

Potencial dendrocronológico en especies arbóreas del bosque seco y húmedo en Santander,  
Colombia

Angelica Smith Moya Robayo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Forestal

Director

Ronald Alfonso Montañez Valencia

M.Sc. Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales

Codirector

Jorge Andrés Giraldo

Ph.D. Ecología

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Programa de Ingeniería forestal

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

Dedico este proyecto principalmente a mi familia, a mis padres por su amor y apoyo incondicional, por ser mi ejemplo de esfuerzo y perseverancia, y por creer en mí incluso en los momentos en que yo dudaba.

A los profesores y mentores que compartieron su conocimiento y me guiaron con paciencia y dedicación.

Gracias a todos por ser parte de este logro.

**Angelica Smith Moya Robayo**

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto y que formaron parte fundamental de mi formación académica y personal.

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fuerza, la salud y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa de mi vida.

A mi familia, por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Sin su guía y confianza, este logro no habría sido posible.

A mis docentes y asesores, por compartir generosamente su conocimiento, por su paciencia, exigencia y compromiso con nuestra formación. En especial, agradezco a el docente Ronald Alfonso Montañez Valencia, por su orientación, sus valiosos aportes y su disposición a lo largo de este trabajo.

Finalmente, agradezco a la comunidad de La india en Landázuri por el apoyo en el trabajo de campo, al igual que a todas aquellas personas e instituciones que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de este proyecto. Cada uno ha dejado una huella importante en este proceso que hoy culmina.

Gracias a todos.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	11
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Referencial.....	15
2.1 Marco Histórico.....	15
2.2 Marco Conceptual.....	17
2.3 Marco Teórico.....	24
3. Metodología.....	27
3.1 Área de Estudio.....	27
3.2 Trabajo de Campo.....	28
3.3 Trabajo de Taller y Laboratorio.....	29
3.4 Procesamiento y Análisis de Datos.....	30
4. Resultados.....	32
4.1 Resultados de <i>N. juliflora</i> por Individuo.....	35
4.2 Resultados de <i>A. graveolens</i> por Individuo.....	39
4.3 Resultados de <i>Cecropia sp.</i> por Individuo.....	43
4.4 Resultados de <i>Ficus sp.</i> por Individuo.....	47
4.5 Resultados por Especie de <i>N. juliflora</i> y <i>A. graveolens</i> .....	51
4.6 Resultados por Especie de <i>Cecropia sp.</i> y <i>Ficus sp.</i> .....	54
4.7 Modelos de Crecimiento.....	57

5. Discusión.....	59
6. Conclusiones .....	64
7. Recomendaciones.....	65
Referencias Bibliográficas.....	67

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Datos generales de las especies en estudio .....	33
<b>Tabla 2</b> Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para <i>N. juliflora</i> por individuo.....	37
<b>Tabla 3</b> ANOVA de <i>N. juliflora</i> por individuo.....	38
<b>Tabla 4</b> Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para <i>A. graveolens</i> por individuo .....	40
<b>Tabla 5</b> ANOVA de <i>A. graveolens</i> por individuo .....	42
<b>Tabla 6</b> Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para <i>Cecropia sp.</i> por individuo.....	44
<b>Tabla 7</b> ANOVA de <i>Cecropia sp.</i> por individuo .....	46
<b>Tabla 8</b> Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para <i>Ficus sp.</i> por individuo .....	48
<b>Tabla 9</b> ANOVA de <i>Ficus sp.</i> por individuo .....	50
<b>Tabla 10</b> Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para los datos de las cuatro especies.....	52
<b>Tabla 11</b> ANOVA de las especies de bosque seco .....	53
<b>Tabla 12</b> ANOVA de las especies de bosque húmedo .....	56

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Sección transversal de la madera de <i>Astronium graveolens</i> .....	18
<b>Figura 2</b> Sección transversal de la madera de <i>Cecropia glazioui</i> .....	20
<b>Figura 3</b> Sección transversal de la madera de a. <i>Ficus benjamina</i> . b. <i>F. elastica</i> . .....	21
<b>Figura 4</b> Sección transversal de la madera de <i>Neltuma juliflora</i> .....	23
<b>Figura 5</b> Mapa de localización del área de estudio.....	28
<b>Figura 6</b> Marcado de rodajas (A) y lijado de las rodajas (B) .....	30
<b>Figura 7</b> Uso del estereomicroscopio para la medición de los anillos.....	31
<b>Figura 8</b> Anillos de crecimiento de la especie <i>Neltuma juliflora</i> (A), <i>Astronium graveolens</i> (B), <i>Cecropia</i> sp. (C) y <i>Ficus</i> sp. (D) .....	34
<b>Figura 9</b> Diagrama de cajas del incremento acumulado, ICA, IMA de la especie <i>N. juliflora</i> por individuo .....	36
<b>Figura 10</b> Incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de <i>N. juliflora</i> por individuo .....	38
<b>Figura 11</b> Correlación de Pearson del incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de <i>N. juliflora</i> por individuo.....	39
<b>Figura 12</b> Diagrama de cajas del incremento acumulado, ICA, IMA de la especie <i>A. graveolens</i> por individuo.....	40
<b>Figura 13</b> Incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de <i>A. graveolens</i> por individuo .....	42
<b>Figura 14</b> Correlación de Pearson de incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de <i>A.</i> <i>graveolens</i> por individuo .....	43

<b>Figura 15</b> Diagrama de cajas del incremento acumulado, ICA, IMA de la especie <i>Cecropia</i> sp. por individuo .....	44
<b>Figura 16</b> Incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de <i>Cecropia</i> sp. por individuo.....	46
<b>Figura 17</b> Correlación de Pearson de incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de <i>Cecropia</i> sp. por individuo .....	47
<b>Figura 18</b> Diagrama de cajas del incremento acumulado, ICA, IMA de la especie <i>Ficus</i> sp. por individuo .....	48
<b>Figura 19</b> Incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de <i>Ficus</i> sp. por individuo .....	49
<b>Figura 20</b> Correlación de Pearson de incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de <i>Ficus</i> sp. por individuo.....	50
<b>Figura 21</b> Diagrama de cajas del incremento acumulado, ICA, IMA por especie de <i>N. juliflora</i> (Izquierda) y <i>A. graveolens</i> (Derecha) .....	51
<b>Figura 22</b> Incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) por especie de <i>N. juliflora</i> (Izquierda) y <i>A. graveolens</i> (Derecha) .....	53
<b>Figura 23</b> Correlación de Pearson de las especies de bosque seco.....	54
<b>Figura 24</b> Diagrama de cajas del incremento acumulado, ICA, IMA por especie de <i>Cecropia</i> sp. (Izquierda) y <i>Ficus</i> sp. (Derecha) .....	55
<b>Figura 25</b> Incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) por especie de <i>Cecropia</i> sp. (Izquierda) y <i>Ficus</i> sp. (Derecha) .....	56
<b>Figura 26</b> Correlación de Pearson de las especies de bosque húmedo .....	57
<b>Figura 27</b> Modelo de crecimiento de <i>N. juliflora</i> (A), <i>A. graveolens</i> (B), <i>Cecropia</i> sp. (C) y <i>Ficus</i> sp. (D) .....	59

## Resumen

**Título:** Potencial dendrocronológico en especies arbóreas del bosque seco y húmedo en Santander, Colombia\*

**Autor:** Angelica Smith Moya Robayo \*\*

**Palabras Clave:** Ritmos de crecimiento, anillos de crecimiento, modelos de crecimiento, incremento radial

**Descripción:** Las especies arbóreas reflejan en los anillos de crecimiento la influencia de factores bióticos y abióticos, lo que permite reconstruir cronologías de variación ambiental y de crecimiento. En este estudio se analizaron dos zonas de vida (bosque seco y bosque húmedo), ubicados en el municipio de Enciso y Bolívar en Santander respectivamente, se realizaron tres recorridos en cada sitio de muestreo, se seleccionaron individuos al azar que estuvieran caídos, derribados o muertos en pie y se obtuvieron entre una y tres secciones transversales, posteriormente se lijo hasta evidenciar contrastes anatómicos y se seleccionaron cuatro especies, dos por zona de vida para la investigación, se realizó la identificación y medición de los anillos con el uso del estereomicroscopio, la datación con el programa RStudio, además se calcularon descriptores estadísticos para encontrar diferencias o similitudes entre individuos y especies del mismo bosque, además, se calculó el ICA, IMA y el modelo de crecimiento de Gompertz. Los resultados indican que en el bosque seco la especie *A. graveolens* obtuvo valores más altos y estables de incremento con un rendimiento superior y sostenido en el crecimiento en comparación con *N. juliflora*. Por otra parte, en el bosque húmedo la especie con mayor y constante crecimiento fue *Ficus sp.* en comparación con *Cecropia sp.* que obtuvo un crecimiento con más variabilidad lo que implica sensibilidad a condiciones ambientales. Además, se evidenció variabilidad intra e interespecífica en los patrones de crecimiento, influenciada por factores ambientales y genéticos. *N. juliflora* mostró alta plasticidad, pero baja sincronía, mientras que *A. graveolens* presentó mayor estabilidad y potencial productivo. *Cecropia sp.* y *Ficus sp.* evidenciaron estabilidad y sincronía moderada, confirmando su utilidad en estudios dendrocronológicos. Estos resultados aportan bases para la gestión forestal y conservación de bosques tropicales.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED. Programa de Ingeniería Forestal. Director: Ronald Alfonso Montañez Valencia. M.Sc. Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales. Codirector: Jorge Andrés Giraldo. Ph.D. Ecología.

### Abstract

**Title:** Dendrochronological potential in tree species of dry and humid forests in Santander, Colombia\*

**Author(s):** Angelica Smith Moya Robayo<sup>5</sup>

**Key Words:** Growth rates, growth rings, growth patterns, radial growth

**Description:** Tree species reflect the influence of biotic and abiotic factors in their growth rings, allowing us to reconstruct chronologies of environmental variation and growth. In this study, two life zones (dry forest and humid forest) were analyzed, located in the municipalities of Enciso and Bolívar in Santander, respectively. Three surveys were conducted at each sampling site, randomly selecting individuals that were fallen, knocked down, or standing dead, and obtaining between one and three cross sections. Subsequently, the wood was sanded until anatomical contrasts were evident, and four species were selected, two per life zone, for research. The rings were identified and measured using a stereomicroscope, and dating was performed using the RStudio program. In addition, statistical descriptors were calculated to find differences or similarities between individuals and species from the same forest. In addition, the ICA, IMA, and Gompertz growth model were calculated. The results indicate that in the dry forest, the species *A. graveolens* obtained higher and more stable growth values with superior and sustained growth performance compared to *N. juliflora*. On the other hand, in the humid forest, the species with the highest and most constant growth was *Ficus sp.* compared to *Cecropia sp.*, which obtained more variable growth, implying sensitivity to environmental conditions. In addition, intra- and interspecific variability in growth patterns was evident, influenced by environmental and genetic factors. *N. juliflora* showed high plasticity but low synchrony, while *A. graveolens* showed greater stability and productive potential. *Cecropia sp.* and *Ficus sp.* showed stability and moderate synchrony, confirming their usefulness in dendrochronological studies. These results provide a basis for forest management and conservation of tropical forests.

---

\* Degree Work

<sup>5</sup>Institute for Regional Outreach and Distance Education (IPRED). Forestry Engineering Program. Director: Ronald Alfonso Montañez Valencia, M.Sc. Conservation and Sustainable Use of Forest Systems. Co-director: Jorge Andrés Giraldo, Ph.D. Ecology.

## Introducción

Las especies arbóreas incorporan elementos bioquímicos a la madera durante el crecimiento primario (altura) y secundario (diámetro), con variaciones anuales en función del entorno abiótico y biótico, tales como, la disponibilidad de nutrientes, la intensidad lumínica, las fluctuaciones de temperatura y precipitación, y, por ende, reflejados en los anillos de crecimiento que permiten reconstruir cronologías de los cambios en el crecimiento (Caetano et al., 2020).

La formación de anillos anuales en árboles tropicales ha sido cuestionada por investigadores desde otras latitudes, quienes, al observar las maderas tropicales en su corte transversal, tangencial y radial, no identificaron patrones de crecimiento radial anual o multianual (Peralta, 2022). Sin embargo, especies arbóreas nativas de la zona tórrida como: *Tabebuia aurea*, *Aspidosperma pyrifolium*, *Rhizophora mangle*, *Morisonia odoratissima* (del Valle et al., 2012; Aragão et al., 2019), desarrollaron bandas de células producidas por el cambium vascular durante un periodo de incidencia de las condiciones ambientales en los patrones de crecimiento; permitiendo la reconstrucción de los periodos de crecimiento radial y variación ambiental pasada (Giraldo, 2011).

La formación de anillos de crecimiento para las especies registradas en latitudes templadas es diferenciada en periodos anuales, v. gr. *Quercus robur* (Netsvetov et al., 2021), *Pinus ponderosa* (Fuchs et al., 2019), *Taxus baccata* (Cedro, 2023), *Platycladus orientalis* (Sun et al., 2021). Por el contrario, las especies arbóreas nativas y endémicas en la zona intertropical dificultan la identificación de señales de crecimiento radial anual o multianual en sus anillos. Además, los análisis de las reconstrucciones y correlaciones entre señales cronológicas se limitan a

determinadas especies y algunos géneros con posible potencial dendrocronológico (Nath et al., 2016).

En los trópicos, la formación de anillos se atribuye a orígenes genéticos y los periodos alternos de lluvia y sequía (Giraldo & del Valle, 2011). Según Fichte et al. (2003), registraron anillos de crecimiento anual en especies tropicales como: *Guatteria aeruginosa*, *Hymenolobium mesoamericanum* y *Dipteryx oleífera* en la selva tropical siempre húmeda (cero meses secos en el sentido ecológico) en Costa Rica. Otra región, con potencial dendrocronológico para más de 20 especies fue en el bosque muy húmedo tropical y bosque pluvial tropical (zona de vida de bmh – T y bp - T), en el Choco biogeográfico y bosque muy húmedo tropical y premontano (zona de vida bmh-T y bh-P), en la Cordillera Central de los Andes colombianos; donde presentaron sensibilidad anual entre anillos y variables ambientales (Rivera, 2013). Menor esfuerzo científico de carácter dendrocronológico se plasma en la región Oriental del país y en específico para Santander.

La dendrocronología reconstruye la variabilidad del crecimiento secundario mediante el análisis de la señal generada por anillos a largo plazo y analiza las variables incidentes del entorno en los incrementos dendrométricos de los árboles (Aragão et al., 2019). En el modelamiento del crecimiento se proyectan diámetros mínimos de corta, forma de crecimiento, tamaño máximo, vida media, como rasgos de interés biométrico forestal (Inga & del Valle, 2017).

A pesar de la diversidad ambiental y gradientes ecológicos determinantes en la dinámica forestal de los bosques tropicales, el análisis y modelación biométrica en periodos anuales en términos de crecimiento radial a nivel de especie es baja. Debido a, dificultades de muestreos permanentes, desconocimiento en la estandarización de protocolos de análisis dendrométricos, la compleja anatomía de las maderas del inter trópico e interés por analizar las fluctuaciones del crecimiento secundario en la diversidad arbórea (Quesada et al., 2022).

Por consiguiente, es importante incrementar las investigaciones en dendrocronología de especies tropicales para la región Oriental del país y en específico en el departamento de Santander, en zonas de vida contrastantes como el bosque seco en el enclave alto del Cañón del Chicamocha (Enciso, San Miguel y Capitanejo) y húmedo en la región del Magdalena Medio (Landázuri, Cimitarra y Bolívar). Así bien, el presente estudio permitió correlacionar a nivel geográfico cómo los árboles responden a un entorno marcado por la variabilidad climática e impactos antropogénicos (Quesada et al., 2022).

Finalmente, se establecieron dos preguntas de investigación: 1. ¿Registran anillos de crecimiento característicos en especies arbóreas de los bosques secos y bosques húmedos en Santander?, 2. ¿Permite la dendrocronología correlacionar ritmos de crecimiento en las especies de bosque seco y bosque húmedo en Santander?, de este modo, se planteó como hipótesis nula: “las especies arbóreas de bosque seco y bosque húmedo permiten registrar tasas de crecimiento anual”, y una hipótesis alterna: “las especies arbóreas de bosque seco y bosque húmedo no registran tasas de crecimiento anual”.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Analizar el potencial dendrocronológico en especies de bosque seco y bosque húmedo en árboles derribados o caídos por condiciones naturales en Santander.

### 1.2 Objetivos Específicos

Identificar los ritmos de crecimiento radial en las especies *Neltuma juliflora* y *Astronium graveolens* del bosque seco y *Cecropia sp.* y *Ficus sp.* del bosque húmedo en Santander.

Corroborar las tasas de crecimiento radial en las especies *Neltuma juliflora* y *Astronium graveolens* del bosque seco y *Cecropia sp.* y *Ficus sp.* del bosque húmedo en Santander.

Aplicar principios de datación cruzada o cofechado entre las tasas de crecimiento radial en las especies *Neltuma juliflora* y *Astronium graveolens* del bosque seco y *Cecropia sp.* y *Ficus sp.* del bosque húmedo en Santander.

## 2. Marco Referencial

### 2.1 Marco Histórico

El uso de la dendrocronología hace referencia al siglo III con Teofrasto, discípulo de Aristóteles, quien atribuyó la formación de anillos en los árboles a la interacción de estos con fenómenos meteorológicos (Giraldo, 2011). En el siglo XIV, Leonardo da Vinci al observar anillos de formación en la especie de pino, los describió como ritmos anuales y que su ancho tenía relación con los años más o menos secos. Las primeras investigaciones con anillos de crecimiento se atribuyen a Duhamel y Buffon en 1737, quienes buscaban explicación a la formación de los anillos y su desigual espesor (citado por Rivera, 2013). Años siguientes, Harting y colaboradores desde 1784 hasta 1901 estudiaron los anillos de crecimiento con fines ecológicos y climáticos.

El investigador Andrew Douglass se conoce como el padre de la dendrocronología, por su estudio en los anillos de los árboles, la actividad solar y su relación con las variaciones climáticas, de esta manera encontró relación significativa entre la precipitación y la señal de los anillos de *Pinus ponderosa* (Giraldo, 2011).

Los estudios dendrocronológicos en el trópico se remontan a finales del siglo XIX con Brandis, quien estudio el crecimiento de la teca (*Tectona grandis*) en la India, y propuso el análisis de los anillos para la gestión forestal (Giraldo & del Valle, 2012). Otras investigaciones, describen la presencia de anillos en árboles tropicales de hoja ancha entre 1906 y 1928 en el archipiélago indonesio. Además, Berlage en 1931 construyó la primera cronología climática mediante anillos de teca en Java (Quesada et al., 2022).

La primera investigación conocida en el trópico americano fue en 1954 en Costa Rica por el investigador Cesar Pérez, quien estudió el crecimiento de *Cordia alliodora*, con ritmos de

crecimiento anual. Posteriormente, en 1966 Heinrich Tschinkel confirma la anualidad de los anillos de *C. alliodora*. Además, Mariaux (1967) planteó un método para demostrar la anualidad de los anillos, el cual se basó en cortes en el cambium vascular con fechas conocidas, con este método demostró la anualidad de los anillos en *Prioria copaifera* en 1972 (Giraldo, 2011).

Las investigaciones dendrocronológicas en Colombia se han centrado en el crecimiento de los árboles en la Cordillera Central y la región del Chocó biogeográfico con *Albizia niopoides* y *Prioria copaifera*, respectivamente. Donde se reconstruyeron los niveles del río Atrato para los últimos 150 años empleando anillos de crecimiento de *Prioria copaifera* (Rivera, 2013). La última década se han realizado investigaciones para correlacionar la anualidad del crecimiento y variabilidad climática en los bosques más lluviosos de América (Giraldo, 2021; Giraldo et al., 2022).

Mediante métodos dendrocronológicos se han reconstruido la distribución espacial y temporal de las emisiones de CO<sub>2</sub> de combustible fósiles en zonas urbanas (Vásquez et al., 2022). Así bien, la datación dendrocronológica ha logrado dar solución a disputas legales entre una compañía eléctrica y un propietario de una plantación de teca (del Valle & Giraldo, 2021). Por último, los avances en los estudios dendrocronológicos en el trópico han sido integrales, con enfoques ecológicos, climáticos y geomorfológicos, de esta manera se aportó al conocimiento sobre la dinámica de los ecosistemas tropicales (Quesada et al., 2022).

Los estudios dendrocronológicos en bosques secos fueron desarrollados con *Cordia alliodora* en el departamento del Tolima, en relictos de bosque seco tropical donde esta especie arbórea es dominante, se corroboró su anualidad de crecimiento generando así, un modelo alométrico de crecimiento radial en dicha especie (Briceño et al., 2016). Otros estudios

dendrocronológicos, resaltaron *Anacardium excelsum*, *Bursera simaruba*, *Neltuma juliflora*, *Cordia collococca* y *Aspidosperma polyneuron* en el departamento del Cesar (Briceño, 2017).

## 2.2 Marco Conceptual

**Anillos de crecimiento:** los anillos de crecimiento son cambios en la distribución del xilema secundario de las plantas, suelen ser el resultado de las variaciones climáticas, las cuales influyen en las condiciones de crecimiento y producen tejidos contrastantes (Quesada et al., 2022). Los anillos pueden ser poco visibles o registrar patrones de anillos indistintos e irregulares, como: patrones de bandas de parénquima marginal, tamaño y distribución de los vasos, variaciones en la densidad de la madera en árboles tropicales (Ohashi et al., 2009).

**Anillos falsos:** la formación de anillos falsos se debe a la actividad cambial en determinadas condiciones, por fluctuaciones climáticas dentro de un mismo periodo, dioecia, fenología, morfología, actividad fotosintética y reserva de carbohidratos (Blagitz et al., 2019).

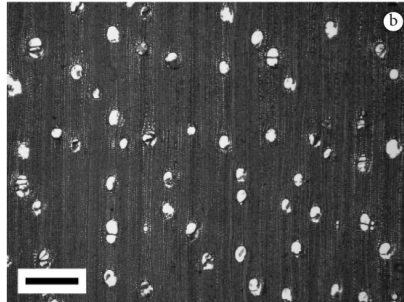
***Astronium graveolens* Jacq.:** registra alturas desde 15 hasta 30 m y unos diámetros entre 40 y 60 cm (Santos et al., 2011). Pertenece a la familia taxonómica Anacardiaceae; presenta hojas compuestas alternas imparipinadas de 11 a 30 cm de largo, con 5 a 15 pares de folíolos de unos 4 a 15 cm de largo, estos son finamente aserrados, de color verde oscuro en el haz y verde pálido en el envés. Cambian de color anaranjado rojizo antes de caer en periodos de sequía. Es una especie dioica, cuenta con flores pequeñas y agrupadas en panículas terminales o axilares de 10 a 25 cm de largo, con cinco pétalos color verde amarillentos. El fruto es una drupa con cáliz alado de uso 10 a 15 mm de largo, de color oscuro, con una sola semilla (Devia et al., 2014, p.12).

La anatomía de *A. graveolens* presenta porosidad difusa sin disposición definida, en ocasiones poros solitarios y múltiples y a veces arracimados. Fibras septadas, paredes gruesas,

punteaduras indistintamente areoladas. Parénquima paratraqueal escaso, vasicéntrico delgado, aliforme de ala corta. Conductos gomíferos transversales (León, 2006).

### Figura 1

*Sección transversal de la madera de Astronium graveolens*



*Nota.* Muestra la sección transversal de la madera de *Astronium graveolens* con Barra de escala = 500  $\mu\text{m}$ . Tomado de *Some properties of Astronium graveolens wood along the stem*, por E. L. Longui, C. C. S. Gondo, I. L. de Lima, M. L. M. Freitas, S. M. B. Florsheim, A. C. S. Zanatto, & J. N. Garcia, 2016, *Floresta e Ambiente*, 23(1), p. 144.

Los anillos de crecimiento se definen por reducción del diámetro radial y engrosamiento de las paredes de las fibras (León, 2006). Albuquerque et al. (2016), definieron los anillos de crecimiento como el aumento de la frecuencia de vasos y reducción del diámetro y una capa de parénquima marginal en el límite de la transición en la madera. Se pueden delimitar por bandas de parénquima axial que reflejan un perfil de densidad de la madera definido por una caída brusca de la densidad (tejido de parénquima) alternada con una mayor densidad (tejido fibroso).

**Bosque húmedo tropical:** los bosques húmedos tropicales se caracterizan por temperaturas cálidas entre 15 y 28°C y elevadas precipitaciones que oscilan entre 1800 mm y más de 10000 mm anuales, al igual que una mega diversidad (Chávez & Arango, 1997). Gracias a estas características es un ecosistema que puede almacenar y procesar grandes cantidades de carbono (131,87 t/ha) a través de la productividad vegetal. Además, en épocas de menor pluviosidad los árboles del trópico liberan agua a la atmosfera a través de la evapotranspiración generando

precipitaciones locales para mantener su entorno húmedo (Paipa & Triana, 2018; Saatchi et al., 2021).

**Bosque seco tropical:** los bosques secos tropicales son ecosistemas con un periodo de seco, denominado estrés hídrico para las plantas y otros organismos (Kattan et al., 2019). Además, cuentan con temperaturas superiores a los 24°C y precipitaciones entre 700 y 2000 mm anuales, de acuerdo con la clasificación climática de Caldas-Lang (1955). Los bosques secos son reguladores del clima global actuando como sumideros de carbono con registros entre 34 y 334 t/ha, sin embargo, son bosques con diversas amenazas y menor intensidad científica (Andrade et al., 2017; Costa et al., 2023). Según el Instituto Humboldt en Colombia existen alrededor de 740 ha de bosque seco tropical (Pizano et al., 2016).

**Bosque tropical:** se ubica en el inter-trópico, limitado por el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio y propio de clima cálido, altas temperaturas y humedad todo el año, con indicadores de alta diversidad en flora y fauna, así como especies endémicas. De igual manera, tiene un papel muy importante en la regulación climática al ser una fuente de calor y humedad que circula por todo el planeta (Pumijumng et al., 2023).

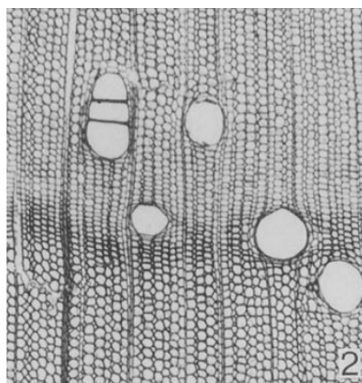
***Cecropia sp.*:** son arboles monopódicos, alcanzan alturas entre 5 y 20 m, las hojas son largas y peltadas, la lámina es excéntrica y está sujeta al peciolo, incisa entre la radiación de la vena principal y la venación es radiada, presencia de tricomas, las estípulas son amplexicaules y fusionadas, pueden variar en longitud de 5 a 50 cm. Pertenece a la familia taxonómica Urticaceae. La inflorescencia consiste en un pedúnculo portando un número de espigas (o espádices) completamente encerrada en una espata, usualmente dos inflorescencias por cada axila en la hoja con una yema lateral entre ellas. Infrutescencias múltiples estrobiliformes, axilares, digitadas,

carneas y agrupadas sobre un pedúnculo aplanado, con cientos de frutiolos libres entre sí (Zegarra, 2011).

La madera no presenta transición entre albura y duramen. Porosidad difusa. Vasos sin patrón definido de disposición, solitarios y múltiples radiales. Placas de perforación simples. Punteaduras intervasculares alternas, circulares a ovaladas y poligonales, grandes. Punteaduras radio-vaso con areola reducida o aparentemente simples, de forma redondeada o alargada. Tíldes presente. Fibras septadas y no septadas, paredes delgadas a medianas, punteaduras indistintamente areoladas. Parénquima paratraqueal vasicéntrico, aliforme de ala corta, marginal. Radios homocelulares de células procumbentes (León, 2015).

## Figura 2

*Sección transversal de la madera de Cecropia glazioui*



*Nota.* Muestra la sección transversal de la madera de *Cecropia glazioui*. Tomado de *The effects of pollution on wood of Cecropia glazioui (Cecropiaceae)*. Por Alves, E. S., 1995. *IAWA Journal*, 16(3), 283–291

Los anillos de crecimiento están definidos por parénquima marginal, además de presentar cambios de densidad debido al aumento del espesor de la pared de la fibra (Giraldo, 2021).

**Dendrocronología:** es una disciplina que permite describir los anillos de crecimiento desde el inicio de su formación hasta el año de derribo o apeo o recolección (Boakye et al., 2016).

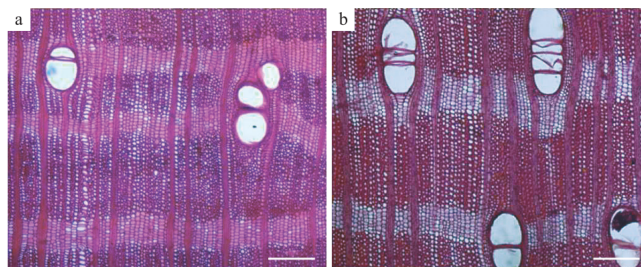
La dendrocronología estima las tasas de incremento radial e identifica las tendencias de crecimiento (Albuquerque et al., 2019). De igual manera, los estudios retrospectivos ayudan a revelar la relación entre periodos climáticos significativos y fluctuaciones del crecimiento en diferentes especies (García et al., 2017).

***Ficus sp.***: arboles con tronco recto, corteza lisa y gris, con abundante látex blanco lechoso, copa amplia y frondosa, pueden registrar alturas hasta 20 m. Pertenece a la familia taxonómica Moraceae. Hojas simples, alternas, con estipula terminal. Flores bisexuales en siconos, flores masculinas a la entrada del opérculo y femeninas en su interior. Fruto sicono, globoso, generalmente de 2 a 2,5 cm de diámetro. Semillas pequeñas y abundantes (Idárraga et al., 2016).

La anatomía de la madera presenta poros generalmente grandes, solitarios y múltiples radiales cortos, platinas de perforación simples, punteaduras intervasculares alternas, circulares a ovaladas y poligonales, grandes, fibras no septadas, paredes delgadas a medianas, parénquima en bandas anchas, en series, radios heterocelulares y tubos laticíferos, baja frecuencia de vasos, punteaduras intervasculares grandes. Se pueden encontrar especies con cristales en parénquima axial o radial y especies sin cristales (Parra, 2014).

### Figura 3

*Sección transversal de la madera de a. Ficus benjamina. b. F. elastica.*



*Nota.* Muestra la sección transversal de la madera de *Ficus benjamina* y *F. elastica*. Tomado de *Anatomía del xilema secundario en seis especies de Ficus l. (Moraceae) en la ciudad de Mérida, Venezuela*. Por Parra, V., J. E. 2014. *Acta botánica venezolana*, 37(2), 165–176

Los anillos de crecimiento están marcados por una banda de fibras comprimidas con paredes celulares gruesas al final del período de crecimiento anual. En algunos casos se puede observar una fina capa discontinua de parénquima marginal entre estas fibras. Los vasos tienen lúmenes de tamaño mediano y están distribuidos uniformemente dentro de cada anillo anual (es decir, la madera tiene porosidad difusa). El parénquima está presente en bandas casi continuas, es más ancho en la madera temprana y disminuye gradualmente su espesor en la madera tardía. Los radios leñosos son de tamaño pequeño a mediano. Los individuos de esta especie tienen uniformidad circular en los anillos de crecimiento. A pesar de la facilidad de identificar visualmente los anillos de crecimiento, incluso en cortes frescos y sin lijar, no siempre es posible realizar una datación exacta de los anillos. En los árboles grandes los anillos de crecimiento en la zona de albura tienen mayor compresión, y las bandas parenquimáticas continuas y delgadas se intercalan con bandas de fibras, que los observadores inexpertos pueden considerar como verdaderos anillos de crecimiento (López et al., 2012, p.511).

**Incremento radial:** el incremento radial se refiere al aumento en el diámetro del fuste o tallo de un árbol a lo largo del tiempo. Por ende, es un proceso biológico complejo relacionado con factores antropogénicos, bióticos y abióticos, y genética de la especie (Anzhella et al., 2023).

*Neltuma juliflora* (Sw.): árbol o arbusto espinoso de hasta 15 m, copa amplia y plana, follaje muy ralo y extendido. Tronco corto y torcido. Pertenece a la familia taxonómica Fabaceae. Hojas compuestas, alternas, bipinnadas, inflorescencia en racimos espigados, cilíndricos, de 6 a 8 cm de largo, crecen en las axilas de las hojas, flores con cáliz pequeño; corola amarillenta, de 3 a 4 mm de largo, con 5 pétalos libres. Los frutos son una vaina fibrosa e indehisciente, recta, linear, semillas aplanadas rodeadas por una pulpa dulce, café sin endospermo (Rojas, 2015).

**Figura 4**

*Sección transversal de la madera de Neltuma juliflora*



*Nota.* Muestra la sección transversal de la madera de *Neltuma juliflora*. Tomado de *The current state of knowledge on Prosopis juliflora*. Por Food and Agriculture Organization of the United Nations, (1986).

*N. juliflora*, presenta porosidad difusa, sin patrón definido de disposición, solitarios, múltiples radiales y arracimados. Platinas de perforación simples. Punteaduras intervasculares alternas, circulares a ovaladas, pequeñas a medianas. Depósitos de goma presentes. Fibras no septadas, paredes muy gruesas, punteaduras indistintamente areoladas. Parénquima apotraqueal difuso (poco), paratraqueal aliforme de ala corta, confluyente, fusiforme (abundante). Radios homocelulares de células procumbentes (León, 2008).

Se describen tres parámetros anatómicos principales para identificar los límites de los anillos de crecimiento: vasos, parénquima y fibras. La madera temprana se caracteriza típicamente por la presencia de vasos de gran tamaño, mientras que la madera tardía suele tener vasos más pequeños y un mayor porcentaje de fibras. En muchas especies el anillo de crecimiento anual está delimitado por una banda de tejido parenquimatoso terminal (Ambite et al., 2022). Esta banda de

tejido parenquimático probablemente se forma al final del periodo de crecimiento y se extiende de forma ininterrumpida a lo largo del borde del anillo de crecimiento (Morales et al., 2001).

**Ritmos de crecimiento:** los ritmos de crecimiento en los árboles son eventos estacionales o cíclicos que se pueden observar en diferentes tejidos y órganos como el cambium vascular, meristemas, hojas, ramas, raíces y estructuras reproductivas. Los ritmos de crecimiento del cambium vascular se relacionan con el incremento radial del árbol, por acumulación de capas o anillos. Además, los ritmos de crecimiento están determinados genéticamente, pero son estimulados por condiciones ambientales (Giraldo, 2021).

**Tasas de crecimiento:** al estimar las tasas de crecimiento con los anillos de los árboles se conoce con precisión los ciclos de rotación biológica y las cantidades de madera para futuras cosechas (López & Villalba, 2020). La densidad específica está estrechamente relacionada con las tasas de crecimiento. Por lo general, altas tasas de crecimiento se asocian con especies arbóreas de baja densidad de la madera (Shimamoto et al., 2016).

### 2.3 Marco Teórico

En la actualidad existe interés por la gestión y sostenibilidad de los bosques tropicales y la asociación con fenómenos ambientales, en especial climáticos y antropológicos, para establecer pautas de rigurosidad científica en el manejo de los bosques a largo plazo. Mediante la implementación de metodologías de observación por microscopía, y técnicas de dendrometría, tinciones en estudios dendrocronológicos; se logra demostrar la frecuencia de formación de los anillos de crecimiento, estimar las tasas de incremento radial y tendencias de crecimiento a largo plazo (Albuquerque et al., 2019). Además, de ofrecer posibilidades para estudios con cronosecuencias para variación climática, silvicultural y ecológica de las especies.

La formación de anillos de crecimiento se ve influenciada por diversos factores ambientales entre los que se encuentra la iluminación solar, el agua, el dióxido de carbono, el oxígeno, el contenido y disponibilidad de nutrientes en el suelo, temperatura y toxinas como metales pesados y la salinidad. Cuando se presentan alteraciones en estos factores las plantas responden a través de su crecimiento, esta respuesta depende de las variaciones ambientales y de relaciones intrínsecas de la especie (Quesada et al., 2022).

En especies arbóreas tropicales se puede relacionar con la cantidad de horas de brillo solar y eventos de pluviosidad, incluso análisis recientes, se relacionó que el crecimiento radial en bosques muy húmedos aumentaba a medida que disminuía las precipitaciones, en comparación con el crecimiento en bosques secos tropicales (Giraldo et al., 2022). De igual manera, la variación intraanual de los anillos de especies tropicales suele estar relacionado con microclimas y eventos como El Niño Oscilación del Sur (Aragão et al., 2019).

La dendrocronología tiene sus fundamentos en la identificación del xilema secundario como periodos de crecimiento en especies arbóreas, datación anual y correlacionando eventos climáticos pasados y construyendo escenarios de cambio climático (Durán et al., 2014). A nivel ecológico y de gestión forestal, la dendrocronología ha permitido estimar las edades (años), las tasas de crecimiento e intervalos para cuantificar el diámetro asintótico en los rodales o bosques (López & Villalba, 2020). Aunque, las especies de los bosques intertropicales llegan a formar anillos no distintivos o complejos de delimitar (Pumijumnong et al., 2023). Además, los anillos con periodos de formación bianual como por ejemplo las especies *Hesperocyparis lusitánica* (Jacoby, 1989) y *Tamarix aphylla* (Fahn et al., 1981), hacen parte del desafío de las técnicas de la dendrocronología (Brienen & Zuidema, 2005). Otras dificultades en la observación se denominan,

anomalías de falsas bandas, acuñaamiento de anillos, anillos dobles y anillos perdidos (Roden, 2008).

La diferenciación anatómica en las angiospermas leñosas, está dada por la presencia de vasos o poros, el tipo de parénquima axial y fibras, fibrotraqueidas, lumen y engrosamiento de la pared celular de los elementos leñosos. Los límites entre la madera temprana y la madera tardía se distinguen por el tamaño de los vasos, en la madera temprana los vasos son de mayor tamaño, proceso opuesto para la dimensión de los vasos en la madera tardía (García et al., 2021).

La anualidad de anillos de crecimiento en especies tropicales ha sido analizada con diferentes técnicas: instalación de dendrómetros para registrar el incremento y correlacionar la dinámica intraanual (Mendivelso, Camarero & Gutiérrez, 2016). Otra técnica realizada, se describe como heridas en el cambium y tras periodos definidos se observaron las alteraciones en la anatomía y formación de nuevos anillos (Rozendaal & Zuidema, 2011). El uso de la radiografía para contrastar las densidades en las temporalidades de formación anual en las maderas y aplicaciones de colorantes y datación mediante isotopos de carbono.

Por otro lado, la datación cruzada o *crossdating* amplía las cronologías con múltiples núcleos superpuestos, para determinar la pertinencia del anillo marcado y año calendario y formación sincrónica relacionada con variables climáticas (Rozendaal & Zuidema, 2011).

Las técnicas de datación cruzada se basan en determinar que un anillo en concreto pertenece a un año específico, utilizando la variación en el ancho de los anillos, pero puede limitarse a especies que muestren patrones distintivos de crecimiento, el tipo de muestras colectadas con el barreno de Pressler, denominadas testigos de madera, o *cores* o cilindros o canutos; también se emplean secciones transversales completas permite observar la presencia de bandas irregulares o falsas lo que facilita la datación cruzada de diferentes radios en una sección

transversal (Roden, 2008; López & Villalba, 2016). Lo anterior, bajos los principios de trazado de mínimo dos radios (variabilidad dentro del árbol) y 8 individuos por especie (variabilidad dentro del bosque), que permiten maximizar la señal y reducir los ruidos de factores externos.

Finalmente, el uso de programas informáticos como COFECHA, BIOCLIM, LIBRERIAS R, efectúan los análisis descriptivos e inferenciales estadísticos sobre el ancho de la señal o anillos de crecimiento en las especies leñosas.

### **3. Metodología**

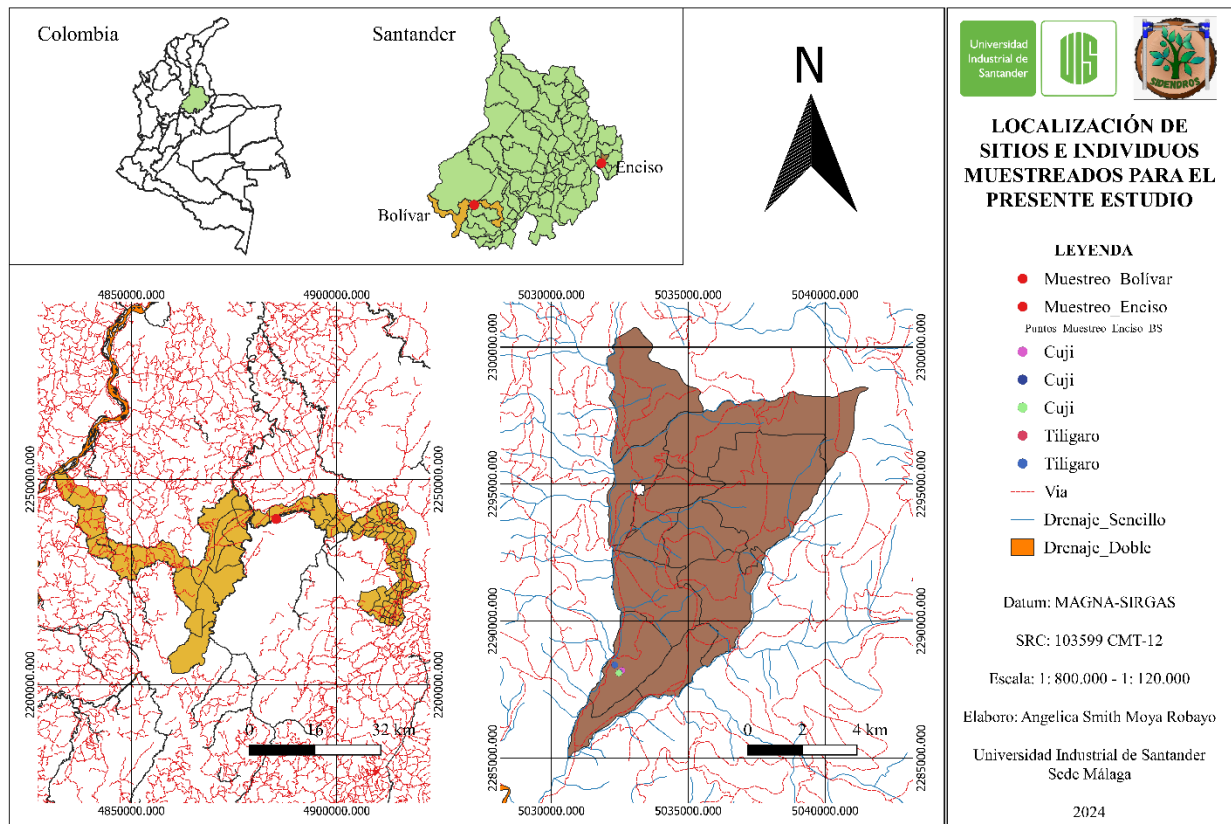
#### **3.1 Área de Estudio**

El estudio se desarrolló en el departamento de Santander, en los municipios de Enciso y Bolívar en las zonas de vida de bosque seco tropical (bs-T) y bosque húmedo tropical (bh-T), respectivamente, de acuerdo con la clasificación de zonas de vida de Holdridge (Holdridge, 1987). El municipio de Enciso se localiza en la Provincia de García Rovira en el sector Nororiental del departamento y su rango altitudinal oscila entre los 1000 hasta 3800 m s. n. m; con temperaturas que varían entre 15 - 24°C y una precipitación de 1300 mm/año (EOT, Enciso Santander, 2003), la recolección de muestras se realizó en la vereda El Juncal (figura 5).

El municipio de Bolívar se localiza al Suroccidente del departamento, en la provincia de Vélez, registrando con un gradiente altitudinal que inicia a los 120 m s. n. m., y 3200 m s. n. m. La precipitación oscila entre 2090 hasta 2585 mm anuales y temperatura promedio anual de 27°C (EOT, Bolívar Santander, 2004), cuenta en inmediaciones de la vereda Horta Medio.

**Figura 5**

*Mapa de localización del área de estudio*



*Nota.* El mapa de localización de sitios e individuos muestreados en los municipios de Bolívar y Enciso, departamento de Santander, Colombia.

### 3.2 Trabajo de Campo

Se realizaron tres recorridos en cada sitio de muestreo, estableciendo ejes o líneas de 500 m cada una, en la orilla de los ríos o terrazas aluviales de referencia. Los individuos arbóreos caídos o derribados por causas naturales o muertos en pie fueron seleccionados al azar en campo y las rodajas fueron cortadas con motosierra según las condiciones observadas en la estructura y sanidad del árbol, entre una (1) y tres (3) secciones transversales (rodajas de madera), con espesor máximo de cinco (5) cm (Velasco et al., 2018). Así mismo, se colectaron muestras de las hojas y registros

fotográficos para su identificación. Cabe mencionar el apoyo financiero obtenido por la VIE – UIS hacia el semillero de investigación SIDENDROS para los diferentes recorridos en campo e insumos para el tratamiento de las rodajas en el laboratorio de maderas de la sede Málaga.

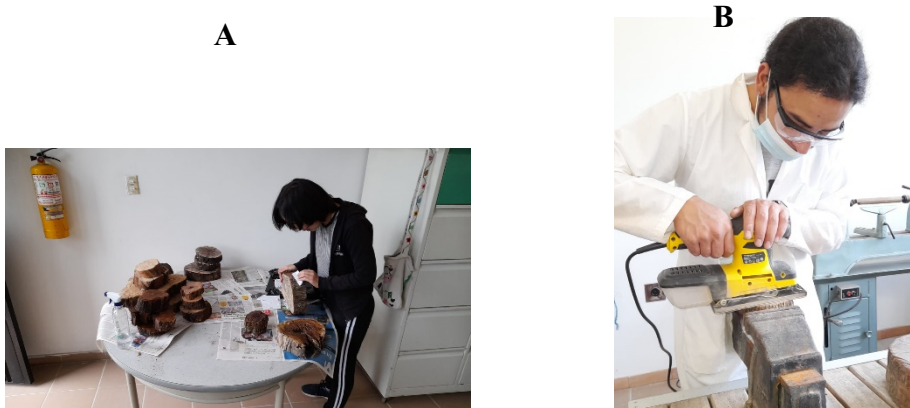
Se georreferenció cada individuo muestreado con GPS Garmin 64s y se agregó la siguiente etiqueta: Inicial del municipio Número del individuo \_Inicial de la parte del árbol donde fue tomada (B: base; R: rama) \_Nombre común. Este último por conversaciones sostenida con aserradores de las áreas de estudio. La identificación taxonómica para las especies del presente estudio consistió en la colección de una muestra botánica para la aplicación de claves taxonómicas y comparación en el herbario en formación de la Universidad Industrial de Santander, sede Málaga.

### **3.3 Trabajo de Taller y Laboratorio**

Las rodajas colectadas fueron dimensionadas a 3 cm de espesor y posterior pulida en el taller y el lijado de las de las trozas inicio con lija de grano grueso desde calibre 60, 80, 120, 200, pasando por granos medios <sup>A</sup> de 240, 300 y 400 hasta llegar a granos gruesos <sup>B</sup> de 600 con la lijadora orbital Ranger Tools. La cual permitió diferenciar contrastes anatómicos visibles como los anillos de crecimiento en las rodajas, límites de cambio de albura, falsos anillos, alteraciones de densidad y daños mecánicos y que sirvieron para la selección de cuatro especies (cuatro muestras por especie). Actividades realizadas en el taller de maderas y área de trabajos del semillero de investigación SIDENDROS en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander, sede Málaga.

**Figura 6**

*Marcado de rodajas (A) y lijado de las rodajas (B)*



*Nota.* (A) La figura muestra el marcado de las rodajas colectadas. (B) Lijado de las rodajas utilizando lijadora eléctrica.

Se trazaron y midieron cuatro ejes transversales para la estimación promedio del diámetro en cada rodaja y con uso del estereomicroscopio marca CARL ZEISS MODELO STEMI 305 Trino con cámara 4k para microscopia Axio cam 208 color, en el laboratorio de la sede Málaga se realizó el conteo y medición del ancho de los anillos y sección radial con niveles de aumento de 10x, 20x y 40x atendiendo los protocolos según Stokes y Smiley (1996) y Carl Zeiss Microscopy GmbH (2015).

**3.4 Procesamiento y Análisis de Datos**

Se construyó la base de datos con la georreferenciación, nombre científico, nombre común, diámetro medido 1, 2, 3 y 4, y diámetro promedio. La estimación de amplitud y crecimientos secundarios se realizó mediante una serie acumulativa del ancho de los anillos, este procedimiento puede generar errores al subestimar o sobreestimar la señal, cuando la médula (centro anatómico) no coincide con el centro geométrico de un círculo perfecto, por lo cual se ajustó mediante la (ecuación 1).

$$Aa = \left( \frac{Rc}{Rm} \right) Am$$

(Ecuación 1)

Donde Aa: ancho ajustado, Rc: radio del círculo perfecto (circunferencia/ $2\pi$ ), Rm: radio sobre el que se midieron el ancho de los anillos, Am: ancho del anillo medido sin corregir (Giraldo & del Valle, 2011; Inga & del Valle, 2017).

Los datos del ancho de los anillos fueron limitados con alfileres de colores y medidos en milímetros utilizando la aplicación de la regla ZEISS en cada sección transversal. Posteriormente, mediante curvas de correlación, se verificaron la datación y la cronología a través del programa RSTUDIO, donde se calcularon los coeficientes de correlación entre las series individuales del ancho de los anillos, proporcionando una base estadística para identificar anillos falsos o ausentes en los radios medios.

### Figura 7

*Uso del estereomicroscopio para la medición de los anillos*



*Nota.* Fotografías del proceso de medición de los anillos de crecimiento utilizando el estereomicroscopio.

Además, se calcularon descriptores estadísticos como la media, máximos, mínimos, desviación estándar, coeficiente de variación, pruebas de normalidad, análisis de varianza (p-value de 0,05; grados de libertad 74-1) con el fin de encontrar diferencias en el crecimiento entre

individuos y especies del mismo bosque y correlación de Pearson entre las variables ya mencionadas (López et al., 2022; Costa et al., 2023).

Se estimó el incremento corriente anual (ICA) que corresponde al incremento diamétrico del árbol para un año determinado (Ecuación 2) y el incremento medio anual (IMA) (Ecuación 3).

$$ICA = CA_t - CA_{t-1}$$

(Ecuación 2)

Donde,  $CA_t$ : crecimiento acumulado correspondiente al año  $t$ ,  $CA_{t-1}$ : crecimiento acumulado del año anterior  $t-1$ .

$$IMA = \left( \frac{CA_t}{t} \right)$$

(Ecuación 3)

Donde,  $CA_t$ : crecimiento acumulado para el año  $t$ ,  $t$ : años totales.

La obtención de los diámetros corrientes y medios se promediaron los incrementos correspondientes a dos radios (A y B), cuasi opuestos en una misma sección transversal, se asignó al anillo central que está en contacto con la médula como anillo 1, siendo en cada sección transversal el año  $t = 1$  (López et al., 2012).

Por último, se aplicó el modelo de crecimiento de Gompertz, el cual expone una curva de crecimiento de forma sigmoïdal, con un punto de inflexión en el tiempo y en el diámetro, la (ecuación 4) el crecimiento (Lozano et al., 2012; Domínguez et al., 2017).

$$D = Ae^{-be - kT}$$

(Ecuación 4)

Donde,  $A$ : valor asintótico máximo,  $b$ : parámetro que ajusta el desplazamiento horizontal de la curva,  $k$ : tasa de crecimiento específica,  $T$ : tiempo parámetros estadísticos.

#### 4. Resultados

El estudio trabajó cuatro (4) especies, dos (2) de bosque seco tropical y dos (2) de bosque húmedo tropical, cada especie contó con la representación de tres individuos con excepción de *N. juliflora* que fueron cuatro individuos. Los rangos de anillos observados fueron desde 12 hasta 29, los cuales arrojaron periodos de análisis en años calendarios desde 1994 hasta 2022. En la tabla 1, se observan las generalidades por especies e individuos.

**Tabla 1**

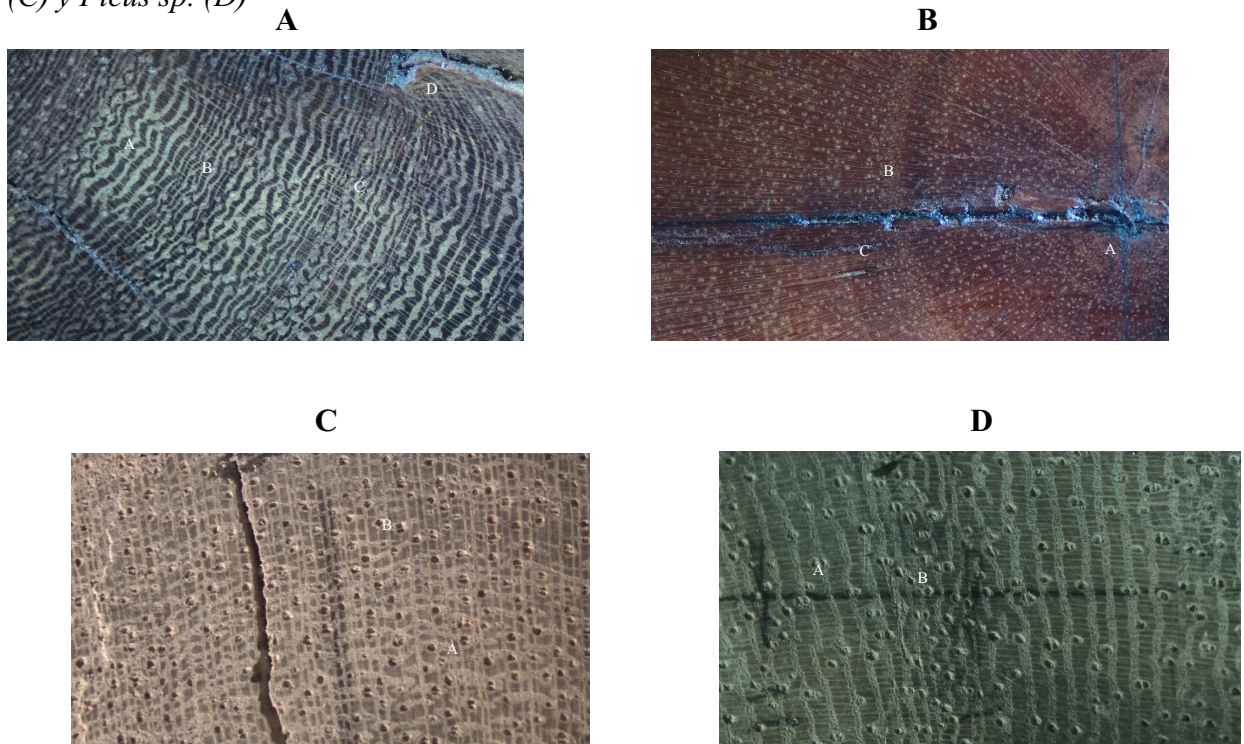
*Datos generales de las especies en estudio*

Bosque	Nombre científico	Nombre común	Familia	Individuos	Diámetro medio (mm)	Nº anillos	Rango de años
Bosque seco	<i>N. juliflora</i> (Sw.) Raf.	Cují	Fabaceae	E10R	106,48	12	2011 - 2022
				E11B	108,05	15	2008 - 2022
				E12B	108,80	29	1994 - 2022
				E13B	120,85	22	2001 - 2022
	<i>A. graveolens</i> Jacq.	Tibigaró	Anacardiaceae	E20B-1	158,90	26	1997 - 2022
				E20B-2	152,95	24	1999 - 2022
				E21B	223,23	26	1997 - 2022
Bosque húmedo	<i>Cecropia</i> sp.	Yarumo	Urticaceae	C2B	325,25	26	1997 - 2022
				C3B	325,00	20	2003 - 2022
				C4B	325,00	26	1997 - 2022
	<i>Ficus</i> sp.	Higuerón	Moraceae	C17B	281,00	19	2004 - 2022
				C18B	269,00	18	2005 - 2022
				C19B	258,25	20	2003 - 2022

*Nota.* Los datos presentan las especies arbóreas analizadas en bosques seco y húmedo, indicando nombre científico, nombre común, familia, código de individuos, diámetro medio, número de anillos y rango de años de crecimiento.

**Figura 8**

Anillos de crecimiento de la especie *Neltuma juliflora* (A), *Astronium graveolens* (B), *Cecropia sp.* (C) y *Ficus sp.* (D)



*Nota.* Las imágenes muestran la morfología de los anillos de crecimiento observados en cortes transversales de la madera bajo lupa estereoscópica de *N. juliflora*, *A. graveolens*, *Cecropia sp.* y *Ficus sp.*

Los registros fotográficos resultantes corresponden a capturas con el estereomicroscopio por cada especie. Así bien, en *N. juliflora* (A) se observó A: baja densidad de fibras, B: alta densidad de fibras, C: anillos comprimidos, D: acuñamiento de los anillos por herida. *A. graveolens* (B) se observó A: primeros anillos de crecimiento, B: alta densidad de poros, C: baja densidad de poros. *Cecropia sp.* (C) se observó A: baja densidad de fibras color oscuro, mayor densidad fibras de color pálido, B: baja densidad de fibras color pálido, mayor densidad fibras de color oscuro. *Ficus sp.* (D) se observó A: fibras separadas y baja densidad de poros, B: fibras más comprimidas y alta densidad de poros (Figura 8).

El cofechado en la especie *N. juliflora* evidenció diferencias en el grado de sincronización de las series evaluadas, el individuo E12B y E10R mostró correlaciones moderadas a altas y estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ;  $p < 0,01$ ) que refuerzan la confiabilidad de la cronología, en contraste, los individuos E13B y E11B presentaron correlaciones bajas y no significativas, lo cual refleja una débil sincronización con la señal común y sugiere la posible influencia de factores microambientales. En el caso de la especie *A. graveolens* mostró un cofechado con correlaciones bajas en los tres individuos, E21B con  $p = 0,07$ ; E20B1 con  $p = 0,13$ ; E20B2 con  $p < 0,21$ ; esto refleja un bajo grado de coherencia en la señal común. La especie *Cecropia sp.* exhibió que los tres individuos tuvieron correlaciones moderadas, siendo en el individuo C2B con un  $p = 0,18$  y en los individuos C3B y C4B con un  $p = 0,30$ , esto confirma que existe una señal dendrocronológica moderada.

Por último, en la especie *Ficus sp.* evidenció una correlación alta y significativa en el individuo C17B con un  $p < 0,05$  lo que evidencia buena coherencia con la señal común, en contraste los individuos C18B y C19B presentaron correlaciones de moderada a bajas con un  $p = 0,15$ . En síntesis, se requieren mayor replicación en el número de individuos en cada especie para la obtención de correlaciones más altas y significativas.

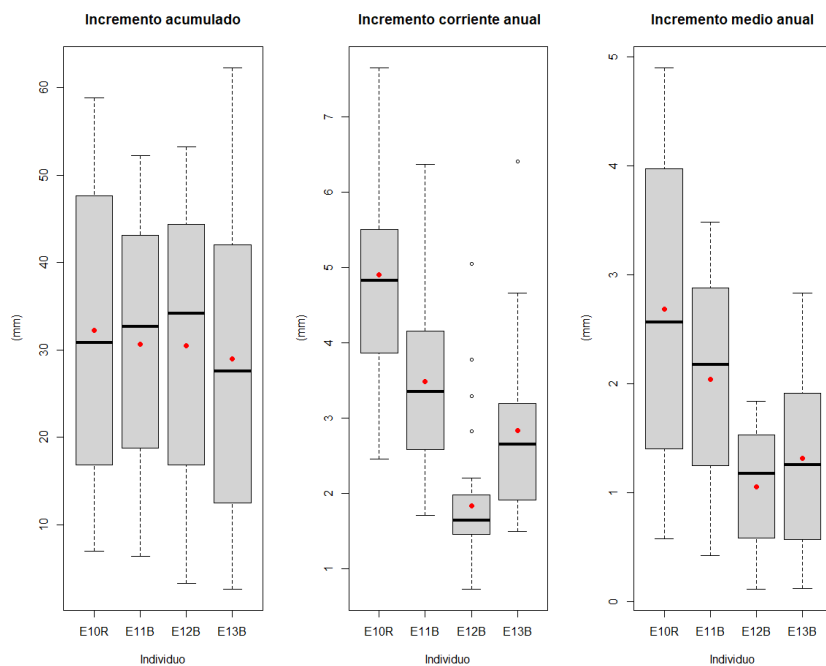
#### **4.1 Resultados de *N. juliflora* por Individuo**

El diagrama de cajas ilustra los valores de la especie *N. juliflora* en tres diferentes medidas: incremento acumulado, incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA), para cuatro individuos (E10R, E11B, E12B y E13B). En el gráfico (figura 9), el incremento acumulado presentó amplia dispersión de los valores, siendo E13B el que mostró un crecimiento relativamente alto. En el ICA E10R y E11B presentó mayor rango en los valores, mientras que los individuos E12B y E13B exhibieron distribuciones más compactas, con menos variabilidad interanual

sugiriendo un crecimiento más estable durante cada año, además presentaron valores atípicos lo cual puede estar relacionado con condiciones ambientales particulares o factores biológicos que afectan el crecimiento de manera irregular. Por último, el IMA en los individuos E10R y E11B mostraron incrementos superiores a los de E12B y E13B sugiriendo que esos últimos podrían estar experimentando un crecimiento más sostenido en comparación con los demás.

**Figura 9**

*Diagrama de cajas del incremento acumulado, ICA, IMA de la especie N. juliflora por individuo*



*Nota.* Las cajas representan la distribución de los valores de incremento para cada individuo de *N. juliflora*. La línea negra dentro de cada caja indica la mediana, los límites superior e inferior corresponden al rango intercuartílico, los bigotes muestran los valores mínimos y máximos, y los puntos rojos representan valores promedios individuales.

Los valores del incremento acumulado presentaron una distribución normal con la excepción del individuo E12B, el ICA refleja normalidad en los individuos E11B y E10R, pero en

los otros individuos no, por último, los valores del IMA mostraron normalidad en los individuos a excepción del individuo E12B (tabla 2).

**Tabla 2**

*Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para N. juliflora por individuo*

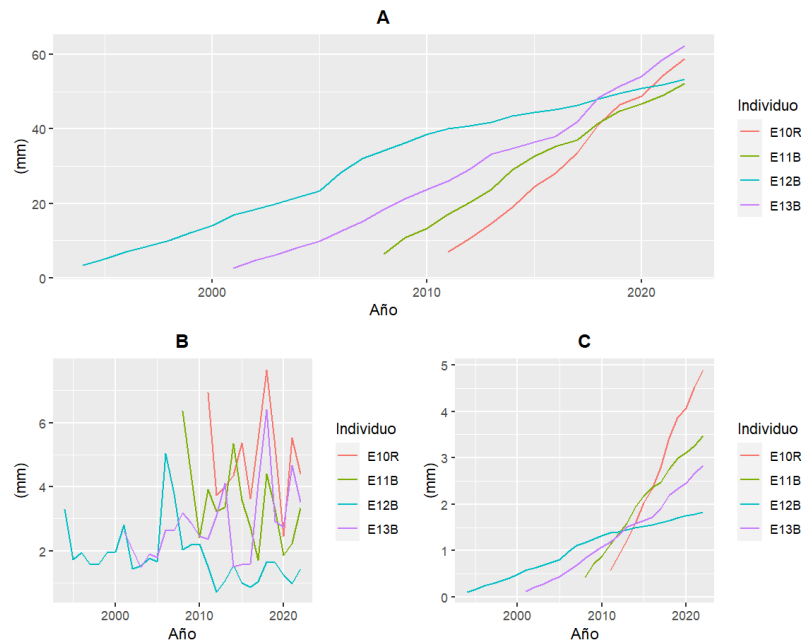
	E12B	E11B	E13B	E10R
Incremento acumulado	0,0326	0,5706	0,3387	0,6349
ICA	0,0001	0,5377	0,0145	0,8440
IMA	0,0326	0,5706	0,3387	0,6349

*Nota.* Los valores corresponden a los niveles de significancia (p) obtenidos en la prueba de Shapiro–Wilk para las variables de incremento acumulado, ICA e IMA de *N. juliflora*. Valores de p inferiores a 0,05 indican desviación de la normalidad.

En la figura 10, el incremento acumulado (A) se observó un aumento constante en todos los individuos, siendo E10R y E13B con el incremento más pronunciado, sin variaciones significativas según ANOVA (tabla 3). El ICA (B) presentó mayor dispersión, E10R y E11B mostraron un crecimiento irregular y fluctuante, por otro lado, E12B y E13B tuvieron un comportamiento más estable con pocos picos y un crecimiento constante, el ANOVA presentó diferencias significativas entre individuos (tabla 3). Por último, en el IMA (C) E10R y E11B mostraron un crecimiento constante y progresivo, en cambio, E12B tiene un crecimiento más pausado y E13B presentó un crecimiento irregular con aumentos en algunos años seguidos de periodos de menor crecimiento, con diferencias significativas entre los individuos (tabla 3).

**Figura 10**

*Incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de N. juliflora por individuo*



*Nota.* Los gráficos muestran las variaciones del crecimiento radial de cada individuo de *N. juliflora* a lo largo del período analizado.

**Tabla 3**

*ANOVA de N. juliflora por individuo*

<i>N. juliflora</i>	p-value
Acumulado	0,957
ICA	<b>4,41e-10 ***</b>
IMA	<b>4,04e-06 ***</b>

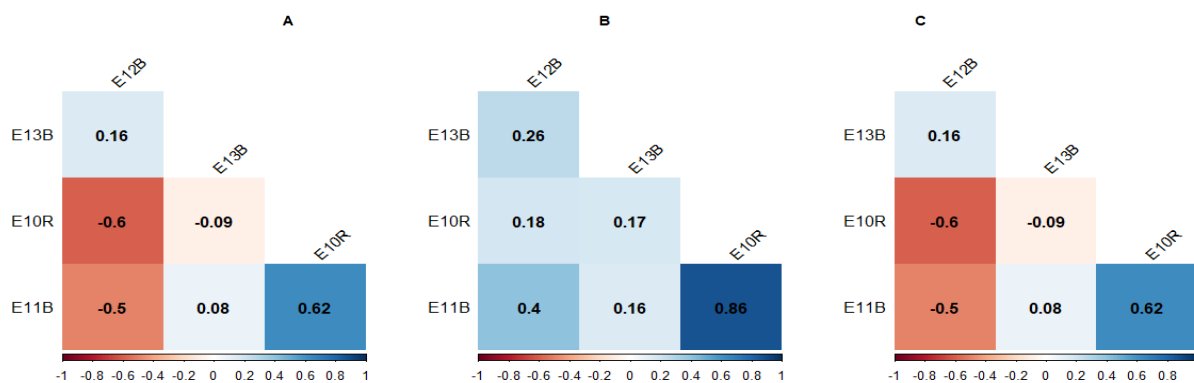
*Nota.* Los valores corresponden al nivel de significancia (p) obtenido en el análisis de varianza (ANOVA) para las variables de incremento acumulado, ICA e IMA de *N. juliflora*. Los asteriscos indican niveles de significancia estadística (\*\*\*)  $p < 0,001$ .

En la correlación de Pearson (figura 11), se observó que en el incremento acumulado (A) el individuo E12B tiene una correlación significativa negativa con E10R y E11B, lo cual indica que sus crecimientos están muy poco relacionados, por el contrario, los individuos E10R y E11B

tiene una correlación significativa positiva por lo que el comportamiento de su crecimiento está alineado. El ICA (B) presentó una correlación significativa positiva entre los individuos E12B – E11B y E11B – E10R, lo que sugiere que el crecimiento está fuertemente relacionado entre estos individuos. Por último, el IMA (C) presentó los mismos valores y correlaciones que el incremento acumulado.

**Figura 11**

*Correlación de Pearson del incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de N. juliflora por individuo*



*Nota.* Los gráficos muestran los coeficientes de correlación de Pearson entre los individuos de *N. juliflora* para las variables de incremento acumulado (A), ICA (B) e IMA (C). Los valores positivos indican correlaciones directas y los negativos relaciones inversas. La intensidad del color representa la magnitud del coeficiente de correlación, donde los tonos rojos señalan correlaciones negativas y los azules positivos.

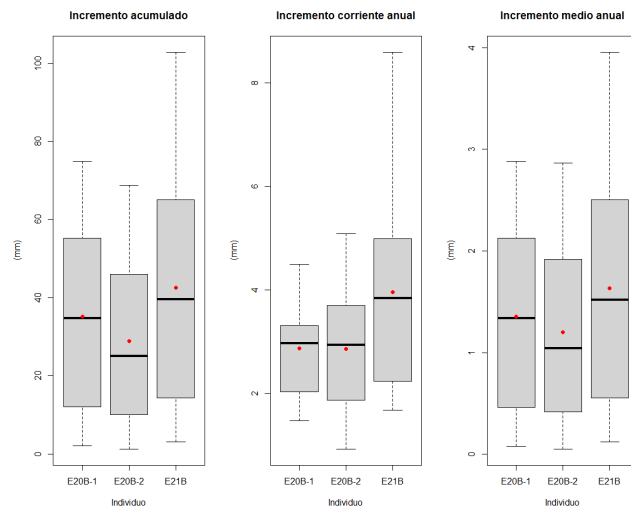
**4.2 Resultados de *A. graveolens* por Individuo**

La especie *A. graveolens* representó en el incremento acumulado para el individuo E21B presento la mayor dispersión en los datos esto indica un incremento consistente, pero con variabilidad, los demás individuos mostraron un crecimiento más moderado y una distribución comprimida. En el individuo E21B se observó una amplia distribución de los datos con fluctuaciones significativas de un año a otro, por otra parte, los individuos E20B-1 y E20B-2

presentaron valores más bajos y concentrados los que sugiere un crecimiento más estable durante los años. Por último, el IMA del individuo mostró el mayor potencial de crecimiento al tener los valores más altos y el individuo E20B-2 el de menor rendimiento (figura 12).

**Figura 12**

*Diagrama de cajas del incremento acumulado, ICA, IMA de la especie A. graveolens por individuo*



*Nota.* Los diagramas muestran la variabilidad del crecimiento radial de los individuos de *A. graveolens*. Las cajas representan el rango intercuartílico, la línea negra indica la mediana, los bigotes muestran los valores mínimo y máximo, y los puntos rojos corresponden a los valores promedios individuales.

Los valores del incremento acumulado, ICA e IMA presentaron una distribución normal en todos los individuos (tabla 4).

**Tabla 4**

*Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para A. graveolens por individuo*

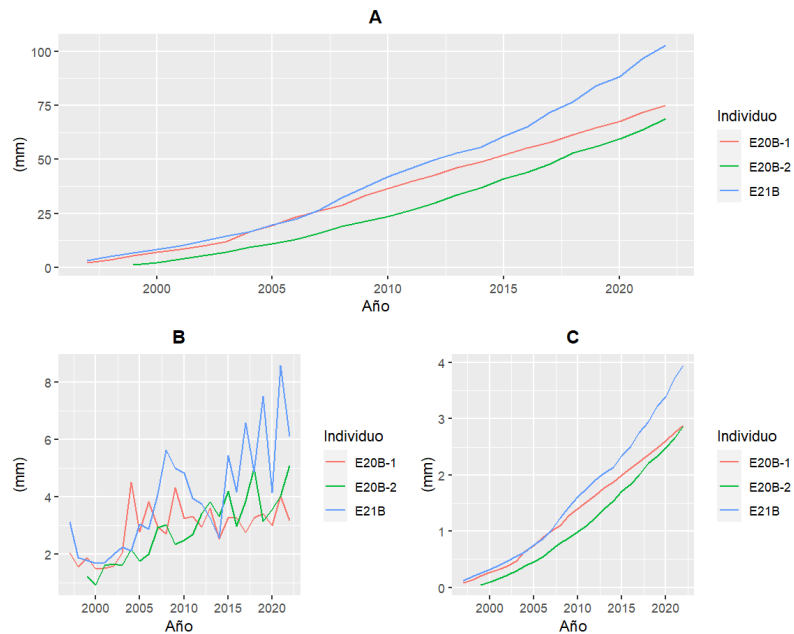
	E20B-1	E20B-2	E21B
Incremento acumulado	0,1273	0,1207	0,0816
ICA	0,2527	0,7686	0,0966
IMA	0,1273	0,1207	0,0816

*Nota.* Los valores corresponden a los niveles de significancia (p) obtenidos en la prueba de Shapiro–Wilk para las variables de incremento acumulado, ICA e IMA de *A. graveolens*. Valores de p inferiores a 0,05 indican desviación de la normalidad.

En la figura 13, en el incremento acumulado (A) el individuo E21B mostró el mayor crecimiento sostenido durante los años, mientras que los demás presentaron un patrón más moderado, sin diferencias significativas (tabla 5). En el ICA (B) E21B presentó los valores más altos en varios años, especialmente después de año 2010, los otros individuos presentaron patrones con variaciones, el ANOVA indicó diferencias significativas (tabla 5). Por último, en el IMA (C) E21B exhibe el incremento más alto a lo largo de todo el periodo, los demás individuos presentaron un crecimiento intermedio con una pendiente regular y constante, sin diferencias significativas entre los individuos (tabla 5).

**Figura 13**

*Incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de A. graveolens por individuo*



*Nota.* Los gráficos muestran las variaciones del crecimiento radial de cada individuo de *A. graveolens* lo largo del período analizado.

**Tabla 5**

*ANOVA de A. graveolens por individuo*

<i>A. graveolens</i>	p-value
Acumulado	0,175
ICA	<b>0,0066 **</b>
IMA	0,304

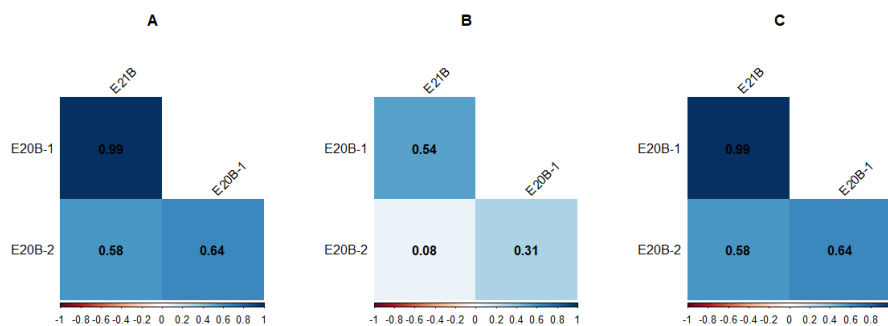
*Nota.* Los valores corresponden al nivel de significancia (p) obtenido en el análisis de varianza (ANOVA) para las variables de incremento acumulado, ICA e IMA en *A. graveolens*. Los asteriscos indican niveles de significancia estadística (\*\*p < 0,01).

La correlación de Pearson (figura 14), mostró una correlación positiva significativa en el incremento acumulado (A) entre individuos de la especie *A. graveolens*, resaltando E21B y E20B-1 que cuentan con patrones de crecimiento similares a lo largo del tiempo. El ICA (B) presentó

una correlación moderada positiva entre E21B y E20B – 1, pero baja entre E21B y E20B-2 lo que indica una relación casi nula entre los incrementos. Por último, el IMA (C) presentó correlaciones iguales al incremento acumulado, lo cual refleja una mayor consistencia entre los patrones de crecimiento de la especie *A. graveolens*.

**Figura 14**

*Correlación de Pearson de incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de A. graveolens por individuo*



*Nota.* Los gráficos muestran los coeficientes de correlación de Pearson entre los individuos de *A. graveolens* para las variables de incremento acumulado (A), ICA (B) e IMA (C).

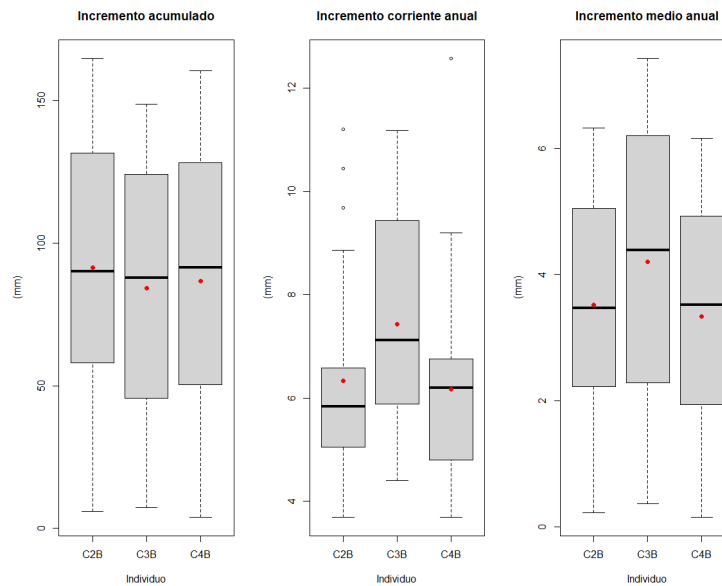
**4.3 Resultados de *Cecropia sp.* por Individuo**

La especie *Cecropia sp.* representó valores de incremento acumulado en los tres individuos oscilan en rangos muy similares, siendo el individuo C2B con el mayor incremento con una distribución relativamente amplia que indica variabilidad en el crecimiento. Los valores del ICA el individuo C3B mostró un incremento corriente mayor, una distribución más amplia y variable, además, los individuos C2B y C4B presentaron una distribución comprimida, con crecimiento más constante y menos variable, pero también algunos años de crecimiento atípico. El IMA presentó valores altos en el individuo C3B por lo que ha experimentado un crecimiento consistente y alto a

lo largo del tiempo en comparación con los demás individuos que presentaron un crecimiento constante (figura 15).

**Figura 15**

*Diagrama de cajas del incremento acumulado, ICA, IMA de la especie Cecropia sp. por individuo*



*Nota.* Los diagramas muestran la variabilidad del crecimiento radial de los individuos de *Cecropia sp.* Las cajas representan el rango intercuartílico, la línea negra indica la mediana, los bigotes muestran los valores mínimo y máximo, y los puntos rojos corresponden a los valores promedios individuales.

Los valores del incremento acumulado presentaron una distribución normal (*Shapiro Wilk*), el ICA reflejó normalidad solo en el individuo C3B, pero en los demás individuos no, por último, los valores del IMA mostraron normalidad en todos los individuos (tabla 6).

**Tabla 6**

*Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para Cecropia sp. por individuo*

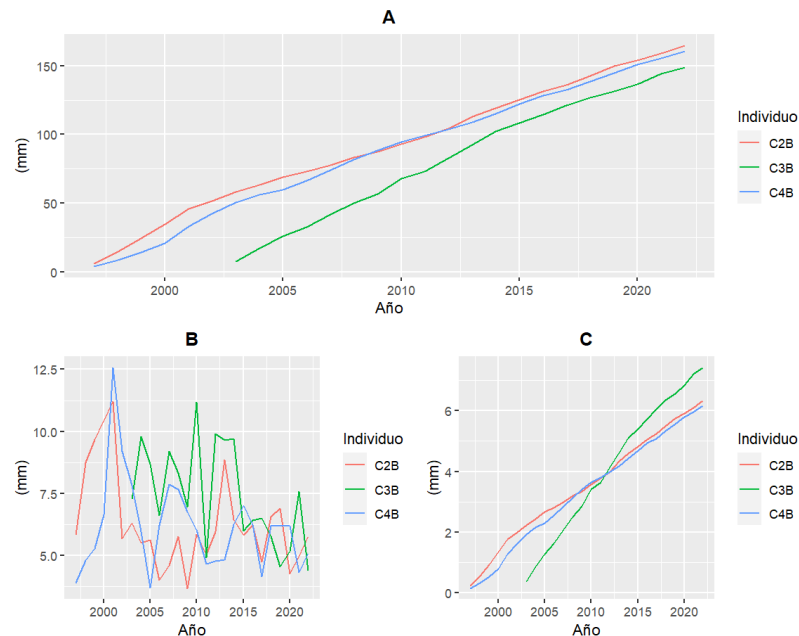
	C2B	C3B	C4B
Incremento acumulado	0,5796	0,3133	0,3110
ICA	0,0037	0,3965	0,0038
IMA	0,5796	0,3133	0,3110

*Nota.* Los valores corresponden a los niveles de significancia (p) obtenidos en la prueba de Shapiro–Wilk para las variables de incremento acumulado, ICA e IMA de *Cecropia sp.* Valores de p inferiores a 0,05 indican desviación de la normalidad.

En la figura 16, el incremento acumulado (A) mostró una trayectoria similar con crecimiento constante y sostenido entre C2B y C4B, mientras que C3B creció más lento, con un incremento a partir del 2010 pero siendo menor que los demás individuos, sin diferencias significativas entre ellos (tabla 7). El ICA (B) presentó una alta variabilidad interanual, siendo el individuo C4B el que alcanzó el pico más bajo, el ANOVA arrojó que no hay diferencias significativas (tabla 7). Por último, el IMA (C) el individuo C3B alcanzó el valor más alto en el año 2022, los otros individuos presentaron valores similares, sin diferencias significativas entre los individuos (tabla 7).

**Figura 16**

*Incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de Cecropia sp. por individuo*



*Nota.* Los gráficos muestran las variaciones del crecimiento radial de cada individuo de *Cecropia sp.* lo largo del período analizado.

**Tabla 7**

*ANOVA de Cecropia sp. por individuo*

<i>Cecropia sp.</i>	p-value
Acumulado	0,859
ICA	0,0725
IMA	0,304

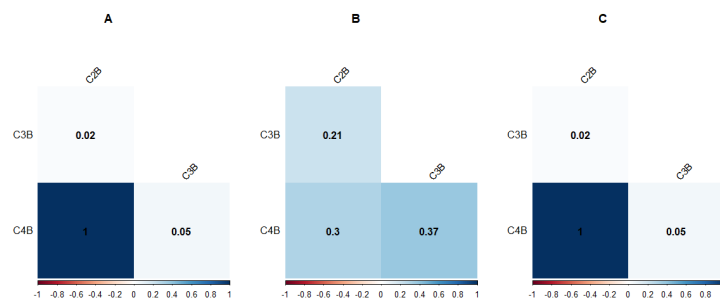
*Nota.* Los valores corresponden al nivel de significancia (p) obtenido en el análisis de varianza (ANOVA) para las variables de incremento acumulado, ICA e IMA en *Cecropia sp.*

En la correlación de Pearson (figura 17), se observó que en el incremento acumulado (A) los individuos C2B y C4B presentaron una correlación, pero entre los demás individuos la correlación fue muy baja. El ICA (B) presentó correlaciones bajas entre los individuos. Por último,

el IMA (C) tiene correlación perfecta entre los individuos C2B y C4B, pero muy baja en los demás, como se presenta en el incremento acumulado.

**Figura 17**

*Correlación de Pearson de incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de Cecropia sp. por individuo*



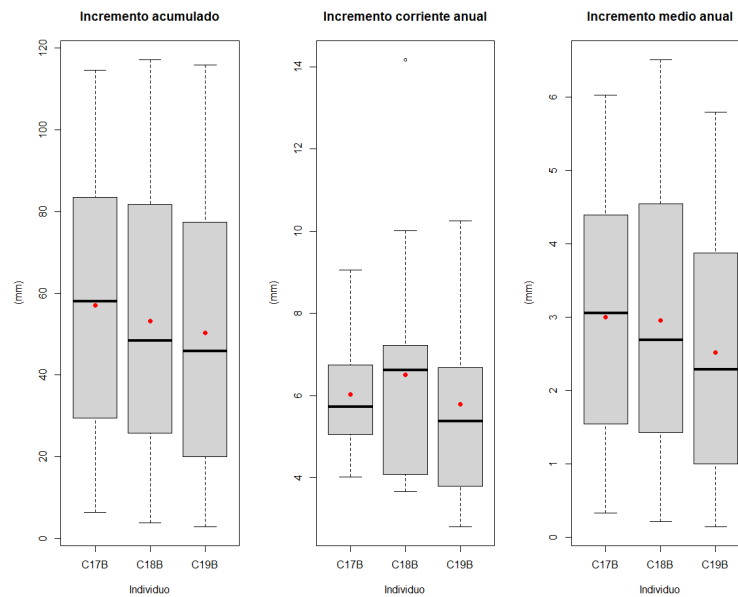
*Nota.* Los gráficos muestran los coeficientes de correlación de Pearson entre los individuos de *Cecropia sp.* para las variables de incremento acumulado (A), ICA (B) e IMA (C).

**4.4 Resultados de *Ficus sp.* por Individuo**

La especie *Ficus sp.* presentó valores de incremento acumulado en los tres individuos que oscilan en rangos muy similares, con pequeñas variaciones en el crecimiento. Los valores del ICA exhiben un incremento constante en el individuo C17B, el incremento de C18B y C19B varió significativamente con valores atípicos. Por último, los valores del IMA se observó una distribución similar entre los individuos, siendo C17B el de mayor incremento medio (figura 18).

**Figura 18**

*Diagrama de cajas del incremento acumulado, ICA, IMA de la especie Ficus sp. por individuo*



*Nota.* Los diagramas muestran la variabilidad del crecimiento radial de los individuos de *Ficus sp.* Las cajas representan el rango intercuartílico, la línea negra indica la mediana, los bigotes muestran los valores mínimo y máximo, y los puntos rojos corresponden a los valores promedios individuales.

Los valores del incremento acumulado presentaron una distribución normal en todos los individuos, el ICA reflejo normalidad solo en el individuo C17B, pero en los demás individuos no, por último, los valores del IMA mostraron normalidad en todos los individuos (tabla 8).

**Tabla 8**

*Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para Ficus sp. por individuo*

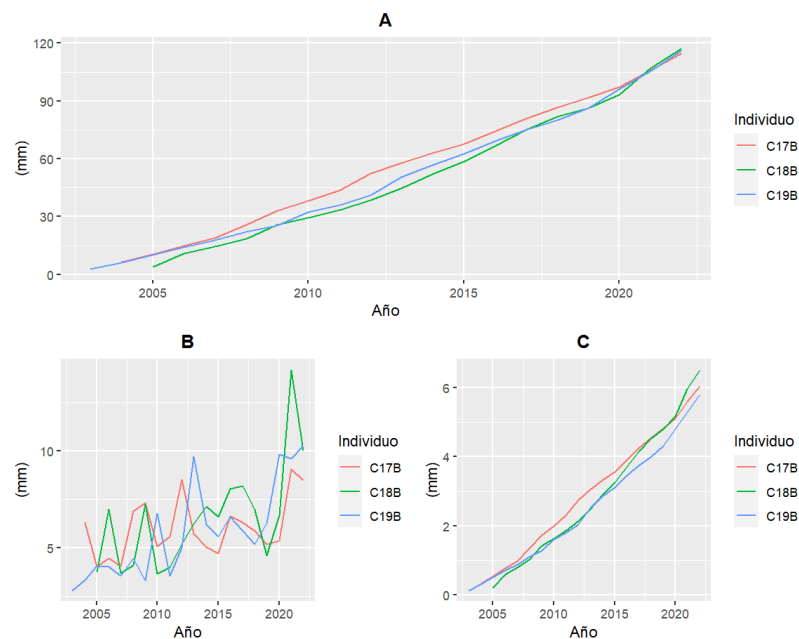
	C17B	C18B	C19B
Incremento acumulado	0,5587	0,5452	0,3452
ICA	0,2230	0,0142	0,0229
IMA	0,5587	0,5452	0,3452

*Nota.* Los valores corresponden a los niveles de significancia (p) obtenidos en la prueba de Shapiro–Wilk para las variables de incremento acumulado, ICA e IMA de *Ficus sp.* Valores de p inferiores a 0,05 indican desviación de la normalidad.

En la figura 19, el incremento acumulado (A) presentó pendientes similares en los tres individuos, siendo el individuo C17B el de mayor crecimiento, asimismo el análisis de varianza no presentó diferencias significativas entre los individuos (tabla 9). En el ICA (B) el individuo C18B presentó un comportamiento con picos altos seguido de disminuciones abruptas, los demás individuos también presentan crecimientos irregulares, pero sin diferencias significativas entre los individuos (tabla 9). Por último, el IMA (C) presentó crecimiento similar entre los individuos, se destacó C17B con valores un poco más alto, además, ciertos años llegan a sobreponerse los incrementos, sin diferencias significativas entre los individuos (tabla 9).

**Figura 19**

*Incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de Ficus sp. por individuo*



*Nota.* Los gráficos muestran las variaciones del crecimiento radial de cada individuo de *Ficus sp.* lo largo del período analizado.

**Tabla 9**

*ANOVA de Ficus sp. por individuo*

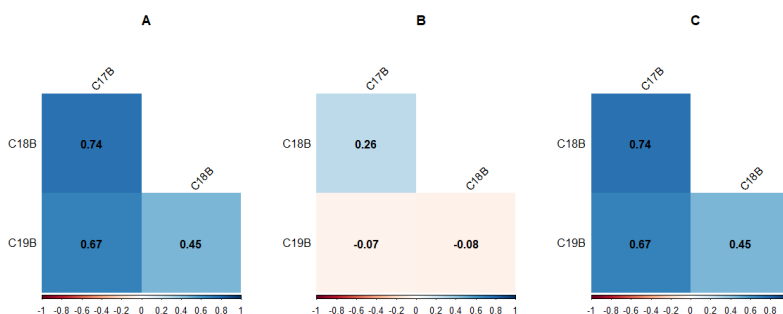
<i>Ficus sp.</i>	p-value
Acumulado	0,832
ICA	0,608
IMA	0,655

*Nota.* Los valores corresponden al nivel de significancia (p) obtenido en el análisis de varianza (ANOVA) para las variables de incremento acumulado, ICA e IMA en *Ficus sp.*

En la correlación de Pearson (figura 20), se observó que en el incremento acumulado (A) los tres individuos tienen una correlación positiva moderada a fuerte, lo que sugiere que tienen un patrón de crecimiento similar medianamente relacionado. El ICA (B) presentó una correlación baja entre los individuos C17B y C18B, además, C19B mostró una correlación negativa con los otros dos individuos lo que sugiere que estos no tienen una relación clara y no siguen el mismo patrón de crecimiento. Por último, el IMA (C) presentó la misma correlación que el incremento acumulado.

**Figura 20**

*Correlación de Pearson de incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) de Ficus sp. por individuo*



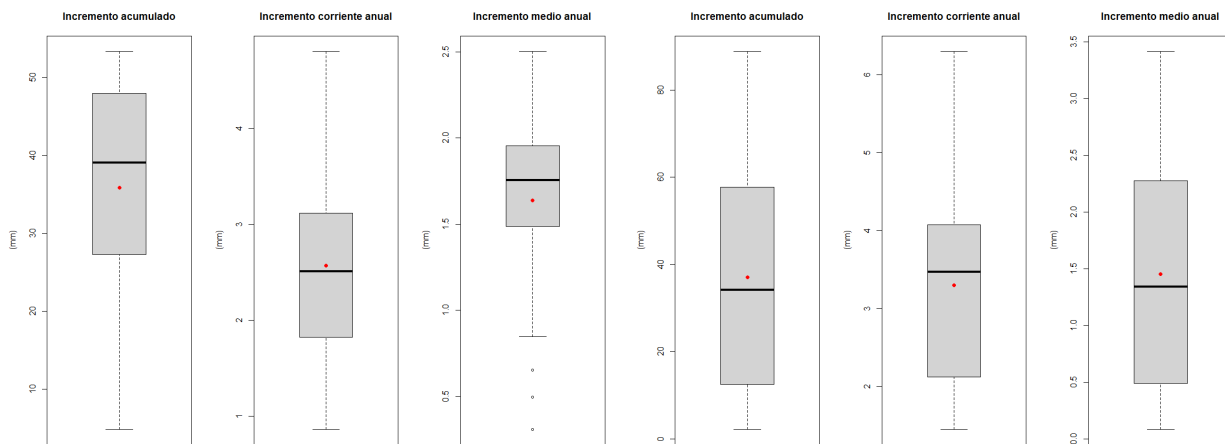
*Nota.* Los gráficos muestran los coeficientes de correlación de Pearson entre los individuos de *Ficus sp.* para las variables de incremento acumulado (A), ICA (B) e IMA (C).

**4.5 Resultados por Especie de *N. juliflora* y *A. graveolens***

En el diagrama de cajas (figura 21), se observó que los valores del incremento acumulado de la especie *A. graveolens* fueron mayores que *N. juliflora* a lo largo del tiempo, teniendo esta un crecimiento más lento y restringido. En cuanto al ICA ambas especies tienen un incremento moderado, aunque *A. graveolens* presentó mayor variabilidad. Por último, el IMA presentó una tasa de crecimiento promedio superior en *A. graveolens*, la menor dispersión de *N. juliflora* podría indicar que es más homogénea en su crecimiento, posiblemente a su adaptación a un rango de condiciones ambientales restringido.

**Figura 21**

*Diagrama de cajas del incremento acumulado, ICA, IMA por especie de *N. juliflora* (Izquierda) y *A. graveolens* (Derecha)*



*Nota.* Los diagramas muestran la variabilidad del crecimiento radial de las especies *N. juliflora* y *A. graveolens*. Las cajas representan el rango intercuartílico, la línea negra indica la mediana, los bigotes muestran los valores mínimo y máximo, y los puntos rojos corresponden a los valores promedios individuales.

En la tabla 10, se observó que la especie *N. juliflora* presentó distribución normal solo en los valores del ICA, en cuanto a la especie *A. graveolens* reflejó normalidad en todos los datos,

además, la especie *Cecropia sp.* mostró una distribución normal en los valores del incremento acumulado e IMA, por último, la especie *Ficus sp.* expuso distribución normal en todos los datos.

**Tabla 10**

*Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para los datos de las cuatro especies*

	<i>N. juliflora</i>	<i>A. graveolens</i>	<i>Cecropia sp.</i>	<i>Ficus sp.</i>
Incremento acumulado	0,0108	0,1282	0,3212	0,3386
ICA	0,7069	0,2711	0,0233	0,0658
IMA	0,0181	0,1203	0,0667	0,2303

*Nota.* Los valores corresponden a los niveles de significancia (p) obtenidos en la prueba de Shapiro–Wilk para las variables de incremento acumulado, ICA e IMA de las cuatro especies. Valores de p inferiores a 0,05 indican desviación de la normalidad.

En la figura 22, la gráfica de incremento acumulado (A) reflejó que *A. graveolens* superó ampliamente a *N. juliflora* alcanzando valores cercanos a 75 mm. En la gráfica del ICA (B) las dos especies presentaron fluctuaciones, aunque *N. juliflora* presentó mayor variabilidad en sus picos y valles, la mayor estabilidad de *A. graveolens* puede indicar mejor resistencia o adaptabilidad a las condiciones ambientales. Por último, en la gráfica del IMA (C) ambas especies mostraron una tendencia creciente, siendo mayor el de *A. graveolens* esto sugiere un rendimiento superior y sostenido en el crecimiento a lo largo del tiempo.

**Figura 22**

*Incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) por especie de N. juliflora (Izquierda) y A. graveolens (Derecha)*



*Nota.* Los gráficos muestran las variaciones del crecimiento radial de las especies *N. juliflora* y *A. graveolens* lo largo del período analizado.

En el análisis de varianza (tabla 11), el incremento acumulado y el IMA no presenta diferencias significativas entre las especies, por el contrario, el ICA si se presentan diferencias significativas entre las especies.

**Tabla 11**

*ANOVA de las especies de bosque seco*

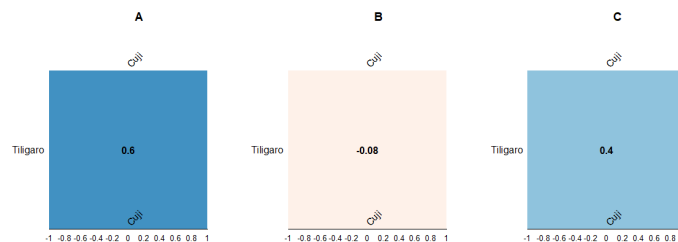
<i>N. juliflora – A. graveolens</i>	p-value
Acumulado	0,8413134
ICA	<b>0,01798 *</b>
IMA	0,3982516

*Nota.* Los valores corresponden al nivel de significancia (p) obtenido en el análisis de varianza (ANOVA) para las variables de incremento acumulado, ICA e IMA en las especies de bosque seco. Los asteriscos indican niveles de significancia estadística (\*p < 0,5).

En la figura 23, la correlación del incremento acumulado (A) entre las dos especies es positiva moderada, esto puede indicar que el incremento aumente o disminuya conjuntamente en las dos especies, aunque con algunas fluctuaciones. El ICA (B) presentó una correlación negativa muy débil, sugiere que las variaciones en el incremento de las especies son opuestas, mientras una aumenta la otra disminuye, pero al presentar un valor tan bajo esta relación es casi inexistente. Por último, el IMA (C) presentó una correlación positiva baja entre las especies, esto indica que el aumento del crecimiento de una especie podría estar asociado con el aumento de la otra, pero de forma débil.

**Figura 23**

*Correlación de Pearson de las especies de bosque seco*



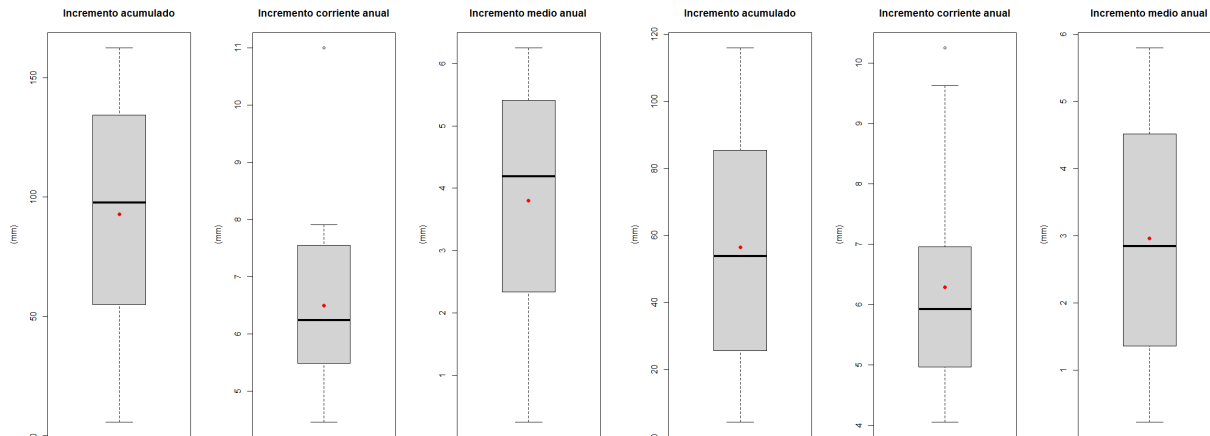
*Nota.* Los gráficos muestran los coeficientes de correlación de Pearson entre las especies de bosque seco para las variables de incremento acumulado (A), ICA (B) e IMA (C).

**4.6 Resultados por Especie de *Cecropia sp.* y *Ficus sp.***

En el diagrama de cajas (figura 24), se observó que el incremento acumulado de las dos especies es significativo, pero *Cecropia sp.* tiene un crecimiento ligeramente superior en comparación con *Ficus sp.* En el ICA la especie *Cecropia sp.* mostró mayor variabilidad interanual en su crecimiento, con valores atípicos más altos, en cambio, *Ficus sp.* tiene un crecimiento interanual más estable, con menos fluctuaciones. Por último, los valores del IMA para ambas especies son similar con una tasa de crecimiento moderado.

**Figura 24**

*Diagrama de cajas del incremento acumulado, ICA, IMA por especie de Cecropia sp. (Izquierda) y Ficus sp. (Derecha)*



*Nota.* Los diagramas muestran la variabilidad del crecimiento radial de las especies *Cecropia sp.* y *Ficus sp.* Las cajas representan el rango intercuartílico, la línea negra indica la mediana, los bigotes muestran los valores mínimo y máximo, y los puntos rojos corresponden a los valores promedios individuales.

En la figura 25, en la gráfica de incremento acumulado (A) *Ficus sp.* reflejó un crecimiento superior y constante en comparación con *Cecropia sp.* que tiene mayor variabilidad en sus primeros años de crecimiento. En la gráfica del ICA (B) las dos especies mostraron variabilidad interanual, pero *Cecropia sp.* tiene fluctuaciones más marcadas lo que puede implicar sensibilidad a condiciones ambientales, por el contrario, *Ficus sp.* tuvo un crecimiento uniforme con menos fluctuaciones extremas lo que puede reflejar una adaptación eficiente a los cambios anuales. Por último, en la gráfica del IMA (C) *Ficus sp.* presentó un incremento consistente y ligeramente alto lo que sugiere un crecimiento estable y menos influenciado por variaciones externas.

**Figura 25**

*Incremento acumulado (A), ICA (B), IMA (C) por especie de Cecropia sp. (Izquierda) y Ficus sp. (Derecha)*



*Nota.* Los gráficos muestran las variaciones del crecimiento radial de las especies *Cecropia sp.* y *Ficus sp.* lo largo del período analizado.

En el análisis de varianza (tabla 12), el incremento acumulado presentó diferencias significativas entre las especies, por el contrario, el ICA e IMA no presentan diferencias significativas entre las especies.

**Tabla 12**

*ANOVA de las especies de bosque húmedo*

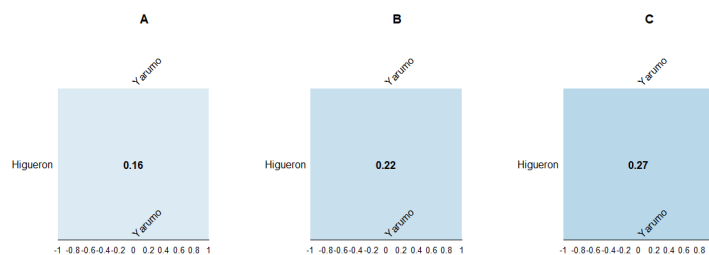
<i>Cecropia sp.</i> - <i>Ficus sp.</i>	p-value
Acumulado	<b>0,00596 **</b>
ICA	0,670333
IMA	0,1337723

*Nota.* Los valores corresponden al nivel de significancia (p) obtenido en el análisis de varianza (ANOVA) para las variables de incremento acumulado, ICA e IMA en las especies de bosque húmedo. Los asteriscos indican niveles de significancia estadística (\*\*p < 0,01).

En la figura 26, la correlación del incremento acumulado (A) es casi nula entre las especies lo que implica que los crecimientos no están estrechamente relacionados, en cuanto al ICA (B) tuvo una correlación positiva baja entre las especies, aunque hay una tendencia leve en que el aumento de una especie podría estar ligeramente asociado con el aumento de la otra. Por último, el IMA (C) entre las dos especies es positiva baja a moderada lo que sugiere una relación ligera, pero algo más evidente entre las especies en comparación con las demás correlaciones.

**Figura 26**

*Correlación de Pearson de las especies de bosque húmedo*



*Nota.* Los gráficos muestran los coeficientes de correlación de Pearson entre las especies de bosque húmedo para las variables de incremento acumulado (A), ICA (B) e IMA (C).

**4.7 Modelos de Crecimiento**

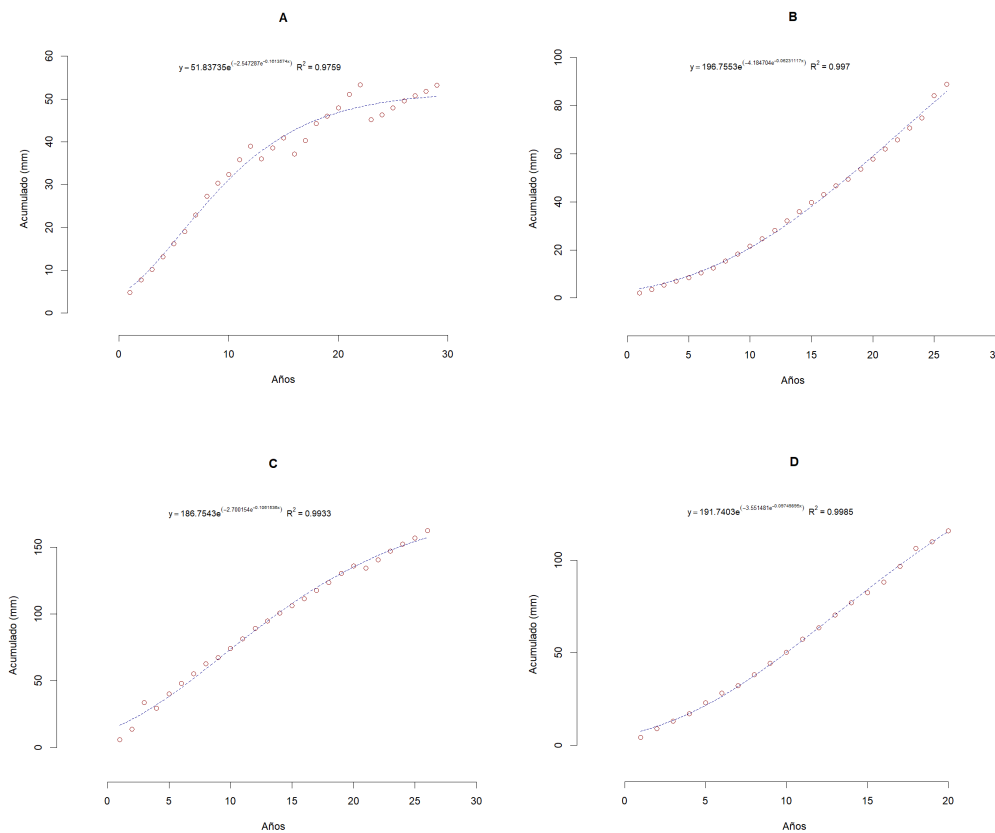
Los modelos de crecimiento (figura 27) de las especies de bosque seco *N. juliflora* (A) representado con la ecuación  $Y = 51,83735 * e^{-2,54728 * e^{-0,101574T}}$  donde “Y” es el acumulado (mm) y “T” es el tiempo (años), el  $R^2 = 0,9759$  indica que el modelo explica el 97,59% de la variabilidad de los datos, esto sugiere un excelente ajuste del modelo a los datos observados, el comportamiento de la curva muestra una fase inicial con un crecimiento acelerado, seguido de una desaceleración a medida que el tiempo avanza, lo cual es típico de los modelos Gompertz. Y el modelo de la especie *A. graveolens* (B) representado por la ecuación  $Y = 196,7553 * e^{-4,184704 * e^{0,06231117T}}$ , el  $R^2 = 0,997$  sugiere un ajuste mejor que en el caso de *N.*

*juliflora*, con un 99,7% de explicación de la variabilidad en los datos, la curva también muestra un crecimiento inicial rápido, que luego se estabiliza, lo cual refleja la naturaleza de este modelo.

El modelo de crecimiento (figura 27) en las especies de bosque húmedo *Cecropia sp.* (C) se representó por la ecuación  $Y = 186,7543 * e^{-2,700154 * e^{-0,108156T}}$ , el  $R^2 = 0,9933$  indica que el modelo explica el 99,33% de la variabilidad de los datos, esto sugiere un ajuste muy bueno, el comportamiento de la curva muestra un crecimiento inicial que se acelera, pero luego tiende a estabilizarse, esta estabilización indica que el crecimiento de la especie llega a un punto de saturación o equilibrio. Y el modelo de la especie *Ficus sp.* (D), se representó por la ecuación  $Y = 191,7403 * e^{-3,561418 * e^{-0,0974899T}}$ , el  $R^2 = 0,9985$  indica que el modelo explica el 99,85% de la variabilidad de los datos, lo que sugiere un ajuste extremadamente preciso del modelo a los datos observados, la curva también muestra un crecimiento rápido al inicio, seguido de una desaceleración con el tiempo, lo que es característico del modelo de Gompertz.

**Figura 27**

*Modelo de crecimiento de N. juliflora (A), A. graveolens (B), Cecropia sp. (C) y Ficus sp. (D)*



*Nota.* Los modelos de crecimiento de las cuatro especies en estudio.

## 5. Discusión

La especie *N. juliflora* presentó alta variabilidad interindividual y correlaciones débiles e incluso negativas, este hallazgo es coherente con lo reportado por Nassif et al. (2019) en su investigación en la zona semiárida del noreste del Brasil, se identificó una cronología bien definida y fuertemente dependiente de las precipitaciones estacionales, lo cual sugiere que el crecimiento no es sincrónico en todos los individuos y podría explicar las correlaciones bajas y negativas entre

algunos individuos de esta especie, además, menciona que *N. juliflora* manifiesta crecimientos en el inicio de la estación lluviosa y a lluvias intensas incluso fuera de temporada, lo que puede causar patrones irregulares de crecimiento entre años y entre individuos. Así mismo Manrique (2017) en su estudio desarrollado en el caribe colombiano reporto variaciones interindividuales importante y patrones irregulares de crecimiento anual, que posiblemente estén relacionadas a condiciones microambientales, competencia por recursos, deficiencia hídrica o disturbios antropogénicos, por esta razón se considera que la plasticidad ecológica de la especie puede hacer que responda de manera individualizada a los estímulos ambientales.

Manrique (2017) discute que la dinámica de crecimiento *N. juliflora* puede ser muy dependiente de la edad del árbol, la disponibilidad de luz y la historia del uso del suelo, es decir, incluso dentro de una misma población, los árboles pueden mostrar trayectorias de crecimiento muy distintas, lo que se refleja en un IMA no uniforme.

La correlación promedio de la especie *A. graveolens* concuerda con el estudio realizado por Miranda et al. (2024) lo cual es satisfactorio para fines dendrocronológicos, aunque en el análisis de IMA e ICA entre individuos fue más débil debido posiblemente a diferencias micro ambientales y genéticas que influyen en el crecimiento individual. Además, se idéntica picos de crecimientos superiores como se observó en el presente estudio, por lo cual se resalta la existencia de patrones de crecimiento coherentes entre individuos.

El incremento acumulado de *A. graveolens* es alto y tiende a ser asintótico, indicando una mayor capacidad para mantener un crecimiento constante a lo largo del tiempo, este comportamiento es congruente con lo reportado por Campos et al. (2016), quienes encontraron que algunas especies nativas de bosque seco como *Astronium sp.* presentaron adaptaciones morfológicas y fisiológicas las cuales les permiten una mayor eficiencia en la absorción y uso del

agua, fundamental para la estabilidad en el crecimiento en condiciones de estrés hídrico. Las correlaciones positivas en el incremento acumulado entre *N. juliflora* y *A. graveolens* sugiere que sus tasas de crecimiento pueden variar pero existe cierta sincronía en la respuesta al ambiente, posiblemente influenciada por factores climáticos y edáficos comunes, sin embargo, la mayor variabilidad en los picos y valles de crecimiento de *N. juliflora* refleja una mayor sensibilidad al ambiente, lo cual coincide con lo observado por Silva et al. (2018), donde destacan que especies con menor adaptación al ecosistemas pueden presentar respuestas de crecimiento más erráticas ante condiciones adversas.

La estabilidad del ICA en *A. graveolens* y su correlación negativa con *N. juliflora* sugiere que las fluctuaciones en el crecimiento de una especie no necesariamente afectan de manera directa o predecible a la otra, lo cual indica un bajo nivel de competencia o que cada especie explota nichos ligeramente diferentes dentro del mismo ecosistema, así como se plantea en el análisis de coexistencia y competencia interespecifica en bosques secos de Martínez y Rojas (2017). Finalmente, se presentó un desempeño superior en *A. graveolens* en el IMA evidencia de un potencial de rendimiento sostenido en términos de productividad, esto concuerda con estudios como el de Torres et al. (2020) que resaltan la importancia de las especies nativas con alta resiliencia y capacidad de recuperación para el manejo forestal en ecosistemas secos.

La variabilidad interanual en el ICA de *Cecropia sp.* mostro diferencias leves, pero sin significancia estadística, lo que sugiere una estabilidad relativa del crecimiento de los individuos año tras año, esto contrasta con los hallazgos de Zalamea et al. (2008) quienes reportaron una disminución progresiva en la duración de los ciclos de crecimiento a lo largo del tiempo, lo que implica una variación sistemática en el desarrollo estructural del árbol, más que una variabilidad aleatoria entre años, puede que la diferencia metodológica (el uso de nodos y ciclos versus el

análisis de crecimiento anual en la presente investigación) puede explicar la discrepancia en la interpretación del patrón de crecimiento.

En cuanto a las correlaciones entre individuos, en *Cecropia sp.* se identificaron correlaciones positivas bajas entre la mayoría de ellos, con excepción de una correlación alta entre dos individuos. Este hallazgo es congruente con el enfoque de Zalamea et al. (2008) quien también reconoce la existencia de variabilidad entre individuos, aunque su estudio se enfoca más en identificar patrones de periodicidad a nivel poblacional mediante análisis de correlación de Spearman.

En lo relacionado al IMA *Cecropia sp.* mostró trayectorias similares entre individuos, reforzando la idea de un patrón de crecimiento común dentro de los individuos, aunque con correlaciones bajas entre la mayoría. Esta homogeneidad general, pese a las correlaciones bajas, sugiere que los árboles comparten condiciones ecológicas y fisiológicas similares, aunque el nivel de sincronía no sea alto. En el estudio del autor, se destacan también trayectorias comunes, pero mucho más estructuradas por los ciclos de desarrollo. El autor incluso propone una segmentación de los individuos en ciclos homogéneos utilizando longitud de entrenudos, ramificación e inflorescencias como indicadores, lo que permite una evaluación más fina de los cambios a lo largo del tiempo.

La especie *Ficus sp.* ha sido muy poco estudiada en dendrocronología por lo que hay pocos recursos para realizar comparaciones, en algunos de los fundamentos teóricos se espera encontrar correlaciones entre individuos de una misma especie o población cuando responden a factores ambientales comunes (temperatura, disponibilidad de agua, luz solar, etc.). Sin embargo, los estudios de Brienen & Zuidema (2005) evidencian que la variabilidad intraespecífica y la heterogeneidad ambiental pueden generar patrones de crecimiento individuales diferenciados,

similar a lo observado en los ICA de esta investigación. Además, la literatura señala que la dendrocronología en regiones tropicales enfrenta retos particulares como la formación irregular o poco clara de anillos de crecimiento, debido a la variabilidad climática y fenológica propia de estas zonas (Tomazello Fo et al., 2009). Esto puede explicar en parte la variabilidad y baja correlación entre algunos índices de crecimiento en individuos de *Ficus sp.* en el presente estudio. A pesar de ello, la correlación moderada a fuerte observada en el incremento acumulado y el índice medio anual sugiere que, aunque exista heterogeneidad individual, el patrón general de crecimiento en esta especie muestra una sincronía suficiente para aplicar metodologías dendrocronológicas en estudios ecológicos y de manejo forestal sostenible.

La variabilidad en el crecimiento de *Cecropia sp.* puede explicarse por su estrategia de vida pionera, que implica una respuesta más sensible y adaptativa a las condiciones ambientales fluctuantes como lo señalan Chazdo (2014) y Poorter et al. (2016), estas especies suelen aprovechar rápidamente los recursos disponibles en ambientes perturbados, lo que genera un crecimiento acelerado, pero a su vez influenciado por la variabilidad anual de factores climáticos y edáficos como condiciones de luz, humedad y disponibilidad de nutrientes, factores que impactan directamente la fisiología y desarrollo de especies pioneras (Mesquia et al., 2015). Por otro lado, *Ficus sp.* se caracteriza por una adaptación eficiente a cambios ambientales, reflejando un crecimiento más uniforme y menos sensible a fluctuaciones anuales, esto coincide con estudios como los de Janzen y Martin (1982) que describen a las especies de *Ficus* como elementos claves en el mantenimiento de la estabilidad ecológica en bosques húmedo, debido a su capacidad para sostener un crecimiento estable y recursos constantes para la fauna frugívora. Además, su estrategia de competencia se basa en el aprovechamiento sostenido de recursos a lo largo del tiempo, lo que puede explicar la correlación positiva moderada observada entre los índices de

crecimiento con *Cecropia sp.* pues sugiere que, aunque no estén directamente relacionados pueden coexistir con cierta sinergia funcional en el ecosistema. La correlación baja y casi nula entre las especies en los primeros años confirma la hipótesis de que cada una responde de manera independiente a los factores ambientales y recursos disponibles, lo que puede favorecer en la diversidad y la sucesión ecológica en el bosque (Finegan, 1996). Finalmente, la estabilidad en el IMA de *Ficus sp.* sugiere un desarrollo que no solo es sostenido en el tiempo, sino que también puede estar menos influenciado por eventos extremos o variaciones climáticas interanuales, lo que es consistente con las observaciones de Rutishauser et al. (2011) sobre la resiliencia de ciertas especies arbóreas en bosques húmedos tropicales.

## 6. Conclusiones

La especie *N. juliflora* presentó una marcada variabilidad en los patrones de crecimiento entre individuos de una misma población, con correlaciones débiles o negativas que indican respuestas diferenciadas a los factores del entorno.

Las fluctuaciones en su crecimiento reflejan la influencia de la disponibilidad de agua, luz, competencia y uso del suelo. Esta variabilidad evidencia una alta plasticidad ecológica de la especie, lo que le permite adaptarse a entornos heterogéneos y responder a condiciones cambiantes de manera individual.

El análisis dendrocronológico permitió identificar patrones de crecimiento diferenciados entre las especies estudiadas, destacándose *A. graveolens* por su estabilidad y crecimiento sostenido a lo largo del tiempo, lo cual evidencia su potencial como especie clave para estudios de productividad y manejo en bosques secos tropicales.

Las correlaciones positivas entre individuos de *A. graveolens* sugieren una sincronía en la respuesta a factores ambientales, aunque la variabilidad observada en *N. juliflora* refleja una mayor sensibilidad a condiciones edáficas y climáticas, confirmando su papel como especie menos resiliente en comparación con *A. graveolens*.

La especie *Cecropia sp.*, la variabilidad interanual del crecimiento se mantuvo baja, lo que sugiere estabilidad relativa, aunque las diferencias metodológicas respecto a otros estudios evidencian la importancia del enfoque analítico en la interpretación de los patrones de desarrollo.

*Ficus sp.* mostró correlaciones moderadas en el incremento acumulado y el índice medio anual, lo que indica que, pese a la heterogeneidad intraespecífica, existe una sincronía suficiente para la aplicación de metodologías dendrocronológicas, reafirmando su valor potencial en estudios ecológicos.

Los resultados en conjunto resaltan la importancia de considerar tanto factores microambientales como genéticos en la evaluación del crecimiento, pues influyen en la variabilidad intra e interespecífica, con implicaciones directas para la gestión forestal y la conservación de ecosistemas secos y húmedos tropicales.

## 7. Recomendaciones

Ampliar el número de individuos y especies evaluadas para fortalecer la robustez estadística y mejorar la representatividad de los patrones de crecimiento en diferentes tipos de bosques.

Complementar los análisis dendrocronológicos con estudios fisiológicos y edáficos que permitan explicar con mayor precisión las diferencias observadas entre especies e individuos.

Implementar técnicas de datación complementarias, como isotopía estable o análisis de carbono, para validar los resultados obtenidos con índices de crecimiento y nodos de desarrollo.

Promover la integración de especies nativas como *A. graveolens* y *Ficus sp.* en planes de manejo forestal y restauración, considerando su resiliencia y capacidad de mantener un crecimiento sostenido bajo condiciones de estrés hídrico o ambiental.

Fomentar estudios de largo plazo que permitan vincular la variabilidad climática (precipitación, temperatura) con los patrones de crecimiento, generando herramientas predictivas útiles para enfrentar escenarios de cambio climático.

Difundir los hallazgos a las comunidades locales y entidades de manejo forestal, de manera que los resultados científicos se traduzcan en prácticas sostenibles de conservación y aprovechamiento de los recursos forestales.

### Referencias Bibliográficas

- Albuquerque, Brandes, A. F. N., Lisi, C. S., Moraes, L. F. D. D., & Barros, C. F. (2019). Tree-ring formation, radial increment and climate–growth relationship: assessing two potential tree species used in Brazilian Atlantic forest restoration projects. *Trees (Berlin, West)*, 33(3), 877–892. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01825-6>
- Albuquerque, A. R., de Castro, V. R., Lobão, M. S., Sarto, C., Tomazello Filho, M., & Guedes, F. T. P. (2016). Comparative analysis of anatomy and micro-densitometry of the growth rings of hardwoods and conifers, with emphasis on dendrochronology Análise comparativa da anatomia e microdensitometria dos anéis de crescimento de folhosas e de coníferas, com ênfase à dendrocronologia.
- Alves, E. S. (1995). The effects of pollution on wood of *Cecropia glazioui* (Cecropiaceae). *IAWA Journal*, 16(3), 283–291.
- Ambite, S., Ferrero, M. E., Piraino, S., Badagian, J., Muñoz, A. A., Aguilera-Betti, I., Gamazo, P., Roig, F. A., & Lucas, C. (2022). *Prosopis* L. woody growth in relation to hydrology in South America: A review. *Dendrochronologia (Verona)*, 76, 126017-. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.126017>
- Andrade-Castañeda, H. J., Segura-Madriral, M. A., Canal-Daza, D. S., Huertas-Gonzales, A., & Mosos-Torres, C. A. (2017). Composición florística y reservas de carbono en bosques ribereños en paisajes agropecuarios de la zona seca del Tolima, Colombia. *Revista de biología tropical*, 65(4), 1245–1260. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i4.27007>

- Anzhella V. Rumyantseva, Sergei A. Chekrygin, & Elena O. Vidyagina. (2023). Interrelation of the Radial Increment of Trees with Various Factors. *Physiologia*, 3(24), 347–365. <https://doi.org/10.3390/physiologia3020024>
- Aragão, Groenendijk, P., & Lisi, C. S. (2019). Dendrochronological potential of four neotropical dry-forest tree species: Climate-growth correlations in northeast Brazil. *Dendrochronologia (Verona)*, 53, 5–16. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.10.011>
- Boakye, Gebrekirstos, A., Hyppolite, D. N., Barnes, V. R., Kouamé, F. N., Kone, D., Porembski, S., & Bräuning, A. (2016). Influence of climatic factors on tree growth in riparian forests in the humid and dry savannas of the Volta basin, Ghana. *Trees (Berlin, West)*, 30(5), 1695–1709. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1401-x>
- Blagitz, M., Botosso, P. C., Longhi-Santos, T., & Bianchini, E. (2019). Tree rings in tree species of a seasonal semi-deciduous forest in southern Brazil: wood anatomical markers, annual formation and radial growth dynamic. *Dendrochronologia (Verona)*, 55, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.04.006>
- Brienen, & Zuidema, P. A. (2005). Relating Tree Growth to Rainfall in Bolivian Rain Forests: A Test for Six Species Using Tree Ring Analysis. *Oecologia*, 146(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0160-y>
- Briceño-J., A. M., Rangel-Ch., J. O., & Bogino, S. M. (2016). Estudio de los anillos de crecimiento de *Cordia alliodora* Oken en Colombia. *Colombia forestal*, 19(2), 219–. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.2.a07>

- Briceño Jiménez, A. M. (2017). Dinámica del crecimiento y relación con el clima de especies arbóreas de los bosques de la región Caribe, Colombia (Doctoral dissertation). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59369>
- Caetano-Andrade, V. L., Clement, C. R., Weigel, D., Trumbore, S., Boivin, N., Schöngart, J., & Roberts, P. (2020). Tropical Trees as Time Capsules of Anthropogenic Activity. *Trends in Plant Science*, 25(4), 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.12.010>
- Caldas, F. J. de., & Lang, R. (1955). Clasificación climática y pisos térmicos de Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Campos, M., Pérez, L., & Rodríguez, J. (2016). Adaptaciones ecofisiológicas de especies arbóreas en bosques secos tropicales. *Revista Forestal Latinoamericana*, 24(2), 123-135.
- Carl Zeiss Microscopy GmbH. (2015). Stemi 305: User manual. Carl Zeiss Microscopy GmbH.
- Cedro. (2023). Dendrochronology and dendroclimatology of yew in Poland. *Dendrochronologia* (Verona), 78, 126068–. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126068>
- Chávez, M. E., & Arango, N. (1997). Informe nacional sobre el estado de la diversidad, Colombia. Tomo I Diversidad biológica. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt.
- Chazdon, R. L. (2014). *Second growth: The promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation*. University of Chicago Press.

- Costa, C. M., Pagotto, M. A., Aragão, J. R. V., & Lisi, C. S. (2023). Differences in climate-growth relationships between two tree species that co-occur in a seasonally dry tropical forest in Northeastern Brazil. *Dendrochronologia* (Verona), 79, 126072–. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126072>
- Del Valle, & Giraldo, J. A. (2021). Radiocarbon and dendrochronology applied in a legal dispute: a case from colombia. *Radiocarbon*, 63(4), 1215–1223. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.30>
- Del Valle, J. I., Ramírez, J. A., Herrera, D. A. (2012). Experiencias dendroclimáticas con árboles de ecosistemas contrastantes de Colombia. *Cuadernos de geografía* (Bogotá), 21(2), 117–126. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v21n2.32217>
- Devia, C.A, Moncaleano, A.M., Niño, L.M. (2014). Flora del bosque seco de los Archipiélagos Islas del Rosario y San Bernardo. Incoder-Universidad Jorge Tadeo Lozano. Cartagena, Colombia. 99 p.
- Domínguez-Calleros, P. A., Rodríguez-Flores, F. J., Lizarraga-Mendiola, L., Jiménez-Gómez, M. A., & Navar Chaidez, J. D. J. (2017). Aplicaciones y ejemplos de modelos de crecimiento diamétrico para árboles tropicales. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(11), 265–274. <https://doi.org/10.19136/era.a4n11.1060>
- Durán Guerra, Quintanar Isaías, A., Villanueva Díaz, J., Jaramillo-Pérez, A. T., & Cerano Paredes, J. (2014). Características anatómicas de la madera de *Bursera lancifolia* (Schltdl.) Engl. con potencial dendrocronológico. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(26), 76–89

- EOT, Enciso Santander, A. M. (2003). Esquema de Ordenamiento Territorial Enciso Santander 2003: EOT Enciso Santander 2003. <https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/123456789/11625>
- Esquema de Ordenamiento Territorial Bolívar Santander 2004: EOT Bolívar Santander 2004. <https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/123456789/11787>
- Fahn, A., Burley, J., Longman, K. A., Mariaux, A., & Tomlinson, P. B. (1981). Possible contributions of wood anatomy to the determination of the age of tropical trees.
- FAO. (1986). The current state of knowledge on *Prosopis juliflora*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/ad317e/AD317E08.htm>
- Fichtler, Clark, D., & Worbes, M. (2003). Age and Long-term Growth of Trees in an Old-growth Tropical Rain Forest, Based on Analyses of Tree Rings and  $^{14}\text{C}$ . *Biotropica*, 35(3), 306–317. [https://doi.org/10.1043/0006-3606\(2003\)035\(0306:AALGOT\)2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0006-3606(2003)035(0306:AALGOT)2.0.CO;2)
- Finegan, B. (1996). "Pattern and process in neotropical secondary rain forests: the first 100 years of succession." *Trends in Ecology & Evolution*, 11(3), 119–124.
- Fuchs, Stevens, L. E., & Fulé, P. Z. (2019). Dendrochronological assessment of springs effects on ponderosa pine growth, Arizona, USA. *Forest Ecology and Management*, 435, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.049>
- García, V. C., Díaz, J. V., Reyna, E. N., & Sifuentes, A. R. M. (2021). Técnicas de análisis de imagen sobre la anatomía de la madera, aplicada a estudios dendrocronológicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

- García-Cervigón, Camarero, J. J., & Espinosa, C. I. (2017). Intra-annual stem increment patterns and climatic responses in five tree species from an Ecuadorian tropical dry forest. *Trees* (Berlin, West), 31(3), 1057–1067. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1530-x>
- Giraldo Jiménez. (2011). Dendrocronología en el trópico: aplicaciones actuales y potenciales. *Colombia Forestal*, 14(1), 97–. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2011.1.a08>
- Giraldo Jimenez, & del Valle Arango, J. I. (2011). Estudio del crecimiento de *Prioria copaifera* mediante técnicas dendrocronológicas. *Revista de biología tropical*, 59(4), 1813–1831.
- Giraldo, & del Valle, J. I. (2012). Modelación del crecimiento de *Albizia niopoides* por métodos dendrocronológicos. *Revista de biología tropical*, 60(3), 1117–1136.
- Giraldo, del Valle, J. I., González-Caro, S., & Sierra, C. A. (2022). Intra-annual isotope variations in tree rings reveal growth rhythms within the least rainy season of an ever-wet tropical forest. *Trees* (Berlin, West), 36(3), 1039–1052. <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02271-7>
- Giraldo, J. (2021). Annual tree rings in the rainiest forests of the Americas. Universidad Nacional de Colombia.
- Holdridge, L. R. (1987). Ecología basada en zonas de vida (No. 83). AgroAmérica.
- Idárraga, P. Á., Urrea, L. M., Roldán P. F., & Cardona N. F. (2016). Flora del Magdalena Medio: áreas de influencia de la Central Térmica Termocentro. ISAGEN – Universidad de Antioquia, Herbario Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 270 p.

- Inga, J. G., & del Valle, J. I. (2017). Log-relative growth: A new dendrochronological approach to study diameter growth in *Cedrela odorata* and *Juglans neotropica*, Central Forest, Peru. *Dendrochronologia* (Verona), 44, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.03.009>
- Jacoby, G. C. (1989). Overview of Tree-Ring Analysis in Tropical Regions. *IAWA Journal*, 10(2), 99-108. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000478>
- Janzen, D. H., & Martin, P. S. (1982). "Neotropical anachronisms: the fruits the gomphotheres ate." *Science*, 215(4528), 19–27.
- Kattan, G. h., Sanchez, C. E., Velez, C., Ramirez, L., & Celis, M. (2019). Beta diversity and knowledge gaps of Colombia's dry forests: implications for their conservation/La diversidad beta y los vacios de conocimiento de los bosques secos de Colombia: implicaciones para su conservacion. *Caldasia*, 41(1), 1–. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v41n1.76229>
- León, H, W. J. (2015). Anatomía de la madera de 87 especies de la reserva forestal ticoporo (Barinas, Venezuela). *Revista Pittieria*, (39), 107-169.
- León, H, W. J. (2008). Anatomía de Madera en 31 Especies de la Subfamilia Mimosoideae (Leguminosae) en Venezuela. *Colombia Forestal*, 11, 113-. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2008.1.a08>
- León, H, W. J. (2006). Anatomía de la madera de 13 especies del orden Sapindales que crecen en el estado Mérida, Venezuela / Wood anatomy of 13 species of the order Sapindales growing in Mérida state, Venezuela. *Acta botánica venezuelica*, 29(2), 269–296.

- Longui, E. L., Gondo, C. C. S., de Lima, I. L., Freitas, M. L. M., Florsheim, S. M. B., Zanatto, A. C. S., & Garcia, J. N. (2016). Some properties of *Astronium graveolens* wood along the stem. *Floresta e Ambiente*, 23(1), 142–149. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.109714>
- López, L., Villalba, R., & Stahle, D. (2022). High-fidelity representation of climate variations by *Amburana cearensis* tree-ring chronologies across a tropical forest transition in South America. *Dendrochronologia* (Verona), 72, 125932–. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125932>
- López, L., Villalba, R. (2020). Climate-growth relationships for *Aspidosperma tomentosum* Mart. in South American tropical dry forests. *Annals of Forest Science* 77, 96. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1007/s13595-020-01001-8>
- López, L., & Villalba, R. (2016). An assessment of *Schinopsis brasiliensis* Engler (Anacardiaceae) for dendroclimatological applications in the tropical Cerrado and Chaco forests, Bolivia. *Dendrochronologia* (Verona), 40, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.07.002>
- López, L., Villalba, R., & Peña-Claros, M. (2012). Ritmos de crecimiento diamétrico en los bosques secos tropicales: aportes al manejo sostenible de los bosques de la provincia biogeográfica del Cerrado Boliviano. *Bosque* (Valdivia, Chile), 33(2), 211–219. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002012000200011>
- López, L., Villalba Anaya, R., & Peña-Claros, M. (2012). Determining the annual periodicity of growth rings in seven tree species of a tropical moist forest in Santa Cruz, Bolivia. *Forest Systems*, 3, 508–514. <https://doi.org/10.5424/fs/2012213-02966>

- Lozano B., L. A., Franco O., N., & Bonilla V., J. L. (2012). Estimación del crecimiento diamétrico, de *Anacardium excelsum* (kunth) skeels, por medio de modelos no lineales, en bosques naturales del departamento del Tolima. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 16(1), 19–32.
- Manrique L., J. D. (2017). Dinámica del crecimiento y relación con el clima de especies arbóreas de los bosques de la región Caribe, Colombia (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín). Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59369>
- Martínez, A., & Rojas, C. (2017). Competencia interespecífica y coexistencia en bosques secos tropicales. *Ecología y Sociedad*, 22(3), 45.
- Mendivelso, H. A., Camarero Martínez, J. J., & Gutiérrez Merino, E. (2016). Dendrocronología en bosques neotropicales secos: métodos, avances y aplicaciones. *Ecosistemas revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, 25(2), 66–75. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-2.08>
- Mesquita, R. C. G., et al. (2015). "Growth responses of pioneer and non-pioneer species in tropical forests." *Forest Ecology and Management*, 348, 54–61.
- Miranda, D. L. C. de, do Carmo, J. F., dos Santos, A. L. O., Nogueira, A. C. N., Da Silva, J. A. N., da Silva, R. S., Stepka, T. F., & Lisboa, G. dos S. (2024). Dendrochronology applied to three forest species in the Brazilian Amazon. *TreeDimensional Journal*, 13, e2024039. <https://doi.org/10.55746/treed.2024.07.039>

- Morales, M. S., Villalba, R., Grau, H. R., Villagra, P. E., Boninsegna, J. A., Ripalta, A., & Paolini, L. (2001). Potencialidad de *Prosopis ferox* Griseb (Leguminosae, subfamilia: Mimosoideae) para estudios dendrocronológicos en desiertos subtropicales de alta montaña. *Revista Chilena de Historia Natural*, 74(4), 865–872. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2001000400013>
- Nassif, D. S., Santos, V. F., Campelo, F., & Roig, F. A. (2019). The hydrological performance of *Prosopis juliflora* (Sw.) growth as an invasive alien tree species in the semiarid tropics of northeastern Brazil. *Biological Invasions*, 21, 2561–2575. <https://doi.org/10.1007/s10530-019-02001-3>
- Nath, Munoz, F., Pélissier, R., Burslem, D. F. R. P., & Muthusankar, G. (2016). Growth rings in tropical trees: role of functional traits, environment, and phylogeny. *Trees (Berlin, West)*, 30(6), 2153–2175. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1442-1>
- Netsvetov, Prokopuk, Y., Ivanko, I., Kotovych, O., & Romensky, M. (2021). *Quercus robur* survival at the rear edge in steppe: Dendrochronological evidence. *Dendrochronologia (Verona)*, 67, 125843–. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125843>
- Ohashi, Okada, N., Nobuchi, T., Siripatanadilok, S., & Veenin, T. (2009). Detecting invisible growth rings of trees in seasonally dry forests in Thailand: isotopic and wood anatomical approaches. *Trees (Berlin, West)*, 23(4), 813–822. <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0322-3>

- Paipa Rios, N. A., & Triana Gómez, M. A. (2018). Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea de un bosque húmedo tropical en Paimadó, Chocó. *Ingenierías USBMed*, 9(1), 18–29. <https://doi.org/10.21500/20275846.3180>
- Parra, V., J. E. (2014). Anatomía del xilema secundario en seis especies de *Ficus* L. (Moraceae) en la ciudad de Mérida, Venezuela. *Acta botánica venezuelica*, 37(2), 165–176.
- Peralta, K. M. C. (2022). Caracterización de la madera de 95 especies forestales del sur de Ecuador con base a sus propiedades físicas, organolépticas y anatómicas (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA).
- Pizano C., González-M. R., López R., Jurado R. D., Cuadros H., Castaño-Naranjo A., Rojas A., Pérez K., Vergara-Varela H., Idárraga A., Isaacs P. y García H. (2016). El Bosque Seco Tropical en Colombia. En: Gómez, M.F., Moreno, L.A., Andrade, G.I. y Rueda, C. (Eds). *Biodiversidad 2015. Estado y Tendencias de la Biodiversidad Continental de Colombia*. Instituto Alexander von Humboldt. Bogotá D. C.
- Poorter, L., et al. (2016). "Biological traits and growth strategies of tropical trees." *Ecology Letters*, 19(10), 1208–1217. <https://doi.org/10.1111/ele.12658>
- Pumijumnong, Muangsong, C., Buajan, S., Songtrirat, P., Chatwatthana, R., & Chareonwong, U. (2023). Factors Affecting Cambial Growth Periodicity and Wood Formation in Tropical Forest Trees: A Review. *Forests*, 14(5), 1025–. <https://doi.org/10.3390/f14051025>

- Quesada-Román, Ballesteros-Cánovas, J. A., St. George, S., & Stoffel, M. (2022). Tropical and subtropical dendrochronology: Approaches, applications, and prospects. *Ecological Indicators*, 144, 109506–. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109506>
- Rivera Builes, C. (2013). Potencial dendrocronológico de árboles de la Amazonia colombiana.
- Roden, J. (2008). Cross-dating of tree ring  $\delta^{18}O$  and  $\delta^{13}C$  time series. *Chemical Geology*, 252(1-2), 72–. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.01.007>
- Rojas, A. (2015). Protocolo de propagación del cují *Prosopis juliflora* (Sw.). Corporación Autónoma Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.
- Rozendaal, D, M. A., & Zuidema, P. A. (2011). Dendroecology in the tropics: a review. *Trees* (Berlin, West), 25(1), 3–16. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0480-3>
- Rutishauser, E., et al. (2011). "Growth and resilience of tropical trees." *Global Change Biology*, 17(6), 2052–2066.
- Saatchi, S., Longo, M., Xu, L., Yang, Y., Abe, H., André, M., Aukema, J. E., Carvalhais, N., Cadillo-Quiroz, H., Cerbu, G. A., Chernela, J. M., Covey, K., Sánchez-Clavijo, L. M., Cubillos, I. V., Davies, S. J., De Sy, V., De Vleeschouwer, F., Duque, A., Sybille Durieux, A. M., ... Elmore, A. C. (2021). Detecting vulnerability of humid tropical forests to multiple stressors. *One Earth*, 4(7), 988–1003. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.06.002>
- Santos, C. M., Lima, I. L., Longui, E. L., Romeiro, D., Zanatto, A. C. S., Morais, E., Zanata, M., & Florsheim, S. M. B. (2011). A densidade básica e característica anatômicas variam

- radialmente na madeira de *Astronium graveolens* Jacq. (Anacardiaceae). *Revista Do Instituto Florestal*, 23(2). <https://doi.org/10.24278/2178-5031.2011232294>
- Silva, R., Gómez, P., & Fernández, D. (2018). Variabilidad en el crecimiento radial de especies nativas e introducidas en ecosistemas semiáridos. *Journal of Arid Environments*, 154, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.05.002>
- Shimamoto, C. T., Botosso, P. C., Amano, E., & Marques, M. C. M. (2016). Stem growth rhythms in trees of a tropical rainforest in Southern Brazil. *Trees (Berlin, West)*, 30(1), 99–111. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1279-z>
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1996). *An introduction to tree-ring dating*. University of Arizona Press.
- Sun, Ma, L., Liu, T., Huang, X., & Zhou, Y. (2021). Temperature reconstruction based on 361 year old dendrochronology of *Platycladus orientalis* (L.) franco in the Wula Mountains, China. *Quaternary International*, 583, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.12.026>
- Tomazello Fo, M., Roig, F. A., & Zevallos Pollito, P. A. (2009). Dendrocronología y dendroecología tropical: Marco histórico y experiencias exitosas en los países de América Latina. *Ecología en Bolivia*, 44(2), 73–82.
- Torres, F., Morales, S., & Vásquez, J. (2020). Biomasa y productividad de especies forestales en zonas áridas. *Forest Ecology and Management*, 465, 118078. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118078>

- Vásquez, Lara, W., del Valle, J. I., & Sierra, C. A. (2022). Reconstructing past fossil-fuel CO<sub>2</sub> concentrations using tree rings and radiocarbon in the urban area of Medellín, Colombia. *Environmental Research Letters*, 17(5), 055008–. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac63d4>
- Velasco Sastre, T., Vergarechea, M., Tapia, A., Dussart, E., Leporati, J., & Bogino, S. (2018). Growth dynamics and disturbances along the last four centuries in the *Prosopis caldenia* woodlands of the Argentinean pampas. *Dendrochronologia (Verona)*, 47, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.12.005>
- Zalamea, P.-C., Stevenson, P. R., Madriñán, S., Aubert, P.-M., & Heuret, P. (2008). Growth pattern and age determination for *Cecropia sciadophylla* (Urticaceae). *American Journal of Botany*, 95(3), 263–271. <https://doi.org/10.3732/ajb.95.3.263>
- Zegarra Vasquez, M. J. (2011). Estudio dendrológico de siete especies del género *Cecropia* Loefl. procedentes de Ucayali y Huánuco-Perú.