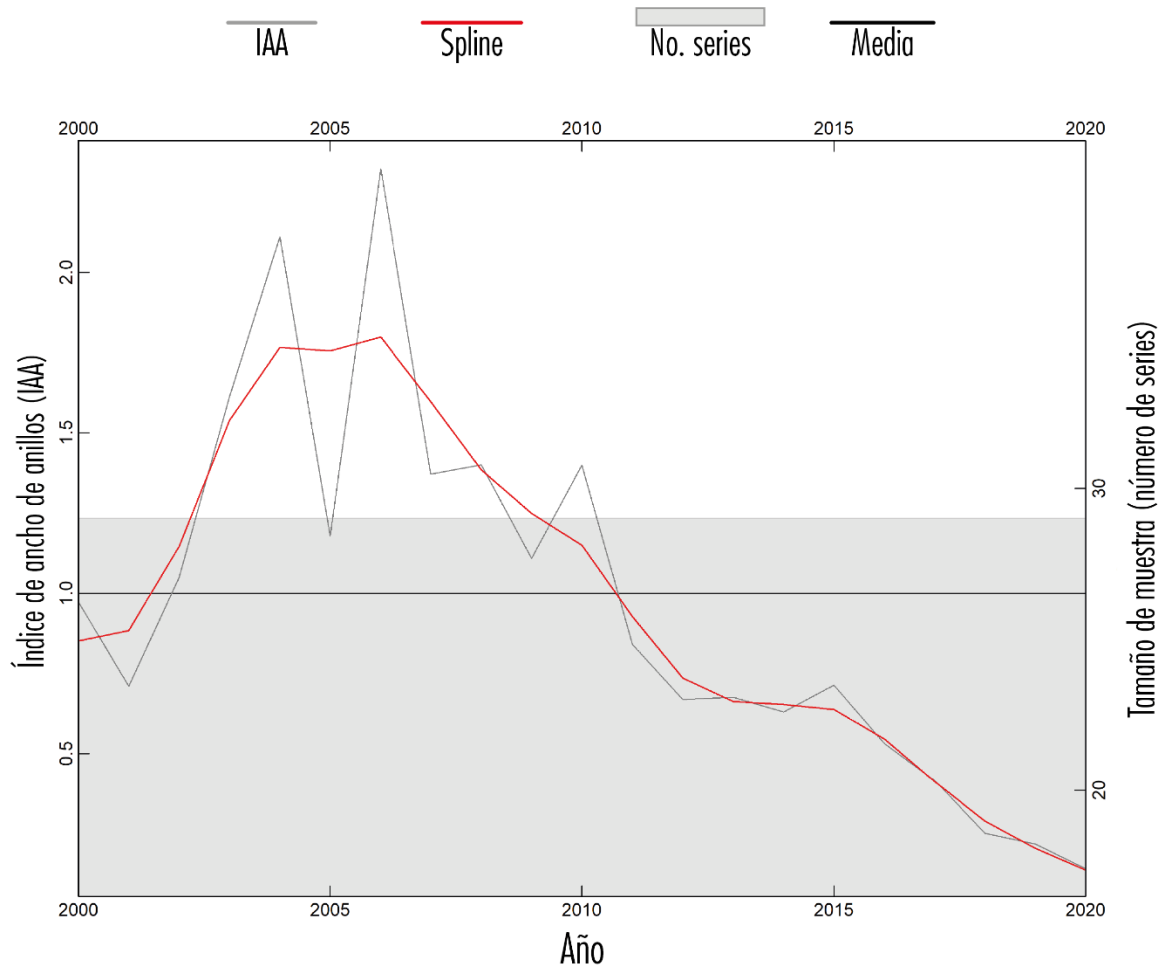
Para la construcción de la cronología se utilizó una serie de índice de ancho de anillos estandarizada con el fin de eliminar las tendencias de las series de ancho de anillos. La inter-correlación de las series mostro un promedio de 0,66 ($p < 0,01$), que oscila entre 0,40 y 0,87 (coeficiente de Pearson, Tabla 3). Este valor de correlación es lo que se conoce comúnmente como cofechado y este demuestra la posibilidad de asignar a cada anillo el año exacto de formación. Por su parte, la curva media de ajustada de 5 años a la cronología mostró un punto influyente de crecimiento

considerable por encima de la media entre el periodo 2004 – 2008. No obstante, se muestra también una disminución en el crecimiento promedio de los árboles después del año 2011 influenciado posiblemente por la competencia dentro del rodal (Figura 14). Es decir, que a medida que los árboles aumentan su tamaño y se reduce la distancia se ejerce más competencia entre ellos (Guadalupe Colín et al., 2018).

Tabla 3. Valores de correlación para las 29 series individuales estandarizadas cofechadas para *Retrophyllum rospigliosii*.

	Series	Correlación	Valor de p		Series	Correlación	Valor de p
1	RR01b	0,84	< 0,001	16	RR07a	0,40	< 0,05
2	RR01c	0,75	< 0,001	17	RR07d	0,55	< 0,01
3	RR01d	0,70	< 0,001	18	RR08a	0,47	< 0,05
4	RR01e	0,50	< 0,01	19	RR08c	0,64	< 0,01
5	RR03a	0,87	< 0,001	20	RR08d	0,49	< 0,01
6	RR03b	0,67	< 0,001	21	RR09b	0,76	< 0,001
7	RR03c	0,76	< 0,001	22	RR09c	0,63	< 0,01
8	RR04a	0,67	< 0,001	23	RR09d	0,70	< 0,001
9	RR04b	0,79	< 0,001	24	RR09f	0,54	< 0,01
10	RR04c	0,58	< 0,01	25	RR10a	0,74	< 0,001
11	RR04d	0,66	< 0,001	26	RR10b	0,40	< 0,05
12	RR04e	0,66	< 0,01	27	RR10c	0,67	< 0,001
13	RR05a	0,83	< 0,001	28	RR11a	0,70	< 0,001
14	RR05b	0,65	< 0,001	29	RR11b	0,81	< 0,001
15	RR05d	0,81	< 0,001				

Figura 14. Cronología construida de la media de los valores estandarizados de las 29 series para un periodo de 21 años para *Retrophyllum rospigliosii*.



Fuente: elaboración propia.

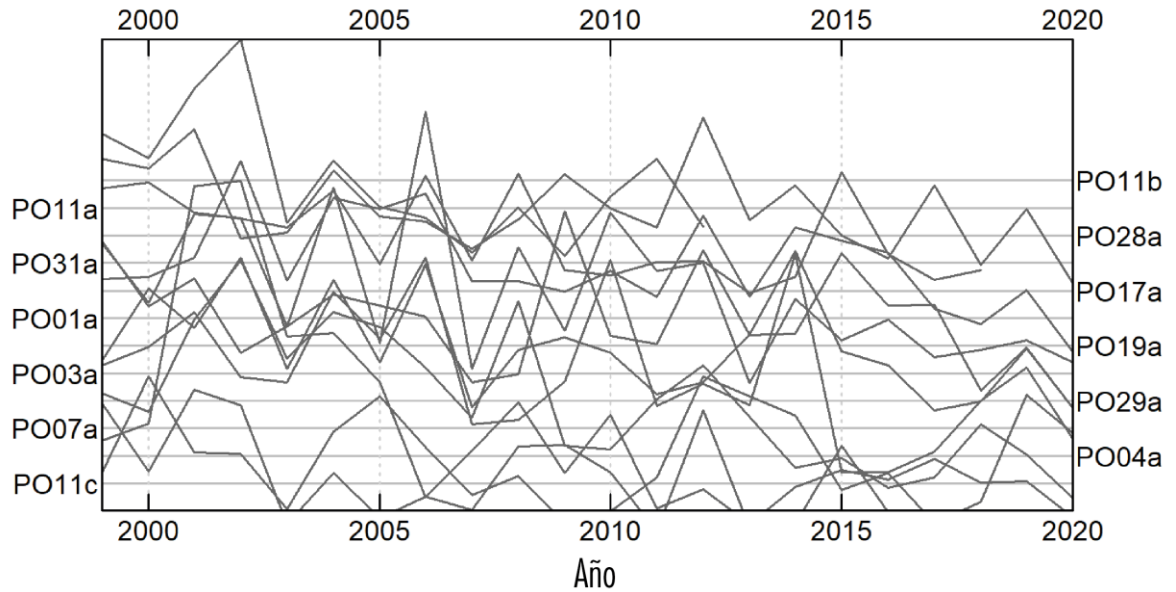
Las dificultades para establecer las cronologías con anillos de crecimiento de *R. rospigliosii* han sido señaladas en estudios con especies de la misma familia (*Podocarpus lawrencei*), reportando la existencia de anillos lobulados y por ende, la existencia de anillos perdidos por acuñamiento (McDougall et al., 2012). No obstante, la presencia de anillos de crecimiento visibles y su posible cofechado indican un potencial para el desarrollo de estudios dendrocronológicos en la

especie, lo que concuerda con un estudio en bosques de niebla al norte de Perú entre los 1350 y 2000 msnm), donde se señaló un buen potencial dendrocronológico para esta especie utilizando secciones transversales y núcleos. En dicho estudio encontraron arboles con edades que alcanzaron los 270 años y determinaron los turnos de corta con anillos de crecimiento para el manejo de estos bosques (Becerra y Zevallos, 2014).

3.2.2. *Podocarpus oleifolius* var *macrostachyus*

De *Podocarpus oleifolius* se tomaron diez muestras de barreno de los treinta árboles muestreados y se cofecharon 12 series de ancho de anillos con mediciones de 254 anillos (Figura 15). Las muestras restantes fueron descartadas por problemas en la calidad de la madera y por la ausencia de límites de anillos definidos en gran parte de las muestras. Las muestras de *P. oleifolius* cubren un periodo de 22 años (1998 – 2020). Los anillos ausentes en todas las series seleccionadas representan solo un 0,8% del número total de los anillos cofechados. Los parámetros obtenidos para las 12 series de anillos de *P. oleifolius* cofechadas revelan un crecimiento promedio radial de 3,68 mm por año, con valores entre 2,86 y 4,23 mm por año. La desviación estándar promedio para todas las series de ancho de anillos fue de 2,07 mm (Anexo 2).

Figura 15. Gráfico espagueti de las series de ancho de anillos de crecimiento de *Podocarpus oleifolius* para un periodo de 22 años.



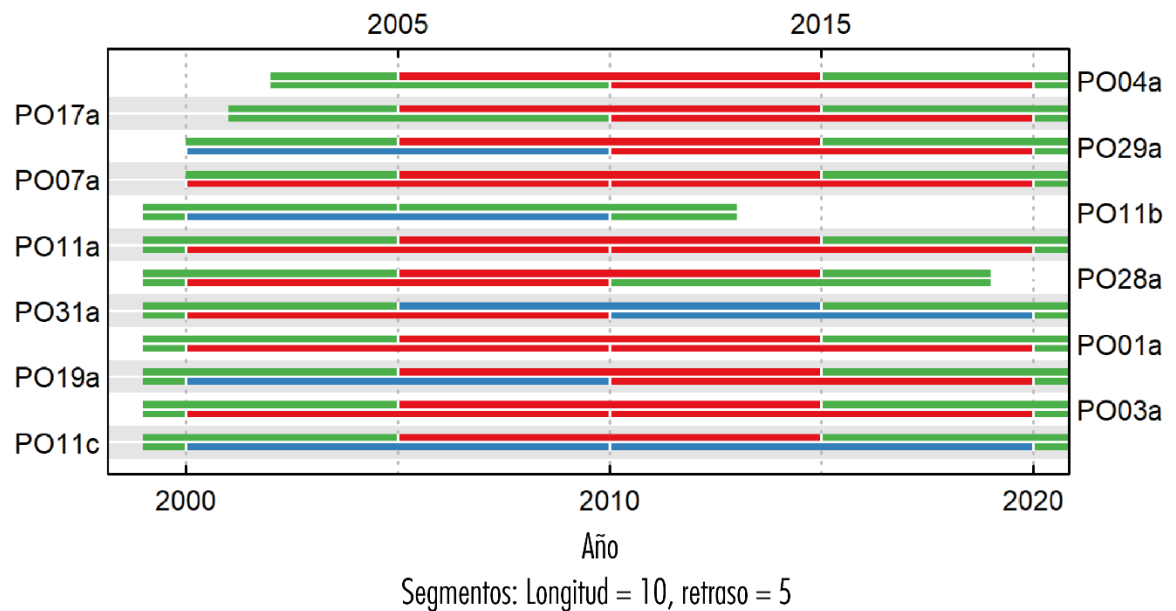
Fuente: elaboración propia.

La inter-correlación media de las series estandarizadas con un modelo *ModNegExp* fue de 0,51 (coeficiente de Pearson), lo cual indica una similitud moderada en las series de anillos de árboles estandarizadas para la especie. La autocorrelación de primer orden (AR1) fue de 0,15, es decir, que la variable del ancho de anillo poca relación tiene con los valores anteriores. La sensibilidad media de 0,51 demostró asimetría positiva en las series de ancho de anillos, es decir que el valor de la media es mayor a la mayoría de las medidas de ancho de anillos (Tabla 4). No obstante, a pesar del valor de correlación de las series de anillos y la poca presencia de anillos anclados o acuñados existió la dificultad para definir los anillos en los núcleos de 5 mm de diámetro, lo que posiblemente ocasionó una baja correlación con la serie maestra durante el periodo de crecimiento de los árboles (Figura 16).

Tabla 4. Estadísticas descriptivas de las 12 series de ancho de anillos de árboles de *Podocarpus oleifolius* en el suroccidente colombiano.

Parámetros	
Número de series de datos	12
Número de mediciones de anillos	275
Promedio longitud de las series (años)	21.15
Rango de edad (años)	22
Lapso	1999 - 2020
Desviación estándar	2,07
Media (Desv. Estándar) series inter-correlación	0.50 (0.150)
Media (Desv. Estándar) AR1	0.13 (0.26)
Sensibilidad media	0.51
Promedio crecimiento radial (mm.año ⁻¹)	3.73

Figura 16. Series de correlación por segmentos de 10 años superpuestos en 5 años realizados con el método de Pearson para la serie de anillos de *Podocarpus oleifolius*.



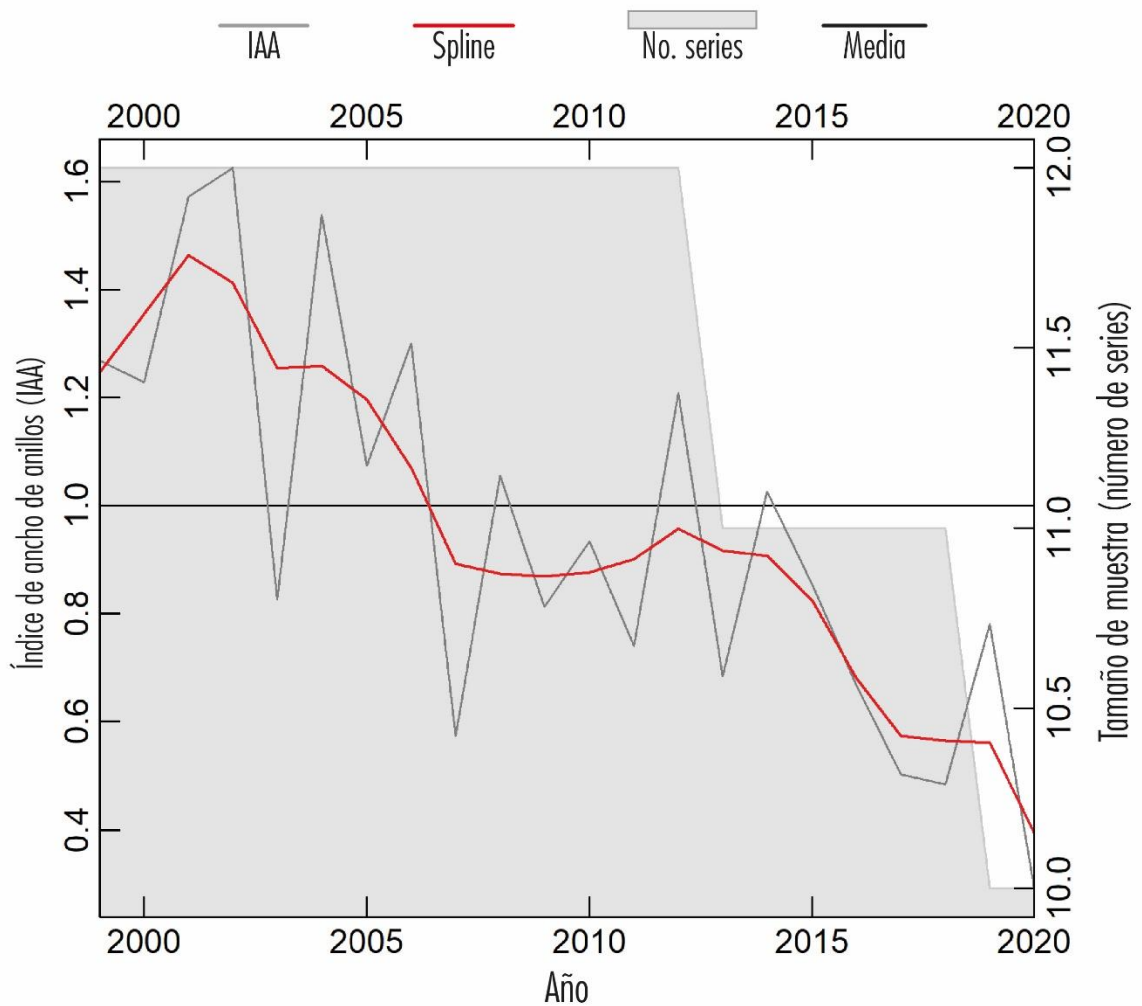
Fuente: elaboración propia.

Para la construcción de la cronología se utilizó una serie de ancho de anillos estandarizada con un modelo a partir del valor de la media, con el fin de eliminar las tendencias de las series de ancho de anillos. En este caso la inter-correlación mostro un valor promedio de 0,54 ($p = 0,02$), un valor que oscila entre 0,31 y 0,73 utilizando el coeficiente de Pearson (Tabla 5). El cofechado demuestra que en este caso es posible asignar a cada anillo el año exacto de su formación, además, resalta la viabilidad de identificar los anillos de crecimiento a partir de las características macroscópicas. La curva media ajustada a la cronología mostró un punto influyente de crecimiento considerable por encima de la media en el periodo 2004 – 2007, similar al encontrado en *Retrophyllum rospigliosii*. Posteriormente, se presentó una disminución en el crecimiento promedio de los árboles después del año 2011, posiblemente influenciado por la competencia dentro del rodal (Figura 17).

Tabla 5. Valores de correlación para las 12 series individuales estandarizadas obtenidas para *Podocarpus oleifolius*.

	Series	Correlación	Valor de p
1	PO11c	0,72	< 0,001
2	PO04a	0,32	0,089
3	PO07a	0,57	< 0,01
4	PO29a	0,55	< 0,01
5	PO03a	0,39	< 0,05
6	PO19a	0,59	< 0,01
7	PO01a	0,33	0,066
8	PO17a	0,56	< 0,01
9	PO31a	0,66	< 0,001
10	PO28a	0,47	< 0,05
11	PO11a	0,51	< 0,01
12	PO11b	0,74	< 0,001

Figura 17. Cronología construida de la media de los valores estandarizados de las 12 series para un periodo de 22 años para *Podocarpus oleifolius*.



Fuente: elaboración propia.

Las dificultades para establecer las series de anillos de crecimiento en *P. oleifolius* han sido señaladas en un estudio con la misma especie y el mismo género. Para *P. oleifolius* en Costa Rica se presentaron dificultades en el cofechado por la formación de anillos falso o fluctuaciones en la densidad intra-anual (Bauch et al., 2006). De igual forma, en un estudio al norte de Indonesia en *Podocarpus neriifolius* se mencionó la presencia de anillos discontinuos o convergentes que dificultó la

datación cruzada de esta especie y ha limitado su uso en estudios dendrocronológicos. Sin embargo, con metodologías basadas en isótopos estables se han demostrado excelentes resultados en el cofechado para *P. neriifolius* (Poussart et al., 2004). De igual forma, February y Stock (1998) mencionan en su estudio sobre el potencial dendrocronológico de *Podocarpus latifolius* y *Podocarpus falcatus* en Sudáfrica que existe una correlación significativa en el conteo de los anillos para ambas especies. Así, para seis árboles de cada especie se encontró una correlación entre la edad y el número de anillos entre 0,88 y 0,92 ($n = 6$, $p < 0,01$). En otro estudio con *P. falcatus* se describieron anillos de crecimiento claros, pero no proporcionó una correlación fuerte entre las series de anillos de las muestras, ocasionadas por la presencia de formaciones ocasionales de anillos falsos o variaciones de densidad. Sin embargo, con el análisis de radiocarbono se corroboró un periodo de edad más de 500 años para esta especie (Krepkowski et al., 2012).

3.2.3. *Prumnopitys harmsiana*

A pesar de que se tomaron 28 muestras radiales de *Prumnopitys harmsiana*, no fue posible demarcar los anillos de crecimiento y por ende establecer las series de ancho de anillos para esta especie. La presencia de anillos de crecimiento con límites claramente definidos es un prerrequisito clave para la demostración convincente del potencial dendrocronológico de una especie (Roig et al., 2005). No obstante, los resultados no son coincidentes con otros realizados al norte de Perú, donde se ha demostrado la presencia de anillos de crecimiento diferenciados para esta especie en individuos con más de 100 años de edad (Becerra y Zevallos, 2014). También, al sur de Ecuador se han construido cronologías de más de 200 años con anillos de *P. harmsiana* (Bräuning et al., 2008). En otra especie del mismo género, *Prumnopitys andina*, en la región templada de los bosques andinos del sur de Chile,

se construyó una cronología de más de 300 años que presentó una correlación inter serie de 0,51 (Álvarez et al., 2021).

Este estudio presenta la primera cronología construida con anillos de crecimiento de *R. rospigliosii* y *P. oleifolius* en el suroccidente colombiano. Ello, representa un avance significativo en el uso de especies de la familia Podocarpaceae en estudios dendrocronológicos. El valor de cofechado de las cronologías en *R. rospigliosii* y *P. oleifolius* sientan las bases para estudios posteriores, a fin de generar un efecto replicador y lograr cronologías de mayor extensión en el tiempo que nos permitan desarrollar efectivamente modelos predictivos para los ecosistemas de montaña donde crecen comúnmente dichas especies. Los resultados también abren la posibilidad de reconstruir variables climáticas como la temperatura y la precipitación con anillos de crecimiento más atrás en el tiempo que el inicio de las mediciones instrumentales. Además, se presenta la posibilidad de estudiar el efecto en los bosques de fenómenos climáticos globales como el fenómeno del niño (ENSO). También, se abre la posibilidad de estudiar las tasas de crecimiento de dichas especies y comprender diversos aspectos de la ecología y dinámica de los bosques montanos tropicales.

4. CONCLUSIONES

R. rospiglosii y *P. oleifolius* presentan potencial para el desarrollo de estudios dendrocronológicos. Ambas especies presentaron anillos de crecimiento distinguibles, con los que se construyó una cronología de 21 años con muestras del tallo de *R. rospiglosii* y de 22 años con muestras de núcleos de *P. oleifolius*. Para ambas especies se reportan dificultades debido al crecimiento lobulado y la formación de anillos anclados frecuentes en ambas especies, sumado a que las muestras de *P. oleifolius* provienen de núcleos.

El potencial dendrocronológico encontrado en *R. rospiglosii* y *P. oleifolius* permitirá, aplicado en bosques naturales, realizar reconstrucciones del pasado climático de la región e investigar la dinámica de estos bosques, ello dado que dichas especies de coníferas tienen crecimiento lento y podrían contener la historia de cientos de años de los bosques andinos.

Según las series estandarizadas en *R. rospiglosii* y *P. oleifolius*, el mayor crecimiento de ambas especies se da en los primeros 10 años de la plantación. Posteriormente, el crecimiento de los árboles disminuye drásticamente posiblemente por el manejo dado a cada una de estas especies en las plantaciones que lleva a una sobreocupación del área.

5. RECOMENDACIONES

Con el fin de conservar las muestras de la madera de *R. rospigliosii*, *P. oleifolius* y *P. harmsiana* que son altamente susceptibles al ataque de hongos, se requiere mantenerlas en lugares con buena aeración. También, para evitar el agrietamiento de las muestras y evitar problemas en el análisis, se requiere un secado lento y no bajo exposición directa al sol.

Desde el punto de vista del análisis se recomienda en futuros estudios dendrocronológicos contar, de ser posible, con muestras de la sección transversal completa (no núcleos) para mayor confiabilidad de los análisis.

Se recomienda el uso de equipos de digitalización para muestras de mayor diámetro con el fin de evitar cortes innecesarios de las muestras para su análisis.

Animar el desarrollo de la investigación dendrocronológica con las especies evaluadas (*R. rospigliosii* y *P. oleifolius*) de forma que se avance en el conocimiento del clima pasado y la dinámica de los bosques montanos.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, C., LE QUESNE, C., ROJAS-BADILLA, M., ROZAS, V. y GONZÁLEZ-REYES, Á., 2021. *Dendrochronological potential of Prumnopitys andina (Podocarpaceae) at the southern limit of its range in the Chilean Andes. New Zealand Journal of Botany* [en línea], vol. 0, no. 0, pp. 1-17. ISSN 11758643. DOI 10.1080/0028825X.2021.1877158. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/0028825X.2021.1877158>.
- ALVAREZ, E., DUQUE, A., SALDARRIAGA, J., CABRERA, K., DE LAS SALAS, G., DEL VALLE, I., LEMA, A., MORENO, F., ORREGO, S. y RODRÍGUEZ, L., 2012. *Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. Forest Ecology and Management* [en línea], vol. 267, pp. 297-308. ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2011.12.013. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>.
- AMOROSO, M.M. y SUÁREZ, M.L., 2015. *The application of tree-ring analysis to ecological questions: A brief review of Dendroecology in Spanish America. Ecosistemas*, vol. 24, no. 2, pp. 1-6. ISSN 16972473. DOI 10.7818/ECOS.2015.24-2.01.
- ANDREU-HAYLES, L., SANTOS, G.M., HERRERA-RAMÍREZ, D.A., MARTIN-FERNÁNDEZ, J., RUIZ-CARRASCAL, D., BOZA-ESPINOZA, T.E., FUENTES, A.F. y JORGENSEN, P.M., 2015. *Matching Dendrochronological Dates with the Southern Hemisphere 14 C Bomb Curve to Confirm Annual Tree Rings in Pseudolmedia rigida from Bolivia. Radiocarbon*, vol. 57, no. 1, pp. 1-13. ISSN 0033-8222. DOI 10.2458/azu_rc.57.18192.
- ARMIJOS MONTAÑO, A.R., 2019. Evaluación anatómica de 50 especies forestales en el sur del ecuador. S.I.: UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.
- BAAS, P., BLOKHINA, N., FUJII, T., GASSON, P., GROSSER, D., HEINZ, I., ILIC,

- J., XIAOMEI, J., MILLER, R., NEWSOM, L.A., NOSHIRO, S., RICHTER, H.G., SUZUKI, M., TERRAZAS, T., WHEELER, E. y WIEDENHOEFT, A., 2004. *IAWA list of microscopic features for softwood identification*. IAWA Journ. Leiden: s.n.
- BAUCH, J., QUIROS, L., NOLDT, G. y SCHMIDT, P., 2006. *Study on the wood anatomy, annual wood increment and intra-annual growth dynamics of Podocarpus oleifolius var. macrostachyus from Costa Rica*. *Applied Botany and Food Quality*, vol. 24, pp. 19-24.
- BECERRA, V. y ZEVALLOS, P.A., 2014. Determinación del turno de corta de *Cedrela odorata* L., *Retrophyllum rospigliosii* Pilger y *Prumnopitys harmsiana* Pilger a través del estudio dendrocronológico en San Ignacio, Región Cajamarca-Perú. *El Ceprosimad Florestal*, vol. 02, no. 2, pp. 33-47.
- BECKER, B. y KROMER, B., 1993. *The continental tree-ring record - absolute chronology, 14C calibration and climatic change at 11 ka*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 103, no. 1-2, pp. 67-71. ISSN 00310182. DOI 10.1016/0031-0182(93)90052-K.
- BELTRÁN GUTIÉRREZ, L.A. y VALENCIA RAMOS, M.G., 2013. Anatomía de anillos de crecimiento de 80 especies arbóreas potenciales para estudios dendrocronológicos en la Selva Central, Perú. *Biología Tropical*, vol. 61, no. 0034-7744, pp. 1025-1037.
- BJÖRKLUND, J., SEFTIGEN, K., FONTI, P., NIEVERGELT, D. y VON ARX, G., 2020. *Dendroclimatic potential of dendroanatomy in temperature-sensitive Pinus sylvestris*. *Dendrochronologia* [en línea], vol. 60, no. January, pp. 125673. ISSN 16120051. DOI 10.1016/j.dendro.2020.125673. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125673>.
- BONINSEGNA, J.A., 2002. *Progress in South American Dendrochronology*. *PAGES NEWS*. Mendoza, Argentina: s.n., pp. 11-13.
- BONINSEGNA, J.A., ARGOLLO, J., ARAVENA, J.C., BARICHIVICH, J., CHRISTIE,

- D., FERRERO, M.E., LARA, A., LE QUESNE, C., LUCKMAN, B.H., MASIOKAS, M., MORALES, M., OLIVEIRA, J.M., ROIG, F., SRUR, A. y VILLALBA, R., 2009. *Dendroclimatological reconstructions in South America: A review*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* [en línea], vol. 281, no. 3-4, pp. 210-228. ISSN 00310182. DOI 10.1016/j.palaeo.2009.07.020. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.07.020>.
- BRÄUNING, A., VOLLAND-VOIGT, F., BURCHARDT, I., GANZHI, O., NAUSS, T. y PETERS, T., 2009. *Climatic control of radial growth of Cedrela montana in a humid mountain rainforest in southern Ecuador*. *Erdkunde*, vol. 63, no. 4, pp. 337-345. ISSN 00140015. DOI 10.3112/erdkunde.2009.04.04.
- BRÄUNING, A., VON SCHNAKENBURG, P., VOLLAND-VOIGT, F. y PETERS, T., 2007. *Seasonal growth dynamics and its climate forcing in a tropical mountain rain forest in southern Ecuador*. *Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*. Erlangen, Germany: s.n., pp. 200.
- BRÄUNING, A., VON SCHNAKENBURG, P., VOLLAND-VOIGT, F. y PETERS, T., 2008. *Seasonal growth dynamics and its climate forcing in a tropical mountain rain forest in southern Ecuador*. *TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology* [en línea], no. May, pp. 27-30. Disponible en: http://treering.de/sites/default/files/TRACE_pdf/Volume_6/Braeuning_et_al_TraceVol_6.pdf.
- BRIENEN, R.J.W. y ZUIDEMA, P.A., 2005. *Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: A test for six species using tree ring analysis*. *Oecologia*, vol. 146, no. 1, pp. 1-12. ISSN 00298549. DOI 10.1007/s00442-005-0160-y.
- BUCKLEY, B.M., BARBETTI, M., WATANASAK, M., ARRIGO, R. D', BOONCHIRDCHOO, S. y SARUTANON, S., 1995. *Dendrochronological Investigations in Thailand*. *IAWA Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 393-409. ISSN 0928-1541. DOI 10.1163/22941932-90001429.
- BUNN, A. y KORPELA, M., 2018. RPubS - Crossdating. [en línea]. [Consulta: 10

- junio 2021]. Disponible en: <https://rpubs.com/andybunn/xdate>.
- BUNN, A.G., 2008. *A dendrochronology program library in R (dplR)*. *Dendrochronologia*, vol. 26, no. 2, pp. 115-124. ISSN 11257865. DOI 10.1016/j.dendro.2008.01.002.
- CAI, Q., LIU, Y., QIAN, H. y LIU, R., 2020. *Inverse effects of recent warming on trees growing at the low and high altitudes of the Dabie Mountains, subtropical China*. *Dendrochronologia* [en línea], vol. 59, pp. 10. ISSN 16120051. DOI 10.1016/j.dendro.2019.125649. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125649>.
- CAMPOS, L.E. y TOMAZELLO, M., 2009. *Dendrocronología en árboles de Tornillo, Cedrelinga cateniformis Ducke (Fabaceae), del Centro de Investigaciones Jenaro Herrera en el noreste de la Amazonia, Región Loreto – Perú* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1388503&info=resumen&idioma=ENG%5Cnhttp://copernic.udg.es/arqueometria/PARTS/28_Proyecto28.pdf.
- COLLEGE, E.S. resource C. at C., 2017. *Part 3: Measuring and Graphing Tree-Ring Width at Chaco Canyon, NM. TREX Tree-Rings Expeditions* [en línea]. [Consulta: 3 junio 2021]. Disponible en: https://serc.carleton.edu/trex/students/labs/lab3_3.html.
- DOUGLASS, A.E., 1946. *Precision of ring dating tree-ring chronologies*. 1946. TUCSON, ARIZONA: University of Arizona.
- FEBRUARY, E.C. y STOCK, W.D., 1998. *An assessment of the dendrochronological potential of two Podocarpus species*. *The Holocene*, vol. 6, pp. 747-750.
- FERGUSON, C.W., 1968. *Bristlecone Pine : Science and Esthetics*. *SCIENCE*, vol. 159, pp. 838-846.
- FRITTS, H.C., 1976. *Dendrochronology and Dendroclimatology. Tree Rings and Climate*, pp. 1-54. DOI 10.1016/b978-0-12-268450-0.50006-9.

- GIRALDO, J., 2012. Anillos, clima y actividad solar. [en línea], Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/8648/>.
- GIRALDO, J.A. y DEL VALLE, J.I., 2021. *Annual Tree Rings in the Rainiest Forests of the Americas* [en línea]. S.l.: Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80415>.
- GUADALUPE COLÍN, J., AGUIRRE CALDERÓN, O.A., CORRAL-RIVAS, J.J., VIVEROS-GUERRERO, E., CORRAL-RIVAS, S. y CRECENTE-CAMPO, F., 2018. Influencia de la competencia en el crecimiento diamétrico de *Pinus durangensis* Martínez en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 9, no. 45, pp. 94-121. DOI 10.29298/rmcf.v9i45.145.
- KELCH, D.G., 1998. *Phylogeny of Podocarpaceae: Comparison of evidence from morphology and 18S rDNA*. *American Journal of Botany*, vol. 85, no. 7, pp. 986-996. ISSN 00029122. DOI 10.2307/2446365.
- KNOFF, P., SCHULZ, C., LITTLE, D.P., STU, T. y DENNIS, W., 2012. *Cladistics anatomical , morphological , and biogeographical data*. *Cladistics*, vol. 28, pp. 271-299.
- KREPKOWSKI, J., BRÄUNING, A. y GEBREKIRSTOS, A., 2012. *Growth dynamics and potential for cross-dating and multi-century climate reconstruction of Podocarpus falcatus in Ethiopia*. *Dendrochronologia* [en línea], vol. 30, no. 4, pp. 257-265. ISSN 11257865. DOI 10.1016/j.dendro.2012.01.001. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2012.01.001>.
- LAYME-HUAMAN, E.T., FERRERO, M.E., PALACIOS-LAZARO, K.S. y REQUENA-ROJAS, E.J., 2018. *Cedrela nebulosa: A novel species for dendroclimatological studies in the montane tropics of South America*. *Dendrochronologia* [en línea], vol. 50, pp. 105-112. ISSN 16120051. DOI 10.1016/j.dendro.2018.06.004. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.06.004>.
- LOCOSEELLI, G.M., CARDIM, R.H. y CECCANTINI, G., 2015. *Rock outcrops*

reduce temperature-induced stress for tropical conifer by decoupling regional climate in the semiarid environment. Int j Biometeorol, pp. 12. DOI 10.1007/s00484-015-1058-y.

LÓPEZ, L. y VILLALBA, R., 2016. *An assessment of Schinopsis brasiliensis Engler (Anacardiaceae) for dendroclimatological applications in the tropical Cerrado and Chaco forests, Bolivia. Dendrochronologia* [en línea], vol. 40, pp. 85-92. ISSN 16120051. DOI 10.1016/j.dendro.2016.07.002. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2016.07.002>.

MARCELO-PEÑA, J.L., SANTINI, L. y TOMAZELLO FILHO, M., 2019. *Wood anatomy and growth rate of seasonally dry tropical forest trees in the Marañón River Valley, northern Peru. Dendrochronologia* [en línea], vol. 55, no. April 2018, pp. 135-145. ISSN 16120051. DOI 10.1016/j.dendro.2019.04.008. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.04.008>.

MARCELO PEÑA, J.L., ROIG, F.A., GOODWIN, Z.A. y TOMAZELLO-FILHO, M., 2020. *Characterizing growth rings in the trees of Perú: A wood anatomical overview for potential applications in dendroecological-related fields. Dendrochronologia*, vol. 62. ISSN 16120051. DOI 10.1016/j.dendro.2020.125728.

MARÍN VÉLEZ, ADRIANA. (1998). *Ecología y silvicultura de las podocarpáceas Andinas de Colombia*. Cali, Colombia: Smurfit Cartón de Colombia.

MARTINEZ-MATAMOROS, J., FERNÁNDEZ GUERRERO, M., LABANDA PATIÑO, C., ZHININ QUEZADA, H. y PUCHA COFREP, D., 2020. Características anatómicas de la madera de *Podocarpus sprucei*, *Podocarpus oleifolius*, *Prumnopittys harmsiana* y *Prumnopitys montana* del sur del Ecuador. ,

MCDUGALL, K.L., BROOKHOUSE, M.T. y BROOME, L.S., 2012. *Dendroclimatological investigation of mainland Australia's only alpine conifer, Podocarpus lawrencei Hook.f. Dendrochronologia* [en línea], vol. 30, no. 1, pp. 1-9. ISSN 11257865. DOI 10.1016/j.dendro.2011.01.011. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2011.01.011>.

- OGDEN, J., 1981. *Dendrochronological Studies and the Determination of Tree Ages in the Australian Tropics. Biogeography*, vol. 8, pp. 405-420.
- POUSSART, P.F., EVANS, M.N. y SCHRAG, D.P., 2004. *Resolving seasonality in tropical trees: multi-decade , high-resolution oxygen and carbon isotope records from Indonesia and Thailand.* , vol. 218. DOI 10.1016/S0012-821X(03)00638-1.
- PÓVOA DE MATTOS, P. y BOTOSSO, P.C., 2003. *DENDROECOLOGIA*. 2003. S.l.: s.n.
- PUCHA-COFREP, D., PETERS, T. y BRÄUNING, A., 2015. *Wet season precipitation during the past century reconstructed from tree-rings of a tropical dry forest in Southern Ecuador. Global and Planetary Change* [en línea], vol. 133, pp. 65-78. ISSN 09218181. DOI 10.1016/j.gloplacha.2015.08.003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.08.003>.
- PUMIJUMNONG, N., 2013. *Dendrochronology in Southeast Asia. Trees - Structure and Function*, vol. 27, no. 2, pp. 343-358. ISSN 09311890. DOI 10.1007/s00468-012-0775-7.
- PUMIJUMNONG, N., ECKSTEIN, D. y SASS, U., 1995. *Tree-Ring Research on Tectona Grandis in Northern Thailand. IAWA Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 385-392. ISSN 0928-1541. DOI 10.1163/22941932-90001428.
- ROIG, F., FERNANDEZ, M., GARECA, E., ALTAMIRANO, S. y MONGE, S., 2001. Estudios dendrocronológicos en los ambientes húmedos de la puna boliviana. *Revista Boliviana de Ecología y conservación ambiental*, vol. 9, pp. 3-13.
- ROIG, F.A., JIMENEZ OSORNIO, J.J., VILLANUEVA DIAZ, J., LUCKMAN, B., TIESSSEN, H., MEDINA, A. y NOELLEMAYER, E.J., 2005. *Anatomy of growth rings at the Yucatán Peninsula. Dendrochronologia* [en línea], vol. 22, no. 1125-7865, pp. 187-193. DOI 10.1016/j.dendro.2005.05.007. Disponible en:

www.elsevier.de/dendro.

ROZENDAAL, D.M.A. y ZUIDEMA, P.A., 2011. *Dendroecology in the tropics: A review. Trees - Structure and Function*, vol. 25, no. 1, pp. 3-16. ISSN 09311890. DOI 10.1007/s00468-010-0480-3.

SCHÖNGART, J., BRÄUNING, A., MAIOLI CAMPOS BARBOSA, A.C., LISI, C.S. y MORALES DE OLIVEIRAA, J., 2017. *Dendroecological Studies in the Neotropics: History, Status and Future Challenges. Dendroecology*. BRAZIL: s.n., pp. 39. ISBN 9783319616698.

SCHÖNGART, J., PIEDADE, M.T., WITTMANN, F., JINK J., W. y WORBES, M., 2005. *Wood growth patterns of Macrobium acaciifolium (Benth.) Benth. (Fabaceae) in Amazonian black-water and white-water floodplain forests. Oecologia*, DOI 10.1007/s00442-005-0147-8.

SCHWEINGRUBER, F.H., 1988. *V The History of Dendrochronology The history of dendrochronology (Europe and USA)*. ,

SOLÍZ, C., VILLALBA, R., ARGOLLO, J., MORALES, M.S., CHRISTIE, D.A., MOYA, J. y PACAJES, J., 2009. *Spatio-temporal variations in *Polylepis tarapacana* radial growth across the Bolivian Altiplano during the 20th century. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology [en línea]*, vol. 281, no. 3-4, pp. 296-308. ISSN 00310182. DOI 10.1016/j.palaeo.2008.07.025. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.07.025>.

SPEER, J.H., ORVIS, K.H., GRISSINO-MAYER, H.D., KENNEDY, L.M. y HORN, S.P., 2004. *Assessing the dendrochronological potential of *Pinus occidentalis* Swartz in the Cordillera Central of the Dominican Republic. The Holocene*, vol. 14, pp. 563-569. ISSN 09596836. DOI 10.1191/0959683604hl732rp.

TOMAZELLO, M., ROIG JUÑENT, F. y ZEVALLOS POLLITO, P., 2009. *Dendrocronología y dendroecología tropical: marco histórico y experiencias exitosas en los países de América Latina. Ecología en Bolivia: revista del*

Instituto de Ecología, vol. 44, no. 2, pp. 73-82. ISSN 1605-2528.

- VÁSQUEZ, Á.M., ALCÁNTARA VARA, E. y HERRERA MACHUCA, M.Á., 2010. *Wood anatomy of Colombian Podocarpaceae (Podocarpus, Prumnopitys and Retrophyllum). Botanical Journal of the Linnean Society*, vol. 164, pp. 293-302.
- VICUÑA-MIÑANO, E.E., 2005. Las Podocarpaceas de los bosques montanos del noroccidente peruano. *Revista Peruana de Biología* [en línea], vol. 12, no. 2, pp. 283-288. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332005000200011&lang=pt.
- VILLALBA, R., BONINSEGNA, J.A. y HOLMES, R.L., 1985. *Cedrela angustifolia and Juglans australis: two new tropical species useful in dendrochronology. Tree Ring Bulletin*, vol. 45, pp. 25-35.
- WORBES, M., 1995. *How to Measure Growth Dynamics in Tropical Trees a Review. IAWA Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 337-351. ISSN 0928-1541. DOI 10.1163/22941932-90001424.
- WORBES, M., 2002. *One hundred years of tree-ring research in the tropics - a brief history and an outlook to future challenges. DENDROCHRONOLOGIA*, vol. 2, pp. 217-231.
- WORBES, M., 2004. *Tree-Ring Analysis. Encyclopedia of Forest Sciences*.
- WORBES, M. y FICHTLER, E., 2010. *Wood Anatomy and Tree-Ring Structure and Their Importance for Tropical Dendrochronology.* , pp. 329-346. DOI 10.1007/978-90-481-8725-6_17.
- ZEGARRA AGÜERO, L.E., 2018. *CARACTERIZACIÓN ANATÓMICA Y DENDROCRONOLÓGICA DE Guatteria hyposericea, Jacaranda copaia Y Pourouma minor DE JUNÍN PERÚ*. S.I.: UNIVERDIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA.

ANEXOS

Anexo 1. Estadísticos para las 29 series individuales creadas en el software estadístico R con la función *summary* para los datos de anchos de anillos de *Retrophyllum rospigliosii*.

	Series	Primer	Último	Año	Media (mm)	Mediana (mm)	Desv. Estand (mm)	Asimetría	Gini	Autocorrelación 1er orden
1	RR01b	2000	2020	21	4,05	3,22	3,51	0,86	0,46	0,50
2	RR01c	2000	2020	21	4,91	3,94	4,72	1,34	0,48	0,23
3	RR01d	2000	2020	21	4,20	3,71	3,41	0,38	0,45	0,40
4	RR01e	2000	2020	21	5,15	3,93	5,41	1,96	0,48	0,07
5	RR03a	2000	2020	21	3,52	3,43	2,39	0,47	0,37	0,15
6	RR03b	2000	2020	21	3,48	3,22	3,42	1,43	0,49	0,30
7	RR03c	2000	2020	21	4,62	3,43	3,81	1,37	0,40	0,27
8	RR04a	2000	2020	21	3,79	3,26	2,83	0,69	0,40	0,62
9	RR04b	2000	2020	21	3,89	3,09	3,21	0,57	0,45	0,67
10	RR04c	2000	2020	21	3,71	3,00	3,40	1,21	0,46	0,52
11	RR04d	2000	2020	21	3,72	3,04	3,12	0,27	0,47	0,75
12	RR04e	2000	2020	21	3,45	2,78	3,03	0,51	0,48	0,69
13	RR05a	2000	2020	21	6,38	5,69	4,78	1,04	0,39	0,51
14	RR05b	2000	2020	21	5,24	5,19	3,51	0,57	0,37	0,50
15	RR05d	2000	2020	21	5,73	4,82	3,87	1,00	0,35	0,43
16	RR07a	2000	2020	21	4,39	3,47	3,49	0,96	0,42	0,39
17	RR07d	2000	2020	21	4,87	5,34	2,92	-0,30	0,33	0,68
18	RR08a	2000	2020	21	7,27	5,87	4,00	0,94	0,29	0,18
19	RR08c	2000	2020	21	6,39	6,69	4,09	0,41	0,35	0,47
20	RR08d	2000	2020	21	6,87	6,17	3,83	1,10	0,29	0,13
21	RR09b	2000	2020	21	10,56	11,33	6,52	0,27	0,34	0,67
22	RR09c	2000	2020	21	10,24	9,09	5,54	0,59	0,29	0,73
23	RR09d	2000	2020	21	10,97	8,62	7,46	0,72	0,37	0,75
24	RR09f	2000	2020	21	8,91	7,93	5,57	0,49	0,34	0,48
25	RR10a	2000	2020	21	7,42	6,03	6,26	1,17	0,44	0,50
26	RR10b	2000	2020	21	6,36	4,17	5,83	0,48	0,50	0,82
27	RR10c	2000	2020	21	7,89	5,32	9,95	1,70	0,59	0,69
28	RR11a	2000	2020	21	11,05	8,82	7,63	1,29	0,35	0,23
29	RR11b	2000	2020	21	9,97	8,14	7,15	1,67	0,34	0,26

Anexo 2. Estadísticos de las 12 series individuales creadas en el software R-studio con la función *summary* para los datos de anchos de anillos de *Podocarpus oleifolius*.

	Series	Primer	Último	Año	Media (mm)	Mediana (mm)	Desv, Estand (mm)	Asimetría	Gini	Autocorrelación 1er orden
1	PO11c	1999	2020	22	3,48	2,74	1,79	0,55	0,28	0,15
2	PO04a	1999	2020	22	3,84	3,57	1,73	0,24	0,25	0,29
3	PO07a	1999	2020	22	3,47	2,15	3,45	1,46	0,49	0,65
4	PO29a	1999	2020	22	3,98	3,47	2,42	0,40	0,34	0,53
5	PO03a	1999	2020	22	3,95	3,62	2,39	0,39	0,33	0,05
6	PO19a	1999	2020	22	3,77	3,53	1,80	0,53	0,26	-0,03
7	PO01a	1999	2020	22	3,27	3,14	1,83	0,25	0,31	-0,05
8	PO17a	1999	2020	22	4,00	3,24	2,56	0,74	0,35	-0,24
9	PO31a	1999	2020	22	4,23	3,69	1,69	0,37	0,22	0,18
10	PO28a	1999	2018	20	2,86	2,08	1,53	0,33	0,29	0,06
11	PO11a	1999	2020	22	3,19	2,84	1,55	0,37	0,27	-0,05
12	PO11b	1999	2012	14	3,99	3,22	2,25	0,79	0,30	0,32