CIENCIA E INTERCULTURALIDAD
Año 18, Vol. 35, No. 2, Julio-Diciembre, 2025
COPYRIGHT © (URACCAN). TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS • ISSN 1997-9231 (Print) • ISSN 2223-6260 (Online).
https://doi.org/10.5377/rci.v35i2.23783

Análisis troncal del crecimiento e incremento de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en Prinzapolka, Nicaragua

Stem analysis of the growth and increment of Pinus caribaea var. hondurensis in Prinzapolka, Nicaragua

Efrain de Jesús Peralta Tercero[1]

RESUMEN

El *Pinus caribaea* var. hondurensis es una conífera tropical de rápido crecimiento con amplio uso en plantaciones comerciales y restauración en la región del Caribe centroamericano, por lo que conocer su patrón de desarrollo es esencial para diseñar manejos silvícolas eficientes. El presente estudio evaluó el crecimiento en altura, diámetro y la relación diámetro-altura de P. *caribaea* en Llano Sucio, municipio de Prinzapolka, Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, mediante el método de análisis troncal. Se seleccionaron cinco individuos tipo y se extrajeron rodajas transversales a diferentes alturas del fuste para reconstruir curvas de crecimiento y estimar edad, Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA). Los resultados muestran un crecimiento acelerado en las primeras edades, especialmente en altura (11.3 m a 10 años; 18.3 m a 20 años), seguido de una desaceleración progresiva en la elongación apical, mientras que el diámetro sin corteza aumentó sostenidamente (9.8 cm a 10 años; 25.4 cm a 42 años) aunque con reducción en la tasa de crecimiento en edades avanzadas. La relación diámetro-altura reflejó una transición de predominio de crecimiento vertical en la fase juvenil a mayor inversión en engrosamiento del fuste a partir de los 20 años (dh ≈ 0.87 a 10 años; 1.08 a 30 años). Estos patrones confirman la utilidad del análisis troncal para reconstruir la historia de crecimiento y aportar información técnica útil para la planificación silvicultural y decisiones de aprovechamiento en plantaciones y masas naturales de la Costa Caribe nicaragüense.

Palabras clave: Pinus caribaea, análisis troncal, crecimiento forestal, incremento diamétrico, Prinzapolka

1 Máster en Docencia Universitaria. Ingeniero Forestal, Especialización en gestión del riesgo y cambio climático, Profesor Titular Área del Conocimiento Agricultura, Universidad de las Regiones Autónomas de la Costa Caribe Nicaragüense (URACCAN) CUR Las Minas. Correo electrónico: efrain.peralta@uraccan.edu.ni, Código ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5622-3241

Master in University Teaching, Agroforestry Engineer. University of the Autonomous Regions of the Nicaraguan Caribbean Coast.

Recibido: 10/10/2025 - Aprobado: 17/12/2025
Peralta Tercero, E. de J. (2026). Análisis troncal del crecimiento e incremento de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en Prinzapolka, Nicaragua. *Ciencia e Interculturalidad, 35*(2), 94-112. https://doi.org/10.5377/rci.v35i2.23783
Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-NoDerivadas

ABSTRACT

The *Pinus caribaea* var. *hondurensis* is a fast-growing tropical conifer widely used in commercial plantations and restoration efforts in Central America's Caribbean region, making knowledge of its growth pattern essential for efficient silvicultural management. This study evaluated height growth, diameter growth, and the diameter-height relationship of P. *caribaea* in Llano Sucio, Prinzapolka municipality, in Nicaragua's North Caribbean Coast Autonomous Region, using the stem-analysis method. Five sample trees were selected, and cross-sectional discs were extracted at different stem heights to reconstruct growth curves and estimate age, Current Annual Increment (CAI), and Mean Annual Increment (MAI). The results showed rapid growth during the early stages, especially in height (11.3 m at 10 years; 18.3 m at 20 years), followed by a progressive slowdown in apical elongation, while bark-free diameter increased steadily (9.8 cm at 10 years; 25.4 cm at 42 years), although its growth rate declined at older ages. The diameter-height relationship reflected a transition from vertical growth dominance in the juvenile phase to greater investment in stem thickening after 20 years (dh ≈ 0.87 at 10 years; 1.08 at 30 years). These patterns confirm the usefulness of stem analysis for reconstructing growth history and providing technical information for silvicultural planning and harvesting decisions in plantations and natural stands on Nicaragua's Caribbean Coast.

Keywords: *Pinus caribaea,* stem analysis, forest growth, diameter increment, Prinzapolka

I. INTRODUCCIÓN

Pinus caribaea var. *hondurensis* es una especie forestal tropical de alto valor económico y ecológico en América Central por su rápido crecimiento, su adaptación a distintas condiciones de sitio y su potencial para la producción de madera. En Nicaragua, esta especie ha sido estudiada por su presencia en plantaciones y bosques de la Costa Caribe, donde representa una opción importante para el manejo forestal y el aprovechamiento sostenible de recursos maderables.

El estudio del crecimiento e incremento en árboles forestales es una base esencial para entender la dinámica de desarrollo de las plantaciones y para definir estrategias de manejo más eficientes. En ese contexto, Magaña Torres e Islas Gutiérrez (1989) señalan que los análisis troncales permiten calcular el crecimiento e incremento de diámetros, altura, área basal y volumen de árboles individuales, lo que convierte a esta técnica en una herramienta sólida para reconstruir la historia del crecimiento de una especie. De forma complementaria, Castillo-López *et al*. (2018) muestran que los datos de análisis troncal son útiles para construir modelos dinámicos de índice de sitio y para describir con precisión la evolución de la altura dominante en especies de pino.

En especies del género *Pinus*, el crecimiento en altura y diámetro no sigue un patrón lineal, sino que depende de la edad, la competencia entre árboles, el espaciamiento y las condiciones del sitio. Wadsworth (2008) encontró que en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* el crecimiento en altura y diámetro está fuertemente relacionado con la densidad de los árboles y con las características del suelo, lo que confirma que la forma del árbol responde a su ambiente de desarrollo. A su vez, Rojas-Sandoval y Acevedo-Rodríguez (2013) destacan que la especie puede alcanzar grandes dimensiones bajo condiciones favorables, formando árboles rectos y productivos, rasgo que refuerza su importancia en plantaciones tropicales.

En la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte de Nicaragua, y específicamente en el municipio de Prinzapolka, no existen antecedentes de estudios relacionados con el crecimiento e incremento de *Pinus caribaea*, lo que hace necesario conocer el comportamiento de esta especie en su ambiente natural o plantado. No obstante, con estos resultados todavía hace falta información específica que describa cómo se expresan su crecimiento en altura, diámetro y relación diámetro-altura en diferentes sitios para elaboración de planes de manejo forestal y así contar con una base técnica más precisa para el manejo forestal.

Por ello, el presente estudio tuvo como propósito evaluar el crecimiento e incremento de *Pinus caribaea* mediante análisis troncal, con el fin de determinar su comportamiento en altura, diámetro y relación diámetro-altura, y aportar información útil para la toma de decisiones silviculturales en la Costa Caribe nicaragüense. Esta información es relevante no solo para documentar el desarrollo de la especie en el municipio de Prinzapolka, sino también para fortalecer la base científica del manejo forestal en plantaciones tropicales y manejo sostenible de los bosques de coníferas en Nicaragua.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Crecimiento e incremento mediante análisis troncal

Rojas Rodríguez y Ortiz Malavasi (1991) señalan que *Pinus caribaea* var. *hondurensis* es una especie de gran importancia en América Central por su rápido crecimiento, su adaptación a distintas condiciones de sitio y su valor para usos múltiples. En el mismo sentido, Rojas-Sandoval y Acevedo-Rodríguez (2013) la describen como una conífera tropical de relevancia silvícola, ampliamente utilizada en plantaciones por su capacidad de formar masas productivas y por su potencial maderable. Estas características justifican que su crecimiento e incremento se estudien mediante métodos que permitan reconstruir la historia del árbol.

Magaña Torres e Islas Gutiérrez (1989) explican que los análisis troncales se han usado desde los años treinta para determinar el crecimiento e incremento de los árboles, y que desde esos años se elaboró un sistema para la realización de análisis troncales (ANATRON) que fue diseñado para calcular diámetros, altura, área basal y volumen a partir de datos de tronco. Esta fuente fortalece el fundamento metodológico del estudio, porque muestra que el análisis troncal es una técnica consolidada en la investigación forestal.

Castillo-López *et al*. (2018) señalan que, para ajustar modelos dinámicos de índice de sitio en especies de pino, se utilizaron datos de análisis de tronco, lo que confirma la utilidad de esta técnica para reconstruir curvas de crecimiento. De forma complementaria, Castillo López *et al*. (2013) indican que los pares de datos altura dominante-edad obtenidos mediante análisis troncal son esenciales para modelar el desarrollo de especies forestales. Esto demuestra que el análisis troncal no solo sirve para describir un árbol individual, sino también para generar modelos de crecimiento útiles para el manejo.

Crecimiento e incremento en altura

Oteng-Amoako y Brink (s.f.). indican que *Pinus caribaea* var. *hondurensis* alcanza alturas significativas en edades relativamente tempranas cuando crece en condiciones favorables. A su vez, Wadsworth (2008) reporta que en *Pinus caribaea* var. hondurensis el crecimiento en altura está relacionado con el espaciamiento y la competencia entre árboles, de modo que el desarrollo vertical puede acelerarse o desacelerarse según la densidad del rodal.

Maguluko *et al*. (2025) observaron que el crecimiento en altura de *P. caribaea* tiende a aumentar rápidamente en edades tempranas y luego cambia de ritmo conforme avanza la edad del rodal. Similar a lo anterior, Wadsworth (2008) muestra que la altura no depende solo de la edad, sino también del espaciamiento y del sitio, por lo que el comportamiento vertical del árbol debe interpretarse dentro de su contexto ecológico y silvicultural. Estos antecedentes respaldan el análisis de la altura como variable clave para entender la fase juvenil y la desaceleración posterior del crecimiento.

Oteng-Amoako y Brink (s.f.) también resaltan que el desempeño en altura de la especie es muy favorable en sitios tropicales bien drenados, donde puede incrementar su talla con rapidez durante los primeros años. Por eso, el estudio de la altura no solo describe una dimensión del árbol, sino que permite inferir el momento en que la especie deja de priorizar la elongación vertical y comienza a concentrar crecimiento en el fuste.

La altura constituye una variable clave para interpretar la fase juvenil y la dinámica de desarrollo de Pinus caribaea, ya que expresa la capacidad de la especie para crecer verticalmente y competir por luz. En estudios de plantaciones, la altura total se ha medido directamente en árboles seleccionados y luego modelado mediante funciones de crecimiento para estimar su comportamiento a diferentes edades (Martínez Cantón et al., 2024). De forma complementaria, Espinoza Silva y Rodríguez Mendoza (2010) evaluaron el incremento y la productividad en plantaciones de Pinus caribaea var. hondurensis mediante parcelas permanentes de muestreo, mediciones de diámetro y altura, e índices de crecimiento, lo que confirma la utilidad de estas variables para describir el desarrollo de la especie. La literatura técnica señala que esta especie puede presentar incrementos en altura de entre 1.04 y 2.09 m por año en sitios favorables, e incluso alrededor de 2.5 m/año en árboles dominantes y codominantes, con incrementos medios anuales de 1.06 a 1.28 m, lo que evidencia su rápido crecimiento vertical bajo buenas condiciones de sitio (Espinoza Silva y Rodríguez Mendoza, 2010; Martínez, 2015).

Crecimiento e incremento en diámetro

Wadsworth (2008) muestra que el crecimiento en diámetro de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* varía según el espaciamiento y las características del suelo, lo que confirma que el incremento diamétrico responde no solo a la edad, sino también al ambiente de crecimiento. Esta relación es esencial para interpretar plantaciones o masas forestales, porque el diámetro suele ser un mejor indicador de la acumulación de madera comercial que la altura total.

Magaña Torres e Islas Gutiérrez (1989) señalan que el sistema ANATRON calcula no solo incrementos en altura, sino también en diámetros, área basal y volumen, lo que demuestra que la variable diamétrica es central en cualquier análisis troncal. Además, Ruiz-Peinado *et al*. (2017) muestran que el crecimiento radial en pinos puede variar entre masas regulares e irregulares, lo que confirma que el diámetro del tronco es sensible a la estructura del rodal y al manejo aplicado. Ambas fuentes son útiles para discutir el comportamiento diamétrico observado en *Pinus caribaea*.

Maguluko, *et al*. (2025) encontraron que el manejo silvícola, especialmente el raleo, influye en la respuesta de crecimiento y rendimiento de *P. caribaea*. Esto es importante porque el diámetro se relaciona directamente con la competencia entre árboles y con la disponibilidad de recursos, por lo que su incremento ayuda a estimar el efecto del manejo sobre la productividad del rodal.

El diámetro es una variable fundamental para evaluar el crecimiento de *Pinus caribaea*, porque refleja la acumulación de biomasa y la respuesta del árbol a las condiciones del sitio. En plantaciones forestales, se ha demostrado que el crecimiento diamétrico puede estimarse mediante parcelas permanentes y modelos no lineales, lo que permite reconstruir su evolución en el tiempo y analizar el efecto del manejo silvícola sobre la especie (Martínez Cantón *et al*., 2024). Además, en estudios comparativos de plantaciones tropicales, *Pinus caribaea* var. hondurensis ha mostrado incrementos diamétricos favorables bajo condiciones de sitio adecuadas, con valores que pueden alcanzar alrededor de 35 cm a los 20 años (Martínez, 2015).

Relación diámetro-altura y manejo

Wadsworth (2008) evidencia que la relación entre diámetro y altura en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* cambia según el espaciamiento, por lo que la forma del árbol refleja su competencia por recursos y su condición de crecimiento. Cuando los árboles son jóvenes, suele predominar la elongación vertical; más adelante, la inversión se orienta al engrosamiento del fuste. Esta transición es esencial para interpretar la arquitectura del árbol y para relacionarla con decisiones de manejo.

Castillo López *et al*. (2013) y Castillo-López *et al*. (2018) muestran que los datos de análisis troncal permiten reconstruir el desarrollo de la altura dominante y, con ello, interpretar cambios en la relación altura-diámetro a lo largo del tiempo. Esa información es valiosa en estudios de pino porque ayuda a identificar edades en las que el crecimiento vertical deja de ser dominante y el árbol comienza a invertir más en volumen. Por tanto, la relación d/h no debe verse como un dato aislado, sino como un indicador de madurez estructural.

Rojas-Sandoval y Acevedo-Rodríguez (2013) advierten que *Pinus caribaea* puede formar masas densas con rapidez, lo que obliga a considerar cuidadosamente el manejo del espaciamiento y de la competencia interna. En ese contexto, la relación diámetro-altura ayuda a decidir si el árbol requiere liberación, raleo o si ya está en una etapa de acumulación de madera comercial. Esta evidencia respalda el valor de estudiar la relación d/h en árboles como herramienta de interpretación silvicultural.

La relación diámetro-altura permite interpretar la forma del árbol y el equilibrio entre crecimiento vertical y engrosamiento del fuste. En estudios comparativos de especies maderables, *Pinus caribaea* ha presentado valores bajos de d/h en relación con otras especies, lo que indica una arquitectura influida por la competencia y el espaciamiento del rodal. Este tipo de relación se analiza mediante mediciones simultáneas de diámetro y altura, además de modelos alométricos que describen cómo cambia la estructura del árbol a lo largo del tiempo. En consecuencia, la relación diámetro-altura sirve para evaluar madurez estructural, estabilidad del fuste y efectos del manejo silvícola sobre el crecimiento (Arias Aguilar, 2004).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del estudio

El estudio es de tipo *descriptivo y retrospectivo*, basado en el análisis troncal de individuos de *Pinus caribaea* seleccionados en una masa forestal ubicada en Llano Sucio, municipio de Prinzapolka, Región Autónoma de la Costa Caribe Norte de Nicaragua. El propósito metodológico es reconstruir la historia de crecimiento de los árboles para estimar incremento en altura, diámetro y relación diámetro-altura a diferentes edades.

Área de estudio

El área de estudio se localiza en Prinzapolka, con coordenadas aproximadas X=801981, Y=1511838, y una altitud cercana a 40 m s. n. m. con un clima tropical húmedo y bosque natural de coníferas.

Selección de árboles

Se seleccionaron *cinco árboles* dentro del área de estudio. Entre individuos dominantes y codominantes, evitando ejemplares deformes, enfermos o excesivamente suprimidos. Esto permite que los datos reflejen el comportamiento general del crecimiento de la especie en el sitio.

Toma de muestras

Los árboles fueron derribados y se obtuvo *secciones transversales o rodajas* a diferentes alturas del fuste. La primera rodaja se tomó a la altura del corte, aproximadamente a 30 cm sobre el suelo; la segunda a 1.30 m de altura, y las restantes a intervalos regulares de *2 m* a lo largo del tronco. Esta disposición de rodajas permite reconstruir la variación del diámetro sin corteza en distintos niveles del árbol (Carrillo Espinosa, 1998) ver Figura 1.

Figura 1

Derribo y medición de intervalos de altura para extracción de rodajas de los árboles analizados



Fuente: Archivo fotográfico del proyecto de investigación (Fotografía tomada por Anabell Bayer Centeno).

Determinación de la edad

La edad de cada árbol se estimó a partir del número de anillos visibles en la primera rodaja, a ese número de anillos se le *sumaron tres años* para aproximar la edad total del árbol (Carrillo Espinosa, 1998). Esa corrección debe explicarse en la metodología como parte del procedimiento utilizado para compensar el tiempo previo al establecimiento de los anillos observables en la primera sección (ver Figura 2).

Figura 2

Determinación del número de anillos por rodaja



Nota: Archivo fotográfico del proyecto de investigación (Fotografía tomada por Efraín Peralta Tercero en el Laboratorio Forestal de la URACCAN, CUR Siuna).

Medición de variables

En cada rodaja se midió el diámetro sin corteza en centímetros. También se registró la altura a la que correspondía cada sección, con el fin de construir la relación entre altura del fuste y diámetro a distintas edades. A partir de estas mediciones se elaboraron tablas de crecimiento acumulado por edad para los años 10, 20, 30, 40 y 42. Cabe mencionar que, para poder visualizar los anillos de crecimiento de los árboles, estas fueron lijadas hasta identificar con precisión cada uno de los anillos, además, se marcó cada 10 años cual era el anillo que lo representaba. Posteriormente usando una regla milimétrica se realizó la medición del radio para posterior convertirlo a diámetro.

Cálculo de crecimiento e incremento

Con los datos obtenidos se calcularon tres indicadores principales:

1. **Crecimiento acumulado**, expresado como altura total y diámetro alcanzado a cada edad.
2. **Incremento corriente anual (ICA)**, que muestra cuánto creció el árbol en un intervalo de tiempo determinado. $ICA_d = \frac{diámetro_2 - diámetro_1}{edad_2 - edad_1}$ o $ICA_h = \frac{alto_2 - alto_1}{edad_2 - edad_1}$
3. **Incremento medio anual (IMA)**, que representa el promedio de crecimiento por año hasta una edad dada. $IMA_d = \frac{diámetro}{edad}$ o $IMA_h = \frac{altura}{edad}$

Estos indicadores fueron construidos tanto para la altura como para el diámetro, y se analizaron por separado construyendo una tabla para el diámetro y un perfil del fuste para la altura.

Relación diámetro-altura

Con los valores de altura y diámetro también se calculó la "**relación d/h a la edad de**", es decir, el cociente entre el diámetro y la altura del árbol. Este indicador sirve para interpretar el cambio en la forma del árbol a medida que avanza la edad y para observar si el crecimiento se concentra más en altura o en grosor del fuste.

Procesamiento de datos

Los datos se organizaron en tablas por edad y por altura de rodaja. Luego se elaboraron gráficos o curvas de crecimiento, perfil del fuste sin corteza, esto para comparar el comportamiento de la altura, el diámetro, el ICA, el IMA y la relación d/h. El procesamiento se realizó en Excel.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento e incremento mediante análisis troncal

El análisis troncal de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en Llano Sucio, Prinzapolka, mostró un patrón claro de crecimiento diferencial entre altura y diámetro a lo largo del tiempo. Este comportamiento confirma una fase inicial de crecimiento vertical acelerado, seguida por una desaceleración progresiva, lo cual coincide con lo observado por Wadsworth (2008) en *Pinus caribaea* var. hondurensis, donde la altura está fuertemente influida por el espaciamiento y por la competencia entre árboles (ver Tabla 1).

Tabla 1

Datos del análisis troncal analizados en cada rodaja en las diferentes secciones transversales

Altura de la sección (m)	Diámetro Sin Corteza en cm, a la Edad de (años):					N anillos	Edad (años)
	10	20	30	40	42		
0.30	12	20.8	27	31.6	32.6	39	3
1.30	9.8	15.8	22	25	25.4	38	4
3.30	7.2	14	19.8	24	25.2	36	6
5.30	5.8	12	19.4	22.8	23.4	34	8
7.30		10.2	16.6	21	21.8	31	11
9.30		9.6	15.8	20.8	21	28	14
11.30		8.6	14	18	18.6	27	15
13.30		7.6	13.2	17	17.6	26	16
15.30		4.8	10.4	15.6	16.4	25	17
17.30		3.4	5	13	14.4	23	19
19.30			4.6	10	11.8	16	26
21.30				7.8	8.6	8	34
23.30					1.07	4	38

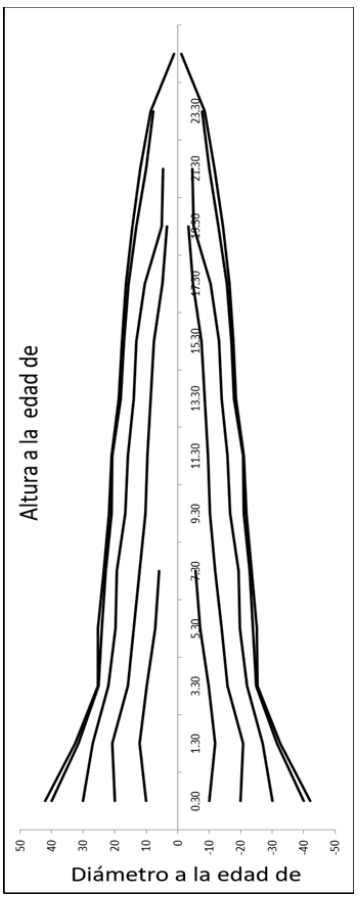
Crecimiento e incremento en altura

Los árboles de *Pinus caribaea* en Llano Sucio mostraron un crecimiento vertical rápido durante las primeras etapas de desarrollo. Los resultados evidencian que los árboles alcanzaron 11.3 m de altura a los 10 años, 18.3 m a los 20 años, 20.3 m a los 30 años, 22.3 m a los 40 años y 23.8 m a los 42 años. Este patrón indica que la especie destinó una gran parte de su crecimiento juvenil a la elongación del fuste, comportamiento que coincide con lo reportado por Oteng-Amoako y Brink (s.f.). para

P. caribaea var. *hondurensis* en sitios favorables y con lo indicado por Wadsworth (2008), quien observó que la altura en esta especie responde fuertemente al espaciamiento y a la competencia entre árboles (ver Figura 3).

Figura 3

Perfil del fuste (representación diámetro y altura)



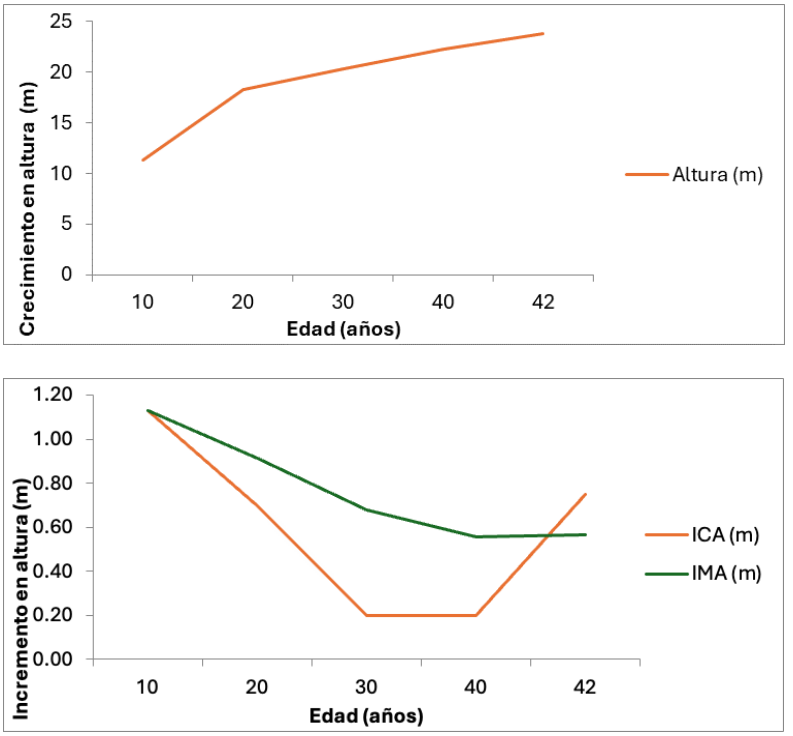
Nota: La figura es elaboración propia, los valores en el eje vertical representan las alturas de cada una de las secciones transversales expresadas en metros, los valores en el eje horizontal la edad en años en donde se hizo la medición del diámetro y las líneas el "**diámetro a la edad de**" en las diferentes alturas de las secciones transversales.

El incremento corriente anual en altura fue de 1.13 m a los 10 años, 0.70 m a los 20 años, 0.20 m a los 30 años, 0.20 m a los 40 años y 0.75 m a los 42 años, mientras que el incremento medio anual descendió de 1.13 m a 0.57 m en el mismo intervalo. Esta disminución progresiva del crecimiento vertical es compatible con la lógica del análisis troncal descrita por Magaña Torres e Islas Gutiérrez (1989), donde los datos de rodajas permiten reconstruir la curva de crecimiento y detectar el momento en que la velocidad de incremento empieza a reducirse. Además, en estudios de pinos con

análisis de tronco, como los modelos de índice de sitio compilados por Castillo-López *et al*. (2018) y Castillo López *et al*. (2013), la altura se usa precisamente para identificar diferencias de desarrollo entre edades y calidades de estación (ver Figura 4).

Figura 4

Crecimiento e incremento en altura



A la edad de (años)	10	20	30	40	42
Altura (m)	11.3	18.3	20.3	22.3	23.8
ICA (m)	1.13	0.70	0.20	0.20	0.75
IMA (m)	1.13	0.92	0.68	0.56	0.57

En términos de interpretación biológica, el resultado sugiere que *P. caribaea* alcanzó rápidamente una altura importante durante su fase juvenil y luego pasó a una etapa de desaceleración apical. Rojas-Sandoval y Acevedo-Rodríguez (2013) señalan que la especie puede crecer con rapidez y alcanzar tallas considerables en condiciones favorables, lo que coincide con el comportamiento observado en Prinzapolka. Por tanto, el patrón de altura no solo refleja edad, sino también la interacción entre sitio, competencia y potencial genético de la especie.

La altura constituye una variable clave para interpretar la fase juvenil y la dinámica de desarrollo de *Pinus caribaea*, ya que expresa la capacidad de la especie para crecer verticalmente y competir por luz. En estudios de plantaciones, la altura total se ha medido directamente en árboles seleccionados y luego modelado mediante funciones de crecimiento para estimar su comportamiento a diferentes edades (Martínez Cantón *et al*., 2024). De forma complementaria, Espinoza Silva y Rodríguez Mendoza (2010) evaluaron el incremento y la productividad en plantaciones de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* mediante parcelas permanentes de muestreo, mediciones de diámetro y altura, e índices de crecimiento, lo que confirma la utilidad de estas variables para describir el desarrollo de la especie. La literatura técnica señala que esta especie puede presentar incrementos en altura de entre 1.04 y 2.09 m por año, con incrementos medios anuales de 1.06 a 1.28 m, lo que evidencia su rápido crecimiento vertical bajo buenas condiciones de sitio (Espinoza Silva y Rodríguez Mendoza, 2010; Martínez, 2015).

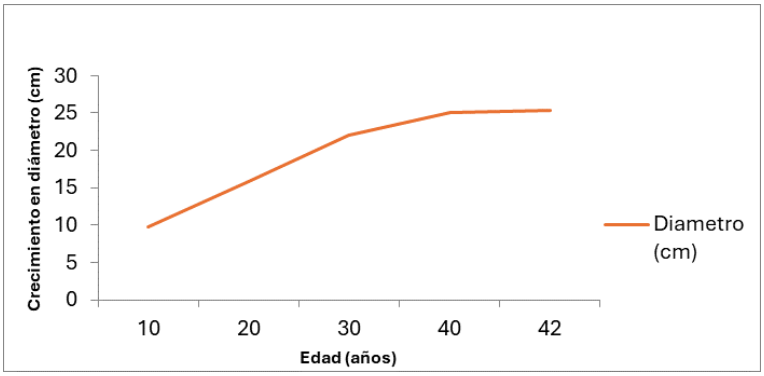
Crecimiento e incremento en diámetro

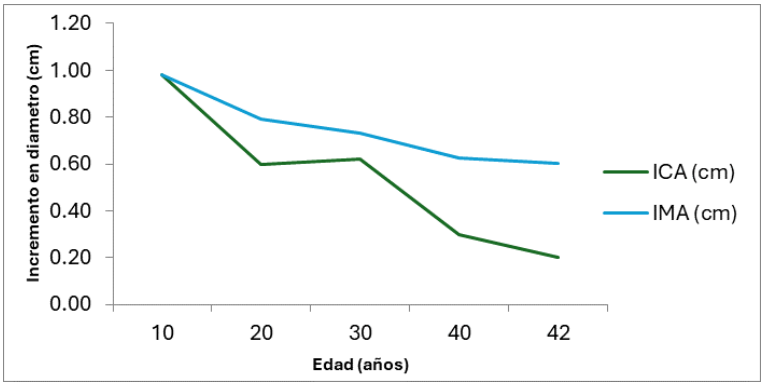
El diámetro sin corteza mostró un aumento continuo a lo largo del período estudiado. Los valores pasaron de 9.8 cm a los 10 años, 15.8 cm a los 20 años, 22 cm a los 30 años, 25 cm a los 40 años y 25.4 cm a los 42 años. Esta tendencia muestra que, aunque el crecimiento diamétrico se desacelera con la edad, el árbol sigue acumulando madera, lo cual es consistente con los hallazgos de Wadsworth (2008), quien demostró que el diámetro en P. caribaea var. hondurensis depende del espaciamiento, el sitio y la competencia entre individuos (ver Figura 5).

El ICA en diámetro fue de 0.98 cm a los 10 años, 0.60 cm a los 20 años, 0.62 cm a los 30 años, 0.30 cm a los 40 años y 0.20 cm a los 42 años, mientras que el IMA descendió de 0.98 cm a 0.60 cm. Estos resultados coinciden con lo planteado por Magaña Torres e Islas Gutiérrez (1989), que consideran el diámetro una variable central en el análisis troncal por su relación directa con el volumen, el área basal y la productividad del rodal. Asimismo, Ruiz-Peinado *et al*. (2017) mostraron que el crecimiento radial en pinos puede diferir entre masas regulares e irregulares, lo que respalda la idea de que el diámetro responde tanto a la edad como a la estructura y manejo del bosque (ver Figura 5).

Figura 5

Crecimiento e incremento en diámetro





A la edad de (años)	10	20	30	40	42
Diámetro (cm)	9.8	15.8	22	25	25.4
ICA (cm)	0.98	0.60	0.62	0.30	0.20
IMA (cm)	0.98	0.79	0.73	0.63	0.60

Desde una perspectiva silvicultural, el aumento sostenido del diámetro sugiere que los árboles analizados todavía mantenían capacidad de engrosamiento del fuste, aun cuando el crecimiento en altura ya era más lento. Rojas-Sandoval y Acevedo-Rodríguez (2013) resaltan que *Pinus caribaea* forma masas densas con rapidez, por lo que la gestión del espacio y de la competencia es clave para favorecer diámetros comerciales adecuados. En ese sentido, los datos de Prinzapolka indican que la especie continúa siendo productiva en fases avanzadas y que su manejo debería considerar la edad de máxima eficiencia en diámetro, para esto es necesario realizar estudios factor de forma, tiempo de paso y turno para estimar con exactitud las dimensiones de los árboles a los cuales pueden ser aprovechados.

El diámetro sin corteza presentó un incremento sostenido a lo largo del tiempo, con una disminución progresiva de la tasa de crecimiento en las edades avanzadas. Este comportamiento coincide con lo reportado por Espinoza Silva y Rodríguez Mendoza (2010), quienes encontraron en plantaciones de *Pinus caribaea* var. hondurensis incrementos corrientes anuales en diámetro entre 0.81 y 1.25 cm e incrementos medios anuales entre 1.19 y 1.85 cm. Asimismo, Martínez Cantón *et al*. (2024) resaltan la utilidad del diámetro normal para estimar el potencial maderable de la especie, mientras que Martínez (2015) señala que *Pinus caribaea* puede alcanzar alrededor de 35 cm de diámetro a los 20 años en condiciones favorables. En consecuencia, los resultados de este estudio muestran que la especie mantiene capacidad de engrosamiento del fuste, aunque con una tendencia natural a reducir su ritmo de crecimiento con la edad.

Relación entre crecimiento en diámetro y crecimiento en altura

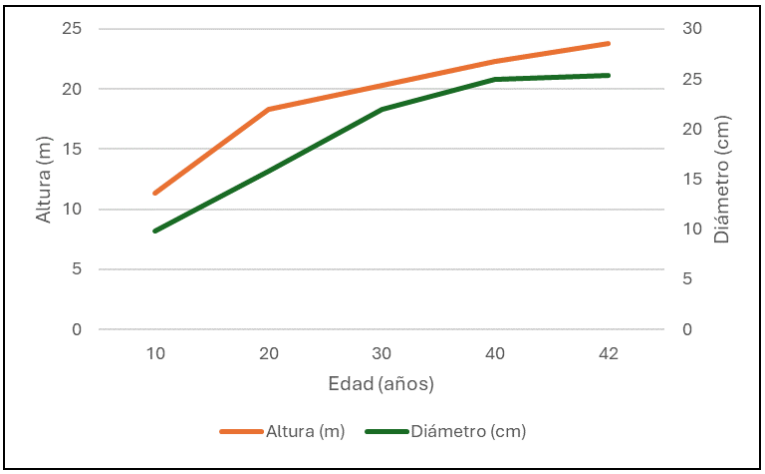
La relación diámetro-altura mostró que durante las primeras edades predominó el crecimiento vertical, pero después, la especie invirtió más en engrosamiento del tronco. Los valores de d/h fueron 0.87 a los 10 años, 0.86 a los 20 años, 1.08 a los 30 años, 1.12 a los 40 años y 1.07 a los 42 años. Este cambio evidencia una transición arquitectónica del árbol, muy similar a lo que Wadsworth (2008) describe para plantaciones de *P. caribaea* var. *hondurensis*, donde la relación entre diámetro y altura cambia conforme modifica la competencia y la disponibilidad de recursos.

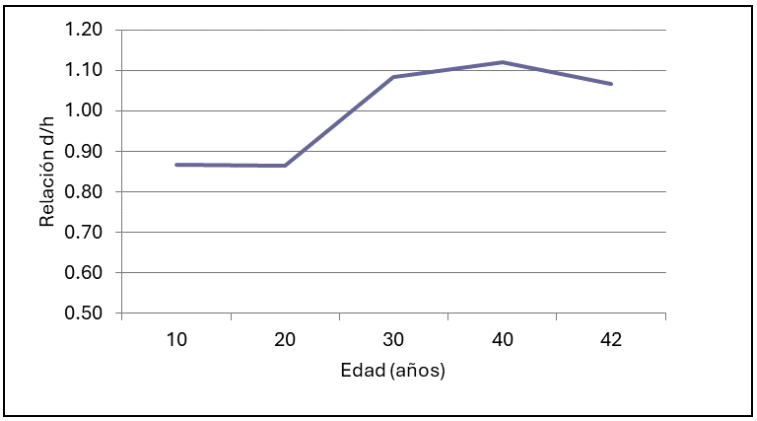
Castillo-López *et al*. (2018) y Castillo López *et al*. (2013) señalan que el análisis troncal permite reconstruir la historia del árbol y observar cambios en la proporción de crecimiento entre altura y diámetro, lo que ayuda a identificar edades críticas de desarrollo. En el caso de Prinzapolka, la relación d/h sugiere que después de los 20 años la especie dejó de priorizar tanto la elongación vertical y comenzó a consolidar un fuste más grueso, lo cual es coherente con una fase de madurez estructural. Esa lectura es importante para el manejo forestal porque señala el momento en que los árboles pueden responder mejor a intervenciones orientadas al volumen y la calidad de madera (ver Figura 6).

Además, la literatura técnica indica que la forma del árbol está fuertemente condicionada por el espaciamiento inicial y por la competencia interna del rodal. Wadsworth (2008) documentó que el crecimiento de *P. caribaea* var. *hondurensis* varía según la densidad de los árboles, mientras que Oteng-Amoako y Brink (s.f.) destacan que la especie puede alcanzar alturas significativas y desarrollar buenos fustes cuando crece en sitios adecuados. Por ello, la relación d/h observada en Prinzapolka no solo refleja la edad del árbol, sino también el contexto ecológico y silvícola en que se desarrolló.

Figura 6

Relación entre crecimiento en diámetro y crecimiento en altura





A la edad de (años)	10	20	30	40	42
Altura (m)	11.3	18.3	20.3	22.3	23.8
Diámetro (cm)	9.8	15.8	22	25	25.4
Relación d/h	0.87	0.86	1.08	1.12	1.07

Implicaciones de estos resultados para manejo y productividad

En conjunto, los resultados muestran que *Pinus caribaea* en Prinzapolka tuvo un comportamiento coherente con el descrito para la especie en otras regiones tropicales. Rojas-Sandoval y Acevedo-Rodríguez (2013) y Oteng-Amoako y Brink (s.f.) coinciden en que es una especie de crecimiento rápido, adaptable y con un fuerte potencial productivo, lo que la hace atractiva para plantaciones forestales. Los datos del análisis troncal confirman esa condición al mostrar incremento sostenido en altura y diámetro, aunque con una desaceleración progresiva en edades mayores.

La información también sugiere que el árbol mantiene potencial de aprovechamiento después de los 40 años, pero ya con menor eficiencia en la acumulación anual de crecimiento. Magaña Torres e Islas Gutiérrez (1989) sostienen que el análisis troncal permite definir edades aprovechables eficientes a partir de las curvas de ICA e IMA, y esa lógica es precisamente la que puede aplicarse a estos árboles de Prinzapolka. En términos de manejo, esto significa que la especie puede seguir creciendo, pero la decisión de intervenir debe considerar el punto en que el incremento marginal ya no compensa el tiempo de permanencia en campo.

Finalmente, la concordancia entre los resultados del estudio y la literatura sobre pinos y análisis troncal fortalece la validez de la información obtenida. Los modelos de crecimiento y sitio en pinos propuestos por Castillo-López *et al*. (2018) y Castillo López *et al*. (2013), junto con la evidencia de Wadsworth (2008), muestran que el crecimiento en altura y diámetro es una función conjunta de edad, sitio y manejo. Por ello, los resultados de este estudio no solo describen el desarrollo de *P. caribaea* en Prinzapolka, sino que también aportan insumos para la planificación silvicultural y para futuras decisiones de aprovechamiento en la Costa Caribe nicaragüense.

V. CONCLUSIONES

- El análisis troncal permitió determinar que *Pinus caribaea* en Llano Sucio, Prinzapolka, presentó un crecimiento importante en altura durante las primeras edades, con una tendencia a desacelerarse conforme aumentó la edad del árbol. Esto confirma que la especie expresa una fase juvenil de rápido crecimiento vertical seguida por una etapa de menor incremento.
- En cuanto al diámetro sin corteza, los resultados mostraron un incremento sostenido a lo largo del tiempo, aunque con una reducción gradual en la tasa de crecimiento en las edades avanzadas. Esto indica que la especie mantiene capacidad de engrosamiento del fuste aun cuando el crecimiento en altura disminuye.
- La relación entre diámetro y altura evidenció un cambio en la arquitectura del árbol, pasando de una mayor inversión en crecimiento vertical en edades tempranas a una mayor orientación hacia el engrosamiento del tronco en edades posteriores. Este comportamiento permite inferir que el árbol alcanza una etapa de madurez estructural que es útil para fines de manejo forestal.
- En conjunto, los resultados muestran que el análisis troncal es una herramienta eficaz para evaluar el crecimiento e incremento de *Pinus caribaea*, ya que permite reconstruir su desarrollo y aportar información técnica valiosa para la planificación silvicultural y el aprovechamiento sostenible de la especie en la Costa Caribe nicaragüense.

VI. REFERENCIAS

Arias Aguilar (2004). Estudio de las relaciones altura-diámetro para seis especies maderables utilizadas en programas de reforestación en la Zona Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 1*(2), 33–43. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5123200.pdf

Carrillo Espinosa, G. (1998). *Apuntes del curso de epidometría*. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco Estado de México.

Castillo López, A., Vargas-Larreta, B., Corral Rivas, J. J., Nájera Luna, J. A., Cruz Cobos, F., y Hernández, F. J. (2013). Modelo compatible altura- índice de sitio para cuatro especies de pino en Santiago Papasquiaro, Durango. *Revista mexicana de ciencias forestales, 4*(18), 89-103. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322013000400007&lng=es&tlng=es

Castillo-López, A., Santiago-García, W., Vargas-Larreta, B., Quiñonez-Barraza, G., Solís-Moreno, R., y Corral-Rivas, J. J. (2018). Modelos dinámicos de índice de sitio para cuatro especies de pino en Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9*(49), 4-27. https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.185

Espinoza Silva, N. M., y Rodríguez Mendoza, M. del C. (2010). *Evaluación del incremento y productividad en plantaciones de pinus oocarpa Schiede y Pinus caribaea Morelet var. hondurensis, en la finca San Nicolás, Municipio de San Fernando, Nueva Segovia, Nicaragua* [Monografía de grado, Universidad Nacional Agraria]. https://repositorio.una.edu.ni/1143/

Magaña Torres, O. S., e Islas Gutiérrez, F. (1989). Sistema para la realización de análisis troncales: ANATRON. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 14*(66), 97-113. https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/download/1133/2481

Maguluko, J., Mwambusi, J., Pima, N., y Mwakalukwa, E. (2025). El impacto del aclareo en el crecimiento y rendimiento de Pinus caribaea en la plantación forestal de Buhindi, distrito de Sengerema, Tanzania. *East African Journal of Forestry and Agroforestry, 8*(1) 509-522. https://doi.org/10.37284/eajfa.8.1.3976

Martínez Cantón, J. L., Alvarez Lazo, D., y Fernández Concepción, R. R. (2024). Evaluation of the standing timber potential in Pinus Caribaea plantations in Cuba. *Avances, 26*(1), 1-17. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9269988.pdf

Martínez, H. (2015). *Pino (Pinus caribaea var. hondurensis): condiciones para su cultivo "Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono*". Fondo Nacional de Financiamiento Forestal Forest Monitoring System for REDD+ Costa Rica. https://www.onfcr.org/wp-content/uploads/media/uploads/documents/pinus-caribaea.pdf

Oteng-Amoako, A. A., y Brink, M. (s.f.). *Pinus caribaea var. hondurensis*. PROTA4U. https://prota.prota4u.org/protav8.asp?g=pe&p=Pinus+caribaea+var.+hondurensis

Rojas-Sandoval, J., y Acevedo-Rodríguez, P. (2013). *Pinus caribaea* (Caribbean pine). CABI Digital Libary. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.41573

Rojas Rodríguez, F. E., Ortiz Malavasi, E. (1991). *Pino caribe, Pinus caribaea Morelet var. hondurensis (Barret y Golfari): especie de árbol de uso múltiple en América Central*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica (CATIE) https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/3343

Ruiz-Peinado, R., Río, M. Sotomayor, M., Madrigal, G., Conde, M., Calama, R., y Pardos, M. (2017). *Comparación del crecimiento radial en masas regulares e irregulares de pino piñonero en el Sistema Central*. http://7cfe.congresoforestal.es/sites/default/files/comunicaciones/276.pdf

Wadsworth, F. H. (2008). Growth of Pinus caribaea hondurensis relative to spacing and trunk diameter on two soils in Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science, 44*(2). 236-241. https://doi.org/10.18475/cjos.v44i2.a12