

Crecimiento diamétrico de *Anacardium excelsum* afectado por variación climática local, Tolima (Colombia)

Luis Alfredo Lozano-Botache¹, Omar Aubrelío Melo-Cruz², y Luisa Fernanda Lozano-Castellanos³

Resumen

El *Anacardium excelsum* (*A. excelsum*) es una especie de alto valor comercial presente en el bosque seco tropical (bs-T) de Colombia, un ecosistema altamente vulnerable a la variabilidad climática y, además, afectado por la deforestación, la fragmentación del hábitat y la sobreexplotación maderera. Evaluar el crecimiento diamétrico de *A. excelsum* permite comprender su respuesta ante estas fluctuaciones. Esta investigación analizó el incremento corriente anual (ICA) diamétrico de 23 individuos, durante 11 años, en dos parcelas permanentes de 40 × 50 m, ubicadas en relictos poco intervenidos de bs-T en el norte del departamento de Tolima, en los municipios de Alvarado y Venadillo. En el desarrollo del estudio se formuló un modelo matemático, presentado como Índice de Anomalías Climáticas (IA), con fundamento en las metodologías del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), integrando anomalías de temperatura y precipitación. Estos datos climáticos provienen de herramientas como el SISDHIM (IDEAM), los modelos hidrológicos CHAC y HEC-HMS y el visor POWER (NASA). El ICA se calculó a partir de diámetros anuales y su relación con el IA se evaluó mediante el método de agrupamiento jerárquico (método de grupos de pares no ponderados con media aritmética – UPGMA), identificando patrones de similitud interanual y agrupaciones de períodos con respuestas comparables. Los resultados mostraron diámetros iniciales entre 11,33 y 112,3 cm y un crecimiento promedio de 0,84 cm año⁻¹, con incrementos altos en los diámetros medios y superiores. El IA presentó una marcada influencia del ENSO, con anomalías de precipitación de hasta +20 % en La Niña y -30 % en El Niño, mientras que las anomalías de temperatura fueron moderadas (-1 a +0,5 °C). El ICA respondió proporcionalmente a estas anomalías, registrando mayor crecimiento en años húmedos y reducciones en períodos secos, sin evidencia de crecimiento diamétrico nulo. El análisis UPGMA reveló patrones recurrentes de respuesta al régimen climático, confirmando que el crecimiento diamétrico de *A. excelsum* está condicionado principalmente por las fluctuaciones en la disponibilidad hídrica. La metodología empleada permitió caracterizar esta relación, aportando información clave para estrategias de manejo y conservación bajo escenarios de cambio climático.

Palabras clave: anomalía climática, bosque seco tropical, cambio climático, crecimiento arbóreo, El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

*FR: 6-VIII-2025. FA: 13-VIII-2025.

¹ Magister en Ciencias Biológicas. Universidad del Tolima, Ibagué (Colombia). Correo electrónico: llozano@ut.edu.co

 orcid.org/0000-0002-1448-8794 **Google Scholar**

² Doctor en Ciencias Agropecuarias. Universidad del Tolima, Ibagué (Colombia). Correo electrónico: omelo@ut.edu.co

 orcid.org/0000-0001-5266-4966 **Google Scholar**

³ Magister en Gestión Ambiental y Evaluación del Impacto Ambiental. Universidad del Tolima, Ibagué (Colombia). Master en Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo Agroforestal. Universidad de Valladolid, Palencia (España).

Correo electrónico: luisafernanda.lozano@uva.es

 orcid.org/0000-0003-4667-6113 **Google Scholar**

CÓMO CITAR:

Lozano-Botache, L.A., Melo-Cruz, O.A., y Lozano-Castellanos, L.F. (2025). Crecimiento diamétrico de *Anacardium excelsum* afectado por variación climática local, Tolima (Colombia). *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. Univ. Caldas*, 29(2), 13-32. <https://doi.org/10.17151/bccm.2025.29.2.1>



The diametric growth of *Anacardium excelsum* is affected by local climatic variation in Tolima, Colombia.

Abstract

Anacardium excelsum is a commercially valuable species found in Colombia's tropical dry forests (bs-T), which are highly vulnerable to climate variability and further impacted by deforestation, habitat fragmentation and overexploitation of timber resources. Assessing its diameter growth provides insight into how it responds to such fluctuations. This study analysed the annual current increment (ACI) in the diameter of 23 individuals over 11 years in two permanent plots measuring 40 x 50 m. These plots were located in minimally disturbed bs-T remnants in the northern department of Tolima, in the municipalities of Alvarado and Venadillo. A Climate Anomaly Index (CAI) was developed based on a mathematical model grounded in IDEAM methodologies, integrating temperature and precipitation anomalies. Data were obtained from the SISDHIM (IDEAM), hydrological models (CHAC and HEC-HMS) and the NASA POWER viewer. The ACI was calculated from annual diameters and its relationship with the CAI was assessed using the unweighted pair group method with arithmetic mean (UPGMA) to identify patterns of interannual similarity and clusters of periods with comparable responses. Initial diameters ranged from 11.33 to 112.3 cm, and the species exhibited an average growth rate of 0.84 cm per year, with greater increments observed in the medium and large diameter ranges. The CAI exhibited a significant ENSO influence, with precipitation anomalies reaching +20% during La Niña and -30% during El Niño, while temperature anomalies were more moderate at -1 to +0.5 °C. The CAI responded proportionally to these anomalies, showing greater growth in wet years and reductions in dry periods with no evidence of zero diameter growth. UPGMA analysis revealed recurrent response patterns to the climatic regime, confirming that *A. excelsum* diameter growth is primarily conditioned by fluctuations in water availability. This methodology effectively characterised this relationship, providing key information for management and conservation strategies in the context of climate change.

Keywords: arboreal growth, climatic anomaly, climate variability, El Niño–Southern Oscillation (ENSO), tropical dry forest.

Introducción

El bosque seco tropical (bs-T) es un ecosistema caracterizado por temperaturas superiores a 24 °C y precipitaciones anuales entre 700 y 2000 mm, con una marcada estacionalidad hídrica que genera períodos prolongados de sequía (Gómez et al., 2016). En Colombia se distribuye de forma fragmentada principalmente en el Caribe, los Llanos y la región norandina, siendo uno de los ecosistemas más amenazados debido a la conversión del suelo para ganadería extensiva y agricultura de corta rotación (Sanchez-Azofeifa et al., 2024). Esta presión antrópica ha reducido su superficie a cerca de 720000ha, equivalente a menos del 8 % de la extensión original (Ariza et al., 2014).

El departamento del Tolima, ubicado en la región centro-occidental de Colombia, alberga importantes relictos de bs-T, particularmente en el valle alto del río Magdalena, un área con alta diversidad florística que incluye municipios donde se ha documentado una marcada variación florística. Por ejemplo, en Venadillo se han registrado 52 especies de 30 familias botánicas (Lozano-Botache et al., 2011); en Suárez, 62 especies de 26 familias; en Armero Guayabal, 60 especies de 35 familias; y en Coello, 21 especies de 12 familias (Morales-Duarte y Fonseca-Peña, 2018). Estos registros evidencian la heterogeneidad florística entre relictos de la misma región, asociada a diferencias en extensión, grado de conservación y condiciones ambientales locales.

Dentro de esta diversidad, *A. excelsum* destaca por su importancia ecológica debido a su capacidad de adaptación a diversas condiciones edáficas y climáticas, lo que la convierte en una especie prioritaria para programas de restauración ecológica. En Colombia, ha sido incluida en la Estrategia Nacional de Conservación de Plantas (NSPC), lo que resalta su papel en la recuperación de ecosistemas degradados (Bocanegra-González y Guillemín, 2018). Además de su función ecológica, *A. excelsum* posee un alto valor maderable. Aunque su crecimiento es medio a lento, en 20 años puede alcanzar dimensiones adecuadas para su aprovechamiento en la industria forestal (Corporación Autónoma Regional del Tolima [CORTOLIMA] y Universidad del Tolima [UT], 2007).

Su importancia económica y ecológica hace necesario el estudio de su dinámica de crecimiento, ya que esto facilita su manejo silvicultural, promueve un aprovechamiento sostenible y optimiza la planificación de estrategias de restauración en áreas degradadas (Barrios et al., 2008; Melo-Cruz y Vargas-Ríos, 2003; Mora et al., 2009). Para ello, la tasa de crecimiento es un indicador clave en estudios forestales, pues permite evaluar la dinámica de una especie a lo largo del tiempo.

Entre las variables más utilizadas para estimar el crecimiento arbóreo, el diámetro a la altura del pecho (DAP) es ampliamente empleado debido a la facilidad de medición, el carácter no destructivo y la fuerte relación que presenta con la biomasa y el volumen comercial de las especies maderables (Castañeda y Madrigal, 2008; Chauchard y Sbrancia, 2003; Imaña Encinas y Encinas, 2008). En estudios de crecimiento, esta variable se fundamenta en la relación alométrica con la altura y el volumen, permitiendo la modelación de la dinámica de los bosques y la evaluación precisa de la respuesta frente a cambios ambientales (Andrade et al., 2014; Lozano-Botache et al., 2012; Lozano-Botache y Melo-Cruz, 2023; Melo-Cruz, 2015; Melo-Cruz y Vargas-Ríos, 2003).

El crecimiento de los árboles no solo depende de las condiciones físicas del entorno como la fertilidad, la pendiente y la profundidad del suelo, sino, además de rasgos funcionales de las especies como la densidad de la madera, el área foliar y el grosor de

la corteza (Arribas et al., 2012; Peñuela-Mora, 2014), también de factores climáticos como la radiación solar y la variabilidad climática, que desempeñan un papel determinante en la disponibilidad de agua en el suelo, la temperatura ambiental y sus efectos sobre la evapotranspiración, el anabolismo y el catabolismo (Del Valle, 1997; Melo-Cruz y Vargas-Ríos, 2003; González et al., 2021).

El clima, en general, no es estático; su variabilidad está influenciada por procesos atmosféricos y oceánicos, entre ellos el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), que modifica la temperatura superficial del océano y la presión atmosférica en el Pacífico tropical. ENSO presenta dos fases contrastantes: El Niño, caracterizado por incrementos térmicos y reducción de la precipitación, y La Niña, que provoca mayores precipitaciones y descenso de la temperatura (Borunda, 2023; Wolter y Timlin, 2011). Estas fluctuaciones pueden alterar la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, así como los extremos térmicos, afectando potencialmente el crecimiento de especies forestales (Cruz-Roa et al., 2018; Montealegre y Pabón Caicedo, 2000; Naranjo Bedoya et al., 2019; Poveda y Mesa, 1996; Sanchez-Azofeifa et al., 2024; Sifontes y Pacheco Moya, 2012). No obstante, la magnitud y el patrón de esta relación en *A. excelsum* aún no han sido determinados con precisión.

Este estudio tiene como objetivo evaluar la relación entre la variabilidad climática interanual y el crecimiento diamétrico de *A. excelsum* en parcelas ubicadas en el departamento de Tolima, mediante un análisis de datos recopilados durante once años. Los resultados permitirán fortalecer las estrategias de conservación y manejo sostenible del bs-T, proporcionando bases científicas para la gestión de especies forestales en escenarios de cambio climático.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el norte del departamento de Tolima (Colombia), en los municipios de Alvarado y Venadillo (Figura 1), dentro de relictos forestales clasificados como bosque seco tropical (Corporación Autónoma Regional del Tolima [CORTOLIMA] y Universidad del Tolima [UT], 2007). Con base en registros multianuales del IDEAM, el municipio de Alvarado presenta una temperatura media anual de 27,76 °C y una precipitación promedio de 1668,22 mm, distribuidas en un régimen bimodal, con períodos lluviosos entre marzo–mayo y septiembre–noviembre. En el municipio de Venadillo, la temperatura media anual es de 25,70 °C, con una precipitación promedio de 1588,95 mm y una distribución climática similar (IDEAM, 2024).

En cada municipio se estableció una parcela permanente de 40 × 50 m. La primera en el relicto “Vallecita” (municipio de Alvarado; 4°34'05" N, 74°58'44" O; 319 m s.n.m.), y la segunda en el relicto “Limones” (municipio de Venadillo; 4°40'38.7" N, 74°49'23.5" O; 274 m s.n.m.).

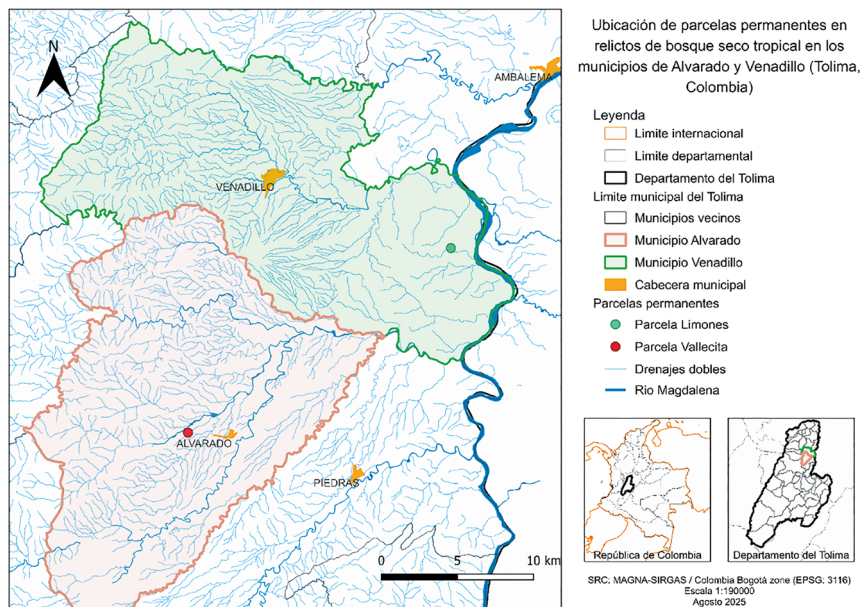


Figura 1.

Ubicación de las parcelas permanentes en relicto del bosque seco tropical en los municipios de Alvarado y Venadillo (Tolima, Colombia).
Fuente: elaboración propia.

Variables climáticas de precipitación y temperatura

Los datos de precipitación correspondientes al período 2008–2019 fueron obtenidos de las estaciones agroclimáticas de Alvarado y Venadillo, a través del geoportal DHIME (IDEAM, 2024), el cual ofrece herramientas para el análisis geoespacial y la gestión de series temporales. Dado que no todas las estaciones contaban con registros completos, los datos faltantes de precipitación fueron estimados mediante los softwares CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) versión 5.07 (CEDEX - Centro de Estudios Hidrográficos, 2021) y HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) versión 4.12 (US Army Corps of Engineers, 2022).

CHAC emplea modelos matemáticos para completar series temporales y análisis de frecuencia, mientras que HEC-HMS permite la estimación de precipitación faltante mediante modelado hidrológico continuo.

Ante la ausencia de registros locales de temperatura, esta variable fue obtenida del portal Power Data Access Viewer (National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2024), con una resolución espacial de $0,5^\circ$ ($\sim 55,56$ km de lado).

Anomalías climáticas

El análisis de la variabilidad climática en este estudio se fundamentó en el concepto del índice de aridez de Lang, una de las clasificaciones climáticas de referencia en Colombia, ampliamente valorada por su simplicidad y aplicabilidad práctica. Este índice se define como el cociente entre la precipitación media anual (mm) y la temperatura media anual ($^\circ\text{C}$), y permite estimar el grado de aridez con base en el equilibrio entre oferta hídrica y demanda térmica (IDEAM, 2014). Su estructura proporcional (P/T) ha sido útil en estudios agroclimáticos, en especial para estimar requerimientos hídricos en cultivos.

Con fundamento en esta relación funcional, se desarrolló un índice adimensional de anomalías climáticas, con el fin de integrar las fluctuaciones relativas de temperatura y precipitación en una métrica única. Las anomalías climáticas se definieron como desviaciones de los valores observados respecto a sus promedios multianuales.

La anomalía de precipitación se calculó mediante un índice relativo (IP), definido como el cociente entre la precipitación mensual o anual observada y su promedio histórico correspondiente (Ecuación 1) (IDEAM, 2019).

$$IP = \left(\frac{Pt}{Pt_m} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

IP = Índice de precipitación mensual o anual (adimensional)

Pt = Precipitación total mensual o anual en milímetros (mm)

Pt_m = Precipitación media mensual o anual multianual en m años (mm)

La anomalía de temperatura se calcula originalmente como la diferencia absoluta respecto a la media histórica (IDEAM, 2019). No obstante, con el fin de armonizarla con la estructura del IP y facilitar comparaciones adimensionales, dicha ecuación fue modificada, expresando la anomalía de temperatura (IATM) como el cociente entre la temperatura observada y su valor medio multianual (Ecuación 2), lo que permitió representarla como un índice.

$$IATM = \frac{tm_{ijt}}{tm_{ij}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

IATM = Índice anomalía de temperatura media de la unidad espacial de referencia i , para el mes j en el tiempo t (adimensional)

tm_{ijt} = Temperatura media del aire de la unidad espacial de referencia i , para el mes j en el tiempo t .

tm_{ij} = Temperatura promedio multianual de la unidad espacial de referencia i , para el mes j .

A partir de estos dos índices se construyó un Índice de Anomalías (IA), definido como el cociente entre el IP y el IATM (Ecuación 3):

$$IA = \frac{IP}{IATM} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

IA = Índice de anomalías

IP = Índice de precipitación mensual o anual

IATM = Índice de temperatura media de la unidad espacial de referencia i , para el mes j en el tiempo t

Este índice resultó adimensional y permitió interpretar valores superiores a 1 como anomalías por encima del promedio interanual y valores inferiores a 1 como condiciones por debajo de dicho promedio tanto para la precipitación como para la temperatura.

Incremento corriente anual (ICA)

Se monitorearon 23 individuos de *A. excelsum* con DAP superiores a 10 cm, distribuidos en las dos parcelas permanentes. El DAP fue registrado en campo mediante un método no destructivo utilizando el sistema digital Field-Map, con el que también se registra coordenadas geográficas para cada individuo y permite medir en tiempo real el diámetro y otras variables estructurales sin necesidad de estandarización manual de la altura de medición. Todas las mediciones se registraron a 1,30 m sobre el nivel del suelo, procurando su ejecución en el mismo mes de cada año, coincidiendo con el segundo período de lluvias característico del régimen climático biestacional de la zona de estudio.

El cálculo de los incrementos diamétricos se basó en la organización cronológica de los valores de DAP estimando el crecimiento anual entre mediciones sucesivas

(López et al., 2012). El período de análisis comenzó en 2008, considerando el año 1 a partir de 2009 y extendiéndose hasta el año 11, correspondiente a 2019. Para estandarizar los valores de crecimiento y facilitar su comparación interanual, se construyó un índice relativo de incremento corriente anual (IICA), definido como el cociente entre el ICA observado en un año específico y el promedio interanual de ICA para el período completo (Ecuación 4):

$$IICA = \frac{ICA_{it}}{ICA_k} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde,

IICA = Índice de incremento medio anual interanual, en el año i

ICA_{it} = Incremento medio anual promedio i , del año t

ICA_k = Incremento medio interanual durante los años k .

Las clases diamétricas se definieron posteriormente a la recolección de datos, con base en los diámetros mínimo y máximo registrados en los 23 individuos monitoreados entre 2008 y 2019. Se utilizó una amplitud fija de 15 cm para segmentar el gradiente de tamaños en grupos comparables y analizar el comportamiento del ICA en relación con el diámetro inicial.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó en el lenguaje de programación Python (versión 3.11), utilizando las bibliotecas *Pandas*, *NumPy*, *Matplotlib*, *Seaborn* y *SciPy*. Las series de datos climáticos y diamétricos fueron organizadas en estructuras tipo *dataframe* para facilitar su procesamiento y análisis. A partir de estas series se calcularon los índices estandarizados de IA y de IICA, lo que permitió analizar su comportamiento interanual y establecer comparaciones temporales. Los valores obtenidos se representaron gráficamente mediante visualizaciones de tendencias y correlaciones entre variables, así como por medio de análisis de agrupamiento jerárquico. Todas las visualizaciones se generaron con *Matplotlib* y *Seaborn*, garantizando la reproducibilidad de los resultados.

Para evaluar la relación entre IA y el IICA, se aplicó el método de agrupamiento jerárquico UPGMA (*Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean*), una técnica ampliamente utilizada para construir dendrogramas a partir de matrices de distancia. Este método clasifica iterativamente elementos o grupos con base en su similitud promedio, generando una estructura jerárquica representada en forma de árbol. Aunque originalmente empleado en estudios filogenéticos, UPGMA ha sido adoptado en contextos ecológicos y ambientales para detectar patrones de asociación entre observaciones multivariadas (Díaz, 2007).

La calidad del agrupamiento se evaluó mediante el coeficiente de correlación cofenética, que cuantifica la concordancia entre las distancias originales y las representadas en el dendrograma; valores altos indican una representación precisa de la estructura de similitudes (Da Silva, 2022).

En este estudio, el UPGMA permitió reconocer patrones de similitud entre los años evaluados, considerando la variabilidad climática y su influencia sobre el crecimiento diamétrico de *A. excelsum*, y generó agrupamientos temporales con respuestas comparables.

Resultados

Crecimiento diamétrico de *A. excelsum*

Se evaluaron 23 árboles de *A. excelsum* de diferentes dimensiones, como se muestra en la Tabla 1. En la primera medición, el rango de los diámetros se distribuyó entre 11,33 y 112,3 cm. Al finalizar el estudio, se establecieron siete rangos de crecimiento diamétrico, cada uno con una amplitud de 15 cm, distribuidos de la siguiente manera: de 10 a 24,99 cm, de 25 a 39,99 cm, de 40 a 54,99 cm, de 55 a 69,99 cm, de 70 a 84,99 cm, de 85 a 99,99 cm y de 100 a 114,99 cm. La distribución de individuos por clase reflejó la estructura poblacional observada en las parcelas, con mayor representación en diámetros intermedios y menor en los extremos, siendo un patrón característico de los bosques naturales.

Debido a la mortalidad natural de algunos individuos, propia de la dinámica ecológica de este ecosistema, la serie de datos presenta registros incompletos en ciertos años, reflejando las pérdidas de individuos durante el monitoreo.

Tabla 1. Incremento anual del diámetro (cm) de *A. excelsum*.

No.	DAP inicial 2008	Año de medición										
		2008 -2009	2009 -2010	2010 -2011	2011 -2012	2012 -2013	2013 -2014	2014 -2015	2015 -2016	2016 -2017	2017 -2018	2018 -2019
1	11,33	1,82	0,65	0,93	0,93	0,60	1,04	1,10				
2	12,89	0,71	0,30	0,57	0,57	0,15	0,56	0,45				
3	15,70	0,10	0,10	0,00	0,00	0,03						
4	16,70	0,10	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
5	23,58	2,92	2,10	2,60	2,60	0,30	1,18	0,43				
6	28,20	0,70	0,10	0,53	0,53	0,09	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03
7	35,20	1,80	1,10	1,80	1,80	1,48	0,74	0,60	0,88	1,02	1,05	1,05
8	40,80	2,60	1,95	2,10	2,10	0,88	0,58	0,19	0,18	0,21	0,21	0,21
9	47,40	1,40	1,40	1,20	1,20	1,20	0,88	0,57	0,47	0,55	0,56	0,56
10	47,90	0,95	0,75	0,67	0,67	0,23	0,30	0,14	0,14	0,17	0,17	0,17
11	48,40	2,30	2,40	2,27	2,27	2,00	1,24	0,72	0,78	0,91	0,93	0,93
12	52,10	1,20	0,40	0,67	0,67	0,58	0,02	0,09	0,16	0,18	0,19	0,19
13	55,79	0,61	0,10	0,27	0,27	0,00	0,24	0,01	0,19	0,22	0,23	0,23
14	55,80	2,30	1,90	2,47	2,47	1,60	0,96	0,87	0,67	0,78	0,80	0,80
15	59,20	4,20	1,70	3,13	3,13	1,96	1,79	1,41	1,92	2,23	2,30	2,30
16	64,80	1,85	1,85	1,10	1,10	0,75	1,84	0,50				
17	68,70	0,75	2,15	0,93	0,93	0,40	0,80	2,00				
18	71,30	2,00	1,40	1,93	1,93	2,22	0,14	1,20	0,54	0,62	0,64	0,64
19	74,80	3,10	2,60	2,63	2,63	1,97	1,02	0,50	0,69	0,81	0,83	0,83
20	76,50	1,90	0,70	1,33	1,33	0,80	0,08	0,13	0,15	0,17	0,18	0,18
21	90,00	2,00	2,80	1,47	1,47	0,23	1,17	2,11				
22	97,78	1,32	0,80	0,80	0,80	0,52	0,62	1,29	0,65	0,76	0,78	0,78
23	112,30	0,10	0,00	0,00	0,00	0,10	0,48					

Nota. Incremento anual del diámetro (cm) de *A. excelsum* (Bertero y Balb. ex Kunth) Skeels durante el período 2008-2019 en parcelas permanentes del norte del departamento del Tolima.

Fuente: elaboración propia.

Anomalías climáticas de precipitación y temperatura

Los datos de precipitación y temperatura fueron procesados para obtener los valores medios anuales e interanuales, así como para calcular el IA, cuyos resultados se presentan en la Tabla 2. Este índice, definido en la Ecuación 3, representa la variabilidad climática a lo largo del período de medición, a partir de las anomalías climáticas de precipitación y temperatura, calculadas según las Ecuaciones 1 y 2.

Tabla 2. Anomalías climáticas anuales en parcelas permanentes de bosque seco tropical en el norte del departamento del Tolima.

Precipitación media promedio interanual			1281 mm = $P\bar{x}_i$		
Temperatura media promedio interanual			20,66 °C = $T\bar{x}_i$		
Año de medición	Precipitación en mm		Temperatura en °C		
	Promedio anual $P\bar{x}_a$	$IP = \frac{P\bar{x}_a}{P\bar{x}_i}$	Promedio anual $T\bar{x}_a$	$IATM = \frac{T\bar{x}_a}{T\bar{x}_i}$	$IA = \frac{IP}{IATM}$
2008 - 2009	973,56	0,76	21,22	1,03	0,74
2009 - 2010	1485,96	1,16	20,92	1,01	1,15
2010 - 2011	1678,11	1,31	19,78	0,96	1,37
2011 - 2012	1383,48	1,08	20,04	0,97	1,11
2012 - 2013	1524,39	1,19	20,42	0,99	1,20
2013 - 2014	1332,24	1,04	20,45	0,99	1,05
2014 - 2015	1024,8	0,80	21,24	1,03	0,78
2015 - 2016	1306,62	1,02	21,37	1,03	0,99
2016 - 2017	1652,49	1,29	20,31	0,98	1,31
2017 - 2018	1524,39	1,19	20,12	0,97	1,22
2018 - 2019	1562,82	1,22	20,67	1,00	1,22

Fuente: elaboración propia.

El IA en el norte del Tolima durante el período 2008-2019 presentó una variabilidad oscilante, determinada principalmente por fluctuaciones en la precipitación, mientras que la temperatura mostró una menor sensibilidad a estos cambios (Figura 2). La anomalía de precipitación evidenció una alta respuesta a los eventos ENSO, con incrementos de hasta un 20 % durante los períodos de La Niña y disminuciones cercanas al 30 % en los eventos de El Niño. En contraste, la anomalía de temperatura presentó variaciones más moderadas, con aumentos de hasta 0,5 °C y descensos de aproximadamente 1 °C, lo que caracteriza al área de estudio como una región de clima cálido permanente con tendencia a la aridez. El comportamiento divergente de las anomalías de temperatura y precipitación confirma la influencia del ENSO en la región.

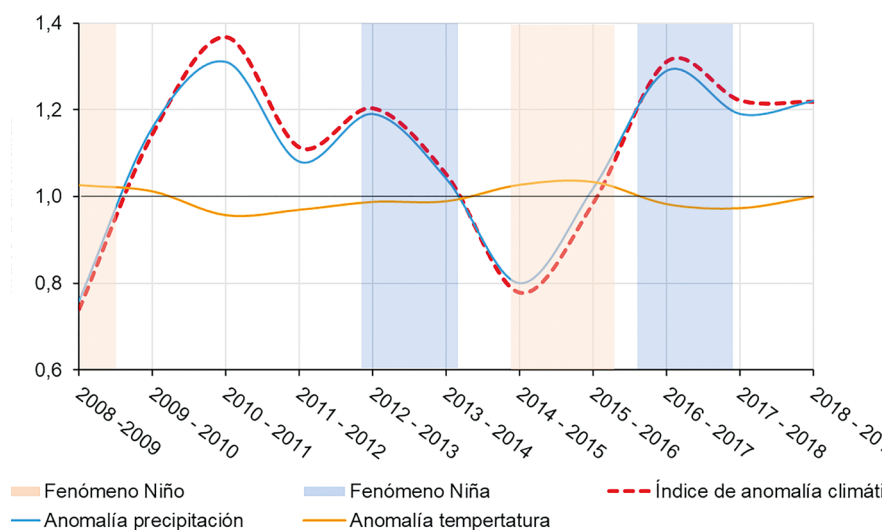


Figura 2. Índice de anomalías climáticas basado en la relación entre el valor medio anual y el promedio interanual de las anomalías de precipitación y temperatura en el norte del departamento del Tolima (2008-2019).

Fuente: elaboración propia.

Desde el inicio del estudio, el IA mostró un incremento progresivo, alcanzando un valor máximo de aproximadamente 1,4 en el período 2010-2011. Posteriormente, el índice descendió por debajo del umbral de referencia (1,0) en 2014-2015, reflejando anomalías negativas similares a las observadas en 2008-2009, ambas asociadas a eventos de El Niño, los cuales generaron una reducción significativa en la precipitación.

A partir de 2016-2017, el IA registró un nuevo incremento significativo, coincidiendo con el segundo fenómeno de La Niña dentro del intervalo de medición, alcanzando valores comparables a los de 2010-2011. En contraste, el primer fenómeno de La Niña

(2012-2013) no mostró un aumento tan pronunciado en el índice. Desde 2016-2017, el IA se ha mantenido relativamente estable en torno a 1,2, lo que sugiere la persistencia de variaciones en los patrones climáticos sin cambios abruptos.

Incremento corriente anual (ICA)

La relación de los IICAs interanuales, calculados mediante la ecuación 4, se presenta en la Figura 3, donde se evidencia una marcada heterogeneidad en el crecimiento según la clase diamétrica. En términos generales, el crecimiento promedio de la especie fue de 0,84 cm por año, con tasas de incremento más altas en los diámetros medios y superiores, y menores en los diámetros pequeños y maduros. Este patrón, característico de modelos logísticos o normales de crecimiento, se observa de forma consistente a lo largo del período de seguimiento y en todas las clases diamétricas definidas pese a la variación natural en su representación.

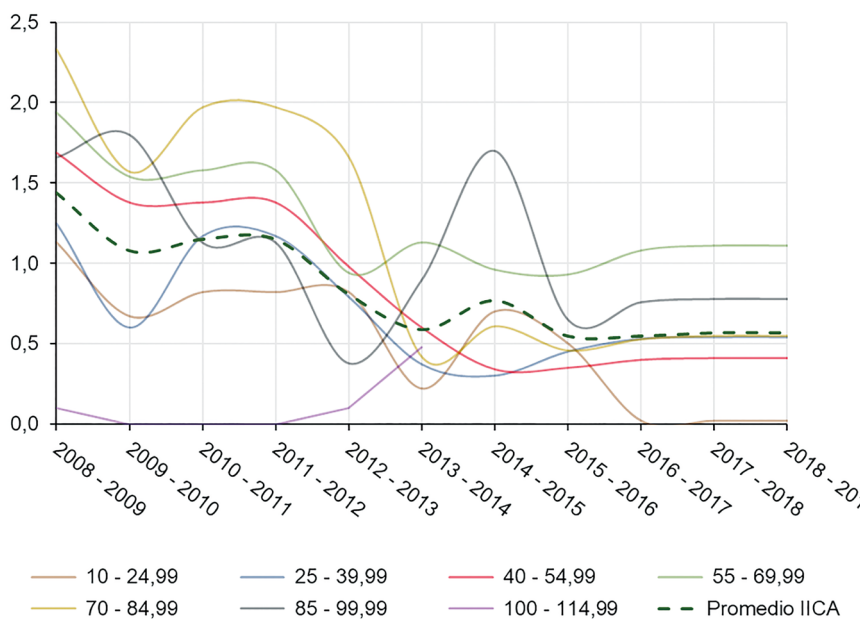


Figura 3. Incremento corriente anual estandarizado con el promedio interanual, para siete clases diamétricas de *A. excelsum*.

Nota. Incremento corriente anual estandarizado con el promedio interanual, para siete clases diamétricas de *A. excelsum* (Bertero y Balb. ex Kunth) Skeels durante el período 2008-2019 en parcelas permanentes del norte del departamento del Tolima.

Asociación índice de anomalías (IA) e índice de incremento de crecimiento anual (IICA)

La Figura 4 muestra que el IICA de *A. excelsum* está influenciado por las variaciones climáticas asociadas al ENSO, con disminuciones durante eventos de El Niño — caracterizados por menor disponibilidad hídrica— y aumentos en períodos de La Niña o con mayor humedad. La correlación entre el IA y el IICA confirma que la disponibilidad de agua es el principal factor regulador, donde los eventos de sequía limitan el desarrollo y los períodos húmedos favorecen el crecimiento. No obstante, se registraron individuos con incrementos sostenidos durante todo el período de evaluación, reflejando variabilidad en la respuesta de crecimiento atribuible a condiciones locales y características individuales dentro de la población.

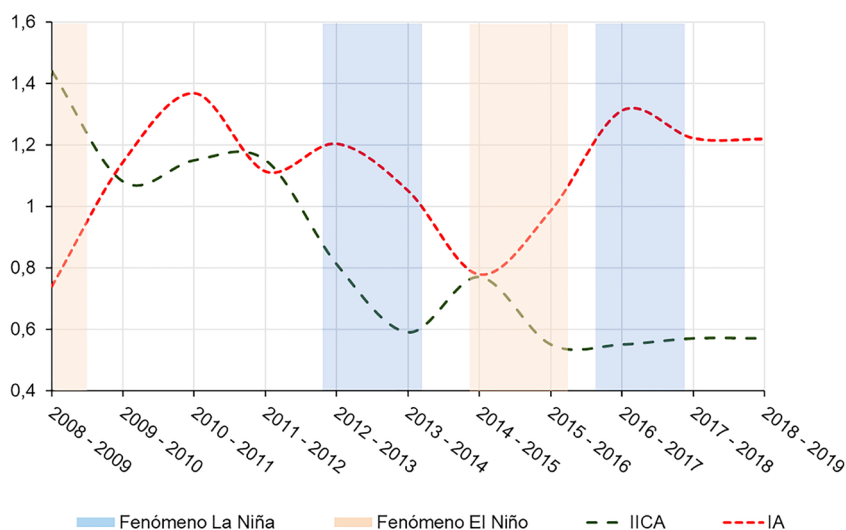


Figura 4 . Relación entre el índice de incremento de crecimiento anual (IICA) y el índice de anomalías (IA) en *A. excelsum* durante el período 2009-2019, con la influencia de los fenómenos ENSO (El Niño y La Niña). Norte del departamento Tolima.

Nota. El eje X representa los períodos interanuales de evaluación y el eje Y muestra los valores adimensionales de ambos índices. Fuente: elaboración propia.

La Figura 5 muestra la organización jerárquica de los años de medición según la similitud entre el IICA y el IA. Los numerales en las abscisas corresponden a cada año del monitoreo mientras que en las ordenadas indica la distancia euclidiana, inversamente proporcional a la similitud: valores bajos reflejan comportamientos de crecimiento más parecidos y valores altos, respuestas más divergentes. El valor de la correlación cofenética de 0,8675 indica una alta correspondencia entre la matriz de distancias original y la estructura jerárquica del dendrograma, reflejando una adecuada discriminación de similitud entre los períodos evaluados.

Se identificaron agrupaciones de años con patrones semejantes frente al régimen climático, como el par 10–11, el conjunto 6–10–11 y el par 3–5, mientras que un año permaneció sin asociación estrecha con otros, evidenciando un comportamiento atípico. Estos resultados confirman que las similitudes detectadas no dependen del orden cronológico, sino de condiciones ambientales específicas que generaron patrones de crecimiento recurrentes en distintos momentos.

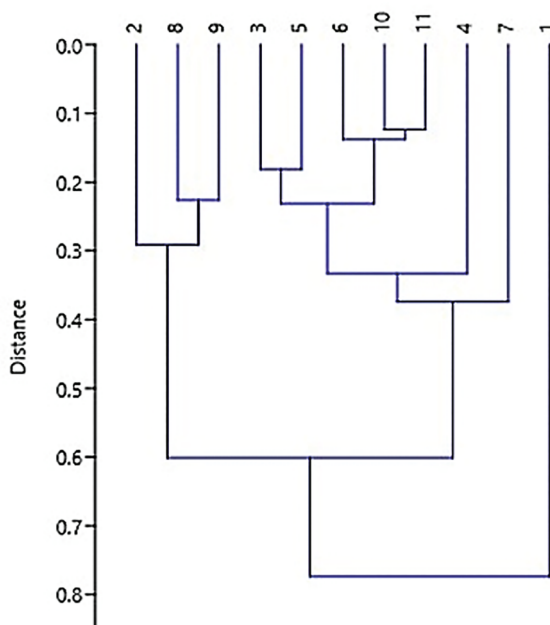


Figura 5. Dendrograma de la variabilidad climática y los incrementos diamétricos anuales de *A. excelsum* durante once años de medición. Método UPGMA basado en distancia euclidiana en el norte del departamento del Tolima.

Nota. Los numerales de las abscisas, del 1 al 11, corresponden a los años de medición: 1 = 2008–2009, 2 = 2009–2010, 3 = 2010–2011, 4 = 2011–2012, 5 = 2012–2013, 6 = 2013–2014, 7 = 2014–2015, 8 = 2015–2016, 9 = 2016–2017, 10 = 2017–2018 y 11 = 2018–2019. Fuente: elaboración propia.

Discusión

A. excelsum es una especie característica de los bosques riparios en ecosistemas tropicales secos y húmedos (Granados-Thorin, 2020; Quiroga et al., 2019). Su presencia y dimensiones han posicionado a esta especie como un recurso de alto valor comercial y de rápido crecimiento (CORTOLIMA y UT, 2007). En este estudio, se registraron diámetros de hasta 112,78 cm y crecimientos anuales de 0,84 cm, sin descartar la existencia de individuos de mayores dimensiones fuera de las parcelas evaluadas. En otros bosques naturales del Tolima se ha estimado un ICA promedio de 1,40 cm·a⁻¹ y, mediante modelos no lineales, se proyecta que un individuo con 10 cm de DAP podría tardar entre 140 y 180 años en alcanzar diámetros cercanos a 113 cm, con tasas inferiores a 0,07 cm·a⁻¹ en etapas avanzadas (Lozano-Botache et al., 2012). Estos valores, junto con registros en bs-T del Caribe colombiano donde se han documentado diámetros superiores a 100 cm y crecimientos radiales sostenidos por más de un siglo con tasas cercanas a 1 cm·a⁻¹ (Briceño y Rangel, 2021), así como en parches secos estacionales de Panamá con individuos de hasta 126,2 cm de DAP (Aguilar et al., 2004), confirman el potencial de *A. excelsum* para alcanzar grandes dimensiones.

Aunque la edad necesaria para alcanzar tales dimensiones continúa siendo incierta, dado que el crecimiento es un proceso dinámico influido por múltiples factores y definido por el balance entre anabolismo y catabolismo (Del Valle, 1997; von Bertalanffy, 1960), existen estudios que respaldan estos resultados respecto a su relación con la disponibilidad hídrica. En el Caribe colombiano, *A. excelsum* ha mostrado un aumento del crecimiento radial durante los meses más lluviosos, con variaciones asociadas a condiciones climáticas locales, aunque sin una relación significativa con indicadores climáticos globales como el Índice de Oscilación Sur - SOI (Briceño y Rangel, 2021). De manera consistente, en un experimento de bosque tropical plantado en Panamá, Hutchison et al. (2018) reportaron que *A. excelsum* incrementó su tasa de crecimiento en años excepcionalmente húmedos (por ejemplo, La Niña 2010) y la redujo marcadamente durante sequías prolongadas, como la asociada al intenso evento de El Niño 2015. En este contexto, la especie presenta un patrón general de incremento diamétrico a lo largo del tiempo, aunque en algunos individuos se registran períodos sin crecimiento medible, generalmente asociados a déficit hídrico severo o a la priorización de recursos hacia procesos reproductivos o de almacenamiento.

Los resultados también son consistentes con estudios previos sobre la vulnerabilidad de las especies ante el cambio climático, como lo mencionado por Arribas et al. (2012), quienes evaluaron los efectos en la abundancia, distribución y regeneración natural de especies en ecosistemas europeos. Investigaciones en bosques nublados andinos de Venezuela también han relacionado el crecimiento radial con la

fenología y la temperatura ambiental (Guerrero et al., 2016; Ortiz et al., 2006). No obstante, debido a la baja estacionalidad térmica en el contexto intertropical colombiano, los resultados no son directamente comparables con estudios en zonas boreales, como los de Babst et al. (2019), donde los contrastes climáticos anuales son más marcados.

El crecimiento diamétrico de *A. excelsum* está determinado por un conjunto de variables ambientales y ecológicas, entre ellas la profundidad y propiedades del suelo, la pendiente, la disponibilidad hídrica, la temperatura, la radiación solar y las interacciones intra e interespecíficas (Ramírez-González, 2005). En este contexto, la medición de individuos que comparten condiciones ambientales homogéneas permite reducir la variabilidad asociada a factores locales, y a su vez, identificar patrones de crecimiento susceptibles de ser relacionados con la variabilidad climática mediante el uso de modelos matemáticos (Melo-Cruz y Vargas-Ríos, 2003).

Aún el número limitado de individuos muestreados, este estudio se distingue por haber logrado un monitoreo continuo durante once años, algo poco común en investigaciones forestales en Colombia, fuera de redes institucionales de parcelas permanentes. Este período fue suficiente para observar que varios individuos superaron umbrales de 15 cm en DAP, avanzando de una categoría diamétrica a la siguiente, lo que demuestra un crecimiento sostenido y medible en condiciones naturales.

El patrón de crecimiento observado es coherente con el modelo logístico propuesto por Verhulst, que describe una fase inicial lenta, seguida por una etapa de crecimiento acelerado, y posteriormente una estabilización (Martínez-Rodríguez, 2008). Esta dinámica sugiere que la muestra abarcó individuos en diferentes etapas ontogenéticas. Sin embargo, los incrementos registrados dentro de una misma clase diamétrica no fueron constantes, lo que podría atribuirse a variaciones ambientales locales o a diferencias genéticas derivadas de la regeneración natural (Melo-Cruz y Vargas-Ríos, 2003; Ramírez-González, 2005). Tales variaciones no pueden explicarse únicamente por el error estadístico, ya que este es independiente de los valores observados (Martínez-Rodríguez, 2008).

En conjunto, estos hallazgos refuerzan la importancia de continuar investigando la respuesta de las especies forestales tropicales ante la variabilidad climática y el cambio global. El presente estudio aporta una perspectiva novedosa sobre el comportamiento de *A. excelsum* frente a estas condiciones, y subraya el valor de los monitoreos de largo plazo en ecosistemas poco representados en la literatura científica.

Conclusiones

El crecimiento diamétrico de *A. excelsum* en el bosque seco tropical del norte de Tolima fue heterogéneo entre individuos y clases, con máximos en diámetros intermedios y superiores y episodios de estancamiento en algunos árboles durante períodos secos.

La disponibilidad hídrica fue el principal determinante del incremento corriente anual con años húmedos que favorecieron el crecimiento, mientras que la temperatura tuvo un efecto secundario, con anomalías inferiores a 2 °C durante los 11 años de estudio, sin valores críticos para la región ni para influir de forma significativa en la especie.

El índice de anomalías climáticas, desarrollado a partir de la estructura proporcional del índice de aridez de Lang, integró eficazmente las variaciones relativas de precipitación y temperatura, permitiendo identificar patrones recurrentes de respuesta diamétrica al régimen hidroclimático, incluida la influencia de eventos ENSO.

Estos resultados refuerzan la necesidad de incorporar la variabilidad de precipitación, incluida la asociada a ENSO, en el manejo y restauración del bosque seco tropical, ajustando la planificación silvícola a ventanas climáticas favorables en la región.

Agradecimientos

A la Universidad del Tolima, a la Facultad de Ciencias y al programa de Doctorado en Ciencias Biológicas. A Jeimmy Lorena Bonilla Vargas, Ingeniera Forestal, por su invaluable apoyo en campo.

Referencias

- Aguilar, S., Hernández, A., Perez, R., Lao, S., Angehr, G., Hubbell, S., y Foster, R. (2004). Tropical forest dynamics across a rainfall gradient and the impact of an El Niño dry season. *Journal of Tropical Ecology*, 20, 51-72. <https://doi.org/10.1017/S0266467403001081>
- Andrade, H., Segura, M., y Forero, L. (2014). *Desarrollo de modelos alométricos para volumen de madera, biomasa y carbono en especies leñosas perennes: Conceptos básicos, métodos y procedimientos*. Sello Editorial Universidad del Tolima.
- Ariza, A., Isaacs, P., y González-M., R. (2014). Memoria técnica para la validación del mapa de coberturas de bosque seco tropical en Colombia. Escala 1:100.000. Versión 2.0. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos "Alexander von Humboldt" – Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., 62.
- Aribas, P., Abellán, P., Velasco, J., Bilton, D. T., Lobo, J. M., Millán, A., y Sánchez-Fernández, D. (2012). La vulnerabilidad de las especies frente al cambio climático, un reto urgente para la conservación de la biodiversidad: *Ecosistemas*, 21(3). <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.10>
- Babst, F., Bouriaud, O., Poulter, B., Trouet, V., Girardin, M. P., y Frank, D. C. (2019). Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Science Advances*, 5(1), eaat4313. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4313>
- Barrios, A., López, A. M., y Nieto, V. M. (2008). Influencia del diámetro medio del rodal y las distancias medias de extracción en los costos de un sistema de cosecha en bosques de *Eucalyptus Globulus* en la zona central de Chile. *Colombia Forestal*, 11(1), 83-92. <https://www.redalyc.org/pdf/4239/423939611006.pdf>
- Bocanegra-González, K. T., y Guillemín, M.-L. (2018). Guidelines for the restoration of the tropical timber tree *Anacardium excelsum*: First input from genetic data. *Tree Genetics and Genomes*, 14(59). <https://doi.org/10.1007/s11295-018-1271-z>
- Borunda, A. (2023). ¿Qué es el fenómeno de El Niño y La Niña? *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.es/medio>

- ambiente/que-es-el-fenomeno-de-el-nino-y-la-nina
- Briceno, A. M., y Rangel-Ch, J. O. (2021). Series de clima en anillos de *Aspidosperma polyneuron* Müll.Arg. y *Anacardium excelsum* (Bertero ex Kunth) Skeels. *Colombia Forestal*, 24(2), 52-64. <https://doi.org/10.14483/2256201X.16285>
- Castañeda, H., y Madrigal, M. A. S. (2008). ¿Cómo estimar rápidamente el carbono almacenado en la biomasa aérea de los sistemas agroforestales indígenas de Talamanca, Costa Rica. <https://www.semanticscholar.org/paper/%C2%BFC%C3%B3mo-estimar-%C3%A1pidamente-el-carbono-almacenado-en-Casta%C3%B1eda-Madrigal/9c88f5d1b7b355b78e6f542b4d6af41756deca49>
- CEDEX - Centro de Estudios Hidrográficos. (2021). *Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas (CHAC)* (Versión 5.07) [Windows]. CEDEX. <https://ceh.cedex.es/chac/>
- Chauchard, L., y Sbrancia, R. (2003). Modelos de crecimiento diamétrico para *Nothofagus obliqua*. *Bosque*, 24(3), 3-16. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002003000300001>
- Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA) y Universidad del Tolima (UT). (2007). *Plan General de Ordenación Forestal del Tolima*. <https://datosabierto.cortolima.gov.co/datasets/fld68ea1ffb2428bb9c26720cc3c2c79/about>
- Cruz-Roa, A. F., Barrios, M. I., Cruz-Roa, A. F., y Barrios, M. I. (2018). Estimación de datos faltantes de lluvia mensual a través de la asimilación de información satelital y pluviométrica en una cuenca andina tropical. *Idesia (Arica)*, 36(3), 107-117. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005001601>
- Da Silva, A. R. (2022). The basics of cluster analysis. RPub. <https://rpubs.com/arsilva87/cluster>
- Del Valle, A. J. I. (1997). Crecimiento de cuatro especies de los humedales forestales del litoral pacífico colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 21, 445-466. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.21\(81\).1997.2996](https://doi.org/10.18257/raccefyn.21(81).1997.2996)
- Díaz, L. G. (2007). Estadística multivariada: inferencia y métodos. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79907>
- Gómez, M., Moreno, L., Rueda-Uribe, C., y Andrade, G. (2016). *Biodiversidad 2015. Reporte de Estado y Tendencias de la Biodiversidad Continental de Colombia*.
- González-M, R., Posada, J. M., Carmona, C. P., Garzón, F., Salinas, V., Idárraga-Piedrahita, Á., Pizano, C., Avella, A., López-Camacho, R., Norden, N., Nieto, J., Medina, S. P., Rodríguez-M, G. M., Franke-Ante, R., Torres, A. M., Jurado, R., Cuadros, H., Castaño-Naranjo, A., García, H., y Salgado-Negret, B. (2021). Diverging functional strategies but high sensitivity to an extreme drought in tropical dry forests. *Ecology Letters*, 24(3), 451-463. <https://doi.org/10.1111/ele.13659>
- Granados-Thorin, N. (2020). *Plantas útiles del bosque seco tropical de la Hacienda Gascoña, Tolima* [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. <http://hdl.handle.net/1992/51235>
- Guerrero, J., Hernández, L., y Schöngart, J. (2016). Monthly diameter increment of tree species and related with environmental variables and phenology in a cloud forest, southeastern Venezuela. *Acta Botanica Venezuelica*, 39, 1-36.
- Hutchison, C., Gravel, D., Guichard, F., y Potvin, C. (2018). Effect of diversity on growth, mortality, and loss of resilience to extreme climate events in a tropical planted forest experiment. *Scientific Reports*, 8(1), 15443. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33670-x>
- IDEAM. (2014). *Clasificación climática de Lang* [Map]. <https://visualizador.ideam.gov.co/CatalogoObjetos/maps-gallery/search-by-group/22258780>
- IDEAM. (2019). *M-GCI-M-G002 guía metodológica de la operación estadística variables meteorológicas*. <https://ideam.gov.co/nuestra-entidad/mapa-de-procesos/procesos-misionales/generacion-de-datos-e-informacion-hidrometeorologica-y-ambiental-para-la-57>
- IDEAM. (2024). *Geportal DHIME*. Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Imaña Encinas, J., y Encinas, O. (2008). *Epidometría Forestal*. <https://doi.org/10.26512/9788587599315>
- López, L., Villalba, R., y 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)*, 33(2), 211-219. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002012000200011>
- Lozano-Botache, L. A., Franco-O., N., y 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. http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30682012000100002
- Lozano-Botache, L. A., y Melo-Cruz, O. A. (2023). Crecimiento diamétrico de *Guarea guidonia* (L.) estimado con modelos no lineales. *Bosque seco tropical en el norte de Tolima. Colombia. Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 1(35), 10-19. <https://doi.org/10.47499/revistaacbb.v1i35.282>
- Lozano-Botache, L., Yaya, M., y Gutierrez, A. (2011). *Evaluación ecológica y estructural de los bosques del departamento del Tolima*.
- Martínez-Rodríguez, E. (2008). Logit Model como modelo de elección discreta: Origen y evolución. *Anuario jurídico y económico escorialense*, (41), 469-484. <https://produccioncientifica.ucm.es/documentos/5d3999e72999520684457dc7>
- Melo-Cruz, O. A. (2015). *Modelación del crecimiento, acumulación de biomasa y captura de carbono en árboles de Gmelina arborea Roxb., asociados a sistemas agroforestales y plantaciones homogéneas en Colombia* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54860>
- Melo-Cruz, O. A., y Vargas-Ríos, R. (2003). *Evaluación ecológica silvicultural sistemas boscosos*. Universidad del Tolima.
- Montealegre, J. E., y Pabón Caicedo, J. D. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorol. Colomb.*, 2, 7-21.
- Mora, E. M., Ramírez Angulo, H., y Torres Lezama, A. (2009). *Análisis de las tasas de crecimiento diametral por grupos funcionales de especies arbóreas en un bosque tropical semi-decídúo de Venezuela*. Universidad de los Andes.
- Morales-Duarte, B. A., y Fonseca-Peña, L. M. (2018). *Evaluación de la composición florística, la estructura y la diversidad de tres bosques secos tropicales en el alto Magdalena, departamento del Tolima* [Trabajo de grado, Universidad del Tolima]. Repositorio Universidad del Tolima. <https://repository.ut.edu.co/entities/publication/6f3f0249-87ea-4fc2-953e-1086cba3d9fd>
- Naranjo Bedoya, K., Aristizabal Giraldo, E. V., y Morales Rodelo, J. A. (2019). Influencia del ENSO en la variabilidad espacial y temporal de la ocurrencia de movimientos en masa detonados por lluvias en la región Andina. *Ingeniería y Ciencia*, 15(29), 11-42.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2024). *Prediction Of Worldwide Energy Resources*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Ortiz, J., Hernández, L., y Worbes, M. (2006). Crecimiento radial de Tachigali y terminalia en bosques de tierra baja al sureste de Venezuela. *Acta Botánica Venezuelica*, 29(2), 211-234.

- Peñuela-Mora, M. C. (2014). *Understanding Colombian Amazonian white sand forests* [Trabajo de grado, Universidad de Utrecht]. <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/302410>
- Poveda, G., y Mesa, O. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica en México*, 11(1), 21-37.
- Quiroga, J. A., Roa, H. Y., Melo-Cruz, O., y Fernández., F. (2019). Estructura de fragmentos de bosque seco tropical en el sur del departamento del Tolima, Colombia. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural*, 23(1). <https://doi.org/10.17151/bccm.2019.23.1.2>
- Ramírez-González, A. (2005). *Ecología aplicada: diseño y análisis estadístico*. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Sanchez-Azofeifa, A., Stan, K., y Mashhadi, N. (2024). Tropical Dry Climates. En M. D. Schwartz (Ed.), *Phenology: An Integrative Environmental Science* (pp. 155-170). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75027-4_8
- Sifontes, V., y Pacheco Moya, R. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33, 71-80.
- US Army Corps of Engineers. (2022). *The Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)* (Versión 4.12) [Windows setup package]. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- Von Bertalanffy, L. (1960). Principles and theory of growth. En W.W. Nowinsky (Ed.), *Fundamental aspects of normal and malignant growth* (pp. 137-259). Elsevier.
- Wolter, K., y Timlin, M. S. (2011). El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *International Journal of Climatology*, 31(7), 1074-1087. <https://doi.org/10.1002/joc.2336>