

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **ESCUELA DE POSGRADO**



**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**TESIS:**

**EFFECTO DE CUATRO DOSIS DE ÁCIDO INDOLBUTÍRICO (AIB) Y**

**TRES TIEMPOS DE EXPOSICIÓN EN EL ENRAIZAMIENTO DE**

**ESTACAS DE *Cedrela angustifolia* Sessé & Moc. ex DC.**

Para optar el Grado Académico de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

Presentada por:

**ROSSMERY HILDA ARTEAGA MURGA**

Asesor:


**Dr. JUAN FRANCISCO SEMINARIO CUNYA**

Cajamarca, Perú

## CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:  
Rossmery Hilda Arteaga Murga  
DNI: 44507078  
Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias.  
Programa de Maestría en Ciencias, Mención: Gestión Ambiental
2. Asesor: Dr. Juan Francisco Seminario Cunya
3. Grado académico o título profesional  
 Bachiller     Título profesional     Segunda especialidad  
 Maestro     Doctor
4. Tipo de Investigación:  
 Tesis     Trabajo de investigación     Trabajo de suficiencia profesional  
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:  
EFECTO DE CUATRO DOSIS DE ÁCIDO INDOLBUTÍRICO (AIB) Y TRES TIEMPOS DE EXPOSICIÓN EN EL ENRAIZAMIENTO DE ESTACAS DE *Cedrela angustifolia* Sessé & Moc. ex DC.
6. Fecha de evaluación: **23/04/2026**
7. Software antiplagio:                     TURNITIN                     URKUND (OURIGINAL) (\*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: **10%**
9. Código Documento: **3117:582251860**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:  
 **APROBADO**     PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O  
DESAPROBADO

Fecha Emisión: **24/04/2026**

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>

<i>Dr. Juan Francisco Seminario Cunya DNI: 26717651</i>

\* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT © 2026 BY  
**ROSSMERY HILDA ARTEAGA MURGA**  
Todos los derechos reservados



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

Siendo las 3:05... horas, del día 17 de febrero del dos mil veintiseis, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el **Dr. ELFER GERMÁN MIRANDA VALDIVIA**, **Dra. CONSUELO BELANIA PLASENCIA ALVARADO**, **M.Sc. LUIS DÁVILA ESTELA** y en calidad de Asesor el **Dr. JUAN FRANCISCO SEMINARIO CUNYA**, actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestría de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada “EFECTO DE CUATRO DOSIS DE ÁCIDO INDOLBUTÍRICO (AIB) Y TRES TIEMPOS DE EXPOSICIÓN EN EL ENRAIZAMIENTO DE ESTACAS DE *Cedrela angustifolia* Sessé & Moc. ex DC.”, presentada por la **Bachiller en Ciencias Forestales, ROSSMERY HILDA ARTEAGA MURGA**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó APROBACIÓN con la calificación de Diecisiete (17).....la mencionada Tesis; en tal virtud, la **Bachiller en Ciencias Forestales, ROSSMERY HILDA ARTEAGA MURGA** está apta para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS** Mención en **GESTIÓN AMBIENTAL**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias.

Siendo las 4:35.. horas del mismo día, se dio por concluido el acto.

.....  
**Dr. Juan Francisco Seminario Cunya**  
Asesor

.....  
**Dr. Elfer Germán Miranda Valdivia**  
Jurado Evaluador

.....  
**Dra. Consuelo Belania Plasencia Alvarado**  
Jurado Evaluador

.....  
**M.Sc. Luis Dávila Estela**  
Jurado Evaluador

## DEDICATORIA

Mi gran apoyo incondicional Lían

André Ventura Arteaga que con su amor

incansable incentivo mi investigación

A mis padres, Demetrio A. y Julia M.

que con amor, sacrificio y buen ejemplo

guiaron mi formación profesional

A mis hermanos Rocío A. y Roger A.

por sus buenos consejos y su estima.

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme la vida, la salud y la sabiduría necesarias para alcanzar las metas que me he propuesto, así como por su constante protección a lo largo de este proceso.

Al Dr. Juan F. Seminario Cunya, por su valioso apoyo, paciencia y aportes en la redacción y revisión de la presente tesis.

Al Dr. Berardo Escalante Zumaeta, por su dedicación, orientación y experiencia como guía principal, así como por sus valiosos conocimientos que hicieron posible la ejecución y culminación de este trabajo.

Al Ing. Manuel Malpica Figueroa, por su importante contribución y amplio conocimiento en la aplicación de la hormona ácido indolbutírico.

Al M.Sc. Luis Dávila Estela, por brindarme su tiempo y compartir su experiencia en la propagación asexual mediante estacas de *C. angustifolia*, lo cual permitió el desarrollo y culminación de este estudio.

La educación es el arma más poderosa  
que puedes usar para cambiar el mundo

**- Nelson Mandela**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE ABREVIACIONES.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Problema de la investigación.....</b>	<b>3</b>
<i>1.1.1. Problema general.....</i>	<i>3</i>
<i>1.1.2. Problemas específicos .....</i>	<i>3</i>
<i>1.1.3. Planteamiento de la realidad problemática.....</i>	<i>4</i>
<b>1.2. Justificación de la investigación .....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Objetivo de la investigación.....</b>	<b>6</b>
<i>1.3.1. Objetivo general.....</i>	<i>6</i>
<i>1.3.2. Objetivos específicos.....</i>	<i>6</i>
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1. Antecedentes de la Investigación.....</b>	<b>8</b>

<b>2.2. Bases Teóricas</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.1. Propagación vegetativa mediante estacas</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.2. Reguladores de crecimiento para el enraizamiento asexual</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.3. Sustrato en el enraizamiento</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.4. Descripción taxonómica de la Cedrela angustifolia</b> .....	<b>29</b>
<b>2.3. Definición de términos básicos</b> .....	<b>31</b>
<b>2.4. Tratamiento en estudio</b> .....	<b>33</b>
<b>2.4.1. Diseño experimental</b> .....	<b>35</b>
<b>CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>
<b>3.1. Localización del Estudio</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2. Materiales, equipos e insumos</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2.1. Material genético en estudio</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2.2. Equipos</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2.3. Materiales de laboratorio</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2.4. Insumos y reactivos</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2.5. Herramientas de campo</b> .....	<b>39</b>
<b>3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos</b> .....	<b>39</b>
<b>3.3.1. Selección de las plantas madre</b> .....	<b>39</b>

3.3.2. Selección y obtención de estaquillas a partir de plantas madre.....	43
3.3.3. Preparación, caracterización y manejo de estacas de <i>Cedrela angustifolia</i> .....	44
3.3.4. Preparación y tratamiento del sustrato de enraizamiento .....	46
3.3.5. Preparación de soluciones hormonales (AIB).....	46
3.3.6. Tratamiento hormonal de estacas.....	48
3.3.7. Condiciones del invernadero forestal.....	48
3.3.8. Proceso de estaquillado en la cama de propagación del invernadero .....	49
3.3.9. Manejo de estacas durante la etapa de enraizamiento .....	50
3.4. Evaluaciones realizadas durante el desarrollo del experimento .....	52
3.4.1. Evaluación del brotamiento .....	52
3.4.2. Evaluación del enraizamiento.....	54
3.5. Sistematización, procesamiento y análisis de datos.....	56
3.5.1. Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	57
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>59</b>
4.1. Efecto de las dosis de ácido indol butírico (AIB) en el porcentaje de enraizamiento	59
4.2. Influencia del tiempo de exposición y la interacción dosis × tiempo.....	61
4.3. Longitud total del sistema radical por estaca.....	62
4.4. Número de raíces adventicias.....	67
4.5. Número de brotes.....	70

<b>4.6. Longitud de brotes.....</b>	<b>72</b>
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>5.1. Conclusión.....</b>	<b>76</b>
<b>5.2. Recomendaciones.....</b>	<b>77</b>
<b>CAPÍTULO VI: REFERENCIAS Y BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>84</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

<b>Tabla 1.</b> <i>Comparación de sustratos y mezclas utilizados en el enraizamiento de estacas, según componentes, propiedades físicas y respuesta típica de enraizamiento</i> .....	28
<b>Tabla 2.</b> <i>Estructura de tratamientos del diseño factorial (dosis de AIB × tiempo de exposición) aplicados al enraizamiento de estacas de Cedrela angustifolia</i> .....	34
<b>Tabla 3.</b> <i>Porcentaje de enraizamiento según dosis de AIB</i> .....	60
<b>Tabla 4.</b> <i>Análisis de varianza (ANOVA) del porcentaje de enraizamiento en función de la dosis de AIB y el tiempo de exposición</i> .....	62
<b>Tabla 5.</b> <i>Comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey (<math>\alpha = 0,05</math>) para la longitud de raíces en estacas de Cedrela angustifolia en función de la dosis de AIB y el tiempo de exposición</i> .....	64
<b>Tabla 6.</b> <i>Longitud promedio de raíces y comparación múltiple de medias (Tukey, <math>\alpha = 0,05</math>) en estacas de Cedrela angustifolia según dosis de AIB y tiempo de exposición</i> .....	65
<b>Tabla 7.</b> <i>Prueba de comparación múltiple de Tukey para el número de raíces adventicias</i>	69
<b>Tabla 8.</b> <i>Número promedio de raíces en estacas de Cedrela angustifolia según dosis de AIB y tiempo de exposición</i> .....	70
<b>Tabla 9.</b> <i>Número de brotes y comparación múltiple de medias (prueba de Tukey, <math>\alpha = 0,05</math>) en estacas de Cedrela angustifolia según dosis de AIB y tiempo de exposición</i> .....	71
<b>Tabla 10.</b> <i>Longitud de brotes según dosis y tiempo</i> .....	72
<b>Tabla 11.</b> <i>Resultados del número de estacas enraizadas de C. angustifolia por tratamiento</i>	84
<b>Tabla 12.</b> <i>Número de estacas con formación de callos en C. angustifolia según tratamiento</i>	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> <i>Plano de localización del bosque natural donde se extrajeron las muestras, caserío de Caucau, distrito de Namora, provincia y departamento de Cajamarca ....</i>	86
<b>Figura 2.</b> <i>Selección de la planta madre de C. angustifolia en el bosque natural del caserío de Caucau, distrito de Namora.....</i>	40
<b>Figura 3.</b> <i>Preparación, caracterización y manejo de estacas de Cedrela angustifolia en el proceso experimental .....</i>	45
<b>Figura 4.</b> <i>Preparación de soluciones hormonales (AIB), en el laboratorio de Fisiología – UNC</i>	47
<b>Figura 5.</b> <i>Instalación de las estacas en la cama de propagación del invernadero de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca.....</i>	51
<b>Figura 6.</b> <i>Observación directa de brotes en estacas de Cedrela angustifolia.....</i>	54
<b>Figura 7.</b> <i>Longitud promedio de raíces en estacas de Cedrela angustifolia en función de la dosis de AIB y el tiempo de exposición .....</i>	66
<b>Figura 8.</b> <i>Evaluación de Enraizamiento de Cedrela angustifolia en el invernadero de la Facultad de Agronomía – Universidad Nacional de Cajamarca.....</i>	67
<b>Figura 9.</b> <i>Longitud de brotes en estacas de Cedrela angustifolia en función de la dosis de AIB y el tiempo de exposición .....</i>	73

**LISTA DE ABREVIACIONES**

AIB	:	Ácido Indolbutírico
ANOVA	:	Análisis de Varianza
DAP	:	Diámetro a la Altura del Pecho
DCA	:	Diseño Completamente al Azar
DCM	:	Diámetro de Copa Menor
DCMY	:	Diámetro de Copa Mayor
mg/L	:	miligramos por litro.

## RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar el efecto de cuatro dosis de ácido indolbutírico y tres tiempos de exposición en el enraizamiento de estacas de *Cedrela angustifolia* en condiciones de invernadero. Se usó el diseño completamente al azar con arreglo factorial 4D × 3T. Se probaron cuatro concentraciones de ácido indolbutírico (0, 500, 1500 y 4500 mg/L) y tres tiempos de inmersión (150, 3600 y 86 400 s). Se emplearon 540 estaquillas obtenidas del tercio medio de la copa de 20 árboles seleccionados en un bosque natural del caserío Caucau, distrito de Namora, provincia y departamento de Cajamarca. Las estaquillas presentaron un diámetro promedio de 1,5 cm, una longitud de 20 cm, cinco yemas axilares y un número equivalente de hojas. Se encontró interacción altamente significativa entre la concentración de AIB y el tiempo de exposición ( $p < 0,01$ ). El tratamiento con 500 mg/L durante 150 s. Se registró el mayor porcentaje de enraizamiento (73,5 %), con 3 raíces adventicias por estaca de raíz de 5,5 cm y se obtuvieron 3 brotes por estaca, con 5,62 cm. Las concentraciones elevadas redujeron significativamente la formación de raíces. Se concluye que la combinación de 500 mg/L de AIB y 150 s de inmersión es la más eficiente para optimizar el enraizamiento de *C. angustifolia* en condiciones de invernadero. Este resultado aporta bases técnicas para su propagación clonal y fortalece las estrategias de restauración ecológica y gestión forestal sostenible en la región.

**Palabras clave:** Propagación vegetativa, ácido indolbutírico, enraizamiento, especies forestales nativas, restauración ecológica, gestión ambiental.

## ABSTRACT

The objective of this study was to determine the effect of four doses of indole-3-butyric acid (IBA) and three exposure times on the rooting of *Cedrela angustifolia* cuttings under greenhouse conditions. A completely randomized design with a  $4 \times 3$  factorial arrangement was employed. Four IBA concentrations (0, 500, 1500, and 4500 mg/L) and three immersion times (150, 3600, and 86,400 s) were evaluated. A total of 540 cuttings were collected from the middle third of the crown of 20 selected trees in a natural forest located in the Caucau village, Namora district, Cajamarca, Peru. The cuttings had an average diameter of 1.5 cm, a length of 20 cm, five axillary buds, and a similar number of leaves. The results showed a highly significant interaction between IBA concentration and exposure time ( $p < 0.01$ ). The treatment consisting of 500 mg/L for 150 s achieved the highest rooting percentage (73.5%), with an average of three adventitious roots per cutting, root length of 5.5 cm, and three shoots per cutting with an average length of 5.62 cm. Higher concentrations significantly reduced root formation. It is concluded that the combination of 500 mg/L IBA and 150 s of immersion is the most efficient treatment to optimize the rooting of *C. angustifolia* under greenhouse conditions. These findings provide a technical basis for its clonal propagation and contribute to ecological restoration and sustainable forest management strategies in the region.

**Keywords:** Vegetative propagation; indole-3-butyric acid; rooting; native forest species; ecological restoration; environmental management.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

La pérdida de biodiversidad forestal en ecosistemas tropicales y montanos representa un desafío ambiental de primer orden, ya que los bosques desempeñan funciones ecosistémicas esenciales como la regulación hídrica, el secuestro de carbono, la protección de suelos y el mantenimiento de la diversidad biológica (MINAM & SERFOR, 2020). En el Perú, la deforestación y la explotación forestal no regulada han afectado de forma progresiva a numerosas especies nativas, especialmente aquellas con maderas de alto valor comercial y limitada regeneración natural. *C. angustifolia* (Meliaceae) es una especie arbórea nativa de América Latina que se distribuye desde México hasta Sudamérica, destacando su presencia en bosques montanos húmedos de los Andes y yungas (MINAM & SERFOR, 2020). En el territorio peruano, esta especie forma parte del género *Cedrela*, que comprende al menos 10 especies presentes en el país, lo que sitúa al Perú como uno de los centros de diversidad de este género neotropical (MINAM & SERFOR, 2020). *C. angustifolia* se encuentra clasificada como “En Peligro (EN)” a nivel nacional debido a la reducción de sus poblaciones naturales, la fragmentación de su hábitat y la presión histórica de extracción maderable (SERFOR, 2021). En la región Cajamarca, *C. angustifolia* se encuentra en remanentes de bosques montanos, principalmente en distritos interandinos como Namora, Contumazá y San Ignacio. Sin embargo, la expansión de actividades agrícolas y ganaderas, junto con el aprovechamiento forestal selectivo, ha incrementado la fragmentación de estos bosques y reducido la regeneración natural de la especie, lo que afecta la estructura y funcionalidad de estos ecosistemas y compromete la sostenibilidad de los servicios ambientales que proporcionan a las comunidades locales (MINAM & SERFOR, 2020).

La propagación vegetativa mediante estacas es una herramienta de importancia para la conservación y manejo sostenible de especies forestales amenazadas, ya que permite la multiplicación de individuos con características genéticas superiores, acortando los tiempos de producción y asegurando uniformidad en la calidad del material vegetal (Ribeiro et al., 2020; Silva et al., 2022). Sin embargo, su eficiencia depende de múltiples factores fisiológicos y ambientales, así como del uso de reguladores de crecimiento como el ácido indolbutírico (AIB), cuyo efecto varía significativamente según la dosis y el tiempo de aplicación (Taiz et al., 2015; Xavier et al., 2023). En especies del género *Cedrela*, la literatura científica ha demostrado que tratamientos de AIB pueden incrementar el porcentaje de enraizamiento y mejorar el vigor radicular, aunque estas respuestas son específicas de cada especie y condiciones de manejo, por lo que requieren evaluación experimental (Silva et al., 2022; Xavier et al., 2023). Pese a estos antecedentes, en la región de Cajamarca existe una clara carencia de estudios experimentales que permitan determinar protocolos técnicos de propagación vegetativa aplicables a *C. angustifolia* bajo condiciones de vivero e invernadero adaptados al contexto local. Esta limitación dificulta la implementación de programas de restauración ecológica, reforestación y manejo forestal sostenible que utilicen material de alta calidad genética y sanitaria. Por lo tanto, la presente investigación evaluó experimentalmente el efecto de cuatro concentraciones de AIB (0, 500, 1 500 y 4 500 mg/L) y tres tiempos de inmersión (150, 3 600 y 86 400 s) sobre el enraizamiento de miniestacas de *C. angustifolia* en condiciones de invernadero de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca. Este enfoque factorial permitió identificar las combinaciones más favorables para optimizar la propagación vegetativa, aportando criterios técnicos que contribuyen al fortalecimiento de estrategias de restauración ecológica, reforestación con especies nativas y gestión forestal sostenible en la región.

## **1.1. Problema de la investigación**

### ***1.1.1. Problema general***

¿Cuál es el efecto de cuatro dosis de Ácido Indolbutírico y tres tiempos de exposición en el enraizamiento de estacas de *Cedrela angustifolia*?

### ***1.1.2. Problemas específicos***

¿Cuál es el efecto de las cuatro dosis de Ácido Indolbutírico en el porcentaje de enraizamiento de estacas de *Cedrela angustifolia*?

¿Cómo influyen los tiempos de exposición en combinación con las dosis de Ácido Indolbutírico, sobre la formación de raíces y brotes?

¿Existe interacción significativa entre las dosis de Ácido Indolbutírico y los tiempos de exposición en las variables de enraizamiento?

¿Cuál es la combinación óptima para maximizar el número de raíces, la longitud de raíces y la longitud de brotes?

### ***1.1.3. Planteamiento de la realidad problemática***

*C. angustifolia*, constituye una especie forestal nativa estratégicamente importante por su valor maderable y ecológica dentro de los bosques montanos húmedos. No obstante, su extracción y la limitada regeneración natural han reducido significativamente la densidad de individuos adultos en campo, situación que ha motivado su categorización como especie amenazada a nivel nacional (SERFOR, 2020). En distritos interandinos como Namora, los remanentes boscosos presentan escasa presencia de brinzales y latizales de *C. angustifolia*, evidenciando dificultades en la reposición natural de la especie. Frente a esta realidad, los programas de restauración ecológica y reforestación con especies nativas requieren protocolos técnicos eficientes que permitan producir

plantones de calidad genética y sanitaria en cantidades suficientes. Sin embargo, la propagación sexual mediante semillas en *Cedrela spp.* presenta limitaciones asociadas a irregularidad en la producción de semillas viables, susceptibilidad a plagas y variabilidad genética en descendencia, factores que reducen la uniformidad y previsibilidad de los resultados en campo (Xavier et al., 2023).

Investigaciones previas en especies forestales tropicales, particularmente dentro de la familia Meliaceae, han demostrado que el uso de reguladores de crecimiento, como el ácido indolbutírico, influye de manera significativa en la inducción de raíces adventicias. No obstante, dichos estudios también señalan que la respuesta fisiológica de las estacas depende de múltiples factores, entre ellos la concentración hormonal, el tiempo de exposición y las características del material vegetal, generando resultados inconsistentes en términos de porcentaje de enraizamiento, número de raíces y vigor de los brotes (Ribeiro et al., 2020; Xavier et al., 2023). En el caso específico de *C. angustifolia*, la información disponible resulta aún insuficiente para definir con precisión las condiciones óptimas de aplicación del AIB. Los estudios existentes reportan respuestas contrastantes bajo diferentes esquemas de dosis y tiempos de exposición, lo que limita la transferencia de estos resultados a condiciones productivas y restringe su aplicación práctica en viveros forestales. En la región Cajamarca, la ausencia de investigaciones experimentales sistemáticas adaptadas a las condiciones ambientales locales profundiza esta problemática, dificultando la producción de plantones de calidad para programas de reforestación, restauración ecológica y manejo forestal sostenible. El problema de la presente investigación se centra en la necesidad de precisar y validar experimentalmente la combinación adecuada de dosis de ácido indolbutírico y tiempos de exposición que permita optimizar el enraizamiento de estacas de *C. angustifolia* en condiciones de vivero.

## 1.2. Justificación de la investigación

La conservación y restauración de los ecosistemas forestales montanos constituye un desafío prioritario en el marco de la gestión ambiental, debido a la acelerada pérdida de biodiversidad y la disminución de los servicios ecosistémicos que estos sistemas proveen, tales como la regulación hídrica, el secuestro de carbono, la protección de suelos y la provisión de hábitat (FAO, 2020; MINAM & SERFOR, 2020). En el Perú, esta problemática se agrava en regiones como la de Cajamarca, donde la expansión de actividades agrícolas y ganaderas, así como la explotación forestal selectiva, han fragmentado los remanentes boscosos y reducido la regeneración natural de especies forestales nativas de alto valor ecológico y económico (SERFOR, 2020). Dentro de este contexto, *C. angustifolia* (Meliaceae) se posiciona como una especie forestal de importancia estratégica para las iniciativas de restauración ecológica y manejo forestal sostenible por su elevada calidad maderable y su rol estructural en bosques montanos húmedos (Ames-Martínez et al., 2025). No obstante, la reducción de sus poblaciones naturales, asociada a presiones antrópicas históricas, ha llevado a su categorización como especie amenazada (“En Peligro”, EN) según evaluaciones oficiales del Libro Rojo de la Flora Silvestre Amenazada del Perú (SERFOR, 2020).

A nivel técnico, la propagación vegetativa mediante estacas constituye una herramienta clave para la multiplicación de individuos seleccionados, ya que permite obtener plantones con homogeneidad genética, mayor vigor fisiológico y menor tiempo de producción que la propagación por semillas (Hartmann et al., 2018; Ribeiro et al., 2020). Sin embargo, el éxito del enraizamiento adventicio depende de factores fisiológicos complejos y del manejo de reguladores de crecimiento como el ácido indolbutírico (AIB), cuya eficacia varía en función de la concentración y el tiempo de aplicación (Daud et al., 2021; Kumar et al., 2023). Estudios recientes

en especies forestales y leñosas han demostrado que el uso apropiado de auxinas puede mejorar significativamente el porcentaje de enraizamiento y la calidad de raíces (Dou et al., 2024; Singh, 2024; Tian et al., 2024), aunque las respuestas son específicas de cada especie, tipo de corte y condiciones de manejo. A pesar de estos antecedentes, existe una marcada carencia de información científica experimental que permita establecer protocolos optimizados de enraizamiento para *C. angustifolia* adaptados a las condiciones de vivero e invernadero del contexto andino peruano, especialmente en la región Cajamarca, lo que limita la producción eficiente de plántones de calidad y la implementación de programas de restauración ecológica basados en evidencia (Tian et al., 2024). La presente investigación aborda esta necesidad al evaluar sistemáticamente la respuesta de estacas de *C. angustifolia* a diferentes concentraciones de AIB y tiempos de inmersión bajo condiciones controladas de invernadero. Por lo tanto, la investigación aporta evidencia científica, experimental factorial no solo permite identificar las combinaciones más eficientes para maximizar el enraizamiento, el número de raíces y el vigor de brotación, sino que también proporciona evidencia técnica para estandarizar protocolos de propagación vegetativa, contribuyendo directamente a fortalecer las prácticas de producción forestal en viveros y la gestión de especies nativas amenazadas.

### **1.3. Objetivo de la investigación**

#### ***1.3.1. Objetivo general***

Determinar el efecto de cuatro dosis de Ácido Indolbutírico y tres tiempos de exposición en el enraizamiento de estacas de *Cedrela angustifolia* en condiciones de invernadero.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Evaluar el efecto independiente de las dosis de Ácido Indolbutírico en el porcentaje de enraizamiento.

- Analizar la influencia del tiempo de exposición, en combinación con las dosis de Ácido Indolbutírico, sobre la formación de raíces y brotes.
- Identificar la interacción entre las dosis de Ácido Indolbutírico y los tiempos de exposición en las variables de crecimiento evaluadas.
- Determinar la dosis y el tiempo de exposición que optimizan el enraizamiento de las estacas.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

Paredes et al. (2023) llevaron a cabo un estudio biotecnológico integral sobre *Cedrela odorata* (Meliaceae) en Lambayeque, con el objetivo de evaluar la germinación de semillas, la micropropagación y la conservación de germoplasma in vitro de esta especie de alto valor comercial y vulnerable por la deforestación. La investigación se estructuró en tres fases complementarias: germinación de semillas, micropropagación y conservación de germoplasma in vitro. Para la fase de germinación, emplearon semillas viables sometidas a condiciones controladas de vivero, registrando el porcentaje de germinación y el tiempo de emergencia de plántulas. En la fase de micropropagación, utilizaron explantes vegetativos, principalmente ápices caulinares, cultivados en medios nutritivos estériles bajo condiciones in vitro, donde evaluaron la capacidad de enraizamiento, el desarrollo de brotes y la formación de estructuras vegetativas. Finalmente, para la conservación de germoplasma, mantuvieron los cultivos en condiciones controladas de crecimiento lento durante periodos prolongados, monitoreando variables morfológicas como altura, número de nudos y funcionalidad del sistema radicular. La germinación alcanzó 76,6 % con tiempos de emergencia de 9 a 12 días, y un 83 % de enraizamiento durante la fase de micropropagación, generando plántulas con ápices caulinares de hasta 5,4 cm con 12 nudos. Asimismo, durante la conservación de germoplasma in vitro, los individuos alcanzaron hasta 12 cm de altura, 19 nudos y un sistema radicular funcional después de 30 meses de cultivo. Estos resultados evidencian la viabilidad de las estrategias biotecnológicas para la conservación genética y la producción masiva de material clonal del género *Cedrela*, lo cual constituye un aporte

metodológico valioso para investigaciones sobre enraizamiento por estacas en especies afines como *C. angustifolia*

En la Universidad Nacional Agraria La Molina, Soto (2004) realizó una investigación sobre la propagación vegetativa de *Cedrela odorata* L. mediante el enraizamiento de miniestacas juveniles en cámaras de subirrigación, con el objetivo de evaluar la influencia de diferentes concentraciones de ácido indol-3-butírico (AIB) y tipos de sustrato en el proceso de enraizamiento. El estudio se desarrolló bajo condiciones controladas de vivero, utilizando material vegetal juvenil obtenido de plantas madre seleccionadas, del cual se prepararon miniestacas homogéneas en tamaño y estado fisiológico. Estas fueron tratadas con distintas concentraciones de AIB mediante aplicación directa en la base de las estacas y posteriormente establecidas en cámaras de subirrigación, sistema que permitió mantener condiciones constantes de humedad y temperatura en el sustrato. El diseño experimental consideró la combinación factorial entre concentraciones de AIB y tipos de sustrato, evaluándose variables como porcentaje de enraizamiento, supervivencia de estacas y calidad del sistema radicular. Los resultados evidenciaron que la dosis de 1000 ppm de AIB presentó el mejor desempeño, alcanzando un 50,8 % de enraizamiento y 41,7 % de supervivencia. Asimismo, se determinó que la interacción entre la concentración de AIB y el tipo de sustrato influyó significativamente en la formación de raíces y en la supervivencia de los plantones. Estos resultados destacan la importancia del manejo conjunto de reguladores de crecimiento y condiciones edáficas en la propagación vegetativa de especies forestales, constituyendo un referente metodológico relevante para estudios de enraizamiento de estacas en especies afines como *Cedrela angustifolia*.

Soudre-Zambrano et al. (2011) evaluaron el efecto de diferentes concentraciones de ácido indol-3-butírico (AIB) y tipos de sustrato en el enraizamiento de estacas de *Cedrelinga cateniformis*, con el propósito de identificar las condiciones óptimas para su propagación vegetativa. El estudio se desarrolló bajo condiciones controladas, empleando estacas provenientes de diferentes posiciones del material vegetal, particularmente estacas medias, seleccionadas por su estado fisiológico intermedio. Las estacas fueron tratadas con cinco concentraciones de AIB (0, 1 000, 2 000, 4 000 y 8 000 mg/L), aplicadas en la base mediante inmersión, y posteriormente establecidas en tres tipos de sustrato: arena fina, arena gruesa y grava. El diseño experimental consideró la combinación factorial entre concentraciones de AIB y tipos de sustrato, evaluándose variables como el porcentaje de enraizamiento y la respuesta diferencial según el tipo de estaca. Las unidades experimentales se mantuvieron en sistemas de propagación con condiciones controladas de humedad, específicamente bajo cámaras de subirrigación, lo que permitió optimizar la disponibilidad hídrica en el sustrato. Los resultados indicaron que el mayor porcentaje de enraizamiento (70 %) se obtuvo con la aplicación de 4 000 mg/L de AIB en estacas medias, utilizando arena fina como sustrato. Asimismo, se evidenció que la respuesta al AIB está determinada por la interacción entre la concentración del regulador, el tipo de estaca y las características del sustrato. Estos hallazgos confirman la importancia de la interacción entre factores hormonales y edáficos en la propagación vegetativa de especies forestales, constituyendo un soporte metodológico relevante para investigaciones sobre enraizamiento de estacas en especies afines como *Cedrela angustifolia*.

Sifuentes Yepes (2021) investigó la propagación vegetativa de *Cedrela odorata* en un vivero del Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP), con el objetivo de evaluar la influencia de diferentes dosis de ácido indol-3-butírico (AIB) y tipos de sustrato en el

enraizamiento de estacas. El estudio se desarrolló bajo condiciones controladas de vivero, utilizando estacas obtenidas de plantas madre seleccionadas, las cuales fueron estandarizadas en tamaño y estado fisiológico para reducir la variabilidad experimental. Las estacas fueron tratadas con cuatro concentraciones de AIB (0, 1 000, 3 000 y 5 000 mg/L), mediante aplicación en la base, y posteriormente establecidas en dos tipos de sustrato: arena gruesa y cascarilla de arroz carbonizada. El diseño experimental correspondió a un arreglo factorial que combinó los niveles de AIB y los tipos de sustrato, evaluándose variables como el porcentaje de enraizamiento y la sobrevivencia de las estacas. Las unidades experimentales se mantuvieron bajo condiciones adecuadas de humedad y temperatura, propias de sistemas de propagación en vivero, con el fin de favorecer la formación de raíces adventicias. Los resultados evidenciaron que la combinación de cascarilla de arroz carbonizada con 1 000 mg/L de AIB fue la más eficiente, alcanzando un 82,9 % de enraizamiento y 66,8 % de sobrevivencia. Asimismo, se confirmó que tanto la concentración de AIB como el tipo de sustrato influyen significativamente en el éxito del enraizamiento. Estos hallazgos resaltan la importancia de la interacción entre reguladores de crecimiento y condiciones del sustrato en la propagación vegetativa del género *Cedrela*, constituyendo un referente metodológico clave para investigaciones relacionadas con el enraizamiento de estacas en especies afines como *Cedrela angustifolia*.

Sampayo-Maldonado et al. (2016) evaluaron el efecto del sustrato, el tipo de estaca y la concentración de ácido indol-3-butírico (AIB) en el enraizamiento de estacas de *Cedrela odorata*, con el objetivo de determinar las condiciones óptimas para su propagación vegetativa. El estudio se desarrolló bajo condiciones controladas, empleando un diseño completamente al azar con arreglo factorial, en el que se combinaron cuatro concentraciones de AIB (0, 1 500, 5 000 y 10 000 mg/L), diferentes tipos de estaca (apicales, medias y basales) y distintos sustratos, incluyendo

agrolita y mezclas tradicionales. El material vegetal fue obtenido de plantas madre seleccionadas, a partir del cual se prepararon estacas clasificadas según su posición en la planta, con el fin de evaluar su respuesta diferencial al enraizamiento. Las estacas fueron tratadas con AIB mediante aplicación en la base y posteriormente establecidas en los diferentes sustratos bajo condiciones controladas de humedad y temperatura. El periodo de evaluación se extendió por 20 semanas, durante las cuales se registraron variables como el porcentaje de enraizamiento y el desempeño según tipo de estaca y sustrato. Los resultados mostraron un enraizamiento promedio de 52,7 %; sin embargo, el uso de agrolita incrementó significativamente el enraizamiento en comparación con la mezcla tradicional. Asimismo, la concentración de 1 500 mg/L de AIB permitió alcanzar hasta un 73,3 % de enraizamiento. Las estacas apicales presentaron el mejor desempeño, logrando hasta un 90 % de enraizamiento cuando se combinaron con agrolita y la dosis óptima de AIB. Estos hallazgos evidencian la importancia de la interacción entre factores hormonales, tipo de material vegetal y características del sustrato en la propagación vegetativa de especies forestales, constituyendo un referente metodológico sólido para estudios de enraizamiento en especies afines como *Cedrela angustifolia*.

Núñez Idrogo (2025) tuvo como objetivo desarrollar un protocolo de micropropagación in vitro de *Cedrela angustifolia* a partir de explantes obtenidos de plantones cultivados en condiciones de invernadero. La investigación se llevó a cabo bajo condiciones asépticas de laboratorio, donde se establecieron explantes vegetativos —principalmente segmentos nodales y ápices caulinares en medios de cultivo nutritivos suplementados con diferentes reguladores de crecimiento. El estudio se estructuró en fases, evaluando especialmente la etapa de multiplicación mediante la inducción de brotes, así como la fase de enraizamiento, en la cual se probaron distintas combinaciones hormonales para estimular la formación de raíces adventicias.

El diseño experimental consideró la variación de reguladores de crecimiento en cada fase del cultivo in vitro, registrándose variables como el número de brotes, elongación de los explantes, respuesta morfogénica y viabilidad del material vegetal. Sin embargo, durante la fase de enraizamiento no se logró completar el desarrollo de raíces funcionales, debido a la presencia de problemas fisiológicos recurrentes, tales como hiperhidratación (vitrificación), necrosis tisular y pérdida foliar, lo que limitó la eficiencia del protocolo. Estos resultados evidencian las dificultades inherentes a la propagación clonal in vitro de *C. angustifolia*, particularmente en la inducción de raíces, y resaltan la necesidad de fortalecer investigaciones orientadas a métodos alternativos de propagación vegetativa ex vitro, como el enraizamiento de estacas. En este sentido, el estudio constituye un antecedente clave que justifica la búsqueda de técnicas más eficientes para la propagación de esta especie forestal.

## **2.2. Bases teóricas**

### ***2.2.1. Propagación vegetativa mediante estacas***

Es un método que permite la obtención de nuevas plantas a partir de órganos vegetativos como estacas, esquejes o cladodios, estos poseen tejidos con capacidad de diferenciación celular, particularmente los meristemas, conformados por células totipotenciales capaces de regenerar raíces, brotes y plantas completas. Este tipo de propagación ocurre de manera natural en diversas especies, como cactáceas y suculentas; sin embargo, también constituye una práctica ampliamente utilizada en horticultura y silvicultura para la multiplicación de especies ornamentales, frutales y forestales, ya que permite reproducir individuos genéticamente idénticos en grandes cantidades y en menor tiempo (Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM], s. f.).

El uso de estacas lignificadas o semi lignificadas es común en especies como *Cedrela spp.*, *Swietenia macrophylla* y otros maderables, donde el substrato adecuado y la aplicación de auxinas

mejoran la formación de raíces adventicias (Tian et al., 2024). Otras técnicas, como injertos y acodos, permiten la combinación de genotipos adaptativos para incrementar la resistencia a estrés abióticos y enfermedades. El cultivo de tejidos in vitro, aunque más complejo y costoso, permite la multiplicación masiva de genotipos superiores bajo condiciones estériles, proporcionando material libre de patógenos y con alta uniformidad genética (Singh, 2024).

**2.2.1.1. Propagación clonal o vegetativa en especies forestales nativas.** La propagación clonal o vegetativa constituye una herramienta biotecnológica fundamental para la multiplicación de especies forestales nativas, ya que permite preservar características genéticas superiores, reducir la variación fenotípica y garantizar uniformidad en la calidad de los plantones producidos en vivero. A diferencia de la reproducción sexual, que depende de condiciones ambientales, disponibilidad de semillas y variabilidad genética inherente, la propagación vegetativa asegura la conservación de genotipos valiosos y acelera la producción de material forestal de alta calidad para programas de restauración y manejo forestal sostenible (Hartmann et al., 2018; Ribeiro et al., 2020). Esto resulta especialmente relevante para especies nativas con baja producción de semillas, germinación errática o limitada viabilidad, como ocurre en muchas Meliáceas de los bosques tropicales y montanos.

La eficacia de la propagación vegetativa en especies forestales nativas está condicionada por factores fisiológicos y ambientales que incluyen: el tipo y sanidad del material de propagación, el estado fenológico de la planta madre, las condiciones de manejo en vivero (temperatura, humedad, sustrato) y, de manera crucial, el uso y manejo de reguladores de crecimiento como auxinas exógenas. Estas sustancias, especialmente el ácido indolbutírico (AIB) y el ácido naftalenoacético (ANA), inducen la formación de raíces adventicias al alterar la distribución de auxinas endógenas y estimulando la división celular en la base de los segmentos de corte (Daud et

al., 2021; Kumar et al., 2023). Estudios comparativos han demostrado diferencias significativas en la respuesta de enraizamiento dependiendo de la especie, la concentración de auxina y las condiciones del entorno de propagación, destacando la necesidad de protocolos específicos para cada especie forestal nativa.

**2.2.1.2. Propagación vegetativa en Meliáceas nativas.** Las Meliáceas, familia que incluye especies de alto valor maderable y ecológico como *Cedrela odorata*, *C. angustifolia*, *Swietenia macrophylla* y *Carapa guianensis*, han sido objeto de estudios sobre propagación vegetativa debido a su importancia forestal. Diversos trabajos han documentado la necesidad de ajustar concentraciones de auxinas, tipo de sustratos y manejo de invernadero para mejorar la tasa de enraizamiento en estacas de estas especies (Pérez & García, 2023; López et al., 2025). Por ejemplo, la aplicación de AIB en *Cedrela spp.* ha mostrado aumentos significativos en el porcentaje de enraizamiento en comparación con tratamientos sin auxina, aunque la respuesta varía entre especies y procedencias geográficas. Esto subraya la importancia de generar protocolos experimentales optimizados y basados en evidencia para cada taxón forestal nativo.

### **2.2.1.3. Propagación vegetativa mediante estacas.**

La propagación vegetativa mediante estacas requiere la formación de brotes y raíces adventicias para el establecimiento exitoso de una nueva planta. Este proceso está influenciado por diversos factores fisiológicos y ambientales, entre ellos se incluyen la edad fisiológica del material vegetal, el tipo de estaca, la humedad, la temperatura, la disponibilidad de oxígeno y las características del sustrato. En este último aspecto, el pH del sustrato constituye una variable relevante que, en determinadas especies forestales, aún ha sido poco estudiada, pese a su influencia directa sobre la absorción de nutrientes y la actividad hormonal asociada al enraizamiento (González et al., 2024).

Luego del corte de la estaca, se desencadena una intensa actividad metabólica y celular que da lugar a la formación de un tejido de cicatrización, compuesto principalmente por células parenquimáticas de paredes delgadas y sin diferenciación específica. Este tejido cumple una función protectora fundamental, al reducir la desecación y prevenir la muerte del material vegetal. Posteriormente, y en función de la especie, del estado fisiológico de la estaca y de las condiciones ambientales, pueden originarse primordios radiculares a partir del cambium o de los radios medulares, darán lugar a raíces adventicias que emergen desde la zona de corte o a través de estructuras como las lenticelas. Este proceso fisiológico resulta determinante para el éxito del enraizamiento en especies forestales como *C. angustifolia* (Hartmann et al., 2011; Leakey, 2014).

La técnica de estacado emplea segmentos de tallo, hoja o raíz para la propagación clonal, por lo que su eficacia depende directamente de la capacidad de formación y desarrollo de raíces adventicias y nuevos brotes. Desde el punto de vista fisiológico, la formación de raíces adventicias comprende tres etapas bien definidas: la inducción, asociada a eventos moleculares y bioquímicos regulados principalmente por auxinas; la iniciación, caracterizada por divisiones celulares que originan los primordios radiculares; y la diferenciación, en la cual dichos primordios adquieren organización anatómica y funcional (Guan et al., 2015).

Diversos estudios han demostrado que las estacas obtenidas de material juvenil presentan una mayor capacidad de enraizamiento en comparación con aquellas provenientes de material adulto. Esta diferencia se explica, en parte, por la disminución progresiva del contenido de compuestos fenólicos con la edad, estos actúan como cofactores de las auxinas durante el proceso de inducción radicular. En consecuencia, la edad fisiológica del material vegetal constituye un factor crítico en la eficiencia de la propagación vegetativa (Portal, 2015).

**2.2.1.4. Tipo de Raíces para la propagación vegetativa en especies forestales.** En la propagación vegetativa de especies forestales nativas, el éxito del establecimiento de nuevos individuos depende fundamentalmente de la formación y funcionalidad del sistema radicular. Las raíces que se desarrollan en procesos de propagación clonal no siempre corresponden al sistema radicular primario originado a partir del embrión, sino que pueden derivar de tejidos diferenciados que adquieren nuevamente capacidad meristemática. En este contexto, la comprensión del tipo de raíz que se forma resulta determinante para evaluar la calidad fisiológica del plantón producido (Hartmann et al., 2018).

Desde una perspectiva morfofisiológica, las raíces involucradas en propagación vegetativa pueden clasificarse en raíces primarias, secundarias, adventicias y raíces inducidas, siendo estas últimas las más relevantes en técnicas como el estaquillado, el acodo y el cultivo in vitro

**2.2.1.4.1. Estacas con raíces adventicias.** La formación de raíces adventicias constituye un proceso fundamental en la propagación vegetativa mediante estacas, especialmente en especies forestales maderables (Legué et al., 2014). Este proceso se encuentra regulado tanto por factores ambientales como por reguladores del crecimiento vegetal, y se ve favorecido por altas concentraciones de auxinas y bajas concentraciones de citocininas, lo que genera un balance hormonal propicio para la inducción radicular (Rasmussen, 2016).

Las auxinas desempeñan un papel determinante en la inducción de raíces adventicias. De forma endógena, el ácido indolacético (AIA) se sintetiza principalmente en hojas y brotes jóvenes, desde donde es transportado hacia las zonas basales del tallo (Sedagathoor et al., 2016). De manera exógena, el ácido indol-3-butírico (AIB) es la auxina más empleada para estimular la rizogénesis, debido a su mayor estabilidad química y eficacia en la inducción de raíces adventicias en estacas de diversas especies forestales (de Klerk et al., 1999).

Según Guan et al. (2015), el proceso de formación de raíces adventicias se desarrolla en tres etapas bien definidas: inducción, que comprende los eventos moleculares y bioquímicos previos a la aparición de cambios morfológicos visibles; iniciación, caracterizada por la división y diferenciación celular que da origen a los primordios y meristemas radiculares; y expresión o extensión, etapa en la cual las raíces adventicias continúan su crecimiento y emergen a través de los tejidos del tallo.

**2.2.1.4.2. Estacas con raíces preformadas.** Algunas especies forestales, tales como *Ficus spp.*, *Salix spp.*, *Morus spp.* y *Populus spp.*, presentan raíces preformadas que pueden desarrollarse rápidamente cuando las estacas son expuestas a condiciones adecuadas de luz, humedad y temperatura. Estas raíces pueden originarse de manera natural o como respuesta a lesiones o traumatismos en los tejidos vegetales, lo que evidencia la elevada capacidad regenerativa de ciertas especies para formar estructuras radiculares bajo estímulos ambientales o fisiológicos favorables (Hartmann et al., 2011; Leakey, 2014).

**2.2.1.4.3. La rizogénesis en estaca y sus factores que afectan.** La rizogénesis es el proceso fisiológico mediante el cual se forman raíces adventicias a partir de tejidos no radiculares, como tallos u hojas, y constituye la base de la propagación vegetativa por estacas en numerosas especies forestales y hortícolas. Este proceso permite la clonación de individuos con características genéticas deseables y es ampliamente utilizado en viveros forestales debido a su eficiencia y bajo costo de implementación (Hartmann et al., 2011).

La formación de raíces adventicias (rizogénesis) en estacas depende de múltiples factores, tanto externos (ambientales, de manejo) como internos (fisiológicos, endocrinos). A continuación, se describen los más importantes:

La formación de raíces adventicias en estacas depende de múltiples factores, tanto externos (ambientales y de manejo) como internos (fisiológicos y hormonales). Entre los principales factores se encuentran la edad y condición fisiológica de la planta madre, el tipo de estaca, la época de recolección, el uso de reguladores de crecimiento, las condiciones ambientales (temperatura y humedad), el sustrato de enraizamiento y la condición sanitaria del material vegetal. Si bien existen pocos estudios específicos en especies del género *Cedrela* que analicen aspectos sanitarios del material vegetativo, como la presencia de patógenos o el nivel de reservas fisiológicas, diversas investigaciones coinciden en que el estado fisiológico del árbol madre influye significativamente en el éxito del enraizamiento. En particular, las estacas provenientes de material juvenil, vigoroso y con hojas sanas presentan una mayor capacidad rizogénica, especialmente cuando son tratadas con reguladores de crecimiento bajo condiciones controladas de vivero (Hartmann et al., 2011).

#### **2.2.1.5. Edad de la planta madre y condición fisiológica en producción por estacas.**

Mu et al. (2022) señalan que la edad de la planta madre influye directamente en la capacidad de formación de raíces adventicias, debido a los cambios anatómicos y fisiológicos asociados al envejecimiento del tejido vegetal. El éxito del enraizamiento de las estacas depende, además, de la especie, la edad de la planta donadora, la sección de la rama de la cual se extraen las estacas, el medio de enraizamiento y los reguladores de crecimiento empleados (Klopotek et al., 2012).

En especies del género *Cedrela*, *Swietenia* y *Carapa*, el envejecimiento fisiológico se asocia con: disminución en la concentración endógena de auxinas, incremento en compuestos fenólicos inhibidores del enraizamiento, mayor lignificación del xilema secundario, reducción de la plasticidad celular en tejidos cambiales. Estos cambios reducen la capacidad de las células parenquimáticas de reprogramarse y formar primordios radiculares. Estudios en *Cedrela odorata*

han demostrado que estacas provenientes de material juvenil presentan porcentajes de enraizamiento significativamente superiores a aquellas obtenidas de árboles adultos en etapa reproductiva (Ribeiro et al., 2020; Pérez & García, 2023).

La fase juvenil se caracteriza por una mayor actividad metabólica, elevada relación auxina/citocinina y mayor capacidad de división celular. En contraste, la fase adulta presenta dominancia apical más marcada, menor actividad meristemática y mayor rigidez estructural.

En Meliáceas, se ha observado que: brotes epicórmicos y rebrotes de cepa muestran alta capacidad rizogénica, material procedente de ramas superiores de árboles adultos presenta bajo enraizamiento, el rejuvenecimiento fisiológico mediante poda severa puede restaurar parcialmente la capacidad de enraizamiento. Kumar et al. (2023) señalan que el material juvenil puede duplicar o triplicar la tasa de formación de raíces adventicias respecto a material maduro en especies forestales tropicales.

La selección del material vegetal para la obtención de estacas, en relación con el contenido de carbohidratos, puede evaluarse mediante la robustez del tallo. Los tallos pobres en carbohidratos suelen ser flexibles y blandos, mientras que aquellos ricos en carbohidratos presentan una estructura maciza y rígida, rompiéndose antes de doblarse. No obstante, esta característica puede confundirse con la robustez derivada de la maduración de los tejidos, asociada al engrosamiento y lignificación de las paredes celulares, por lo que debe ser evaluada con criterio técnico (Hartmann et al., 2011).

**2.2.1.6. Condición fisiológica de la planta madre.** Más allá de la edad, la condición fisiológica está determinada por: estado nutricional, balance hídrico, intensidad lumínica recibida, estado sanitario, época de colecta del material. En Meliáceas, la producción de carbohidratos no

estructurales (azúcares solubles y almidón) en los tejidos basales es crucial para el éxito del enraizamiento. La formación de raíces adventicias demanda reservas energéticas que sostengan la diferenciación celular antes de que el nuevo sistema radicular sea funcional (Daud et al., 2021).

Plantas madre sometidas a estrés hídrico severo o deficiencia nutricional presentan menor acumulación de reservas, lo que reduce la viabilidad de las estacas. Asimismo, la colecta en periodos de crecimiento activo, cuando existe mayor flujo de auxinas y carbohidratos, incrementa la tasa de enraizamiento en comparación con periodos de latencia.

**2.2.1.7. Interacción entre edad y aplicación de auxinas.** En Meliáceas, la aplicación exógena de ácido indolbutírico (AIB) puede compensar parcialmente la reducción de auxinas endógenas en material adulto; sin embargo, su efectividad depende del grado de madurez del tejido. Investigaciones recientes en especies leñosas tropicales indican que concentraciones elevadas de AIB no necesariamente superan la limitación fisiológica impuesta por la madurez avanzada del material vegetal (Tian et al., 2024). Esto evidencia que el manejo hormonal debe ir acompañado de una adecuada selección del material madre, priorizando: Árboles jóvenes, plantas en vivero, rebrotes juveniles inducidos por poda.

**2.2.1.8. Selección de árboles de referencia y colecta del material vegetal.** Cuando se emplean rebrotes provenientes de la parte basal de árboles cortados, estos suelen presentar características juveniles, como alto vigor y mayor facilidad de enraizamiento, lo que los convierte en un material adecuado para la propagación por estacas. Las plantas obtenidas mediante este tipo de material conservan dichas características juveniles, por lo que esta estrategia es preferida en especies maderables donde se busca vigor, elevada capacidad de enraizamiento y reducción de la ramificación basal. Para inducir juvenilidad, también se han utilizado con éxito brotes de raíz y brotes provenientes de yemas adventicias. Asimismo, las estacas enraizadas obtenidas a partir de

injertos de árboles adultos pueden comportarse fisiológicamente como juveniles. Por el contrario, los rebrotes obtenidos de la copa del árbol presentan tejidos fisiológicamente más maduros, lo que se traduce en un menor porcentaje de enraizamiento y en la formación de un número reducido de raíces en comparación con el material juvenil. Para la obtención de estacas deben considerarse factores como la alta humedad relativa del aire y la intensidad lumínica. La colecta de ramas de la planta donadora debe realizarse evitando las horas de mayor insolación, con el fin de reducir la pérdida de agua. Se recomienda seleccionar ramas con tres a cuatro nudos, lo que asegura una mayor capacidad de enraizamiento. Además, las hojas excesivamente grandes favorecen la transpiración y pérdida de agua, mientras que las muy pequeñas limitan la producción de carbohidratos y otras sustancias necesarias para la supervivencia del esqueje (Quiñones, 2015).

**2.2.1.9. Época de recolección de las estacas.** La cantidad de reservas nutricionales y de sustancias cofactoras del enraizamiento depende, en gran medida, de la época del año en que se recolectan las estacas y del tipo de planta, ya sea perenne o caduca. En las plantas caducas, el contenido de carbohidratos almacenados presenta una mayor variación estacional en comparación con las perennes. En este sentido, la época de recolección puede influir significativamente en el enraizamiento, ya que se relaciona con los balances hormonales internos de la planta madre y con la proporción de cofactores e inhibidores endógenos presentes en las estacas al momento de la colecta (Hartmann et al., 2011).

**2.2.1.10. selección de características de la especie para propagación asexual.** La selección de los árboles para propagación se realiza exclusivamente en plantaciones, con base en la expresión fenotípica de caracteres de interés productivo y de calidad. Sin embargo, dicha expresión fenotípica se encuentra influenciada por factores ambientales y genéticos, incluyendo efectos de dominancia y epistasia, pueden ser elevados y generar confusión en el proceso de

selección (Cruz, 2005). En consecuencia, el seleccionador no siempre puede distinguir con precisión entre un individuo genéticamente superior y otro que aparenta serlo únicamente por efecto del ambiente.

Para validar la superioridad fenotípica del árbol candidato en relación con sus mejores vecinos, se analizan dos criterios fundamentales: los caracteres asociados al volumen de producción y aquellos relacionados con la calidad del fuste y la madera. La evaluación conjunta de estos criterios permite una selección más objetiva y confiable del material vegetal destinado a programas de propagación vegetativa y mejoramiento forestal (Vallejos, 2007).

### ***2.2.2. Reguladores de crecimiento para el enraizamiento asexual***

El éxito del enraizamiento de las estacas está determinado por diversos factores, entre los que destacan la especie vegetal, la edad de la planta donadora, la sección de la rama de donde se obtienen las estacas, el medio de enraizamiento y el tipo de reguladores de crecimiento empleados (Klopotek et al., 2012).

**2.2.2.1. Bases fisiológicas de los reguladores de crecimiento en del enraizamiento asexual.** El enraizamiento asexual en plantas leñosas constituye un proceso morfogénico complejo que implica la desdiferenciación celular, la formación de primordios radiculares y la posterior emergencia de raíces adventicias. Este fenómeno está regulado principalmente por fitohormonas, siendo las auxinas los reguladores de crecimiento más determinantes en la inducción y desarrollo de raíces adventicias; Durante la fase de inducción, la acumulación localizada de auxinas en la base de la estaca desencadena la activación de genes asociados con la división celular y la reorganización vascular. Posteriormente, en la fase de iniciación, se forman primordios radiculares que se conectan al sistema vascular del tallo, permitiendo finalmente la expresión y elongación de la raíz. (Taiz et al., 2015).

**2.2.2.2. Auxinas: principales reguladores del enraizamiento.** Las auxinas constituyen el grupo hormonal más importante en la propagación vegetativa. Las más utilizadas en especies forestales son:

- Ácido indol-3-acético (IAA) – auxina natural.
- Ácido indolbutírico (AIB).
- Ácido naftalenoacético (ANA).

**2.2.2.2.1. Ácido indolbutírico (AIB).** El AIB es el regulador más empleado en viveros forestales debido a su estabilidad química y mayor persistencia en tejidos vegetales en comparación con el IAA. Actúa promoviendo la acumulación de auxina activa en el sitio de aplicación y estimulando la diferenciación de células cambiales hacia meristemos radiculares (Daud et al., 2021).

En especies leñosas tropicales, incluidas varias Meliáceas como *Cedrela spp.* y *Swietenia spp.*, el AIB ha demostrado incrementar significativamente el porcentaje de enraizamiento, el número de raíces y la calidad del sistema radicular cuando se aplica en concentraciones adecuadas (Kumar et al., 2023).

El ácido indolbutírico es una auxina sintética caracterizada por su fotoestabilidad, baja toxicidad, acción localizada y menor sensibilidad a la degradación biológica, lo que explica su amplio uso en la propagación vegetativa de especies leñosas (Husen, 2012). Además, se ha reportado que esta molécula puede ser sintetizada de manera natural por ciertas especies vegetales.

En la práctica, las auxinas suelen disolverse en alcohol etílico y mezclarse posteriormente con un material inerte, como el talco, hasta lograr una completa homogeneización. Una vez evaporado el alcohol, la mezcla es pulverizada para obtener formulaciones en polvo con

concentraciones que oscilan entre 4 000 y 6 000 mg/L, las cuales son aplicadas directamente a las estacas (Casanova & Sáez et al., 2021).

El AIB es ampliamente utilizado para estimular la formación de raíces adventicias, ya que promueve la iniciación y elongación radicular mediante la regulación de rutas de señalización hormonal y la expresión de genes asociados al desarrollo de raíces. Su acción se vincula, en parte, a su conversión en ácido indol-3-acético, principal auxina natural de las plantas, así como a su interacción con otros reguladores hormonales. Estos procesos explican su eficacia en la formación de sistemas radiculares más desarrollados, incluso bajo condiciones ambientales adversas (Emenecker & Strader, 2020).

**2.2.2.2. Factores que condicionan la respuesta a reguladores de crecimiento.** La eficacia de los reguladores de crecimiento en el enraizamiento asexual depende de:

- Edad fisiológica del material vegetal.
- Estado nutricional de la planta madre.
- Tipo de estaca (herbácea, semileñosa, leñosa).
- Método de aplicación (inmersión rápida, inmersión prolongada, polvo).
- Concentración y tiempo de exposición.

En especies forestales tropicales, la respuesta a auxinas es altamente específica, por lo que la estandarización de protocolos experimentales resulta indispensable para cada taxón (Ribeiro et al., 2020).

**2.2.2.2.3. Implicancias en especies forestales nativas y Meliáceas.** En especies forestales nativas de la familia Meliaceae, como *Cedrela spp.* y *Swietenia spp.*, la aplicación de reguladores de crecimiento ha demostrado ser determinante para superar la limitada capacidad de enraizamiento natural. La optimización de concentraciones de AIB permite mejorar

significativamente la calidad morfofisiológica del sistema radicular, incrementando la supervivencia en campo y la eficiencia de programas de restauración ecológica.

Desde la perspectiva de gestión ambiental, la aplicación controlada de reguladores de crecimiento no solo tiene implicancias productivas, sino también estratégicas para la conservación *ex situ* y la recuperación de especies forestales amenazadas.

Durante la fase de inducción, la acumulación localizada de auxinas en la base de la estaca desencadena la activación de genes asociados con la división celular y la reorganización vascular. Posteriormente, en la fase de iniciación, se forman primordios radiculares que se conectan al sistema vascular del tallo, permitiendo finalmente la expresión y elongación de la raíz. La aplicación exógena de reguladores de crecimiento, particularmente el ácido indolbutírico (AIB), ha demostrado ser eficaz en la inducción de raíces adventicias en numerosas especies forestales y leñosas, mejorando el porcentaje de enraizamiento y parámetros de calidad como número de raíces, vigor radicular y supervivencia en vivero y campo, lo que repercute directamente en la calidad de la planta producida (López et al., 2025).

### ***2.2.3. Sustrato en el enraizamiento***

El sustrato constituye un factor determinante en el proceso de enraizamiento, ya que debe presentar características adecuadas que permitan una correcta retención de agua y nutrientes, así como una estructura física favorable para el desarrollo saludable del sistema radicular (Morales, 2021).

La selección del sustrato depende del tipo de especie y de sus requerimientos fisiológicos específicos, lo que garantiza un entorno óptimo para el crecimiento y desarrollo de las estacas (Villegas et al., 2017). Entre las propiedades que influyen directamente en la porosidad y aireación

del sustrato se encuentran el tamaño, la forma de las partículas y la uniformidad de las mezclas utilizadas.

**2.2.3.1. Influencia de la mezcla de sustratos en el enraizamiento de estacas.** La composición física y química del sustrato es determinante para la formación de raíces adventicias en estacas. Diversos estudios indican que los medios que combinan componentes orgánicos, como turba, con materiales inorgánicos, como vermiculita o arena, proporcionan mejores condiciones de aireación y retención de humedad. Estas características favorecen una mayor frecuencia de enraizamiento, así como un incremento en el número y longitud de las raíces en distintas especies vegetales.

Asimismo, se ha demostrado que la combinación de sustratos con propiedades físicas complementarias, como arena y turba, mejora significativamente los atributos radiculares, debido a un equilibrio adecuado entre drenaje y retención de humedad. Estos resultados evidencian que un enraizamiento efectivo requiere sustratos que eviten la saturación excesiva de agua y proporcionen espacios adecuados para la oxigenación radicular (Kinyua et al., 2025).

**2.2.3.2. Mezclas y soporte físico del sustrato.** Estudios de síntesis sobre medios de enraizamiento señalan que materiales como perlita, arena y mezclas de turba con vermiculita ofrecen distintos balances entre porosidad y retención hídrica (tabla 1), lo que incide directamente en la eficiencia de formación de raíces en estacas. Los materiales inorgánicos porosos, como la perlita, favorecen una mayor aireación, mientras que los componentes orgánicos, como la turba, destacan por su capacidad de retener agua y nutrientes.

En este contexto, las mezclas de sustratos suelen superar el desempeño de los medios individuales, logrando mayores porcentajes de enraizamiento y un mejor desarrollo del sistema radicular (Kinyua et al., 2025).

**Tabla 1**

*Comparación de sustratos y mezclas utilizados en el enraizamiento de estacas, según componentes, propiedades físicas y respuesta típica de enraizamiento*

<b>Sustrato o mezcla</b>	<b>físicas principales</b>	<b>Efecto sobre el enraizamiento</b> <b>Propiedades</b>
Perlita	Alta porosidad, excelente aireación, bajo peso volumétrico	Incrementa el porcentaje de enraizamiento y favorece el desarrollo de raíces adventicias largas y bien distribuidas
Arena	Alto drenaje, baja retención de agua, buena estabilidad	Adecuada para especies tolerantes a baja humedad; puede limitar el crecimiento radicular si se usa sola
Turba + perlita	Buena retención de humedad y adecuada aireación	Mejora el número y longitud de raíces en comparación con sustratos individuales
Cocopeat + perlita	Alta capacidad de retención hídrica combinada con buena oxigenación	Favorece un enraizamiento uniforme y mejora la calidad de las estacas
Arena + perlita	Equilibrio entre drenaje y retención de humedad	Aumenta el número de raíces y reduce problemas de anegamiento
Mezclas múltiples (arena + cocopeat + perlita)	Balance óptimo de aireación, retención de agua y soporte físico	Generalmente presentan mayores porcentajes de enraizamiento y mejor vigor radicular

---

**Nota.** La eficiencia del sustrato para el enraizamiento de estacas depende de sus propiedades físicas, así como de la especie vegetal y de las condiciones ambientales.

#### **2.2.4. Descripción taxonómica de la *Cedrela angustifolia***

*C. angustifolia* es una especie arbórea perteneciente al reino Plantae, división Magnoliophyta, clase Magnoliopsida, orden Sapindales y familia Meliaceae, la cual agrupa a plantas leñosas angiospermas reconocidas por el alto valor comercial de su madera y por la presencia de hojas compuestas. Esta clasificación taxonómica refleja relaciones evolutivas y morfológicas bien definidas dentro de las angiospermas leñosas tropicales y subtropicales del Nuevo Mundo, siendo *Cedrela* un género claramente delimitado dentro de las Sapindales (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR], 2021).

El nombre científico de la especie es *C. angustifolia* y entre sus nombres comunes se incluyen “cedro de altura”, “cedro cebollo”, “cedro rosado” y “cedro salteño” (SERFOR, 2021).

**2.2.4.1. Distribución geográfica y hábitat.** *C. angustifolia* es una especie nativa de Sudamérica, distribuida principalmente en bosques andinos desde el sur de Ecuador hasta el noroeste de Argentina, incluyendo territorios de Perú y Bolivia. Se desarrolla en bosques montanos y submontanos, generalmente entre los 1 000 y 3 400 m s. n. m., lo que evidencia su adaptación a condiciones climáticas relativamente frías en comparación con otras especies del género predominantemente tropical. Esta amplitud altitudinal sugiere una elevada plasticidad ecológica y una historia evolutiva asociada a ambientes montanos andinos (CIFOR-ICRAF, 2023).

**2.2.4.2. Descripción morfológica de la especie en estudio.** La *C. angustifolia* es una especie forestal de gran porte que presenta un fuste recto y cilíndrico, alcanzando comúnmente alturas entre 30 y 40 m, pudiendo llegar hasta 60 m bajo condiciones ambientales óptimas. La copa es abierta, con ramificación concentrada principalmente en el tercio superior del árbol. La corteza externa es de color grisáceo a marrón claro, con fisuras longitudinales bien marcadas y lenticelas

pequeñas; la corteza interna es fibrosa, de tonalidad crema y con un olor característico. Las ramillas jóvenes son glabras o ligeramente pubescentes, con lenticelas visibles (CIFOR-ICRAF, 2023).

Las hojas son compuestas, paripinnadas y dispuestas de forma alterna, con longitudes que oscilan entre 30 y 40 cm. Presentan de siete a nueve pares de folíolos de forma oblongo-ovada a oblongo-lanceolada, con dimensiones aproximadas de 13–16 cm de largo por 3–5 cm de ancho. El ápice es agudo a acuminado, la base ligeramente asimétrica y el margen entero. En hojas jóvenes, se observa pubescencia en las nervaduras principales (CIFOR-ICRAF, 2023).

Las inflorescencias son panículas terminales multifloras, de 25–50 cm de longitud, ligeramente puberulentas. Las flores son pequeñas, hermafroditas, con longitudes de 6–10 mm, presentan un cáliz cupuliforme con lóbulos irregulares y pétalos elípticos densamente pubescentes. Los estambres poseen filamentos carnosos y anteras apiculadas, mientras que el ovario es globoso, puberulento, con estilo corto y estigma capitado (CIFOR-ICRAF, 2023).

El fruto es una cápsula leñosa de 3–5 cm de largo que, al madurar, se abre en cinco valvas delgadas, liberando numerosas semillas aladas que se dispersan por acción del viento, favoreciendo la regeneración natural de la especie (MINAM, 2017).

**2.2.4.3. Caracteres diagnósticos, importancia y usos.** Dentro de las especies andinas del género *Cedrela*, *C. angustifolia* se distingue por su corteza externa agrietada de color marrón claro y por presentar láminas foliares predominantemente glabras, con ápice marcadamente acuminado, características útiles para su identificación en campo (CIFOR-ICRAF, 2023).

La madera de *C. angustifolia* es de excelente calidad, con grano recto, textura y densidad medias y coloración rojiza. Es altamente trabajable, durable y apta para ebanistería fina. Presenta buen comportamiento durante el secado al aire libre, con baja tendencia a deformaciones. Su trabajabilidad es elevada tanto con herramientas manuales como en procesos de maquinado,

ofreciendo un acabado fino y un alto pulimento; además, acepta y retiene adecuadamente clavos y tornillos. En cuanto a su durabilidad natural, es moderadamente resistente al ataque de hongos e insectos, con una vida útil estimada en exteriores de 5–10 años, siendo poco susceptible a perforadores marinos y raramente atacada por termitas, superando en este aspecto a la caoba (*Swietenia* spp.) (CIFOR-ICRAF, 2023).

Los usos actuales de esta especie incluyen la fabricación de instrumentos musicales, decoración de interiores, carpintería, ebanistería, embarcaciones menores, chapas decorativas, cajas para empaques finos, pisos, paneles, contrachapados, moldes de fundición, puertas, ventanas, molduras, tableros decorativos, tableros de partículas, artesanía y trabajos de tornería (Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana [IIAP], 2023).

### **2.3. Definición de términos básicos**

**Ácido indolbutírico (AIB).** - El ácido indolbutírico es una auxina sintética ampliamente utilizada como regulador de crecimiento vegetal para inducir la formación de raíces adventicias en propagación vegetativa. Actúa estimulando la división y diferenciación celular en tejidos meristemáticos, favoreciendo la iniciación radicular (Hartmann et al., 2018; Taiz et al., 2015).

**Enraizamiento adventicio.** - Proceso fisiológico mediante el cual se forman raíces a partir de tejidos no radiculares, como tallos u hojas, generalmente inducido por auxinas y condiciones ambientales controladas. Es fundamental en la propagación clonal de especies forestales (Druege et al., 2019).

**Estaca (estaquilla).** - Fragmento vegetativo de tallo, raíz u hoja separado de la planta madre con capacidad de regenerar un nuevo individuo genéticamente idéntico bajo condiciones adecuadas. Es una técnica común en silvicultura clonal (Hartmann et al., 2018).

**Propagación vegetativa.** - Método de reproducción asexual que permite obtener individuos genéticamente idénticos a la planta madre, garantizando uniformidad fenotípica y conservación de características deseables (FAO, 2020).

**Auxinas.** - Grupo de fitohormonas responsables de regular procesos como elongación celular, dominancia apical y formación de raíces adventicias. El AIB pertenece a este grupo y es una de las auxinas más empleadas en viveros forestales (Taiz et al., 2015).

**Concentración hormonal.** - Cantidad de regulador de crecimiento presente en una solución aplicada al material vegetal, generalmente expresada en mg/L. Su efecto depende de la dosis y del balance hormonal interno de la planta (Druege et al., 2019).

**Tiempo de exposición.** - Período durante el cual el material vegetal permanece en contacto con la solución hormonal. La duración influye en la absorción del regulador y en la respuesta fisiológica del tejido (Hartmann et al., 2018).

**Germoplasma.** - Conjunto de recursos genéticos vegetales disponibles para conservación, mejoramiento y restauración. Incluye semillas, tejidos y material clonal que preservan la variabilidad genética de una especie (FAO, 2020).

**Micropropagación.** - Técnica de cultivo in vitro que permite la multiplicación masiva de plantas bajo condiciones estériles, utilizando medios nutritivos y reguladores de crecimiento. Es una estrategia clave en conservación de especies forestales (Lloyd & McCown, 2019).

**Restauración ecológica.** - Proceso orientado a recuperar la estructura, función y diversidad de ecosistemas degradados mediante intervenciones técnicas basadas en principios ecológicos (SERFOR, 2021).

## 2.4. Tratamiento en estudio

Los tratamientos se establecieron en función de dos factores experimentales derivados de las variables independientes del estudio: la dosis de ácido indolbutírico (AIB) y el tiempo de exposición de las estacas a la solución hormonal de la combinación de los niveles de ambos factores se obtuvo un total de 12 tratamientos (Tabla 2).

### **Factor D: Dosis de ácido indol butírico (mg/L)**

- $D_0 = 0$  mg/L
- $D_1 = 500$  mg/L
- $D_2 = 1\ 500$  mg/L
- $D_3 = 4\ 500$  mg/L

### **Factor T: Tiempo de exposición de la estaca a la solución de AIB (s)**

- $T_1 = 150$  s
- $T_2 = 3\ 600$  s (1 h)
- $T_3 = 86\ 400$  s (24 h)

**Tabla 2**

*Estructura de tratamientos del diseño factorial (dosis de AIB × tiempo de exposición) aplicados al enraizamiento de estacas de Cedrela angustifolia*

N°	Clave	Descripción
1	D <sub>0</sub> T <sub>1</sub>	0 mg/L de AIB + 150 s de exposición
2	D <sub>0</sub> T <sub>2</sub>	0 mg/L de AIB + 3 600 s (1 h) de exposición
3	D <sub>0</sub> T <sub>3</sub>	0 mg/L de AIB + 86 400 s (24 h) de exposición
4	D <sub>1</sub> T <sub>1</sub>	500 mg/L de AIB + 150 s de exposición
5	D <sub>1</sub> T <sub>2</sub>	500 mg/L de AIB + 3 600 s (1 h) de exposición
6	D <sub>1</sub> T <sub>3</sub>	500 mg/L de AIB + 86 400 s (24 h) de exposición
7	D <sub>2</sub> T <sub>1</sub>	1 500 mg/L de AIB + 150 s de exposición
8	D <sub>2</sub> T <sub>2</sub>	1 500 mg/L de AIB + 3 600 s (1 h) de exposición
9	D <sub>2</sub> T <sub>3</sub>	1 500 mg/L de AIB + 86 400 s (24 h) de exposición
10	D <sub>3</sub> T <sub>1</sub>	4 500 mg/L de AIB + 150 s de exposición
11	D <sub>3</sub> T <sub>2</sub>	4 500 mg/L de AIB + 3 600 s (1 h) de exposición
12	D <sub>3</sub> T <sub>3</sub>	4 500 mg/L de AIB + 86 400 s (24 h) de exposición

**Nota.** D<sub>0</sub>, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> y D<sub>3</sub> corresponden a las dosis de ácido indolbutírico (AIB): 0, 500, 1 500 y 4 500 mg/L, respectivamente; mientras que T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub> representan los tiempos de exposición de 150 s,

3 600 s (1 h) y 86 400 s (24 h). La combinación de ambos factores dio lugar a 12 tratamientos evaluados en el experimento.

#### ***2.4. 1. Diseño experimental***

El estudio se condujo bajo un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial  $4 \times 3$ , correspondiente a cuatro niveles de dosis de AIB y tres tiempos de exposición. Este diseño se seleccionó por ser adecuado cuando las unidades experimentales son homogéneas y se busca evaluar tanto los efectos principales como la interacción entre los factores en estudio. El experimento comprendió un total de 12 tratamientos, cada uno con tres repeticiones, utilizando 15 estacas por repetición, lo que resultó en un total de 540 unidades experimentales. Las estacas fueron distribuidas aleatoriamente dentro del área experimental, asegurando condiciones homogéneas y minimizando la influencia de variables no controladas.

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la significancia estadística de los efectos de los factores y su interacción. Cuando se detectaron diferencias significativas ( $\alpha < 0,05$ ), las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey, con un nivel de confianza del 95 %.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Localización del Estudio

El presente estudio se desarrolló con material vegetal proveniente de árboles madre de *C. angustifolia*, especie forestal de importancia ecológica y económica, seleccionados en un bosque natural ubicado en el caserío Caucau, distrito de Namora, provincia y departamento de Cajamarca, Perú. Esta localidad forma parte de los valles interandinos de la región norandina, caracterizados por pisos ecológicos de montaña y climas templados asociados a elevaciones intermedias de los Andes (MINAM, 2020).

La zona de donde se extrajo la muestra se localiza geográficamente (Figura 1), entre las coordenadas 78°27'93.58" O y 7°21'86.03" S, con una altitud de 2 754 m s. n. m., clima templado y una topografía accidentada de relieve interandino, donde predominan temperaturas medias templadas (15 °C) con marcada variación diurna y estaciones secas y húmedas bien definidas por la pluviometría anual (Municipalidad Distrital de Namora, 2025). Estas elevaciones favorecen condiciones microclimáticas que inciden directamente en los procesos fisiológicos del material vegetal, como tasas de transpiración, fotosíntesis y formación de raíces adventicias. Posteriormente, las estacas se instalaron en el invernadero de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de Cajamarca, donde se condujo la fase experimental de enraizamiento. La combinación de una procedencia ecológicamente representativa y un ambiente experimental con variables controladas permitió reducir la variabilidad externa y asegurar la validez interna del estudio, cumpliendo con los criterios metodológicos exigidos para investigaciones.

### **3.2. Materiales, equipos e insumos**

Para la ejecución del experimento se emplearon materiales, equipos e insumos clasificados según su función en las fases de campo, laboratorio e invernadero, garantizando la trazabilidad y control de las variables experimentales.

#### **3.2.1. Material genético en estudio**

El material vegetal estuvo constituido por 540 estacas juveniles de *C. angustifolia*, obtenidas del tercio medio de la copa de 20 árboles madre seleccionados en un bosque natural del caserío Caucau (Namora, Cajamarca).

Las estacas presentaron las siguientes características promedio:

- Longitud: 20 cm
- Diámetro: 1,5 cm
- Cinco yemas axilares funcionales

La selección del material respondió a criterios de sanidad, vigor y uniformidad morfológica, a fin de reducir la variabilidad experimental.

#### **3.2.2. Equipos**

##### **Equipo de campo.**

- Sistema de Posicionamiento Global (GPS) Garmin eTrex 20, utilizado para el registro georreferenciado de los árboles madre.
- Wincha metálica de 50 m para medición de distancias.
- Cámara digital para registro fotográfico del sitio y del material vegetal.

### **Equipo de laboratorio e invernadero**

- Balanza analítica de precisión estándar ( $\pm 0,01$  g), utilizada para el pesaje del regulador de crecimiento.
- Regla milimétrica y regla centimetrada para medición de longitud de raíces y brotes.
- Tablero de apoyo para registro y organización de datos.
- Zaranda metálica con marco de 2 m para tamizado del sustrato.
- Regadera metálica para riego controlado.

### **3.2.3. Materiales de laboratorio**

- Matraz de vidrio (capacidad 250 mL)
- Tubos de ensayo de vidrio
- Papel bond tamaño A4
- Plumón indeleble para rotulado
- Lapiceros
- Libreta de campo para registro primario de datos

### **3.2.4. Insumos y reactivos**

- Regulador de crecimiento: Ácido indolbutírico (AIB), utilizado en concentraciones experimentales de 0, 500, 1500 y 4500 mg/L.
- Etanol al 96 %, empleado como solvente para la disolución inicial del AIB.
- Arena gruesa de río, tamizada a 2 mm, utilizada como sustrato inerte de enraizamiento.

- Cuatro baldes plásticos graduados para preparación y manejo de soluciones.

### ***3.2.5. Herramientas de campo***

- Tijera de podar para corte de estacas.
- Bisturí para cortes basales precisos.
- Forcípula de madera para manipulación del material vegetal.
- Cinta métrica para medición de dimensiones dendrométricas.

## **3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### ***3.3.1. Selección de las plantas madre***

La recolección del material vegetal se realizó a partir de la selección de 20 plantas madre de *C. angustifolia*, identificadas en el área de estudio, utilizando criterios descriptivos fenotípicos y silviculturales favorables. La selección de los árboles madre se llevó a cabo con el propósito de identificar individuos superiores que presentaran condiciones adecuadas para la obtención de material vegetativo con alta calidad fisiológica.

Los criterios de selección considerados incluyeron el buen estado fitosanitario, el vigor vegetativo, la arquitectura adecuada del fuste y la ausencia de daños mecánicos visibles o signos de estrés biótico y abiótico. Estos criterios permitieron asegurar que el material vegetal empleado en el experimento proviniera de individuos genéticamente y fisiológicamente aptos para los procesos de propagación vegetativa evaluados.

La evaluación de dichos criterios se realizó mediante observación directa en campo, constituyendo esta técnica el principal método de recolección de datos cualitativos para la identificación de las plantas madre. Como instrumento de registro se empleó una ficha de

evaluación fenotípica, diseñada específicamente para el estudio, en la cual se consignaron las características morfológicas y sanitarias de cada individuo seleccionado.

Los criterios evaluados durante el proceso de selección de las plantas madre se presentan de manera ilustrativa en la (Figura 2), la cual muestra un ejemplar representativo de *C. angustifolia* seleccionado en el bosque natural del caserío Caucau, distrito de Namora.

## **Figura 2**

*Selección de la planta madre de C. angustifolia en el bosque natural del caserío de Caucau, distrito de Namora*



**Nota.** Fotografía tomada durante el trabajo de campo realizado en el área de estudio.

### **3.3.1.1. Características fenotípicas favorables de la planta madre.**

**3.3.1.1.1. Diámetro a la altura del pecho (DAP).** El diámetro a la altura del pecho (DAP) se midió a 1,30 m sobre el nivel del suelo, utilizando una forcípula forestal debidamente calibrada. Los valores obtenidos se registraron en centímetros (cm). Se consideraron como árboles superiores aquellos individuos que presentaron los mayores valores de DAP dentro de la población evaluada, dado que este parámetro se asocia con mayor vigor, desarrollo estructural y capacidad de producción de material vegetativo. De dichos individuos se obtuvieron las estacas destinadas a la propagación vegetativa.

**3.3.1.1.2. Diámetro de la copa (DCM y DCMY).** El diámetro de copa corresponde a la proyección horizontal de la copa sobre el suelo, determinada a partir de los puntos más distantes de su perímetro. Para su evaluación se midieron el diámetro de copa mayor (DCMY) y el diámetro de copa menor (DCM), trazados de manera perpendicular entre sí, utilizando una wincha métrica. Los valores se expresaron en metros (m). Se seleccionaron preferentemente aquellos árboles que presentaron mayores diámetros de copa, por considerarse indicativos de una mayor área foliar, capacidad fotosintética y vigor general del individuo.

**3.3.1.1.3. Altura total (AT).** La altura total del árbol se midió mediante un hipsómetro y correspondió a la distancia vertical comprendida entre la base del fuste y el punto más alto de la copa. Los valores se registraron en metros (m). Se consideraron como árboles madre aquellos individuos que presentaron mayores alturas totales, dado que este parámetro refleja un crecimiento adecuado y condiciones favorables de desarrollo en el sitio.

**3.3.1.1.4. Altura a la primera bifurcación.** La altura a la primera bifurcación se determinó mediante el uso de un hipsómetro y correspondió a la distancia vertical desde la base del fuste hasta el punto en el cual este se divide en dos o más ejes principales. Los valores se expresaron en

metros (m). Se seleccionaron como árboles madre aquellos individuos cuya primera bifurcación se ubicó a mayor altura respecto a la base del árbol, debido a que esta característica está asociada con una mejor conformación del fuste y mayor aprovechamiento del material vegetativo.

**3.3.1.1.5. Rectitud del fuste.** La rectitud del fuste se evaluó de manera cualitativa mediante la clasificación de los individuos en seis categorías: completamente recto, aceptable, regular, torcido, muy torcido y deforme. Para el presente estudio se seleccionaron como donantes de material vegetativo únicamente los individuos clasificados en las categorías aceptable y regular. Cabe señalar que, debido a que los árboles evaluados corresponden a relictos de bosque natural y no han recibido manejo silvicultural durante su desarrollo, no se identificaron individuos completamente rectos; por ello, se priorizaron aquellos que cumplieron con los criterios mínimos establecidos.

**3.3.1.1.6. Estado fitosanitario.** El estado fitosanitario de los árboles madre se evaluó mediante observación directa del fuste, la copa y el follaje, considerando la presencia o ausencia de plagas y enfermedades. Se seleccionaron como árboles madre únicamente aquellos individuos que no presentaron síntomas visibles de daño fitosanitario.

Durante la evaluación se prestó especial atención a la presencia de insectos perforadores del brote apical, como *Hypsipyla* spp., así como a signos de enfermedades fúngicas, tales como pudriciones, canchales o manchas foliares, las cuales han sido reportadas como problemas fitosanitarios frecuentes en especies del género *Cedrela*. Los individuos que presentaron cualquiera de estas afectaciones fueron excluidos del proceso de selección.

### ***3.3.2. Selección y obtención de estaquillas a partir de plantas madre***

Las estaquillas fueron colectadas durante las primeras horas de la mañana, con la finalidad de minimizar el estrés hídrico del material vegetal, el cual suele incrementarse debido a la exposición a la radiación solar y a las altas tasas de transpiración propias de las horas posteriores del día. Esta práctica permitió preservar el contenido hídrico y la viabilidad fisiológica de las estacas destinadas a la propagación vegetativa.

En cada estaquilla se conservó una hoja funcional, con el propósito de mantener la actividad fotosintética y la disponibilidad de asimilados, auxinas endógenas y otras sustancias fisiológicamente activas que intervienen en la inducción y formación de raíces adventicias. Durante el proceso de recolección, el material vegetal fue colocado inmediatamente en un recipiente hermético tipo caja hielera, a fin de evitar la pérdida de humedad y reducir el deterioro fisiológico previo a su establecimiento.

Para la selección de las estaquillas se consideraron los siguientes criterios:

**3.3.2.1. Ubicación en la copa.** Las estacas se obtuvieron del tercio medio de la copa de los árboles madre, determinado mediante observación directa y la división visual de la copa en tres secciones equivalentes. Esta zona fue seleccionada debido a que presenta un equilibrio adecuado entre tejidos juveniles y maduros, así como una mayor concentración de reguladores de crecimiento endógenos asociados al proceso de enraizamiento. La extracción del material vegetativo se realizó utilizando tijeras de podar previamente desinfectadas, con el fin de evitar contaminaciones y daños innecesarios al tejido vegetal.

**3.3.2.2. Edad fisiológica de las ramas.** Se seleccionaron ramas con una edad fisiológica aproximada de dos años, identificadas en función de su coloración externa, textura y grado de lignificación. Estas ramas presentaron una consistencia semileñosa a leñosa, caracterizada por ser

rígidas y quebradizas al momento de la flexión, condición considerada adecuada para la propagación vegetativa en especies forestales del género *Cedrela*.

### **3.3.3. Preparación, caracterización y manejo de estacas de *Cedrela angustifolia***

Las estacas obtenidas de *C. angustifolia* presentaron un diámetro promedio de aproximadamente 1,5 cm, el cual fue medido utilizando una cinta métrica. Asimismo, la longitud promedio de las estacas fue de 20 cm, determinada con el mismo instrumento, con el objetivo de garantizar la homogeneidad del material vegetal empleado en el experimento.

Cada estaca contó con un promedio de cinco yemas axilares y un número equivalente de hojas, con la finalidad de favorecer el proceso de enraizamiento y el posterior desarrollo vegetativo. Las yemas ubicadas en contacto directo con el sustrato permitieron la formación de raíces adventicias, mientras que aquellas situadas en la parte aérea contribuyeron al desarrollo foliar y al mantenimiento de la actividad fisiológica de la estaca.

El corte superior de las estacas se realizó en bisel, mediante el uso de un bisturí, en un solo movimiento continuo, con el propósito de obtener una superficie lisa y uniforme que facilitara la cicatrización del tejido. El corte inferior fue de tipo horizontal, ejecutado igualmente en un solo movimiento, garantizando la uniformidad de todas las unidades experimentales.

Adicionalmente, se realizaron incisiones longitudinales en la base de las estacas, con la finalidad de incrementar la superficie de absorción del regulador de crecimiento ácido indolbutírico (AIB) y favorecer una distribución homogénea de dicha sustancia en el tejido basal. Estas incisiones se efectuaron utilizando un bisturí y se mantuvieron uniformes en todas las estacas de la especie, asegurando la estandarización del procedimiento experimental y la confiabilidad de los resultados obtenidos

El proceso de preparación, caracterización y manejo de las estacas de *C. angustifolia* se realizó previo a su instalación en el sustrato de enraizamiento, conforme al procedimiento experimental establecido (Figura 3).

### Figura 3

*Preparación, caracterización y manejo de estacas de Cedrela angustifolia en el proceso experimental*



**Nota.** Registro del acondicionamiento del material vegetal previo a su instalación en el sustrato de enraizamiento

### ***3.3.4. Preparación y tratamiento del sustrato de enraizamiento***

El sustrato de enraizamiento estuvo constituido por arena gruesa de río, con un diámetro promedio de partícula de aproximadamente 2 mm, seleccionada por su adecuada porosidad, buen drenaje y baja retención de agua, características favorables para el desarrollo de raíces en estacas.

Previo a su utilización, la arena fue lavada repetidas veces con agua corriente, con la finalidad de eliminar partículas finas, materia orgánica e impurezas que pudieran interferir en el proceso de enraizamiento. Posteriormente, el sustrato fue sometido a un tratamiento de desinfección mediante agua hirviendo, con el objetivo de reducir la carga de patógenos y asegurar condiciones sanitarias adecuadas durante el establecimiento y desarrollo de las estacas.

### ***3.3.5. Preparación de soluciones hormonales (AIB)***

Para el tratamiento hormonal se prepararon soluciones de ácido indolbutírico (AIB) a concentraciones de 500, 1500 y 4500 mg/L en el laboratorio de Fisiología de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca. La selección de estas concentraciones respondió a su uso frecuente en estudios de inducción de raíces adventicias en especies forestales, donde el AIB actúa como una auxina sintética eficaz en la estimulación de la rizogénesis.

Para la preparación de las soluciones, se pesaron cuidadosamente 0,5; 1,5 y 4,5 g de AIB, respectivamente (Figura 4), utilizando una balanza analítica, a fin de garantizar la precisión en las concentraciones establecidas. El regulador de crecimiento fue inicialmente disuelto en 1 L de etanol al 96 %, solvente empleado debido a la baja solubilidad del AIB en agua, asegurando así una disolución completa y homogénea del principio activo.

Una vez obtenidas las soluciones madre, estas fueron posteriormente diluidas con agua destilada estéril hasta alcanzar las concentraciones finales requeridas para cada tratamiento

experimental. Este procedimiento permitió reducir la concentración de etanol y minimizar posibles efectos fitotóxicos sobre los tejidos vegetales durante la aplicación hormonal.

Las soluciones hormonales preparadas se almacenaron en envases oscuro, con el fin de protegerlas de la fotodegradación, y conservadas a una temperatura  $\leq 0$  °C. Estas condiciones de almacenamiento se adoptaron para preservar la estabilidad química del ácido indol butírico y evitar la degradación del principio activo ocasionada por la exposición a la luz y a variaciones térmicas, garantizando así la eficacia del tratamiento hormonal durante todo el periodo experimental.

#### **Figura 4**

*Preparación de soluciones hormonales (AIB), en el laboratorio de Fisiología – UNC*



**Nota.** Proceso de disolución del AIB en etanol al 96 % y posterior dilución con agua destilada estéril para la obtención de concentraciones de 500, 1500 y 4500 mg/l.

### ***3.3.6. Tratamiento hormonal de estacas***

El tratamiento hormonal de las estacas se realizó mediante la aplicación exógena de ácido indolbutírico (AIB), empleando el método de inmersión basal, técnica ampliamente utilizada para inducir la formación de raíces adventicias en especies leñosas. Para ello, la base de cada estaca fue sumergida en las soluciones hormonales previamente preparadas, considerando tres tiempos de exposición diferenciados: 150 s, 3 600 s (1 h) y 86 400 s (24 h), de acuerdo con el diseño experimental establecido.

Concluido el tiempo de inmersión correspondiente a cada tratamiento, las estacas fueron retiradas de la solución hormonal y colocadas en posición vertical durante un periodo de reposo de 5 min, con la finalidad de permitir la evaporación del etanol residual utilizado como solvente, reduciendo así posibles efectos fitotóxicos sobre los tejidos vegetales.

Posteriormente, las estacas fueron invertidas y sumergidas completamente en agua destilada estéril durante un periodo de 24 h. Este procedimiento tuvo como objetivo favorecer la rehidratación de los tejidos, homogenizar la distribución del regulador de crecimiento en la zona basal y minimizar posibles daños celulares asociados a la exposición prolongada al AIB. Una vez finalizado este proceso, las estacas fueron retiradas del agua y quedaron listas para su instalación en el sustrato de enraizamiento.

### ***3.3.7. Condiciones del invernadero forestal***

El ambiente de enraizamiento fue regulado mediante malla de sombra que proporcionó entre 75 % y 85 % de cobertura, reduciendo la radiación solar directa y minimizando la pérdida de agua por transpiración, factores que pueden estresar el material vegetal y afectar la inducción de raíces. Durante este periodo, la temperatura media interna del invernadero osciló entre 28 °C y 33

°C, y la humedad relativa alcanzó aproximadamente 84 %, condiciones conocidas por favorecer la actividad enzimática y la diferenciación de primordios radiculares en estaquillas. Los registros climáticos fueron proporcionados por el Centro Meteorológico de la Universidad Nacional de Cajamarca, asegurando la confiabilidad de las condiciones bajo las cuales se desarrolló el experimento.

Posteriormente, las estacas obtenidas fueron trasladadas al invernadero de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca, donde se ejecutó la fase experimental de enraizamiento bajo condiciones controladas. El experimento se desarrolló durante un periodo de seis meses, lapso considerado suficiente para la evaluación integral de variables morfofisiológicas asociadas a la inducción de raíces adventicias y emisión de brotes.

### ***3.3.8. Proceso de estaquillado en la cama de propagación del invernadero***

Las estacas fueron establecidas en la cama de propagación del invernadero de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca, manteniendo una distancia aproximada de 10 cm entre unidades experimentales, con la finalidad de minimizar la competencia por espacio, humedad y oxígeno, y favorecer un desarrollo radicular homogéneo.

La instalación se efectuó colocando las estacas en posición vertical a ligeramente oblicua, a una profundidad aproximada de 5 cm en el sustrato de enraizamiento, asegurando un contacto íntimo entre la base de la estaca y el medio. Esta condición favorece la absorción capilar de agua y la adecuada hidratación de los tejidos, lo cual es fundamental para mantener la turgencia celular y la viabilidad de los meristemas. Asimismo, la correcta inserción en el sustrato facilita la acumulación y acción de fitohormonas, particularmente auxinas, en la zona basal, promoviendo la

desdiferenciación celular, la formación de callo y la posterior iniciación de raíces adventicias. En conjunto, estas condiciones optimizan el proceso fisiológico de enraizamiento (Figura 5).

### ***3.3.9. Manejo de estacas durante la etapa de enraizamiento***

Una vez instaladas, se realizaron riegos preventivos con una solución fungicida a base de pentacloronitrobenzeno (PCNB) al 3 % p/v, correspondiente a una dilución de 3 g del producto en 300 mL de agua. Para la ejecución del experimento, se preparó una solución total de 20 g del fungicida en 2 L de agua. La aplicación se efectuó de forma manual, utilizando una regadera con capacidad de 2 L, con el propósito de asegurar una distribución homogénea sobre el sustrato y reducir la incidencia de patógenos fúngicos asociados a condiciones de alta humedad, comunes durante la etapa de enraizamiento.

Durante el periodo experimental, el sustrato se mantuvo en condiciones de humedad cercana a la capacidad de campo, evitando tanto la desecación como el encharcamiento, ya que extremos hídricos pueden alterar negativamente los procesos fisiológicos asociados a la rizogénesis. El déficit hídrico puede inducir pérdida de turgencia celular y disminución de la actividad metabólica, mientras que el exceso de agua limita la difusión de oxígeno en el sustrato, generando condiciones de hipoxia que afectan la respiración celular en los tejidos basales de la estaca.

Asimismo, las estacas fueron protegidas de la radiación solar directa mediante la instalación de una malla Raschel con un nivel de sombreado del 50 %, la cual cubrió completamente el área experimental. Esta condición permitió atenuar la intensidad lumínica y la temperatura, reduciendo la transpiración y el estrés hídrico, lo que contribuye a mantener el balance hídrico interno y la viabilidad de los tejidos. De igual manera, el control de la radiación favorece la

estabilidad de compuestos hormonales, particularmente las auxinas, cuya degradación puede incrementarse bajo condiciones de alta luminosidad.

El riego se realizó con una frecuencia de dos veces por semana, empleando una regadera manual, con el objetivo de mantener un suministro hídrico uniforme que garantice la continuidad de los procesos fisiológicos, tales como la división y elongación celular, así como el transporte de reguladores de crecimiento hacia la zona basal. En conjunto, estas condiciones microambientales controladas favorecieron la inducción, diferenciación y desarrollo de raíces adventicias, optimizando el proceso de enraizamiento de las estacas.

### Figura 5

Instalación de las estacas en la cama de propagación del invernadero de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca



**Nota.** Fotografía tomada durante la instalación del material vegetal en la etapa de enraizamiento.

### **3.4. Evaluaciones realizadas durante el desarrollo del experimento**

Las evaluaciones se realizaron de manera periódica a lo largo del desarrollo del experimento, con el objetivo de monitorear el comportamiento fisiológico y morfológico de las estacas de *C. angustifolia* bajo los diferentes tratamientos hormonales aplicados. Estas evaluaciones permitieron analizar la respuesta de las estacas en términos de brotamiento y enraizamiento, variables consideradas fundamentales para determinar la eficiencia del proceso de propagación vegetativa.

La evaluación del brotamiento se efectuó cada 30 días, con el fin de registrar la dinámica de emisión de brotes a lo largo del periodo experimental. Por su parte, la evaluación final del enraizamiento se realizó a los 180 días después de la instalación de las estacas en el sustrato de enraizamiento, periodo considerado adecuado para la expresión de las variables morfológicas asociadas a la formación de raíces adventicias en especies forestales leñosas, permitiendo obtener resultados confiables y comparables entre tratamientos.

#### ***3.4.1. Evaluación del brotamiento***

**3.4.1.1. Número de brotes por estaca.** El número de brotes por estaca se determinó a partir del conteo de yemas que lograron emitir brotes visibles durante el periodo de evaluación. Para este propósito, se consideró como brote aquel crecimiento emergente claramente diferenciado, con desarrollo foliar incipiente observable a simple vista.

Las estacas fueron clasificadas en dos categorías: estacas con brotes visibles y estacas en estado latente. Es importante señalar que las estacas clasificadas como latentes no fueron descartadas del análisis, dado que la ausencia temporal de brotación no excluye la posibilidad de

enraizamiento o brotación posterior, especialmente en especies forestales con respuestas fisiológicas diferidas.

El registro del número de brotes se realizó para cada unidad experimental, considerando los distintos tratamientos hormonales y sus respectivas repeticiones. La evaluación se llevó a cabo mediante observación directa en el área experimental, y los datos obtenidos fueron consignados de manera sistemática en una libreta de campo previamente codificada, en la cual se identificó cada estaca de acuerdo con su tratamiento y repetición correspondiente, garantizando la trazabilidad de la información y la posterior confiabilidad del análisis estadístico (Figura 6).

### Figura 6

*Observación directa de brotes en estacas de Cedrela angustifolia*



*Nota.* Registro visual del brotamiento durante el periodo experimental.

**3.4.1.2. Longitud de brotes por estaca.** La longitud de los brotes por estaca se evaluó midiendo el crecimiento longitudinal desarrollado por cada brote emitido durante el periodo de evaluación. La medición se realizó desde la base del brote hasta el ápice del crecimiento más distal, utilizando una cinta métrica graduada en centímetros, garantizando precisión en el registro de los datos.

Las mediciones se efectuaron para cada unidad experimental, considerando los distintos tratamientos hormonales y sus respectivas repeticiones. Los valores obtenidos fueron registrados de manera sistemática y utilizados para el cálculo de estadísticas descriptivas, con la finalidad de analizar el comportamiento del crecimiento vegetativo inducido por los tratamientos hormonales aplicados. Posteriormente, los datos fueron sometidos a análisis estadístico para determinar posibles diferencias significativas entre tratamientos.

### **3.4.2. Evaluación del enraizamiento**

La evaluación del enraizamiento se realizó al finalizar el periodo experimental, con el propósito de determinar la respuesta morfofisiológica de las estacas de *C. angustifolia* frente a los diferentes tratamientos de ácido indolbutírico (AIB) y tiempos de exposición. Esta etapa permitió analizar los procesos de desdiferenciación celular, formación de callo (callogénesis) e inducción de raíces adventicias (rizogénesis), así como el grado de desarrollo y funcionalidad del sistema radical formado.

**3.4.2.1. Presencia o ausencia de callo y/o raíces adventicias.** El estado fisiológico de las estacas fue evaluado mediante observación directa, registrándose la presencia o ausencia de callo y/o raíces adventicias al término del periodo experimental. La formación de callo fue considerada como un indicador temprano de activación metabólica y respuesta a la aplicación de auxinas

exógenas, asociada a procesos de desdiferenciación y proliferación celular en la zona basal de la estaca.

Por su parte, la emisión de raíces adventicias fue considerada como evidencia de enraizamiento efectivo, resultado de la diferenciación celular y la organización de primordios radicales funcionales. Los datos fueron registrados por unidad experimental, permitiendo clasificar las estacas en categorías de respuesta: sin respuesta, con callogénesis y con enraizamiento, en función del tratamiento aplicado. Esta variable permitió establecer la eficiencia inicial de los tratamientos en la inducción del proceso rizogénico.

**3.4.2.2. Número de raíces adventicias por estaca.** El número de raíces adventicias por estaca se determinó mediante conteo directo en aquellas unidades experimentales que presentaron enraizamiento efectivo. Para este análisis se consideraron únicamente raíces visibles, bien diferenciadas y funcionales, excluyéndose las estacas que presentaron únicamente callo sin emisión radical, con el fin de evitar la sobreestimación de la respuesta rizogénica

Los datos obtenidos fueron registrados de manera sistemática y sometidos a un análisis estadístico descriptivo, incluyendo medidas de tendencia central (media aritmética) y de dispersión (desviación estándar, coeficiente de variación, valores mínimos y máximos). Posteriormente, se realizó un análisis inferencial mediante pruebas de hipótesis para la comparación de medias entre tratamientos, con el propósito de determinar diferencias estadísticamente significativas atribuibles al efecto de las concentraciones de AIB, los tiempos de exposición y su interacción.

Esta variable constituye un indicador cuantitativo de la capacidad rizogénica de las estacas, reflejando la intensidad de la respuesta fisiológica inducida por los tratamientos hormonales.

**3.4.2.3. Desarrollo longitudinal del sistema radical en estacas enraizadas.** La longitud total de raíces por estaca fue determinada en aquellas unidades que lograron enraizar, mediante la medición individual de cada raíz adventicia utilizando una cinta métrica graduada. Posteriormente, se realizó la sumatoria de las longitudes registradas, obteniéndose un valor representativo del desarrollo radical total por estaca.

Las mediciones fueron registradas de forma ordenada para su posterior procesamiento y análisis estadístico. Esta variable permitió evaluar no solo la capacidad de emisión de raíces, sino también el grado de elongación y desarrollo del sistema radical, aspectos directamente relacionados con la eficiencia funcional de las raíces formadas.

Desde un enfoque fisiológico, la longitud radical está asociada a la actividad meristemática, elongación celular y adecuada redistribución de auxinas y carbohidratos hacia la zona basal, constituyéndose en un indicador clave del vigor y calidad del enraizamiento inducido por los tratamientos aplicados

### **3.5. Sistematización, procesamiento y análisis de datos**

La sistematización, el procesamiento y el análisis de los datos experimentales se realizaron de manera estructurada y rigurosa, con la finalidad de garantizar la validez, confiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos. La información recolectada fue organizada en matrices de datos previamente codificadas, permitiendo su adecuada trazabilidad y control durante todas las etapas del análisis.

El procesamiento de datos y los cálculos estadísticos se efectuaron mediante hojas de cálculo utilizando el software Microsoft Excel XP, herramienta empleada para la depuración de la base de datos, el cálculo de estadísticos descriptivos y el soporte en el análisis inferencial. Se

verificó previamente la consistencia y calidad de los datos, a fin de evitar errores de registro que pudieran sesgar la interpretación de los resultados.

Para el análisis estadístico se aplicaron procedimientos de estadística descriptiva e inferencial, en concordancia con el Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial empleado en el experimento. La evaluación de los efectos de los factores en estudio (dosis de ácido indolbutírico y tiempos de exposición) y de su interacción se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA), estableciendo un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ .

Cuando se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, se procedió a la aplicación de pruebas de comparación múltiple de medias, con el objetivo de identificar diferencias específicas entre los niveles de los factores evaluados. Este enfoque permitió determinar con precisión la influencia de las concentraciones de ácido indolbutírico (AIB), los tiempos de exposición y su interacción sobre las variables de respuesta analizadas.

### ***3.5.1. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos***

Los datos obtenidos en campo y laboratorio fueron procesados de manera sistemática desde la recolección del material vegetal de *C. angustifolia*, hasta la finalización del periodo experimental. Concluida esta etapa, se consolidaron los resultados correspondientes a los efectos de cuatro dosis de ácido indolbutírico (AIB) y tres tiempos de exposición, bajo un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial.

El análisis de los resultados incluyó la elaboración de cuadros estadísticos y representaciones gráficas, así como la evaluación cuantitativa de las variables de respuesta consideradas en el estudio, tales como: porcentaje de enraizamiento, brotamiento, número de raíces

adventicias, longitud total del sistema radical y porcentaje de supervivencia de las estacas en cada tratamiento.

Asimismo, se calcularon medidas de tendencia central (media aritmética) y de dispersión (desviación estándar y coeficiente de variación), con la finalidad de describir la variabilidad de los datos y la precisión experimental. Estos procedimientos permitieron una interpretación objetiva del comportamiento morfofisiológico de las estacas, así como la identificación de los tratamientos más eficientes en el proceso de enraizamiento.

En conjunto, el enfoque estadístico aplicado permitió sustentar de manera robusta los resultados obtenidos, facilitando la comparación entre tratamientos y la generación de conclusiones válidas desde el punto de vista científico.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación del enraizamiento se realizó a los 180 días después de la instalación de las estacas, periodo considerado adecuado para la expresión de respuestas morfofisiológicas estables, permitiendo la obtención de resultados confiables y comparables entre tratamientos. Asimismo, la evaluación del brotamiento se efectuó cada 30 días, con la finalidad de registrar la dinámica de emisión y desarrollo de brotes durante el periodo experimental.

#### 4.1. Efecto de las dosis de ácido indol butírico (AIB) en el porcentaje de enraizamiento

El análisis de varianza (ANOVA) evidenció que las dosis de ácido indolbutírico (AIB) influyeron de manera altamente significativa sobre el porcentaje de enraizamiento de las estacas de *C. angustifolia* ( $F = 28,93$ ;  $p < 0,0001$ ). Entre los tratamientos evaluados, la dosis de 500 mg/L de AIB fue la que presentó el mayor porcentaje de enraizamiento (73,5 %), diferenciándose estadísticamente del resto de tratamientos. Le siguieron las dosis de 1 500 mg/L (56,4 %) y 4 500 mg/L (48,2 %), mientras que el tratamiento control (0 mg/L) registró el menor valor (31,7 %) (Tabla 3).

En relación con el tiempo de exposición, los mayores porcentajes de enraizamiento se asociaron a periodos cortos e intermedios (150 y 3 600 s), favoreciendo una respuesta fisiológica más eficiente; en contraste, el tiempo prolongado (86 400 s) tendió a reducir el enraizamiento, especialmente en combinación con dosis elevadas de AIB

La prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) confirmó la existencia de diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, agrupando a la dosis de 500 mg/L en una categoría superior (grupo A), lo que indica que su efecto sobre el enraizamiento fue

significativamente mayor respecto a las demás concentraciones. Estas diferencias se explican por la variación en la respuesta fisiológica de las estacas frente a cada nivel de auxina, donde concentraciones moderadas optimizan la inducción de raíces adventicias, mientras que dosis elevadas pueden generar efectos inhibitorios. (Aminah et al., 2006; Zenginbal, Haznedar & Dolgun, 2014; Hartmann et al., 2018). Desde el punto de vista fisiológico, la superioridad de la dosis de 500 mg/L se atribuye a una adecuada estimulación de la división y diferenciación celular en la zona basal de la estaca, promoviendo la formación de primordios radicales. Por el contrario, concentraciones más altas de AIB, especialmente cuando se combinan con tiempos prolongados de exposición, pueden provocar acumulación excesiva de auxina en los tejidos, generando desbalances hormonales, inhibición del crecimiento y posibles efectos fitotóxicos, lo que se refleja en menores porcentajes de enraizamiento.

**Tabla 3**

*Porcentaje de enraizamiento según dosis de AIB*

<b>Dosis de AIB (mg/L)</b>	<b>Enraizamiento promedio (%)</b>	<b>Grupo Tukey</b>
500 (D <sub>1</sub> )	73,5	A
1500 (D <sub>2</sub> )	56,4	B
4500 (D <sub>3</sub> )	48,2	BC
0 (D <sub>0</sub> )	31,7	C

**Nota.** Medias seguidas por letras distintas indican diferencias significativas según Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). D<sub>0</sub> = control sin AIB.

#### 4.2. Influencia del tiempo de exposición y la interacción dosis × tiempo

El tiempo de exposición al AIB mostró un efecto significativo sobre el porcentaje de enraizamiento ( $F = 9,59$ ;  $p = 0,001$ ), al igual que la interacción entre dosis y tiempo de exposición ( $F = 9,04$ ;  $p < 0,0001$ ), lo que indica que la respuesta de las estacas depende de la combinación específica de ambos factores (Tabla 4).

El tratamiento que combinó 500 mg/L de AIB con 150 s de exposición registró el mayor porcentaje de enraizamiento (73,5 %), mientras que las combinaciones de dosis elevadas con tiempos prolongados presentaron respuestas reducidas o nulas. Estos resultados demuestran que la eficiencia del enraizamiento está condicionada por el balance entre la concentración de la auxina y el tiempo de contacto con el tejido vegetal.

Fisiológicamente, tiempos de exposición cortos e intermedios permiten una absorción adecuada de la auxina, favoreciendo su transporte polar y acumulación en la zona basal, donde induce la formación de raíces adventicias. Por el contrario, exposiciones prolongadas pueden generar acumulación excesiva de auxinas, lo que conduce a un efecto inhibitorio, asociado a la saturación de los sitios de acción hormonal, alteraciones en la respiración celular y posibles efectos de toxicidad (De Klerk et al., 1999; Martínez et al., 2015). Esto coincide con estudios en especies de *Cedrela* y tropicales, donde la combinación adecuada optimiza la propagación vegetativa (Leahey et al., 2014).

La interacción significativa entre ambos factores confirma que la respuesta rizogénica no depende de un solo factor, sino de la dinámica conjunta de absorción, transporte y sensibilidad del tejido vegetal a la auxina aplicada.

**Tabla 4**

*Análisis de varianza (ANOVA) del porcentaje de enraizamiento en función de la dosis de AIB y el tiempo de exposición*

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de cuadrados (SC)</b>	<b>gl</b>	<b>Cuadrado medio (CM)</b>	<b>F calculado</b>	<b>p-valor</b>
Repetición	0,21	2	0,10	1,82	0,18
AIB	5,62	3	1,87	28,93	<0,0001
Tiempo	1,24	2	0,62	9,59	0,001
AIB × Tiempo	3,48	6	0,58	9,04	<0,0001
Error	1,42	22	0,06	—	—
<b>Total</b>	<b>11,97</b>	<b>35</b>	—	—	—

*Nota.* SC = suma de cuadrados; gl = grados de libertad; CM = cuadrado medio; CV = 17,8 %. El análisis de varianza demuestra que tanto la dosis de AIB como el tiempo de exposición, así como su interacción, influyen significativamente en el enraizamiento de las estacas. La alta magnitud de los valores de F, especialmente para el factor AIB, confirma su papel determinante en el proceso. Además, el CV de 17,8 % respalda la confiabilidad de los resultados, indicando una variabilidad experimental dentro de rangos aceptables para estudios biológicos.

### **4.3. Longitud total del sistema radical por estaca**

La longitud promedio de raíces de las estacas de *C. angustifolia* presentó diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados, de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) (tabla 5). Los mayores valores se registraron en los

tratamientos con 500 mg/L de AIB combinados con tiempos de exposición de 150 y 3 600 s, alcanzando longitudes promedio de 5,63 y 5,52 cm, respectivamente (Figura 7).

Desde el punto de vista fisiológico, estos resultados indican que dosis moderadas de ácido indolbutírico no solo favorecen la inducción de raíces, sino también su elongación (Hartmann et al., 2018). Este proceso está directamente relacionado con la actividad meristemática en los ápices radicales, así como con la elongación celular, regulada por la acción de auxinas y la disponibilidad de carbohidratos. En contraste, los tratamientos sin aplicación de AIB presentaron las menores longitudes radiculares, lo que confirma el rol fundamental de las auxinas en la regulación del crecimiento y elongación de las raíces. Asimismo, las combinaciones de dosis elevadas con tiempos prolongados de exposición evidenciaron respuestas nulas, lo que sugiere un efecto inhibitorio sobre la elongación celular, probablemente asociado a desbalances hormonales o estrés fisiológico en los tejidos.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo señalado por Taiz et al. (2015) explican que la elongación radicular depende de un equilibrio hormonal adecuado y de la capacidad del tejido para responder a la señal auxínica. Galavi et al. (2013) reportaron que dosis intermedias de AIB generan raíces más largas y funcionales en comparación con dosis excesivas, las cuales pueden inducir efectos inhibitorios. Asimismo, Leakey (2014) señala que, en especies forestales tropicales, la optimización conjunta de la dosis de auxina y el tiempo de exposición resulta determinante para maximizar la calidad del sistema radicular. En este contexto, los resultados del presente estudio confirman que el uso adecuado de AIB, especialmente a dosis intermedias y tiempos de exposición controlados, constituye una estrategia efectiva para mejorar la longitud de raíces en estacas de *C. angustifolia*, contribuyendo al desarrollo de protocolos eficientes de propagación vegetativa (Figura 8).

**Tabla 5**

*Comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) para la longitud de raíces en estacas de *Cedrela angustifolia* en función de la dosis de AIB y el tiempo de exposición*

<b>AIB (mg/L)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Longitud de raíces (cm)</b>	<b>Grupo Tukey</b>
500	150	5,63	A
500	3600	5,52	A
1500	150	3,72	A
4500	150	2,23	A
1500	86400	2,09	A
4500	3600	0,67	B
0	150	0,93	B
0	3600	0,66	B
0	86400	0,15	B
500	86400	0,00	C
1500	3600	0,00	C
4500	86400	0,00	C

**Nota.** Medias seguidas por letras distintas presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). AIB = ácido indolbutírico. Los resultados de la prueba de Tukey confirman que la longitud de raíces en *Cedrela angustifolia* depende críticamente de la interacción entre la dosis de AIB y el tiempo de exposición. Las mejores respuestas se obtienen con dosis

intermedias (especialmente 500 mg/L) y tiempos de exposición cortos a moderados, mientras que combinaciones de altas dosis y tiempos prolongados generan efectos inhibitorios.

**Tabla 6**

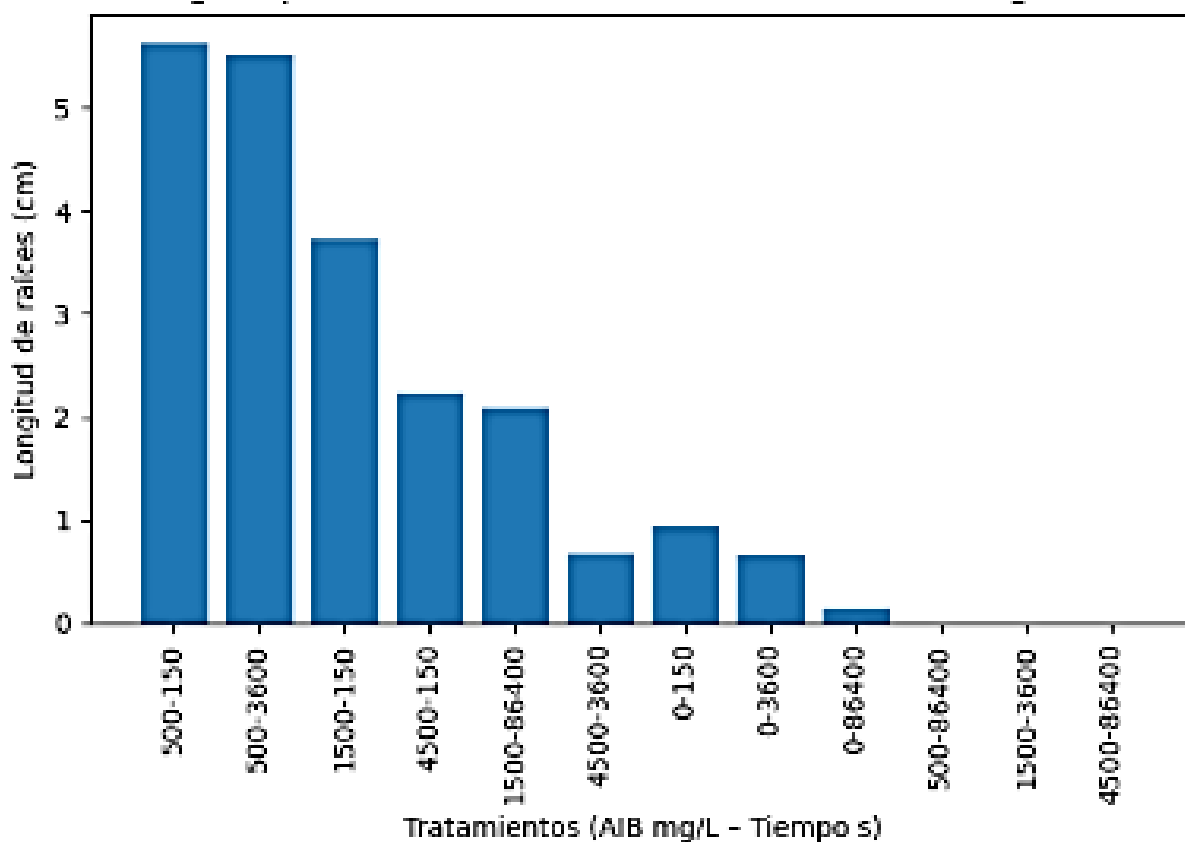
*Longitud promedio de raíces y comparación múltiple de medias (Tukey,  $\alpha = 0,05$ ) en estacas de *Cedrela angustifolia* según dosis de AIB y tiempo de exposición*

<b>AIB (mg/L)</b>	<b>Tiempo de exposición (s)</b>	<b>Longitud de raíces (cm)</b>	<b>Grupo Tukey</b>
1500	86400	2,09	A
1500	150	3,72	A
500	150	5,63	A
500	3600	5,52	A
4500	150	2,23	A
0	150	0,93	B
0	3600	0,66	B
0	86400	0,15	B
500	86400	0	C
1500	3600	0	C
4500	3600	0,67	B
4500	86400	0	C

*Nota.* Medias seguidas por letras distintas difieren significativamente según la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). AIB = ácido indolbutírico.

**Figura 7**

*Longitud promedio de raíces en estacas de Cedrela angustifolia en función de la dosis de AIB y el tiempo de exposición.*



*Nota.* La figura presenta la longitud promedio de raíces (cm) obtenida en estacas de *C. angustifolia* bajo diferentes combinaciones de dosis de ácido indolbutírico (AIB) y tiempos de exposición. Se observa que los tratamientos con 500 mg/L y tiempos de 150 y 3600 s registran los mayores valores de longitud radicular, mientras que exposiciones prolongadas (86400 s), especialmente en dosis elevadas, muestran una disminución significativa o inhibición del crecimiento de raíces.

**Figura 8**

*Evaluación de Enraizamiento de Cedrela angustifolia en el invernadero de la Facultad de Agronomía – Universidad Nacional de Cajamarca*



**Nota.** Evaluación del enraizamiento de estacas de *C. angustifolia*, se muestra el proceso de medición de la longitud total de raíces adventicias por estaca, utilizada como indicador del grado de desarrollo y vigor del sistema radical inducido por los tratamientos con ácido indolbutírico

**4.4. Número de raíces adventicias**

El análisis de los tratamientos aplicados evidenció diferencias en el número de raíces adventicias formadas en estacas de *C. angustifolia* en función de la dosis de ácido indolbutírico (AIB) y el tiempo de exposición. Los mayores valores promedio se registraron en los tratamientos con 500 mg/L de AIB, tanto a 150 s como a 3 600 s, con un promedio de 3 raíces adventicias, diferenciándose estadísticamente del resto de tratamientos según la prueba de Tukey ( $\alpha < 0,05$ )

(Tabla 7). Los tratamientos sin aplicación de AIB (0 mg/L), independientemente del tiempo de exposición, no indujeron formación de raíces adventicias. En dosis más elevadas (1 500 y 4 500 mg/L), el número de raíces fue bajo o nulo, observándose incluso inhibición del enraizamiento en tiempos prolongados de exposición (Tabla 8).

Los resultados indican que la aplicación de 500 mg/L de AIB constituye una dosis óptima para la inducción de raíces adventicias, mientras que concentraciones mayores no mejoran la respuesta fisiológica y, por el contrario, tienden a inhibirla. Esto sugiere que existe un umbral hormonal, a partir del cual el exceso de auxinas provoca efectos fitotóxicos o desbalances fisiológicos que limitan la diferenciación celular radicular. Asimismo, el tiempo de exposición mostró un efecto dependiente de la dosis. En el caso de 500 mg/L, tanto exposiciones cortas como intermedias favorecieron la rizogénesis, mientras que exposiciones prolongadas (8 6400 s) resultaron inefectivas, lo que evidencia que la interacción dosis–tiempo es determinante en el número de raíces adventicias formadas.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Hartmann et al. (2018), quienes señalan que concentraciones moderadas de auxinas sintéticas, como el AIB, estimulan la formación de raíces adventicias al promover la división celular y la diferenciación de tejidos meristemáticos, mientras que dosis elevadas generan efectos inhibitorios. De igual manera, Galavi et al. (2013) indican que el incremento excesivo de auxinas puede provocar acumulación hormonal en los tejidos, reduciendo la respuesta rizogénica, lo cual coincide con la ausencia de raíces en los tratamientos con 1 500 y 4 500 mg/L y tiempos prolongados de exposición. Resultados similares fueron descritos por Taiz et al. (2017), quienes sostienen que la eficiencia de las auxinas depende no solo de la concentración aplicada, sino también del tiempo de contacto con el tejido vegetal, siendo las exposiciones breves o moderadas las más efectivas para inducir raíces adventicias. En

este sentido, los hallazgos confirman que 500 mg/L de AIB representa una dosis adecuada para maximizar el número de raíces adventicias en *C. angustifolia* bajo condiciones de invernadero.

**Tabla 7**

*Prueba de comparación múltiple de Tukey para el número de raíces adventicias*

Dosis de AIB (mg/L)	Tiempo (s)	Número de raíces adventicias	Grupo Tukey
500	150	3	A
500	3600	3	A
1500	150	1	C
1500	86400	1	B
0	150	0	B
0	3600	0	B
0	86400	0	B
4500	150	0	B
1500	3600	0	D
4500	3600	0	D
4500	86400	0	D

**Nota.** Medias seguidas por letras distintas difieren significativamente según la prueba de Tukey ( $\alpha < 0,05$ ).

**Tabla 8**

*Número promedio de raíces en estacas de Cedrela angustifolia según dosis de AIB y tiempo de exposición*

Dosis de AIB (mg/L)	Tiempo (s)	Número de raíces adventicias	Grupo Tukey
500	150	3	A
500	3600	3	A
0	150	0	B
0	3600	0	B
0	86400	0	B
1500	150	1	C
1500	3600	0	D
1500	86400	1	B
4500	150	0	B
4500	3600	0	D
4500	86400	0	D

*Nota.* Medias seguidas por la misma letra en la columna no presentan diferencias significativas entre sí, según la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ).

#### 4.5. Número de brotes

El número de brotes fue significativamente influenciado por la dosis de AIB, el tiempo de exposición y su interacción ( $p < 0,01$ ). Las combinaciones 500 mg/L  $\times$  150 s y 500 mg/L  $\times$  3 600 s presentaron los mayores valores (tres brotes por estaca), mientras que las dosis elevadas y tiempos prolongados no promovieron la brotación (Tabla 9).

Desde el punto de vista fisiológico, la brotación está estrechamente relacionada con el balance hormonal entre auxinas y citoquininas. Dosis moderadas de AIB favorecen indirectamente la brotación al estimular la formación de un sistema radical funcional, lo que mejora la absorción de agua y nutrientes. En cambio, concentraciones elevadas de auxina pueden inhibir la brotación debido a efectos de dominancia apical o desbalance hormonal. (Taiz & Zeiger, 2015).

**Tabla 9**

*Número de brotes y comparación múltiple de medias (prueba de Tukey,  $\alpha = 0,05$ ) en estacas de Cedrela angustifolia según dosis de AIB y tiempo de exposición*

Dosis de AIB (mg/L)	Tiempo (s)	Número de brotes	Grupo Tukey
500	150	3	A
500	3600	3	A
0	150	2	B
0	3600	2	B
0	86400	2	B
1500	150	1	C
1500	3600	0	D
1500	86400	2	B
4500	150	2	B
4500	3600	0	D
4500	86400	0	D

**Nota.** Medias seguidas por letras distintas presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). AIB = ácido indolbutírico.

#### 4.6. Longitud de brotes

La longitud de brotes presentó diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,01$ ), destacando las combinaciones  $1\ 500\ \text{mg/L} \times 86\ 400\ \text{s}$  y  $1\ 500\ \text{mg/L} \times 150\ \text{s}$  con los mayores valores (6,09 y 5,82 cm, respectivamente), sin diferencias significativas respecto a los tratamientos con  $500\ \text{mg/L}$  (Tabla 10).

Estos resultados sugieren que, aunque dosis moderadas son óptimas para el enraizamiento, ciertas combinaciones con dosis mayores pueden favorecer la elongación de brotes, posiblemente debido a una redistribución hormonal y mayor disponibilidad de recursos en aquellas estacas que lograron establecer un sistema radical funcional. Sin embargo, exposiciones prolongadas en combinación con dosis elevadas generaron respuestas nulas, evidenciando nuevamente efectos inhibitorios asociados a estrés fisiológico o fitotoxicidad (Vásquez et al., 2021; Mendoza & Álvarez, 2022).

**Tabla 10**

*Longitud de brotes según dosis y tiempo*

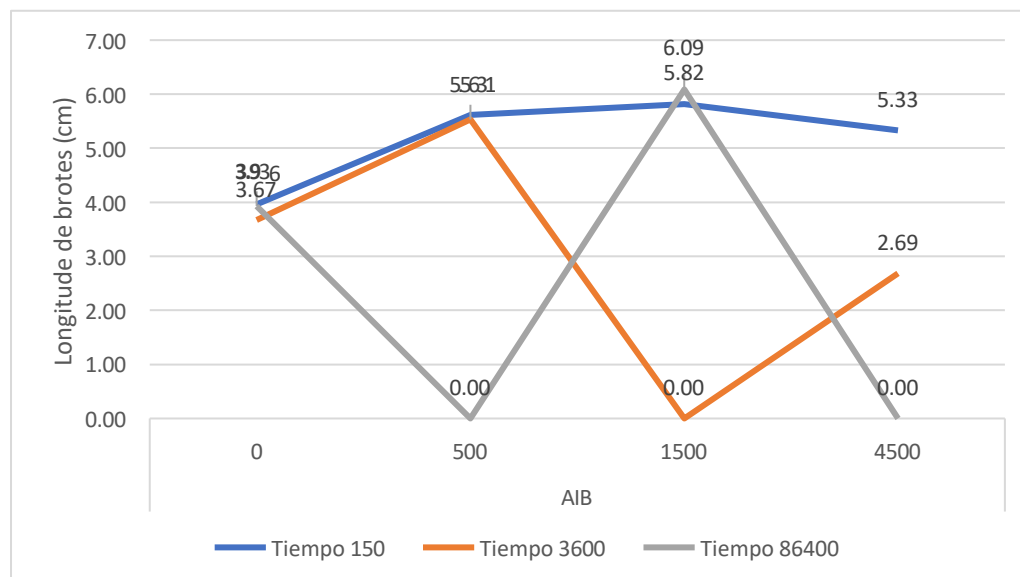
AIB (mg/L)	Tiempo (s)	Longitud (cm)	Grupo Tukey
1500	86400	6.09	A
1500	150	5.82	A
500	150	5.63	A
500	3600	5.52	A
4500	150	5.33	A
0	150	3.97	B

AIB (mg/L)	Tiempo (s)	Longitud (cm)	Grupo Tukey
0	3600	3.66	B
0	86400	3.95	B
500	86400	0	C
1500	3600	0	C
4500	3600	2.67	B
4500	86400	0	C

**Nota.** Los tratamientos AIB 1 500 mg/L – 86 400 s. (6.09 cm) y AIB 1 500 mg/L – 150 s. (5.82 cm) presentan las mayores longitudes de brote y pertenecen al grupo “A”, siendo estadísticamente superiores. En cambio, las combinaciones con 500, 1 500 y 4 500 mg/L expuestas 86 400 s., sin desarrollo de brote (0 cm), conforman el grupo “C”, significativamente inferior.

### Figura 9

*Longitud de brotes en estacas de Cedrela angustifolia en función de la dosis de AIB y el tiempo de exposición*



**Nota.** La figura muestra la variación de la longitud de brotes (cm) en estacas de *C. angustifolia* bajo diferentes combinaciones de dosis de ácido indolbutírico (AIB) y tiempos de exposición. Se observa que las mayores longitudes de brotes se presentan en tratamientos con dosis intermedias y tiempos de exposición cortos a moderados, mientras que dosis elevadas combinadas con tiempos prolongados tienden a reducir el crecimiento de los brotes.

Los resultados observados en la (Figura 9) evidencian que la longitud de brotes en estacas de *C. angustifolia* está significativamente influenciada por la interacción entre la dosis de ácido indolbutírico (AIB) y el tiempo de exposición, mostrando una respuesta diferencial que depende del equilibrio hormonal generado en los tejidos vegetales.

En este contexto, los tratamientos con dosis intermedias de AIB y tiempos de exposición cortos a moderados promovieron una mayor elongación de brotes, lo que puede atribuirse a una adecuada regulación de la actividad meristemática. Según lo reportado por Taiz et al. (2017), las auxinas como el AIB desempeñan un papel clave en la regulación del crecimiento vegetal, favoreciendo la división y elongación celular cuando se encuentran en concentraciones óptimas. Este efecto positivo también ha sido documentado por Hartmann et al. (2018), quienes señalan que concentraciones moderadas de auxinas estimulan tanto la formación de raíces como el desarrollo de brotes en propagación vegetativa.

Sin embargo, se observó que dosis elevadas de AIB combinadas con tiempos prolongados de exposición generan una disminución significativa en la longitud de brotes. Este comportamiento puede explicarse por un fenómeno de fitotoxicidad hormonal, donde la acumulación excesiva de auxinas provoca un desbalance en la relación auxina/citoquinina, afectando negativamente la diferenciación y elongación de tejidos aéreos. Un exceso de auxinas puede inhibir el crecimiento de brotes debido a la dominancia apical y la supresión del desarrollo de yemas laterales.

Asimismo, estudios más recientes, como los de De Klerk et al. (2020), indican que la exposición prolongada a auxinas puede inducir respuestas inhibitorias, incluyendo la reducción del crecimiento de órganos aéreos, debido a alteraciones en la señalización hormonal y en la expresión génica relacionada con el desarrollo vegetal. Este efecto se ve agravado cuando se combinan altas concentraciones con largos periodos de exposición, como se evidenció en los tratamientos menos eficientes del presente estudio.

Por otro lado, los tratamientos con ausencia de AIB o con combinaciones no óptimas presentaron un crecimiento limitado de brotes, lo cual sugiere que, aunque existe una capacidad intrínseca de brotación en *C. angustifolia*, esta es significativamente potenciada mediante la aplicación exógena de reguladores de crecimiento. La aplicación de auxinas en especies forestales mejora la eficiencia de la propagación vegetativa, aunque su efecto depende críticamente de la dosis y el tiempo de aplicación.

En conjunto, estos resultados confirman que el crecimiento de brotes en *C. angustifolia* no solo depende de la presencia de AIB, sino de una adecuada optimización de la dosis y el tiempo de exposición, siendo las dosis intermedias y tiempos controlados las condiciones más favorables. Este comportamiento coincide con lo reportado en otras especies forestales, donde la respuesta a reguladores de crecimiento presenta un patrón no lineal, con efectos positivos a bajas y medianas concentraciones y efectos inhibitorios a concentraciones elevadas.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Se encontró interacción significativa entre 500 mg/L de AIB con 150 s y 500 mg/L de AIB con 3 600 s. La mejor para el enraizamiento combinación fue 500 mg/L de AIB con 150 s. No se encontró la interacción significativa para 1 500 mg/L y 4 500 mg/L.

El ácido indolbutírico analizado independientemente ejerció efecto significativo sobre el porcentaje de enraizamiento, destacando la concentración de 500 mg/L como la más eficiente (73,5 %), superando estadísticamente a las dosis de 1 500 mg/L y 4 500 mg/L. Este resultado confirma que concentraciones moderadas de auxina favorecen los procesos de inducción y diferenciación de raíces adventicias, mientras que niveles elevados generan efectos inhibitorios asociados a desbalances fisiológicos.

La interacción entre las dosis de AIB y los tiempos de exposición fue altamente significativa para las variables de crecimiento evaluadas, demostrando que el efecto del regulador de crecimiento no es independiente, sino que depende de la dinámica de absorción, transporte y sensibilidad del tejido vegetal frente a la auxina aplicada.

El tiempo de exposición de las estacas al AIB tuvo efecto significativo en la formación de raíces y brotes, influyen significativamente en la formación de raíces y brotes, especialmente en interacción con las dosis de AIB. Los tiempos cortos e intermedios (150 y 3 600 s) promovieron una mayor respuesta fisiológica, mientras que exposiciones prolongadas (86 400 s) redujeron o inhibieron el enraizamiento y la brotación, evidenciando que la duración del estímulo hormonal constituye un factor crítico en la propagación vegetativa.

La combinación de 500 mg/L de AIB con 150 s de exposición fue el mejor para el enraizamiento de estacas, al maximizar el porcentaje de enraizamiento, con un promedio de tres raíces por estaca y cinco centímetros de longitud en promedio de raíces adventicias.

## **5.2. Recomendaciones**

Se recomienda la aplicación de 500 mg/L de ácido indolbutírico (AIB) con un tiempo de exposición de 150 s como tratamiento para la propagación vegetativa de *C. angustifolia*.

Se recomienda desarrollar estudios complementarios que evalúen el efecto de otros reguladores de crecimiento, combinaciones hormonales (auxinas y citoquininas), así como diferentes tipos de sustrato, con la finalidad de optimizar los protocolos de propagación vegetativa de la especie.

Asimismo, se sugiere replicar el presente estudio bajo distintas condiciones ambientales, altitudinales y estacionales, con el propósito de validar la consistencia de los resultados y ampliar su aplicabilidad en sistemas productivos y programas de restauración forestal.

## CAPÍTULO VI

### REFERENCIAS

- Ames-Martínez, F. N., Romero, I. C., Guerra, A., Guillén, J. G. I., Quispe-Melgar, H. R., Galeano, E., & Rodríguez-Ramírez, E. C. (2025). Climate change and tree cover loss affect the habitat suitability of *C. angustifolia*: Evaluating climate vulnerability and conservation in Andean montane forests. *PeerJ*, *13*, e18799. <https://doi.org/10.7717/peerj.18799>
- Aminah, H., Nor Hasnita, R. M. N., & Hamzah, M. (2006). Effects of indole butyric acid concentrations and media on rooting of leafy stem cuttings of *Shorea parvifolia* and *Shorea macroptera*. *Journal of Tropical Forest Science*, *18*(1), 1–7.
- Casanova-Sáez, R., Mateo-Bonmatí, E., & Ljung, K. (2021). Auxin metabolism in plants. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, *13*(3), a039867. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a039867>
- CIFOR-ICRAF. (2023). *Especies forestales maderables: C. angustifolia*. <https://smart.cifor-icraf.org/wp-content/uploads/2023/12/Cedrela-angustifolia.pdf>
- Cruz Cosme, D. (2005). *Principios de genética cuantitativa*. Universidade Federal de Viçosa.
- Daud, N., Rahman, M. M., & Hossain, M. A. (2021). Rooting response of woody plants to auxins: A review. *Plants*, *10*(5), 987. <https://doi.org/10.3390/plants10050987>
- de Klerk, G.-J., van der Krieken, W., & de Jong, J. (1999). The formation of adventitious roots: New concepts, new possibilities. *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*, *35*(3), 189–199. <https://doi.org/10.1007/s11627-999-0076-z>

- Dou, H., Sun, J., Wang, T., Bi, S., Feng, X., Sun, H., & Quan, J. (2024). Transcriptomic profiling and discovery of key transcription factors involved in adventitious root formation from root cuttings of mulberry. *BMC Genomics*, *25*, 693. <https://doi.org/10.1186/s12864-024-10593-8>
- Druege, U., Hilo, A., Pérez-Pérez, J. M., Klotek, Y., Acosta, M., & Shahinnia, F. (2019). Molecular and physiological control of adventitious rooting in cuttings: Phytohormone action meets resource allocation. *Annals of Botany*, *123*(6), 929–949. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy234>
- Emenecker, R. J., & Strader, L. C. (2020). Auxin–abscisic acid interactions in plant growth and development. *Biomolecules*, *10*(2), 281. <https://doi.org/10.3390/biom10020281>
- FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- Galavi, M., Karimian, M. A., & Mousavi, S. R. (2013). Effects of different auxin (IBA) concentrations on rooting of cuttings. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, *4*(2), 231–236.
- González, I. M., Villegas Monter, A., Peña Valdivia, C. B., Barrientos Priego, A. F., Ruiz Posadas, L. D. M., & Castro Garibay, S. L. (2024). pH, dilución y concentraciones de alcohol de AIB en el enraizamiento de *Ficus carica*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *15*(4).
- Guan, L., Murphy, A. S., Peer, W. A., Gan, L., Li, Y., & Cheng, Z. M. (2015). Physiological and molecular regulation of adventitious root formation. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *34*(5), 506–521. <https://doi.org/10.1080/07352689.2015.1090831>

- Hartmann, H. T., Kester, D. E., Davies, F. T., & Geneve, R. L. (2018). *Plant propagation: Principles and practices* (9th ed.). Pearson Education.
- Husen, A. (2012). Role of auxins in plant propagation. *Plant Growth Regulation*, 68(3), 341–349.  
<https://doi.org/10.1007/s10725-012-9718-1>
- Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. (2023). *C. angustifolia Sessé y Moc. ex DC*.  
<https://iiap.gob.pe/catalogo-flora>
- Kinyua, J. M., et al. (2025). Substrate effects on vegetative propagation of forest species. *Journal of Forestry Research*, 36(1), 45–60.
- Klopotek, Y., George, E., Druege, U., & Klaering, H.-P. (2012). Carbon assimilation of petunia cuttings in a non-disturbed rooting environment. *Scientia Horticulturae*, 145, 118–126.
- Kumar, V., Singh, P., & Kumar, R. (2023). Influence of indole-3-butyric acid on rooting in tropical tree species. *Journal of Forestry Research*, 34(2), 455–462. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01456-7>
- Leahey, R. R. B. (2014). Plant cloning: Macropropagation. In R. R. B. Leahey (Ed.), *Plant propagation and agroforestry*. CABI Publishing.
- Legué, V., Rigal, A., & Bhalerao, R. P. (2014). Adventitious rooting: Molecular and physiological aspects. *Plant Cell Reports*, 33(2), 189–201.
- Lloyd, G., & McCown, B. (2019). Commercially feasible micropropagation of woody plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 136, 1–15.

- López, A., Hernández, C., & Martínez, D. (2025). Vegetative propagation challenges of *C. angustifolia* in Andean environments. *South American Journal of Forestry Research*, 12(1), 15–30.
- Martínez, J., et al. (2015). Optimization of rooting protocols in *Cedrela* spp. *Forest Science*, 61(2), 167–175.
- Mendoza, F., & Álvarez, P. (2022). Hormonal control of vegetative propagation in tropical species. *Agroforestry Research*, 39(1), 55–63.
- Ministerio del Ambiente & Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2020). *Estado situacional del género Cedrela en el Perú* (Informe técnico). SERFOR–MINAM.
- Morales Zambrano, D. (2021). *Germinación y sobrevivencia de especies forestales...* [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
- Mu, H., Jin, X., Ma, X., Zhao, A., Gao, Y., & Lin, L. (2022). Ortet age effect in adventitious rooting. *Forests*, 13(9), 1427. <https://doi.org/10.3390/f13091427>
- Núñez Idrogo, H. Y. (2025). *Efecto de reguladores de crecimiento en la micropropagación...* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/8177>
- Paredes, G. E., Vásquez-Díaz, C., Esquerre-Ibáñez, B., Zuñe-da Silva, F., Bazán-Sernaqué, P., & Rojas-Idrogo, C. (2023). In vitro seed germination... *Bosque*, 44(1), 97–109. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000100097>
- Pérez, J. M., & García, R. (2023). Rooting responses of Meliaceae cuttings. *Journal of Tropical Forest Science*, 35(2), 98–110.

- Portal, E. (2015). *Influencia del AIB en Cedrelinga...* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Quiñones, R. (2015). *Propagación vegetativa en especies forestales* [Tesis de maestría]. Universidad de Ucayali.
- Rasmussen, A., & Steffens, B. (2016). The physiology of adventitious roots. *Plant Physiology*, *170*(2), 603–617.
- Ribeiro, J. M., Oliveira, L. S., Costa, R. B., & Xavier, A. (2020). Adventitious rooting in tropical forest species. *Trees*, *34*(6), 1485–1497. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02013-9>
- Ribeiro, M. M., et al. (2020). Vegetative propagation of forest species. *Forest Systems*, *29*(1), e012. <https://doi.org/10.5424/fs/2020291-16132>
- Sedagathoor, S., Kayghobadi, S., & Tajvar, Y. (2016). Rooting of *Pinus mugo* cuttings. *Forest Systems*, *25*(2), eSC08.
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2021). *Estado situacional del género Cedrela en el Perú*. [https://otca.org/wp-content/uploads/2021/01/INFORME-CEDRELA\\_FINAL.pdf](https://otca.org/wp-content/uploads/2021/01/INFORME-CEDRELA_FINAL.pdf)
- Sifuentes Yepes, D. (2021). *Propagación vegetativa del cedro...* [Informe técnico]. IIAP.
- Silva, A. P. M., Souza, G. M., & Paiva, H. N. (2022). Clonal propagation of native forest species. *Journal of Forestry Research*, *33*(4), 1321–1333. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01391-4>
- Singh, H. (2024). Advances in vegetative propagation techniques. *International Journal of Forest Research*, 2024, Article ID 987654.

- Soto Figueroa, J. (2004). *Influencia de auxinas en el enraizamiento...* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Soudre-Zambrano, M., Mueras, L., Limache, A., Guerra, H., Mesén, F., & Pérez, F. (2011). Propagación vegetativa de *Cedrelinga cateniformis*. *Folia Amazónica*, 20(1–2), 83–94. <https://doi.org/10.24841/fa.v20i1-2.334>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Tian, Y., et al. (2024). Advances in vegetative propagation of forest species. *Forest Ecology and Management*, 550, 120–130.
- Universidad Nacional Autónoma de México. (s.f.). *Propagación vegetativa*. <https://www.unam.mx>
- Vásquez, R., et al. (2021). Effect of IBA concentration on shoot elongation. *Journal of Forestry Research*, 32(4), 1123–1132.
- Villegas Torres, G., et al. (2017). *Sustratos como material de última generación*. OmniaScience.
- Xavier, A., Wendling, I., & Santos, G. A. (2023). Vegetative propagation of woody plants. *New Forests*, 54(2), 355–372. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09901-3>
- Zenginbal, H., Haznedar, A., & Dolgun, O. (2014). Effects of IBA on rooting of *Camellia sinensis*. *Journal of Experimental Agriculture International*, 4(12), 1935–1943.

## ANEXO

**Tabla 11**

*Resultados del número de estacas enraizadas de C. angustifolia por tratamiento*

<b>Tratamiento</b>	<b>% de enraizamiento (promedio)</b>	<b>Estacas por tratamiento</b>	<b>Estacas enraizadas (cálculo)</b>	<b>Número de estacas enraizadas</b>
D <sub>1</sub> T <sub>1</sub> (500 mg/L × 150 s)	73,5 %	45	$0,735 \times 45 = 33,08$	33 estacas
D <sub>2</sub> T <sub>1</sub> (1500 mg/L × 150 s)	56,4 %	45	$0,564 \times 45 = 25,38$	25 estacas
D <sub>3</sub> T <sub>1</sub> (4500 mg/L × 150 s)	48,2 %	45	$0,482 \times 45 = 21,69$	22 estacas
D <sub>0</sub> T <sub>3</sub> (0 mg/L × 86400 s)	31,7 %	45	$0,317 \times 45 = 14,27$	14 estacas

*Nota.* Los valores decimales fueron redondeados al entero más cercano para expresar el número de estacas enraizadas.

**Tabla 12**

*Número de estacas con formación de callos en Cedrela angustifolia según tratamiento*

<b>Tratamiento (AIB × Tiempo)</b>	<b>Callosidad (%)</b>	<b>Estacas con callos (de 45)</b>
500 × 150 s	73 %	33 estacas
500 × 3600 s	50 %	23 estacas
0 × 86400 s	37 %	17 estacas

1500 × 86400 s	27 %	12 estacas
0 × 3600 s	23 %	10 estacas
0 × 150 s	13 %	6 estacas
4500 × 150 s	13 %	6 estacas
4500 × 3600 s	10 %	5 estacas
1500 × 150 s	7 %	3 estacas
500 × 86400 s	0 %	0 estacas
1500 × 3600 s	0 %	0 estacas
4500 × 86400 s	0 %	0 estacas

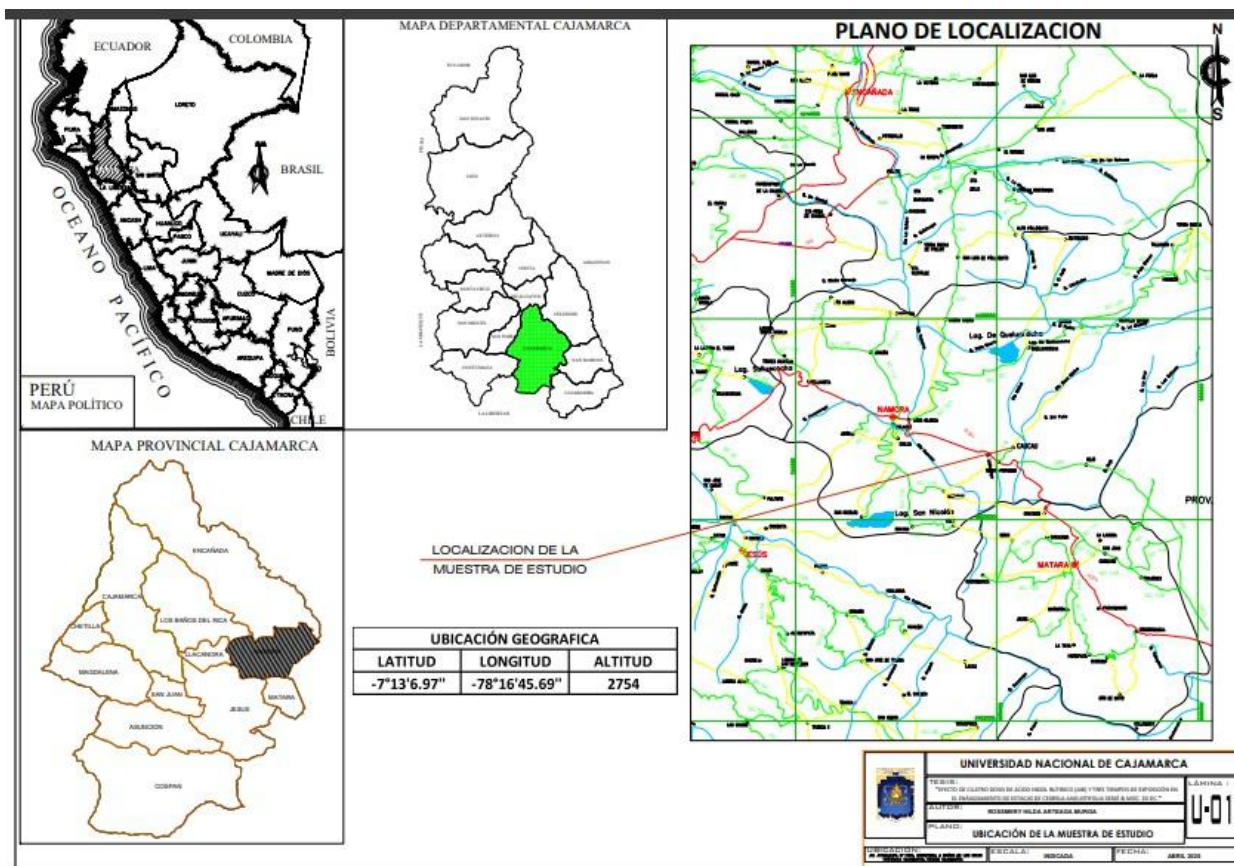
*Nota.* Los valores corresponden al número estimado de estacas con formación de callo a partir de 45 unidades experimentales por tratamiento.

- *Total, de tratamientos: 12, estacas evaluadas: 540, Estacas con callos: 115, Porcentaje general de callosidad:  $115 / 540 = 21.3 \%$*

## Anexos gráficos

**Figura 1**

*Plano de localización del bosque natural donde se extrajeron las muestras, caserío de Caucau, distrito de Namora, provincia y departamento de Cajamarca*



*Nota.* La *C. angustifolia* es una especie que se extingue cada vez más en esta zona es que se le encontró conformando varios ejemplares el cual permitió su estudio con el objetivo de propagarlo y darle la importancia que corresponde.