

Sensibilidad de los anillos de crecimiento de *Fraxinus uhdei* a la temperatura y precipitación en el área urbana de Medellín, Colombia

Tree-rings sensitivity of Fraxinus uhdei to temperature and precipitation in the urban area of Medellín, Colombia

Juan Pablo **Diosa-Ospina**¹, Jorge A. **Giraldo**^{1,*}, Felipe **Franco-Gaviria**¹, Marileny **Vasquez**², Sergio Alonso **Orrego**³

¹Facultad de Ingeniería, Tecnológico de Antioquia, Institución Universitaria, Calle 78B No. 72A 220 Medellín, Colombia.

²Consultora independiente, Medellín, Colombia

³Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Forestales, Cra. 64c #63-120, Medellín, Colombia.

* Autor para correspondencia: (J.A. Giraldo) jorge.giraldo76@tdea.edu.co

Cómo citar este artículo:

Diosa-Ospina, J.P., Giraldo, J.A., Franco-Gaviria, F., Vásquez, M., Orrego, S.A., 2024, Sensibilidad de los anillos de crecimiento de *Fraxinus uhdei* a la temperatura y precipitación en el área urbana de Medellín, Colombia: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 76 (3), A060524. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2024v76n3a060524>

Manuscrito recibido: 19 de Enero, 2024
Manuscrito corregido: 12 de Abril, 2024
Manuscrito aceptado: 3 de Mayo, 2024

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

Los árboles son sensibles a las condiciones medioambientales. La disciplina que estudia los árboles como bioindicadores de cambio ambiental se denomina dendrocronología. Aunque son muchas las especies tropicales que forman anillos de crecimiento existen pocos estudios orientados a obtener información medioambiental confiable de árboles urbanos. Este estudio analiza el potencial dendrocronológico de *Fraxinus uhdei* (urapán o fresno) como indicador de cambio ambiental relacionado con la precipitación y la temperatura en un área urbana, específicamente la ciudad de Medellín, Colombia. Se muestrearon 12 árboles adultos y sanos ubicados en un campus universitario de la ciudad. Se aplicaron técnicas dendrocronológicas estándar y se evidenció una muy buena sincronización de las series de anillos (cofechado), tanto visual como estadísticamente ($r = 0.49$, $p < 0.05$). Se obtuvo una cronología de anillos de 37 años (1986-2023). Se observó una correlación positiva y significativa entre la cronología y la precipitación media del período noviembre-marzo ($r = 0.47$, $p < 0.05$), así como una correlación negativa con la temperatura media del período octubre-mayo ($r = -0.54$, $p < 0.05$). Tanto la precipitación como la temperatura afectan el crecimiento de la especie, lo cual es evidencia de su potencial dendroclimático. No existe un reporte previo de la especie *F. uhdei* para evaluar el potencial bioindicador de condiciones climáticas en Medellín.

Palabras clave: Dendrocronología, clima, árboles urbanos, cofechado.

ABSTRACT

Trees are sensitive to environmental conditions. Dendrochronology is the scientific discipline dedicated to studying and considering trees as bioindicators of environmental change. Although there are many tropical species with growth rings, there are few studies using urban trees as a reliable source of environmental information. This study aims to analyze the dendrochronological potential of Urupán / Fresno (*Fraxinus uhdei* - Oleaceae) as an indicator of environmental change related to precipitation and temperature in an urban area, specifically the city of Medellín, Colombia. We sampled 12 adult and healthy trees growing at an university campus in the city, applying standard dendrochronological techniques. A good synchronization of the tree-ring series (crossdating) was found, both visually and statistically ($r = 0.49$, $p < 0.05$). We obtained a 37-year ring chronology (1986-2023). Our findings revealed a positive and significant correlation between the chronology and the average precipitation during the period November-March ($r = 0.47$, $p < 0.05$), and a negative relationship with the average temperature during the period October-May ($r = -0.54$, $p < 0.05$). Both precipitation and temperature affect the growth of the species, which constitutes evidence of its dendroclimatic potential. It does not exist a previous report of the species *F. uhdei* to evaluate the potential bioindicator of climatic conditions in Medellín.

Keywords: Dendrochronology, climate, urban trees, crossdating.

1. Introducción

Los árboles son archivos de la historia ambiental. Almacenan información de las condiciones medioambientales de un sitio a lo largo del tiempo (*e.g.*, temperatura, precipitación, contaminación; Speer, 2010). Aunque todos los órganos de las plantas son influenciados por la variación ambiental, el tallo de las plantas leñosas almacena información del pasado en forma de capas de madera (*i.e.* anillos de crecimiento; Schweingruber y Börner, 2018). Cada año se forman estas capas y su espesor depende de qué tan favorables o desfavorables sean las condiciones ambientales que regulan el desarrollo del árbol. Por tanto, la formación de anillos puede estar determinada principalmente por la disponibilidad lumínica, hídrica y por las variaciones de la temperatura (Fritts, 1976; Schweingruber, 2007).

La disciplina que se encarga de fechar los anillos de crecimiento y establecer su relación con variables ambientales se conoce como dendrocronología (Giraldo, 2011). Aunque su inicio y principales desarrollos han ocurrido en regiones extratropicales, en la actualidad, esta ciencia ha demostrado ser aplicable con éxito en el trópico (Rozendaal y Zuidema, 2011; Giraldo *et al.*, 2020; Quesada-Román *et al.*, 2022; Andreu-Hayles *et al.*, 2023). Los ecólogos han evidenciado que tanto el déficit hídrico como el exceso de agua son factores limitantes para el crecimiento de los árboles tropicales, y estos determinan los ritmos de crecimiento, es decir, la formación de los anillos de crecimiento (Schöngart *et al.*, 2017). Además, en ambientes siempre húmedos, donde no existen meses secos, el potencial dendrocronológico se sustenta en el exceso de agua y la disponibilidad lumínica, los cuales regulan los ritmos de crecimiento de los árboles (Giraldo *et al.*, 2022, 2023).

La aplicación de la dendrocronología en las ciudades ofrece una oportunidad única de investigación (Miyahara *et al.*, 2022; Vásquez *et al.*, 2022). En áreas urbanas la alta contaminación atmosférica, el aumento de la temperatura y sequía, producto de la impermeabilización del suelo, afectan

notablemente el desarrollo y crecimiento de las plantas (Miyahara *et al.*, 2022). Por ello los árboles en las ciudades son un valioso recurso de estudio. Al desarrollarse en condiciones extremas, permiten simular los efectos que el cambio climático tendría sobre especies creciendo en ambientes con menor impronta antrópica y brindar información valiosa para la toma de decisiones basadas en evidencias, particularmente en la evaluación de la vulnerabilidad y el análisis de riesgos para las ciudades. A pesar de ello son pocos los estudios de dendrocronología en estos ambientes (Andreu-Hayles *et al.*, 2023). Si bien los árboles en las ciudades pueden ser más jóvenes que los registros instrumentales del clima, la sensibilidad de sus anillos de crecimiento resulta útil en ciudades con pocas estaciones meteorológicas y datos climáticos locales limitados (Miyahara *et al.*, 2022).

Los árboles en las ciudades proveen múltiples beneficios y servicios ecosistémicos que contribuyen al bienestar y calidad de vida de los habitantes (Luederitz *et al.*, 2015). Por ejemplo, *Fraxinus uhdei* (Oleaceae), conocido como urapán o fresno, es una especie ornamental, nativa de México, que ha sido incorporada con éxito al arbolado urbano de varias ciudades (UNC, 2015; Restrepo *et al.*, 2015; López-López *et al.*, 2018). Diferentes estudios muestran los servicios ecosistémicos que proporciona esta especie, entre los que destacan la captura y almacenamiento de carbono (López-López *et al.*, 2018), la reconstrucción mediante anillos de crecimiento de las emisiones de CO₂ fósil en ciudades de México (San Luis Potosí; Beramendi-Orosco *et al.*, 2013) y Colombia (Medellín; Vásquez *et al.*, 2022). Lo cual evidencia la temporalidad de los anillos de *F. uhdei* y su uso potencial como biomonitor de contaminación.

Sin embargo, la sensibilidad de los anillos de crecimiento de la especie a parámetros climáticos ha sido poco explorada. Se plantea como hipótesis que los anillos de crecimiento de *F. uhdei* son sensibles a la variabilidad de la precipitación y la temperatura en Medellín. Como objetivo se propone estudiar el potencial dendrocronológico de *F. uhdei* como indicador de cambio ambiental relacionado

con la precipitación y temperatura en la ciudad de Medellín. A su vez, se plantea: 1) generar una cronología de anillos consistente y representativa de *F. uhdei*, 2) realizar comparaciones entre la cronología y las series climáticas.

2. Área de estudio

Este estudio se realizó en una zona urbana de la ciudad de Medellín, ubicada en el Norte de la cordillera de los Andes, en Colombia, específicamente en el arboretum del Tecnológico de Antioquia — Institución Universitaria (6°16,80' N - 75°34,98' O; Figura 1). En el arboretum del campus univer-

sitario del Tecnológico de Antioquia existen 220 individuos de árboles y arbustos, distribuidos en 23 familias, 48 géneros y 49 especies. La especie del estrato arbóreo más abundante y dominante es *F. uhdei*, con 48 individuos (Serna-González *et al.*, 2021).

La ciudad de Medellín presenta una temperatura media anual de 20.1 °C, y una precipitación media anual de 2246 ± 339 mm, siendo los meses menos lluviosos enero y febrero con 99 ± 47 mm y 97 ± 41 mm respectivamente, y los meses más lluviosos mayo y octubre con 257 ± 88 mm y 237 ± 77mm respectivamente (Figura 1). A su vez, la evapotranspiración potencial media anual es de 1125 ± 8.9 mm y durante los meses menos lluvio-

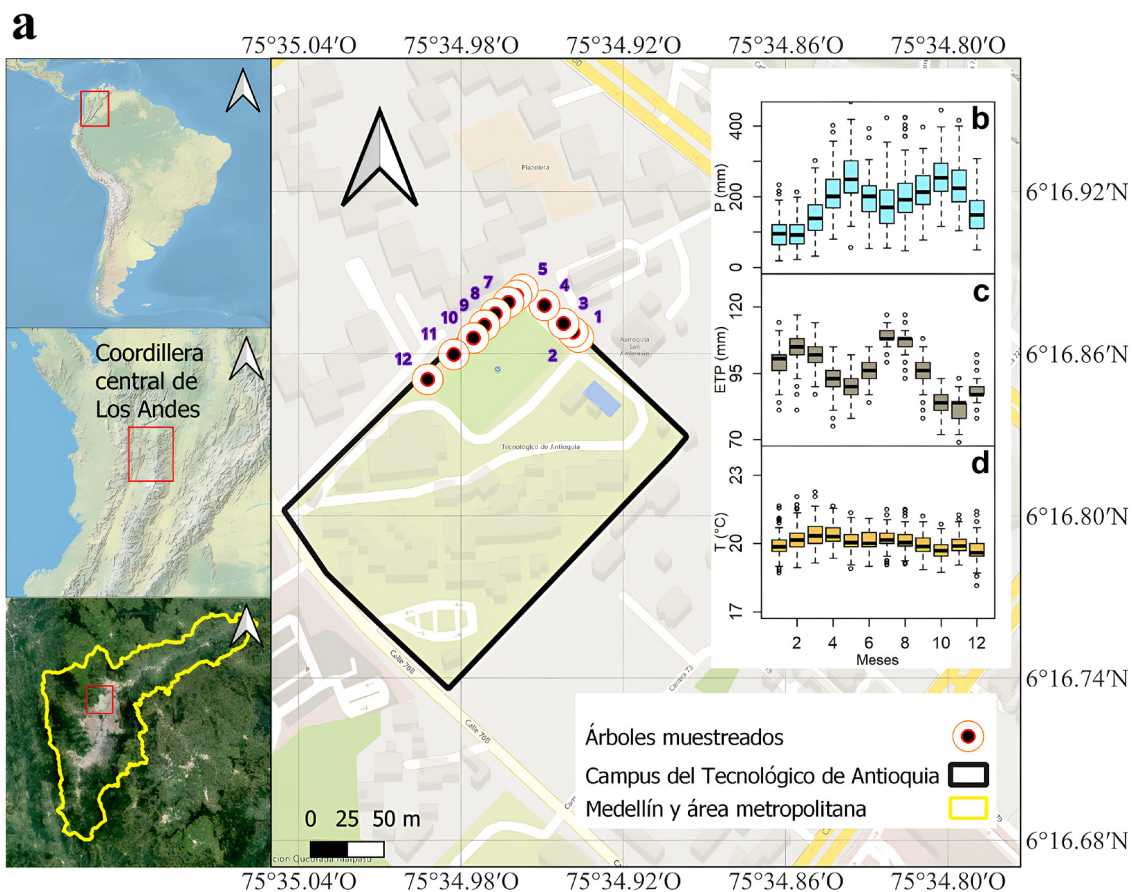


Figura 1 Área de estudio y clima. a) Localización del área de estudio: Campus universitario del Tecnológico de Antioquia, b) Diagrama de cajas y bigotes por la precipitación (P) mensual en milímetros (mm), c) Diagrama de cajas y bigotes para la evapotranspiración (ETP) mensual en mm, d) Diagrama de cajas y bigotes para la temperatura (T) media mensual en grados Celsius (°C). Datos del Climate Research Unit – CRU (Harris *et al.*, 2020; Osborn *et al.*, 2021).

Los datos de precipitación para el periodo enero-febrero es de 95.8 ± 8 mm y 102.6 ± 8.5 mm, respectivamente (Figura 1). La información climática se obtuvo de las bases de datos del CRU: Climate Research Unit (1921-2022; Harris *et al.*, 2020; Osborn *et al.*, 2021).

3. Materiales y método

3.1. MUESTREO

Se seleccionaron 12 individuos de *F. uhdei* presentes en el campus universitario del Tecnológico de Antioquia, creciendo bajo las mismas condiciones de suelo, pendiente y clima. En el muestreo se midió el diámetro, altura del árbol, altura de muestreo y coordenadas. De cada individuo se obtuvieron dos núcleos de madera con un barreno de incremento Haglöf, con 30 cm de longitud y 5,15 mm de diámetro. Las muestras fueron obtenidas a una altura aproximada de 1,3 m sobre el suelo. Se obtuvo un total de 24 núcleos. Todos los registros de campo se hicieron en la aplicación Memento Database® (<https://mementodatabase.com/>).

3.2. PROCESAMIENTO DE MUESTRAS Y OBTENCIÓN DE SERIES DE ANILLOS

Los núcleos extraídos se fijaron permanentemente en molduras de madera, las cuales sirvieron como soporte para su posterior procesamiento. Una vez en la moldura, las muestras se secaron a temperatura ambiente durante una semana. Posteriormente, se aplicaron lijas de diferente textura (*i.e.* granos de 100 a 400), para resaltar así los anillos de crecimiento. Luego los núcleos se digitalizaron con un escáner Epson 10000XL del Laboratorio de Bosques y Cambio Climático de la Universidad Nacional de Colombia, que permite obtener imágenes con una resolución superior a 1800 dpi/ppp. Antes de efectuar la medición de los anillos, se realizó un reconocimiento de éstos usando una lupa cuenta hilos en las muestras físicas y con ayuda de las imágenes escaneadas, con el fin de identificar anillos característicos mediante la técnica de Skeleton Plot (Speer, 2010). Tomando

en cuenta las observaciones que proporciona el Skeleton Plot se procedió a medir el ancho de anillos (precisión: 0,014 mm) en cada una de las muestras de forma digital empleando el software CooRecorder (Cybis Elektronik & Data AB).

3.3. SINCRONIZACIÓN DE SERIES Y GENERACIÓN DE LA CRONOLOGÍA

Durante la medición del ancho de anillos en el software CooRecorder también se realizó la generación de series de referencia en el software CDendro (Cybis Elektronik & Data AB), con la intención de obtener un mejor control de calidad entre las series analizadas. Este proceso se realizó cada dos árboles de manera acumulativa; es decir, luego de realizar el cosechado para los dos primeros individuos con esta información se generó una serie de referencia para los individuos 3 y 4. Posteriormente, se repitió este proceso para los individuos 5 y 6, con la serie de referencia generada con la información de los individuos previamente cosechados (*i.e.* 1, 2, 3 y 4), y así sucesivamente hasta completar los 12 árboles muestreados.

Los archivos generados se guardaron en formato “.rwl” y se analizaron en el software R 4.3.1 (R Core Team, 2023) y el ambiente integrado de desarrollo (IDE: Integrated development environment) R Studio (www.rstudio.com), usando el paquete dplR (Bunn, 2008, 2010). El paquete dplR permite verificar el éxito del cosechado en relación con la medición de los anchos de anillos y generar una cronología final, representativa de la muestra. Como método de estandarización se empleó una Spline con una rigidez de 0.67, conservando el 50% de la variabilidad de la señal. En particular, la sincronización de anillos (cosechado) se evaluó tanto visualmente (diagrama de espagueti), como con parámetros estadísticos (*i.e.* intercorrelación serial: r).

Se estimó la señal expresada de la población (EPS, por sus siglas en inglés), la cual mide la variabilidad compartida por las series de la cronología, con valores del $EPS < 0.85$ sugiriendo una señal dominada por pocos árboles (Speer, 2010). También se midió la intensidad de la señal

de submuestra (SSS, por sus siglas en inglés), que mide la varianza común entre un subconjunto de muestras, con valores de $SSS > 0.85$ indicando la idoneidad de la cronología para reconstrucciones climáticas (Buras, 2017). Se calculó la relación señal ruido (SNR, por sus siglas en inglés), la cual mide la cantidad de ruido respecto a la señal registrada en la cronología.

Además se midió la sensibilidad media de la cronología que evalúa la variabilidad de las series (oscila entre 0 y 1). Si todas las series tuviesen la misma medida de ancho la sensibilidad media sería 0. Valores cercanos a cero sugieren series complacientes (poca o nula señal) y valores más altos indican un mayor variabilidad y sensibilidad a las condiciones ambientales. No obstante, valores extremadamente altos, podrían indicar series muy variables e incluso anillos perdidos (Speer, 2010).

3.4. DATOS CLIMÁTICOS EMPLEADOS

Aunque a nivel local el SIATA (Sistema de Alerta Temprana del Área Metropolitana del Valle de Aburra; <https://siata.gov.co/>) recopila información meteorológica (*e.g.* precipitación, temperatura, humedad relativa, radicación) de alta resolución temporal (*i.e.* minutos), su intervalo temporal es menor a 9 años, presentando registros continuos para el período 2014-2023. Esta información no es suficiente para efectuar comparaciones climáticas con cronologías de ancho de anillos.

No obstante, existe una fuente de información con mayor extensión temporal (CRU: Climate Research Unit; Harris *et al.*, 2020), resolución temporal mensual y lapso temporal de más de una centuria (1901-2022). Con el fin de validar la veracidad de los datos de precipitación mensual y temperatura media mensual disponibles en CRU, se realizó una correlación de Pearson entre las series temporales mensuales disponibles en SIATA con las series temporales mensuales del CRU para el mismo periodo.

3.5. RELACIONES DE LA CRONOLOGÍA DE ANILLOS DE CRECIMIENTO CON LAS SERIES CLIMÁTICAS

Se evaluó la influencia de las variables precipitación y temperatura sobre el crecimiento de *F. uhdei*, usando la cronología generada para la especie, y para evaluar su potencial como bioindicador. Para ello, se empleó el paquete treeclim (Zang y Biondi, 2015) del software R. Evaluamos las relaciones entre el índice de anillos y el clima, estableciendo correlaciones que ayudan a entender la forma en la que una variable afecta positiva o negativamente el crecimiento de un individuo determinado. Obtuvimos correlaciones estáticas, estacionales y móviles usando bootstrapping (*i.e.* técnicas de remuestreo) que permite obtener medidas de precisión (*e.g.* sesgo, varianza, intervalos de confianza) de las correlaciones. El anterior análisis permite evaluar la aptitud que tienen las cronologías para una reconstrucción climática (Zang y Biondi, 2015).

4. Resultados

4.1. SERIES OBTENIDAS Y DESCRIPCIÓN DE ANILLOS

El diámetro de los árboles muestreados varió entre 26,5 y 80,5 cm, la altura entre 7 y 13 m, y la mayoría de los árboles presentaron algún grado de defoliación o pérdida de sus hojas (Datos Suplementarios: Tabla S1).

En total se obtuvieron 24 núcleos (Tabla 1, Datos Suplementarios: Tabla S1), pero uno de los núcleos (árbol 11, muestra b: Fu11b) se descartó porque durante el proceso de fijación sobre la moldura quedó girado y con el plano radial siendo el único visible. Por tanto, en este núcleo no fue posible medir los anillos de crecimiento. Los anillos de crecimiento de *F. uhdei* pueden apreciarse a simple vista, pues son fáciles de delinear y datar; estos se delimitan por porosidad semicircular, bandas de parénquima y cambios en el espesor de la pared de las células con células aplanadas radialmente (Figura 2).

Tabla 1. Estadísticos principales de las series de *F. uhdei*. *Significancia del 95% ($p < 0.05$)

Parámetro	Valor
Número de árboles	12
Número de series	23
Número de anillos	734
Longitud de la cronología	1986-2023
Promedio ancho de anillos (mm)	5.53
Sensibilidad media	0.52
Intercorrelación serial media (series crudas)*	0.5
Intercorrelación serial media (series estandarizadas)*	0.49
Relación señal ruido	7.15
Señal expresada de la población (EPS)	0.87
Intensidad de la señal de submuestra (SSS)	0.6
Autocorrelación orden 1 (crudas)	0.39
Autocorrelación orden 1 (estandarizadas)	-0.04

4.1. ESTADÍSTICOS DE LA CRONOLOGÍA

La extensión temporal de las series varió entre 1986-2023 y aunque la mayoría de los núcleos se acercaron, sólo en los árboles 5, 7, 8 y 12 se logró alcanzar la médula. Las series analizadas presentaron una buena sincronización (cofechado) visual y estadística (Tabla 1 y Datos Suplementarios: Figura S1). La intercorrelación se refiere a la medida de la relación lineal entre dos o más variables en un conjunto de datos. La intercorrelación de las series crudas, sin estandarizar, fue 0.5 ($p < 0.05$) y de las series estandarizadas fue 0.49 ($p < 0.05$; Tabla 1).

La sensibilidad media fue 0.52, valor que sugiere una alta variabilidad y sensibilidad de las series. La señal expresada de la población fue 0.87. Todos estos valores indican la robustez de la cronología sobre la señal aportada por los árboles (Tabla 1). La cronología resultante, a partir de los 12 árboles, presenta una extensión temporal de 36 años (1986-2023; Figura 3).

En el proceso de sincronización de las series se identificaron patrones de comportamiento simi-

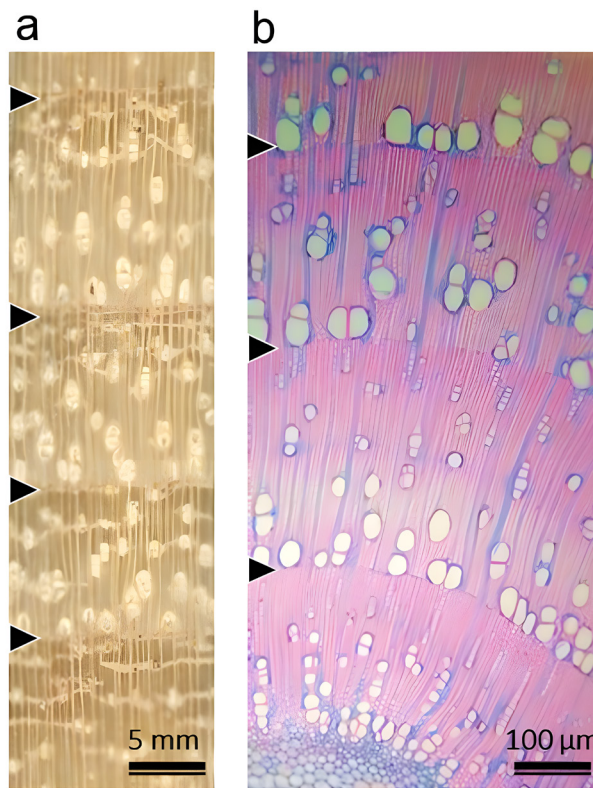


Figura 2 Anillos de crecimiento de *F. uhdei* observables a simple vista, las flechas indican el límite de los anillos de crecimiento. a) vista macroscópica, b) vista microscópica con aumento de 4x.

lares en relación con el ancho de anillo (anillos finos), principalmente en los años 1998, 2010 y 2020 (Figura 3 y Datos Suplementarios: Figura S1). En estos años prevalecieron anillos más finos.

4.2. VALIDACIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS EMPLEADOS

Las bases de datos climáticas consultadas (CRU y SIATA) evidenciaron una alta semejanza entre estas, tanto para la temperatura como para la precipitación. Es importante mencionar que se hizo un análisis comparativo de una fuente de información regional (SIATA) con una fuente de información global (CRU). La correlación entre los datos mensuales de las dos fuentes de información es alta y significativa, tanto para precipitación ($r = 0.76$, $p < 0.05$) y temperatura ($r = 0.82$, $p < 0.05$). La existencia de un patrón de comporta-

miento similar para ambas variables sugiere que los datos de CRU son una fuente de información confiable (Figura 4). En consecuencia, dicha base de datos se empleó en el estudio de las relaciones crecimiento-clima que se presentan en la siguiente sección.

4.3. RELACIONES DE LA CRONOLOGÍA DE ANILLOS VS. CLIMA

Los análisis efectuados permitieron evidenciar una relación entre la precipitación y la temperatura mensual, período octubre-marzo, durante el cual la especie *F. uhdei* tiene su mayor crecimiento. En particular, la precipitación mensual de noviembre a marzo, correlacionó positiva y significativamente con el crecimiento de la especie (noviembre: $r = 0.38$, $p < 0.05$; diciembre: $r = 0.29$, $p < 0.05$,

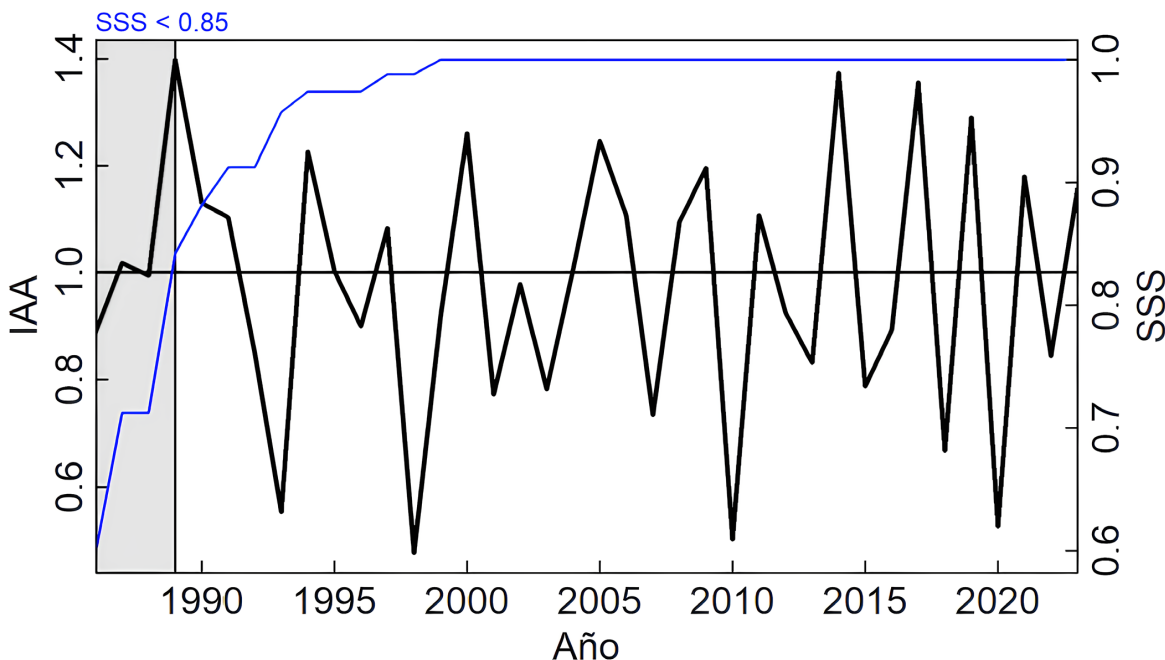


Figura 3 Cronología estándar de *F. uhdei* representativa de los árboles muestreados. La línea continua representa el índice de ancho de anillos (IAA), la línea discontinua representa la intensidad de la señal de la muestra (SSS, por sus siglas en inglés) y el área gris representa la porción de la serie cuyo SSS es inferior al valor crítico (0.85)

enero: $r = 0.35$, $p < 0.05$; febrero: $r = 0.26$, $p < 0.05$; marzo: $r = 0.43$, $p < 0.05$; Figura 5a). La precipitación promedio en esos mismos meses, noviembre a marzo, también se correlacionó positivamente con el crecimiento de la especie ($r = 0.47$, $p < 0.05$; Figuras 5a y 6a).

Por otra parte, la temperatura mensual de octubre a mayo correlacionó negativamente con el crecimiento de la especie (octubre: $r = -0.30$, $p < 0.05$; noviembre: $r = -0.43$, $p < 0.05$; diciembre: $r = -0.50$, $p < 0.05$; enero: $r = -0.58$, $p < 0.05$; febrero: $r = -0.44$, $p < 0.05$; marzo: $r = -0.58$, $p < 0.05$; abril: $r = -0.25$, $p > 0.05$; mayo: $r = -0.38$,

$p < 0.05$; Figura 5b). La temperatura promedio de noviembre a marzo también se correlacionó negativamente con el crecimiento de la especie ($r = -0.54$, $p < 0.05$; Figuras 5b y 6b).

5. Discusión

Los resultados de esta investigación confirman la posibilidad de establecer líneas temporales sólidas de la especie *F. uhdei* que permiten su uso como bioindicador de la variabilidad climática en un área urbana. Aunque *F. uhdei* se usó recientemente

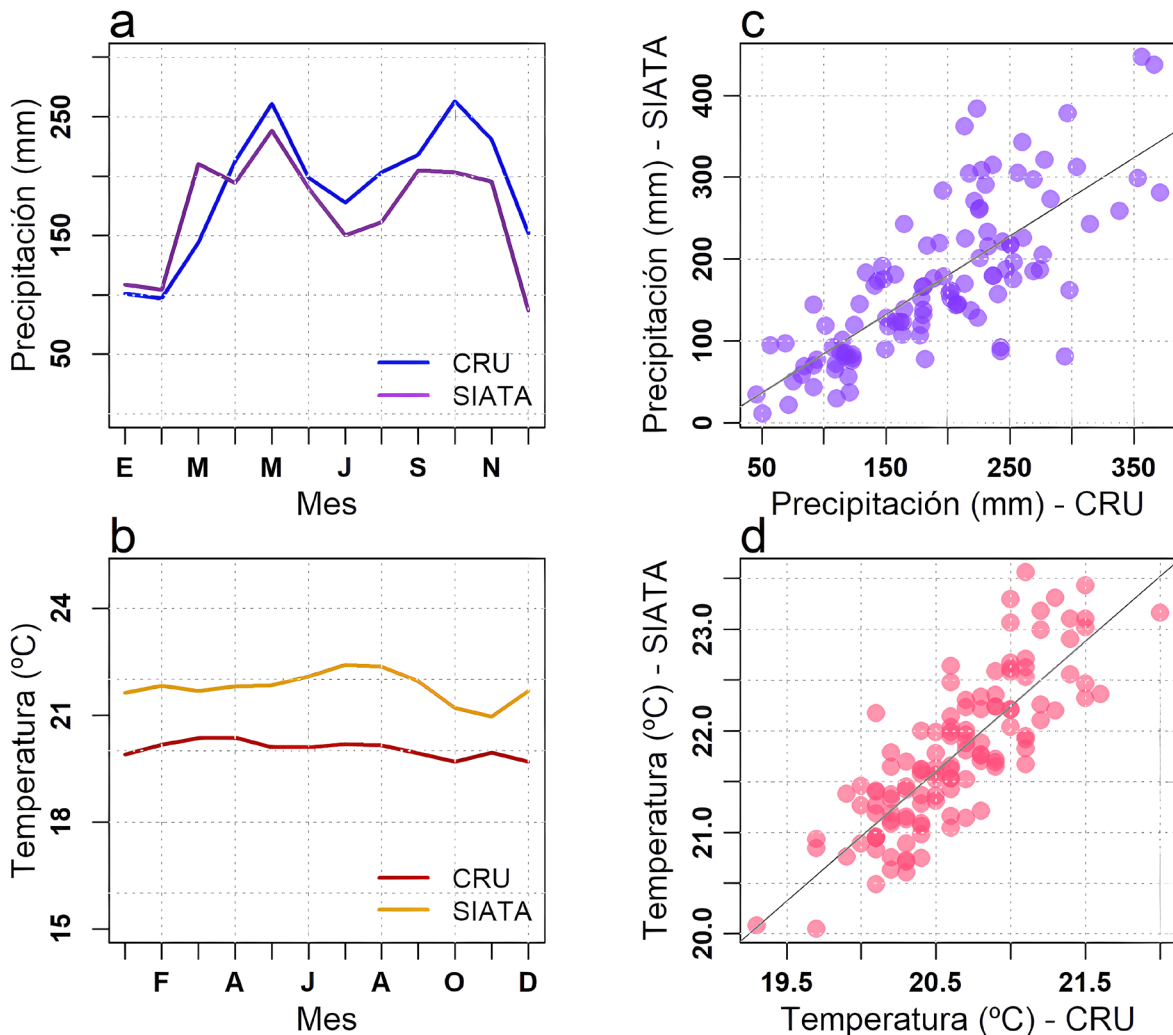


Figura 4 Comparación de datos climáticos usando como fuentes de información CRU y SIATA. a) y c) Precipitación mensual (mm) CRU vs. SIATA ($r = 0.76$, $p < 0.05$), b) y d) Temperatura (°C) mensual CRU vs. SIATA ($r = 0.82$, $p < 0.05$).

para reconstruir las emisiones de CO₂ fósil en Medellín, usando anillos de crecimiento (Vásquez *et al.*, 2022), es la primera vez que se reporta su potencial dendroclimático en esta ciudad. Se observó que el crecimiento de la especie está altamente influenciado por la precipitación de noviembre a marzo (Figuras 5a y 6a), y limitado por la temperatura en el periodo de octubre a marzo (Figuras 5b y 6b). Esto permite concluir que, para las condiciones ambientales de la ciudad de Medellín y su área metropolitana, la especie tiene un potencial bioindicador de cambio ambiental, mostrando una correlación significativa entre el

ancho de los anillos y las condiciones de precipitación y temperatura en el período 1986-2023 (rango de la cronología).

En los años 1998, 2010 y 2020 se observó un patrón de comportamiento caracterizado por una disminución significativa en el crecimiento de la especie en comparación con años anteriores. Según los datos recopilados por el CRU para esos mismos años se encontró que la precipitación media mensual del mes de enero fue 29.1 mm, 16.7 mm y 50.1 mm, respectivamente. Estos valores son considerablemente menores al promedio de 91.6 mm, y podrían ocasionar un estrés hídrico

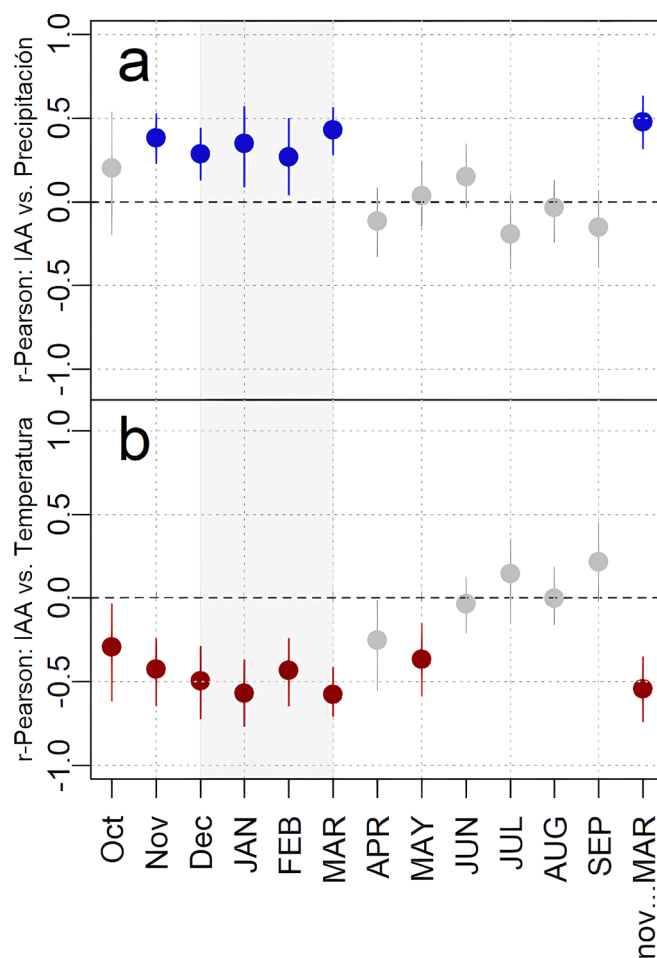


Figura 5 Crecimiento vs. Clima durante los meses de mayor probabilidad de crecimiento (octubre año previo, septiembre año corriente). a) Correlación con bootstrap entre la cronología de anillos (IAA) y la precipitación mensual y b) Correlación con bootstrap entre el IAA y la temperatura mensual. Los meses en minúscula indican el año previo, los meses en mayúscula representan el año corriente. La significancia estadística de las correlaciones se indica mediante líneas resaltadas (relación significativa, $p < 0.05$), en azul y rojo: correlaciones significativas positivas y negativas respectivamente, en gris: relación no significativa, $p > 0.05$.

significativo, ya que la evapotranspiración potencial en esos meses sería inferior a la ETP media mensual. Es importante destacar que los años 1998 y 2010 fueron años El Niño, durante los cuales la precipitación se redujo y la temperatura aumentó particularmente en los meses que la especie presenta crecimiento Octubre–Marzo (<https://psl.noaa.gov/enso/>).

Históricamente enero es el mes en el que menos llueve en la ciudad de Medellín, lo cual influye notablemente en el crecimiento de la especie.

Por otro lado, la temperatura promedio mensual para el mes de enero y el período 1901-2022 fue de 19.3 °C. Al ser una variable limitante, sugiere que valores superiores al promedio tendrían un impacto negativo en el crecimiento de la especie. Durante los años 1998, 2010 y 2020 la temperatura promedio mensual en enero superó los 20 °C, registrando valores de 21.5 °C, 21 °C y 21.7 °C, respectivamente. Esto es contrario a lo observado en los años 2000 y 2005, en los cuales fue mayor el crecimiento y la temperatura para el mes de

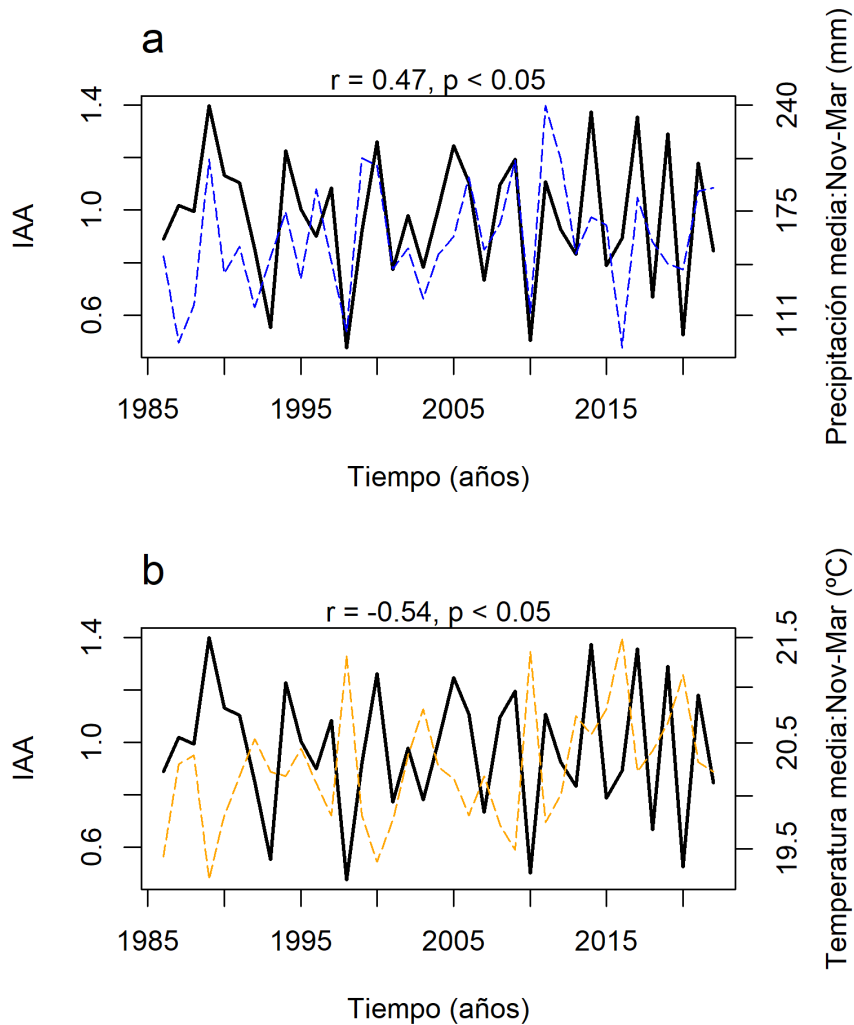


Figura 6 Relaciones de crecimiento – clima en el período 1986 – 2023 para la especie *F. uhdei*. a) comparación visual y estadística entre el índice de ancho de anillos (IAA), en negro y la precipitación media (azul) en el período noviembre-marzo. b) Comparación visual y estadística entre el IAA, en negro (negro) y la temperatura media (naranja) en el período noviembre-marzo. r = coeficiente de correlación de Pearson. Nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$).

enero: 18.9 °C y 19.5°C, respectivamente, valores cercanos al promedio histórico.

Los resultados obtenidos en el análisis de sincronización (cofechado) sugieren el efecto de una señal ambiental común que determina el crecimiento de la especie. Esto permite inferir un crecimiento rítmico, también reportado en otros estudios con la misma especie (Miranda-Avilés *et al.*, 2009; Beramendi-Orosco *et al.*, 2013; Villanueva *et al.*, 2015; Vásquez *et al.*, 2022). Se obtuvo una intercorrelación serial alta ($r = 0.49$, $p < 0.05$), comparada con otros estudios efectuados con la misma especie en Colombia (Vásquez *et al.*, 2022) y México (Miranda-Avilés *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2015). Cabe resaltar que los árboles empleados en este estudio se encontraban creciendo en las mismas condiciones ambientales, cercanos los unos de los otros y en un área específica en un campus universitario de un área urbana. Si se aumentara la muestra de árboles, considerando mayor distancia entre estos, no necesariamente implicaría una disminución de la intercorrelación serial, como lo evidencian otros estudios con la especie (Miranda-Avilés *et al.*, 2009; Beramendi-Orosco *et al.*, 2013; Villanueva *et al.*, 2015; Vásquez *et al.*, 2022). Esto porque los factores climáticos que determinan el crecimiento de la especie son de escala regional.

El patrón de lluvias durante los meses de noviembre a marzo determina el crecimiento anual de la especie. Otros estudios también encontraron evidencia de la sensibilidad del crecimiento de la especie a la variabilidad de la precipitación. Por ejemplo, Miranda-Avilés *et al.* (2009) encontraron relaciones positivas entre la precipitación y el índice de anillos en el período julio-septiembre ($r = 0.4$, $p < 0.05$) en la cuenca del río Guanajuato, México. En ese mismo estudio, la relación existente entre el crecimiento y la temperatura promedio fue positiva durante todos los meses del año, sobresaliendo enero ($r = 0.5$, $p < 0.05$). En contraste, nuestro estudio sugiere correlaciones negativas y significativas con la temperatura, durante los mismos meses en los que la precipitación tuvo una influencia sobre el crecimiento (Figuras 5b y 6b).

En ambientes subtropicales y templados la variabilidad de la temperatura a lo largo del año presenta un contraste mayor que en aquellos ambientes tropicales (cerca del ecuador), donde la variabilidad de la temperatura es mínima. En la cuenca del río Guanajuato, la temperatura media anual oscila entre 14 y 22°C, en tanto que en Medellín la temperatura anual oscila entre 20.94 y 22.40°C. Lo anterior permite explicar que la temperatura puede ser limitante tanto por déficit como por exceso. En nuestro estudio, mayores temperaturas medias en el período de crecimiento de octubre a marzo implican limitación del crecimiento. Por su parte, en el estudio de Miranda-Avilés *et al.*, (2009) el aumento de la temperatura implica un estímulo sobre el crecimiento de la especie.

Otro estudio también realizado en México con *F. uhdei* encontró una relación negativa con la precipitación anual (Villanueva *et al.*, 2015), lo cual es contrario a nuestras evidencias. Cabe resaltar que los árboles de dicho estudio se encontraban en parques urbanos sometidos a riego constante y, por tanto, el aporte adicional de humedad producto de la precipitación explica dicha relación. En efecto, tanto el exceso como el déficit de una variable ambiental puede ser limitante para el crecimiento de los árboles. Dicha situación sugiere que árboles de *F. uhdei* establecidos a lo largo de quebradas urbanas, donde el acceso al agua es permanente, el aporte de agua en forma de precipitación durante los meses más lluviosos podría ser limitante para su crecimiento.

La información obtenida en este estudio permite catalogar a una de las tantas especies arbóreas urbanas como bioindicador de cambio ambiental. Los bioindicadores de cambio ambiental son una herramienta útil y eficaz que ofrecen una perspectiva biológica directa sobre las condiciones ambientales de un ecosistema (Vásquez *et al.*, 2022). Dicha información resulta valiosa bajo diferentes contextos, como en la toma de decisiones relacionadas con la restauración, conservación o aprovechamiento de una especie determinada (Miyahara *et al.*, 2022).

5. Conclusión

Este estudio demuestra el potencial bioindicador ambiental de la especie *F. uhdei* para registrar la variabilidad de la precipitación y la temperatura, ya que estas dos variables resultan ser limitantes para el crecimiento de la especie. Los años más secos y cálidos suelen ser limitantes para el desarrollo y crecimiento de la especie. Esto sugiere que el aumento de eventos extremos tanto de temperatura como de precipitación, producto del cambio climático global, podrían afectar el desarrollo de la especie, particularmente en ambientes antrópicos donde las condiciones climáticas son exacerbadas por el efecto de isla de calor. Con este estudio se genera una cronología consistente y robusta que podría ser usada como referencia para futuros estudios con esta especie en otras áreas de la ciudad. Esta es la primera vez que se usa la especie *F. uhdei* para evaluar su potencial como indicador de condiciones climáticas en Medellín. La sensibilidad de la especie a la temperatura en el período menos lluvioso del año, la hace interesante para evaluar el efecto de la isla de calor en la ciudad.

Contribución de los autores

(1) Conceptualización: JAG; (2) Análisis o adquisición de datos: JPDO; (3) Desarrollo metodológico/técnico: JPDO, JAG; (4) Redacción del manuscrito original: JPDO; (5) Redacción del manuscrito corregido y editado: JAG, FFG, MV, SAO; (6) Diseño gráfico: JAG, FFG, MV, SAO; (7) Trabajo de campo: JPDO, JAG; (8) Interpretación: JAG, FFG, MV, SAO

Todos los autores están de acuerdo con la versión final del manuscrito.

Financiamiento

La investigación no contó con financiación.

Agradecimientos

Al laboratorio de Bosques y Cambio Climático de la Universidad Nacional, por poner a disposición el recurso técnico que hizo posible esta investigación. Al Tecnológico de Antioquia por permitir muestrear los árboles dentro del campus universitario.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Editor a cargo

Alexander Correa Metrio.

Referencias

- Andreu-Hayles, L., Tejedor, E., D'Arrigo, R., Locosselli, G.M., Rodríguez-Catón, M., Daux, V., Oelkers, R., Pacheco-Solana, A., Paredes-Villanueva, K., Rodríguez-Morata, C., 2023, Dendrochronological advances in the tropical and subtropical Americas: Research priorities and future directions: *Dendrochronologia*, 81, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126124>
- Beramendi-Orosco, L.E., Hernandez-Morales, S., Gonzalez-Hernandez, G., Constante-Garcia, V., Villanueva-Diaz, J., 2013, Dendrochronological Potential of *Fraxinus Uhdei* and Its Use as Bioindicator of Fossil CO₂ Emissions Deduced from Radiocarbon Concentrations in Tree Rings: *Radiocarbon* 55(2), 833-840. <https://doi.org/10.1017/S0033822200057994>
- Bunn, A.G., 2008, A dendrochronology program library in R (dplR): *Dendrochronologia* 26(2), 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Bunn, A.G., 2010, Statistical and visual crossdating in R using the dplR library: *Dendrochronologia* 28(4), 251-258. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.01.002>

- doi.org/10.1016/j.dendro.2009.12.001
- Buras, A., 2017, A comment on the expressed population signal: *Dendrochronologia* 44, 130–132. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.03.005>
- Fritts, H.C., 1976, *Tree rings and climate*: UK, Academic Press, 567 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-268450-0.X5001-0>
- Giraldo, J.A., 2011, Dendrocronología en el trópico: Aplicaciones actuales y potenciales: *Colombia Forestal*, 14(1), 97–111. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2011.1.a08>
- Giraldo, J.A., Valle, J.I. del, Sierra, C.A., Melo, O., 2020, Dendrochronological potential of trees from America's rainiest region, en Pompa-García, M., Camarero, J.J. (eds.), *Latin American Dendroecology*, Cham, Springer International Publishing, 79–119. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9_5
- Giraldo, J.A., 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* 36(3), 1039–1052. <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02271-7>
- Giraldo, J.A., Valle, J.I. del, González-Caro, S., David, D.A., Taylor, T., Tobón, C., Sierra, C.A., 2023, Tree growth periodicity in the ever-wet tropical forest of the Americas: *Journal of Ecology* 111(4), 889–902. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14069>
- Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P., Lister, D., 2020, Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset: *Scientific Data*, 7, 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- López-López, S.F., Martínez-Trinidad, T., Benavides-Meza, H.M., García-Nieto, M., Ángeles-Pérez, G., 2018, Reservorios de biomasa y carbono en el arbolado de la primera sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México: *Madera y Bosques*. 24(3), 1–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431620>
- Luederitz, C., Brink, E., Gralla, F., Hermelingmeier, V., Meyer, M., Niven, L., Panzer, L., Partelow, S., Rau, A.L., Sasaki, R., Abson, D.J., Lang, D.J., Wamsler, C., Wehrden, H. von, 2015, A review of urban ecosystem services: Six key challenges for future research: *Ecosystem Services*, 14, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.05.001>
- Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M., Martínez-Reyes, J., 2009, Potencial del Uso del Fresno (*Fraxinus uhdei*) en Estudios Dendrocronológicos: *Ciencia Tecnológica* 38, 24–29.
- Miyahara, A.A.L., Paixão, C.P., Dos Santos, D.R., Pagin-Cláudio, F., Da Silva, G.J., Bertoleti, I.A.F., De Lima, J.S., Da Silva, J.L., Candido, L.F., Siqueira, M.C., Silva, R.P., Racanelli, Y.R., Locosselli, G.M., 2022, Urban dendrochronology toolkit for evidence-based decision-making on climate risk, cultural heritage, environmental pollution, and tree management – A systematic review: *Environmental Science & Policy* 137, 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.08.025>
- Osborn, T.J., Jones, P.D., Lister, D.H., Morice, C.P., Simpson, I.R., Winn, J.P., Hogan, E., Harris, I.C., 2021, Land Surface Air Temperature Variations Across the Globe Updated to 2019: The CRUTEM5 Data Set: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(2), e2019JD032352. <https://doi.org/10.1029/2019JD032352>
- Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J.A., George, S.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>
- R Core Team, 2023, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, reference index: Viena, R Foundation for Statistical Computing,
- Restrepo, H.I., Moreno, F., Hoyos, C., 2015, Incidencia del deterioro progresivo del

- arbolado urbano en el valle de Aburrá, Colombia: Colombia Forestal 18(2), 225-240. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2015.2.a04>
- Rozendaal, D.M., Zuidema, P., 2011, Dendroecology in the tropics: a review: Trees 25(1), 3–16. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0480-3>
- Schöngart, J., Bräuning, A., Barbosa, A.C.M., Lisi, C.S., Oliveira, J.M., 2017, Dendroecological studies in the neotropics: History, status and future challenges.: en Amoroso, M.M., Daniels, L., Baker, P.J., Camarero, J.J., (eds.), Dendroecology. Ecological Studies, Analysis and Synthesis, vol 231, Cham, Springer, 35–73. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8_3
- Schweingruber, F.H., 2007, Wood structure and environment: Berlín, Springer, 279 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48548-3>
- Schweingruber, F.H., Börner, A., 2018, The plant stem, a microscopic Aspect: Cham, Springer <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73524-5>
- Serna-González, M., Jimenez, E., Escudero, A, Martínez, AF, 2021, Diversidad, estructura y riesgo de los árboles del Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria: Antioquia, Sello Editorial Tecnológico de Antioquia, 218 p.
- Speer, J.H., 2010, Fundamentals of tree ring research: USA, University of Arizona Press, 368 p.
- Universidad Nacional de Colombia (UNC), 2015, Formulación del plan maestro de zonas públicas verdes del Municipio de Envigado, incluyendo caracterización del componente arbóreo: entrega final, proceso contractual no. 15-00-09-08-016-15, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Ciencias Forestales, Medellín, 647 p.
- Vásquez, M., Lara, W., Valle, J.I. del, Sierra, C.A., 2022, Reconstructing past fossil-fuel CO2 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>
- Villanueva, J., Pérez Evangelista, E.R., Beramendi Oroscó, Laura, Cerano Paredes, J. , 2015, Crecimiento radial anual del fresno (*Fraxinus udhei* (Wenz.) Lingelsh.) en dos parques de la Comarca Lagunera: Revista Mexicana de Ciencias Forestales 6(31), 40–57. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i31.194>
- Zang, C., Biondi, F., 2015, Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships: Ecography 38(4), 431–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>

Datos suplementarios

Tabla 1. Información de los árboles muestreados. Id: identificador de cada árbol, incluye las iniciales de la especie y un consecutivo de acuerdo con el muestreo. La observación fenológica, es la observación al momento del muestreo: Defoliación 1: Perdida de sus hojas en un rango de 0 - 25% de la copa, Defoliación 2: Perdida de sus hojas en un rango 26-50% de la copa, Defoliación 3: Perdida de sus hojas en un rango de 51-75% de la copa. Defoliación 4: Perdida de sus hojas en un rango de 76-100% de la copa.

Id	Fecha de muestreo	Diámetro (cm)	Altura (m)	Observación fenológica	Latitud	Longitud	Edad/Anillos
Fu1	25/08/2023	72,5	13	Defoliación 4	6,281113187	-75,5822504	37
Fu2	25/08/2023	26,5	11	Defoliación 3	6,281152265	-75,58229266	25
Fu3	25/08/2023	37,5	12	Defoliación 4	6,281208888	-75,58235567	38
Fu4	25/08/2023	65,7	13	Defoliación 4	6,281311767	-75,58246652	35
Fu5	1/09/2023	34,2	7	Defoliación 2	6,281396303	-75,58261964	31
Fu6	1/09/2023	58,3	12	Defoliación 1	6,281359618	-75,58265792	34
Fu7	1/09/2023	63,3	12	Defoliación 1	6,281316552	-75,58270737	38
Fu8	1/09/2023	42,9	10	Defoliación 1	6,281265511	-75,58277595	35
Fu9	4/09/2023	59	13	Sin cambios	6,281208888	-75,58283657	31
Fu10	8/09/2023	73,1	13	Defoliación 1	6,281149873	-75,58290675	33
Fu11	8/09/2023	80,5	12	Sin cambios	6,280995156	-75,58304392	27
Fu12	8/09/2023	57,1	12	Sin cambios	6,280869149	-75,58323053	30

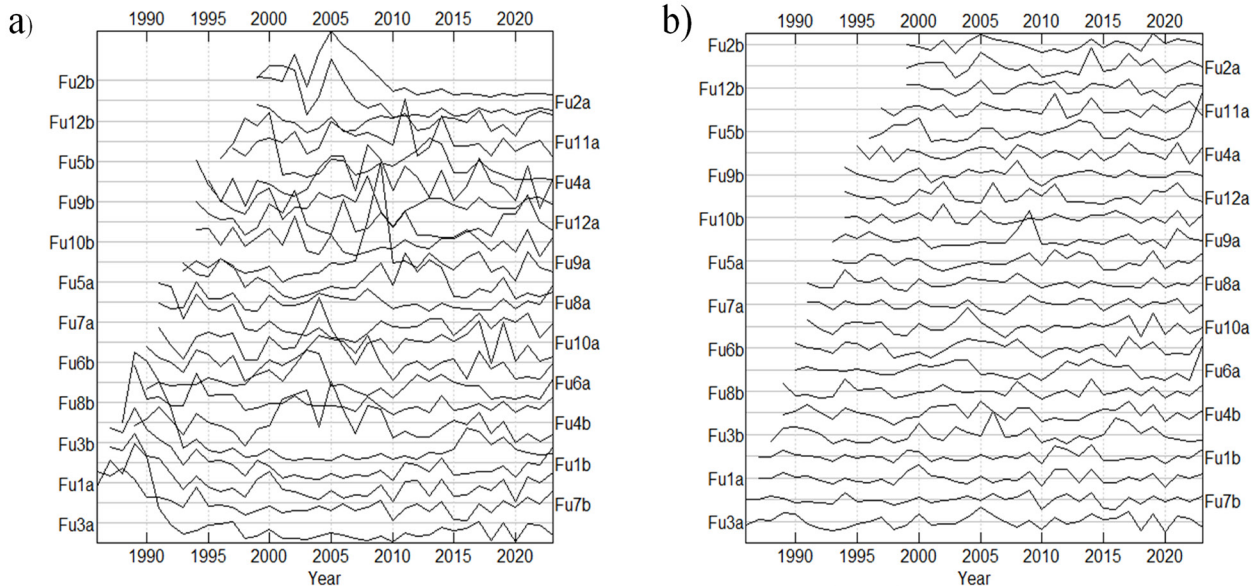


Figura S1 Sincronización visual de series a través del diagrama de espagueti. a) series crudas, b) series estandarizadas