

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**EFFECTO DE DIFERENTES TRATAMIENTOS EN
LA CAPACIDAD DE ENRAIZAMIENTO DE
ESTAQUILLAS JUVENILES DE *Dipteryx*
*odorata***

Presentado por:

Diego Patricio Zavaleta Gómez

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL

Lima - Perú
2019

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos para calificar la sustentación del Trabajo de Tesis, presentado por el ex-alumno de la Facultad de Ciencias Forestales, Bach. DIEGO PATRICIO ZAVALA GÓMEZ, intitulado “EFECTO DE DIFERENTES TRATAMIENTOS EN LA CAPACIDAD DE ENRAIZAMIENTO DE ESTAQUILLAS JUVENILES DE *DIPTERYX ODORATA*”.

Oídas las respuestas a las observaciones formuladas, lo declaramos:

.....

con el calificativo de

En consecuencia, queda en condición de ser considerado APTO y recibir el título de INGENIERO FORESTAL.

La Molina, 28 de Septiembre de 2017

.....
Mg. Sc. Víctor Manuel Barrera Arroyo
Presidente

.....
Ing. Carlos Fernando Bulnes Soriano
Miembro

.....
Lic. Daysi Rocío Guzmán Loayza
Miembro

.....
Ing. Ignacio Rómulo Lombardi Indacochea
Asesor

DEDICATORIA

Dedicado a mi madre

AGRADECIMIENTOS

*El trabajo de campo de esta tesis ha sido financiado por la empresa Reforestadora Amazónica S.A. y el área de Investigación y desarrollo (I+D), mediante su proyecto “Desarrollo de una tecnología de propagación y manejo de suelos degradados para garantizar la calidad y producción de plántones y árboles de *Dipteryx odorata* Aubl. Willd (shihuahuaco) en Puerto Inca, Huánuco”, a quienes agradezco por haberme dado la oportunidad de realizar el presente trabajo de investigación que conto con todo su respaldo técnico, económico y logístico.*

De manera muy especial al ing. Mg. Sc. Manuel Soudre Zambrano, Gerente I+D de RAMSA y asesor científico de la presente investigación, quien ha contribuido de manera fundamental en la parte experimental, así también por la información proporcionada, sus valiosas orientaciones, contribuciones técnicas y su plena confianza. De igual manera al equipo técnico y los trabajadores del área I+D por su permanente colaboración a lo largo del trabajo en campo, en especial a la ing. Lyanna Sáenz Ramírez y al sr. Alejandro Zambrano.

En la Universidad Nacional Agraria La Molina, al ing. Ignacio Lombardi Indacochea por sus consejos y aportes en distintos aspectos que permitieron desarrollar este documento. A los miembros del jurado por sus sugerencias y aportes. Al Ph.D Carlos Reynel Rodríguez por su apoyo en la identificación botánica de la especie.

RESUMEN

Se evaluó el efecto de la aplicación exógena del ácido indol-3-butírico (AIB), medios de enraizamiento, posición de la estaquilla en el brote y área foliar en la propagación vegetativa por estaquillas de *Dipteryx odorata* (Fabaceae: Papilionoideae), realizándose en dos ensayos consecutivos usando propagadores de sub-irrigación. En el experimento 1, las estaquillas fueron tratadas con diferentes concentraciones de AIB (0, 1000, 3000, 5000 y 7000 mgL⁻¹) y sembradas en tres medios de enraizamiento (arena fina, arena media y arena gruesa). La aplicación de AIB resultó significativa ($p < 0,05$, ANOVA) para la capacidad de enraizamiento, observándose los mejores resultados con 3000 mgL⁻¹ de AIB en arena fina. En el experimento 2, las estaquillas se agruparon según su posición en el brote (basal, media y apical) y recorte de área foliar (1000, 2000 y 3000 mm²). Las estaquillas fueron tratadas con 3000 mgL⁻¹ de AIB y puestas en arena fina. La interacción entre posición de estaquilla y área foliar fue significativa ($p < 0,05$, ANOVA) para el enraizamiento y número de raíces por estaquilla, mientras que la posición de estaquilla resultó significativa ($p < 0,05$, ANOVA) para la longitud promedio de raíces. Se alcanzó un enraizamiento aceptable de 73,3 por ciento con $2,33 \pm 0,33$ raíces de $38,1 \pm 7,3$ mm de longitud con el uso de estaquillas de posición apical, 3000 mm² de área foliar, 3000 mgL⁻¹ de AIB y arena fina. Se concluye que es posible la propagación vegetativa de la especie considerando el efecto de los tratamientos en estudio.

Palabras claves: *Dipteryx odorata*, Propagación vegetativa, Enraizamiento, AIB, Medios de enraizamiento.

ÍNDICE GENERAL

	Página
I. Introducción	1
II. Revisión de Literatura	5
1. Descripción de la especie	5
1.1. Clasificación Sistemática	5
1.2. Descripción Botánica	6
1.3. Distribución.....	7
1.4. Ecología.....	7
1.5. Características Silviculturales	8
1.6. Productos y Usos	10
2. Propagación vegetativa	11
2.1. Propagación vegetativa mediante el enraizamiento de estaquillas	12
2.2. Factores externos que influyen en el enraizamiento de estaquillas	13
2.2.1. Efecto del sistema de propagación.....	13
2.2.2. Efecto del microambiente de propagación.....	14
2.2.3. Efecto del sustrato de enraizamiento.....	16
2.3. Factores internos que influyen en el enraizamiento de estaquillas.....	17
2.3.1. Efecto de la aplicación de auxinas	17
2.3.2. Efecto de la variación del área foliar.....	18
2.3.3. Efecto de la posición de la estaquilla en el brote.....	19
2.3.4. Efecto de la actividad fotosintética.....	20
2.4. Factores relacionados a la condición de la planta madre.....	21
2.4.1. Efecto del estado nutricional de la planta madre.....	21
2.4.2. Efecto del estado de maduración.....	22
2.4.3. Efecto del ambiente	23
2.5. Consideraciones anatómicas y fisiológicas sobre la formación de raíces adventicias en estaquillas.....	24
2.5.1. Aspectos anatómicos en la formación de raíces adventicias.....	24
2.5.2. Aspectos fisiológicos en la formación de raíces adventicias.....	27
3. Antecedentes sobre la propagación vegetativa de especies forestales tropicales en propagadores de Sub-Irrigación	32
4. Antecedentes sobre la propagación vegetativa de especies del género <i>Dipteryx Schreb.</i>	33
III. Materiales y Métodos	35
1. Materiales	35
1.1. Ubicación del área experimental.....	35
1.2. Materiales y Equipos.....	35
2. Metodología	37
2.1. Antecedentes del material experimental.....	37
2.2. Procedimiento experimental para sustratos y Concentraciones de ácido indol-3-Butírico.....	38
2.2.1. Acondicionamiento del sistema de propagación	38
2.2.2. Acondicionamiento de las estaquillas	38
2.2.3. Preparación y aplicación del ácido 3-indol butírico en las estaquillas	39
2.2.4. Instalación de las estaquillas en el propagador.....	40
2.3. Diseño experimental y análisis estadísticos de las variables	41
2.3.1. Diseño experimental	41
2.3.2. Variables evaluadas	43

2.3.3.	Procesamiento y análisis estadístico	44
2.4.	Procedimiento experimental para la posición de estaquilla y área foliar	46
2.4.1.	Acondicionamiento del sistema de propagación	46
2.4.2.	Acondicionamiento de las estaquillas	46
2.4.3.	Instalación de las estaquillas en el propagador.....	47
2.5.	Diseño experimental y análisis estadístico de las variables	47
2.5.1.	Diseño experimental	47
2.5.2.	Variables evaluadas	49
2.5.3.	Procesamiento y análisis de datos.....	50
IV.	Resultados y Discusión	53
1.	Efecto de los sustratos y concentraciones de ácido Indol-3-Butírico.	53
1.1.	Condiciones microclimáticas del proceso.....	53
1.2.	capacidad de enraizamiento en estaquillas juveniles de <i>Dipteryx odorata</i>	54
1.3.	Efectos de las concentraciones del ácido indol-3-butírico	55
1.3.1.	Enraizamiento	57
1.3.2.	Número de raíces por estaquilla	60
1.3.3.	Longitud promedio de raíces	61
1.3.4.	Formación de callos	63
1.3.5.	Formación de brotes.....	65
1.4.	Efectos de los sustratos	67
1.4.1.	Sobrevivencia	67
1.4.2.	Formación de callos	69
1.5.	Efectos de interacción entre factores.....	70
2.	Efecto de la posición de la estaquilla y el área foliar.	74
2.1.	Condiciones microclimáticas del proceso.....	74
2.2.	Capacidad de enraizamiento en estaquillas juveniles de <i>Dipteryx odorata</i>	75
2.3.	Efectos de interacción entre la posición de estaquilla y área foliar	76
2.3.1.	Enraizamiento	77
2.3.2.	Número de raíces por estaquilla	81
2.3.3.	Sobrevivencia	83
2.3.4.	Defoliación.....	85
2.4.	Efectos de la posición de estaquilla	86
2.4.1.	Longitud promedio de raíces.....	87
2.4.2.	Formación de brotes.....	89
2.4.3.	Formación de callos.....	90
V.	Conclusiones.....	93
VI.	Recomendaciones	95
VII.	Referencias bibliográficas.....	97
VIII.	Anexos.....	107

Índice de tablas

	Página
Tabla 1: Clasificación de suelos propuesto por Kopecky según el tamaño de partículas de sus componentes.	17
Tabla 2: Medidas para la preparación de 100 ml solución fitohormonal de ácido indol-3-butírico (AIB).	40
Tabla 3: Descripción de tratamientos evaluados en la primera etapa experimental.	41
Tabla 4: Descripción de tratamientos evaluados en la segunda etapa experimental.	48
Tabla 5: Condiciones microclimáticas en el propagador de sub-irrigación y en el ambiente de propagación registradas durante 45 días, Puerto Inca (Huánuco, Perú).	53
Tabla 6: p-valor y significancia estadística obtenidos en el análisis de la varianza individual para el efecto de los sustratos y las concentraciones de ácido indol-3-butírico (AIB).	55
Tabla 7: Efectos de la concentración de ácido indol-3-butírico en la capacidad de enraizamiento y variables relacionados a la rizogénesis en estaquillas de <i>Dipteryx odorata</i>	56
Tabla 8: Efectos los medios de enraizamiento en variables relacionados al enraizamiento de estaquillas de <i>Dipteryx odorata</i>	67
Tabla 9: Condiciones microclimáticas en el propagador de sub-irrigación y en el ambiente de propagación registradas durante 30 días, Puerto Inca (Huánuco, Perú).	74
Tabla 10: P-valor y significancia estadística obtenidos en el análisis de la varianza individual para el efecto de la posición de estaquilla y el área foliar.	75
Tabla 11: Efectos de interacción de la posición de estaquilla y el área foliar en variables relacionados al enraizamiento de estaquillas de <i>Dipteryx odorata</i>	77
Tabla 12: Efectos las posiciones de estaquilla en variables relacionados al enraizamiento de estaquillas de <i>Dipteryx odorata</i>	87

Índice de figuras

	Página
Figura 1: Estructuras químicas correspondientes a algunas auxinas de ocurrencia natural encontradas en diferentes especies vegetales y auxinas sintéticas. Fuente: Acosta <i>et al.</i> (2013).....	28
Figura 2: Croquis de distribución de tratamientos dentro del propagador de sub-irrigación usados en el primer ensayo.	42
Figura 3: Croquis de distribución de tratamientos dentro del propagador de sub-irrigación usados en el segundo ensayo.....	48
Figura 4: Efecto de las concentraciones de ácido indol-3-butírico (AIB) sobre el enraizamiento de estaquillas de <i>Dipteryx odorata</i>	58
Figura 5: Efecto de las concentraciones de ácido indol-3-butírico (AIB) en el número de raíces por estaquilla.	60
Figura 6: Efecto de las concentraciones del ácido indol-3-butírico (AIB) en la longitud promedio de raíces.	62
Figura 7: Comparativo del número y longitud de raíces por estaquilla de <i>Dipteryx odorata</i> según tratamiento hormonal. Ambas estaquillas fueron instaladas en arena fina.....	63
Figura 8: Efectos del ácido indol-3-butírico (AIB) en la formación de callos en la base de las estaquillas de <i>Dipteryx odorata</i>	64
Figura 9: Efecto de la presencia de callos en la emisión de raíces. En la estaquilla enraizada (derecha) la raíz emerge opuesta al callo.....	65
Figura 10: Efectos del ácido indol-3-butírico (AIB) en la formación de brotes o yemas laterales en estaquillas de <i>Dipteryx odorata</i> después de 45 días.	66
Figura 11: Estaquilla de <i>Dipteryx odorata</i> que evidencia la necrosis del tejido desde la base hasta la parte apical.	69
Figura 12: Comparativo entre sistemas radiculares de estaquillas de <i>Dipteryx odorata</i> según el medio de enraizamiento, ambas fueron tratadas con la misma concentración de AIB.....	72
Figura 13: Efecto de interacción de la posición de la estaquilla y el área foliar sobre el enraizamiento de estaquillas de <i>Dipteryx odorata</i>	78
Figura 14: Efecto de interacción de la posición de la estaquilla y el área foliar sobre el número de raíces por estaquilla en <i>Dipteryx odorata</i>	81
Figura 15: Efectos de la interacción de la posición de la estaquilla y el área foliar sobre el número promedio de raíces por estaquilla de <i>Dipteryx odorata</i>	82
Figura 16: Efecto de interacción de la posición de estaquilla y el área foliar sobre la sobrevivencia de estaquillas de <i>Dipteryx odorata</i>	84

Figura 17:	Distribución de la longitud promedio de raíces en estaquillas de <i>Dipteryx odorata</i> después de 30 días.....	88
Figura 18:	Estaquilla apical de <i>Dipteryx odorata</i> enraizada, se observa la presencia de brotes aéreos sin afectar el sistema radicular.	90
Figura 19:	Formación de callos en especies del género <i>Dipteryx</i> durante su propagación vegetativa.	91

Índice de anexos

	Página
Anexo 1 Requerimientos para la construcción y habilitado del propagador de Sub-Irrigación.....	107
Anexo 2 Efecto de los sustratos y concentraciones del ácido Indol-3- Butírico. Análisis estadístico para el enraizamiento	109
Anexo 3 Análisis estadístico para el número de raíces por estaquilla	112
Anexo 4 Análisis estadístico para la longitud promedio de raíces	115
Anexo 5 Análisis estadístico para la sobrevivencia	118
Anexo 6 Análisis estadístico para la formación de callos.....	122
Anexo 7 Análisis estadístico para la formación de brotes	125
Anexo 8 Análisis estadístico para la defoliación	128
Anexo 9 Efecto de la posición de estaquilla y el área foliar Análisis estadístico para el enraizamiento	131
Anexo 10 Análisis estadístico para el número de raíces por estaquilla	135
Anexo 11 Análisis estadístico para Sobrevivencia	138
Anexo 12 Análisis estadístico para la defoliación	141
Anexo 13 Análisis estadístico para la longitud promedio de raíces	144
Anexo 14 Análisis estadístico para la formación de brotes	147
Anexo 15 Análisis estadístico para la formación de callos.....	150

I. INTRODUCCIÓN

Dipteryx odorata (Aubl.) Willd. (Fabaceae: Papilionoideae) es una especie arbórea de los bosques húmedos de América tropical. Forma parte de un grupo de 29 especies del género *Dipteryx* Schebr. (Maués 2006). Es un árbol de uso múltiple con aplicaciones en la industria tabacalera, cosmética y maderera (Sampaio 1993, Carvalho 2009, Herrero-Jáuregui *et al.* 2012, Grandtner y Chevrette 2013). Precisamente, en esta última se destaca por su madera de alto valor comercial y calidad deseable en construcción civil, pisos, durmientes, construcción pesada, carpintería de exteriores, entre otras. Con presencia cada vez mayor a nivel nacional e internacional. Solo en los últimos cinco años su comercialización ha crecido más de 70 por ciento; convirtiéndose en la segunda especie extraída a nivel nacional, la primera en Madre de Dios, la segunda en Loreto y Ucayali y la tercera en Huánuco (MINAGRI 2015). Su madera es una de las más demandadas en la elaboración de pisos. En 2014, más del 60 por ciento de la producción nacional de pisos de madera fue de la especie, según fuentes del MINAGRI (2015).

La creciente presencia de shihuahuaco (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.), en la industria, se explica por los cambios que ha experimentado la composición de especies comerciales de la Amazonía peruana en el último quindenio y por la aparición de nuevos mercados demandantes de madera dura como el mercado chino (Putzel *et al.* 2013). Esto ha ocasionado una fuerte presión sobre la especie y sobre los bosques que la albergan. Pese a que diversos estudios demuestran su importancia ecológica y económica, es escasa e inadecuada la planificación y manejo de los bosques naturales, así como fuerte el impacto sobre la regeneración natural, y frente a las actuales modalidades de extracción es probable que a mediano y largo plazo no pueda ser aprovechada sosteniblemente (Maués 2006, de Souza *et al.* 2011, Herrero-Jáuregui *et al.* 2012, Putzel *et al.* 2013, Vison *et al.* 2015). Esta situación ha ocasionado que sus poblaciones muestren indicios de declive y fragmentación en la mayor parte de su área de distribución (de Souza *et al.* 2011, Vison *et al.* 2015).

Ante el desafío que representa conservar y aprovechar sosteniblemente a *Dipteryx odorata*, se ha impulsado la investigación silvicultural de la especie. En plantaciones experimentales puras y mixtas, se ha logrado probar su buena adaptación a distintas condiciones

fisiográficas y edáficas, inclusive, en suelos con escasa disponibilidad de nutrientes y en aquellos degradados por actividades antrópicas como la agricultura y el sobrepastoreo (Romo 2005, Ricse 2007, Carranza 2014, Soudre 2016). El éxito de las plantaciones experimentales la coloca al frente de otras especies, convirtiéndola en una alternativa ideal para programas de reforestación en áreas degradadas y donde otras especies no pueden prosperar (Soudre 2016). Pero a futuro, la implementación operativa de estos programas requerirá de plantas con disponibilidad inmediata en cantidades y calidades aceptables. Actualmente, en viveros, la propagación sexual es la única vía de reproducción para la especie; no obstante, las semillas que dan origen a estas plántulas no cuentan con certificaciones o documentación que respalde su procedencia y calidad (Galván 2007).

La propagación sexual como único medio de producción podría traer, en el tiempo, algunos inconvenientes que harían poco viable la producción comercial de plántulas de calidad. Se sabe que las semillas de *Dipteryx odorata* son sensibles a la desecación y pierden rápidamente su viabilidad, además, las tasas de germinación son variables e irregulares, así como lo es la fructificación (Maués 2006, Carvalho 2009, Ramos 2012, Flores 2014, Prestes *et al.* 2016). Asimismo, con el método sexual se observa una alta heterogeneidad genotípica y fenotípica en las poblaciones naturales y plantaciones experimentales (Vison *et al.* 2015). A esto se suma el deterioro y fragmentación de su hábitat, lo cual podría afectar la polinización, dispersión de semillas, diversidad genética y capacidad reproductiva (Maués 2006, de Souza *et al.* 2011, Herrero-Jáuregui *et al.* 2012, Putzel *et al.* 2013, Vison *et al.* 2015). Aspectos que hacen que la propagación sexual presente inconvenientes, al menos, a corto y mediano plazo, mientras tanto, es necesario buscar nuevas alternativas a la semilla.

Es así como la propagación vegetativa, por su parte, permite mantener, asegurar y multiplicar genotipos valiosos; obtener ganancias genéticas en menor tiempo y explotar la varianza genética total (Mesén 1998, Hartmann *et al.* 2011). Igualmente, su uso es indicado cuando se presentan inconvenientes en la reproducción sexual de las especies o estas presentan ciclos reproductivos largos y/o irregulares (Rojas *et al.* 2004). La propagación vegetativa mediante estaquillas permite capturar las ventajas de la propagación asexual, además, de ser la técnica que mejores resultados ha tenido en especies tropicales (Leakey *et al.* 1990, Longman 1993, Mesén 1998, Hartmann *et al.* 2011). De igual manera, el sistema de propagación debe brindar condiciones adecuadas para que el proceso de enraizamiento sea exitoso. Los propagadores de sub-irrigación han demostrado ser tan eficaces como

cualquier otro sistema de propagación (Leakey *et al.* 1990). A ello se suman una serie de ventajas como su fácil operatividad y baja inversión, convirtiéndola en una propuesta viable desde el punto de vista técnico y económico (Leakey *et al.* 1990, Mesén 1998). Precisamente, para diversas especies tropicales se tienen resultados que demuestran la posibilidad de propagar asexualmente por el método de estaquillas usando propagadores de sub-irrigación (Leakey *et al.* 1990, Mesén 1993, Tchoundjeu y Leakey 1996, Mesén y Ruiz 2010, Soudre *et al.* 2011, de Andrade 2014, Azad y Matin 2015).

Por lo tanto, considerando la relevancia ecológica, silvicultural y económica que tiene *Dipteryx odorata* Aubl. Willd., el presente trabajo tiene como objetivo general contribuir al conocimiento de la propagación vegetativa de la especie mediante el desarrollo de un método reproducible empleando estaquillas fisiológicamente juveniles, por ello se han considerado los siguientes objetivos específicos:

- Establecer una concentración adecuada de sustancia promotora del enraizamiento (ácido indol-3-butírico), la cual influya positivamente en la capacidad de enraizamiento.
- Determinar un sustrato que facilite el enraizamiento y crecimiento radicular.
- Distinguir la mejor posición de estaquilla capaz de tener efectos positivos sobre la capacidad de enraizamiento.
- Definir el área foliar necesaria para asegurar un adecuado enraizamiento.

**“página en blanco
incluida ex-profeso por
razones de
compaginación”**

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE.

1.1. CLASIFICACIÓN SISTEMÁTICA

Brako y Zarucchi (1993), Carvalho (2009), Grandtner y Chevrette (2013) e ILDIS (2015) definen taxonómicamente a la especie de la siguiente manera:

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida
Subclase:	Rosidae
Orden:	Fabales
Familia:	Fabaceae
Subfamilia:	Papilionoideae
Género:	<i>Dipteryx</i> Schreb.
Especie:	<i>Dipteryx odorata</i> (Aublet) Willdenow in <i>Sp. Pl.</i> iv. 3 (2): 910. 1802
Sinonimia botánica:	<i>Coumarouna odorata</i> Aublet <i>Coumarouna tetraphylla</i> (Benth.) Aublet <i>Dipteryx tetraphylla</i> Benth.

El nombre común varía de país a país inclusive dentro del mismo. Se le conoce como cumaru, cumaru-ferro, cumaru-do-amazonas, cumaru-da-folha-grande, cumaru verdadeiro y cumaruzeiro (Brasil); almendrillo, almendro y visguero (Bolivia); charapilla, choibá y serrapia (Colombia); gaïac de cayenne (Guayana Francesa); eboe (Costa Rica, Honduras y

Panamá); yape y serrapia (Venezuela); shihuahuaco y shihuahuaco de hoja grande (Perú). Internacionalmente es conocida y comercializada como cumaru o brazilian teak (teca brasilera) (Sampaio 1993, Carvalho 2009, Grandtner y Chevrette 2013, Putzel *et al.* 2013, Flores 2014).

1.2. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

Carvalho (2009) la describe como una especie arbórea perennifolia o perennifolia de mudanza foliar. Son árboles del estrato emergente de hasta 50 m de altura y 1,5 m de diámetro a la altura del pecho (Herrero-Jáuregui *et al.* 2012, Flores 2014). Con fuste recto y cilíndrico, con aristas y protuberancias desde la base hasta el primer metro de altura; ramificación dicotómica, tortuosa y abundante; copa frondosa y bien formada (Carvalho 2009). El ritidoma es áspero y de color amarillo grisáceo, de 3 mm de espesor; la corteza es de color marrón amarillento, de textura lisa, laminar a fibrosa, astringente y sin exudaciones (Carvalho 2009, Flores 2014).

Las hojas son compuestas, alternas e imparipinadas, conformadas por cinco o siete folíolos sin estipulas. Los folíolos son asimétricos, elípticos de 85 mm a 145 mm de largo y de 50 mm a 75 mm de ancho, coriáceos, espesos y glabros, con puntuaciones traslucidas; base asimetría, trunca y redondeada; ápice agudo a muy cortamente acuminado y borde entero (Spichiger *et al.* 1990, Francisco 2010). El raquis alado se proyecta sin folíolo hacia la parte apical (Carvalho 2009).

Las inflorescencias son de tipo panícula dispuestas en racimos axilares o terminales. De dos a ocho racimos por inflorescencias, de 0,15 m a 0,3 m de longitud con hasta 120 flores (Carvalho 2009). Las flores son hermafroditas, papilionácea, aromáticas, zigomorfas con perianto rosado, cáliz ferruginoso y corola purpura a violeta, de 21,9 mm a 25,4 mm de largo (Spichiger *et al.* 1990, Carvalho 2009, Flores 2014). Los frutos monospermos son drupáceos, oblongos, comprimidos, indehiscentes y leñosos de color marrón claro, de 60 mm de longitud y de 35 mm de ancho con 20 mm de espesor aproximadamente (Spichiger *et al.* 1990, Francisco 2010). La semilla cilíndrica tiene cotiledones rectos, de color marrón y radícula terminal (Carvalho 2009).

1.3. DISTRIBUCIÓN

Dipteryx odorata es una especie arbórea endémica de América tropical (Grandtner y Chevrette 2013). Carvalho (2009) señala que se distribuye desde los 7° de latitud Norte (Honduras) hasta los 8° de latitud Sur (Brasil) y hasta los 850 msnm de altitud.

La especie está ampliamente distribuida en la zona tropical de América. Desde los bosques húmedos de Honduras hacia los bosques amazónicos de América del sur, en países como Colombia, Costa Rica, Brasil, Bolivia, Guyana, Guayana Francesa, Surinam, Venezuela y Perú (Carvalho 2009, Grandtner y Chevrette 2013).

1.4. ECOLOGÍA

Son árboles longevos de los bosques húmedos primarios, aunque también es posible su presencia en bosques secundarios (Sampaio 1993, Carvalho 2009, Flores 2014). Refiriéndose a ello, Carvalho (2009) y Maués (2006), mencionan que es una especie de la fase final de la sucesión considerada clímax de crecimiento rápido o demandante de luz. Sobre la clasificación según su requerimiento de luz, investigaciones como las de Romo (2005) y Putzel *et al.* (2013) encuentran que el mayor crecimiento se da en condiciones de claros más que bajo la sombra del dosel arbóreo, respondiendo positivamente la apertura del dosel, por lo que la especie encajaría en el grupo de las heliófitas.

Sin embargo, esta postura no es compartida, pues existen estudios que cuestionan esta clasificación ecológica. Investigadores como de Souza *et al.* (2011), al estudiar poblaciones naturales de la especie, encontraron una distribución diamétrica tipo “J invertida” característica de las especies tolerantes a la sombra o esciófitas. Al igual que Carvalho (2009), quien afirma que la especie pertenecería este grupo. Por lo que su clasificación dentro de un gremio ecológico es aún tema de debate. Quizás, como indican Putzel *et al.* (2013), citando a Chambers *et al.* y Clark y Clark, el hecho de que se la clasifique como esciófita se deba a que pobremente su maduración sea muy lenta; sin embargo, agregan, con mayor disponibilidad de luz en las etapas de vida juvenil, pueden madurar y crecer muy rápido, alcanzando alturas de hasta 5 m en 2 años (Romo 2005) o 11.5 m en 6 años (Ricse 2007).

En relación a sus requerimientos bioclimáticos, Carvalho (2009) refiere que la especie se desarrolla en precipitaciones que oscilan entre los 1 200 y 2 500 mm anuales. Aunque menciona el caso de 7 000 mm anuales en Cochabamba, Bolivia. Según sea el caso, es

evidente que la especie tiene afinidad por ambientes con altas precipitaciones. Respecto a la temperatura media anual, indica Carvalho (2009), que encuentra buenos crecimientos entre 24,8 °C y 26,7 °C.

Se considera como especie de amplia distribución espacial y aleatoria, pero con frecuencia y abundancia muy variable, por lo general poco abundante (Soares y de Carvalho 1998, Maués 2006, de Souza *et al.* 2011, Herrero-Jáuregui *et al.* 2012, Vison *et al.* 2015). Carranza (2014) menciona estudios realizados por la Asociación Peruana para la Conservación de la Naturaleza (APECO) en distintas comunidades del Purús (Ucayali) que demuestran la adaptación de shihuahuaco a distintas condiciones fisiográficas y edáficas. Ciertamente, menciona que se encontraron árboles en sectores inundados y en terrazas, también una proporción considerable fue encontrada en colinas; lo mismo en pendientes suaves en su mayoría, en pendientes suaves a medias y hasta en pendientes fuertes. Al igual como sucede con *Dipteryx alata* Vogel, se trataría de una especie con extensa distribución espacial producto de su amplia variabilidad genotípica y fenotípica, la cual le permitiría una alta adaptabilidad ecológica (Canuto *et al.* 2008, Santos *et al.* 2014, Soares *et al.* 2014, Vison *et al.* 2015).

1.5. CARACTERÍSTICAS SILVICULTURALES

La especie presenta ciclo fenológico asincrónico y la fructificación puede ser bianual (Maués 2006) o bienal (Flores 2014). La floración suele ocurrir al final del periodo de lluvias (setiembre a abril), mientras que la fructificación en el auge del estiaje (mayo a setiembre), según puntualiza Maués (2006). En la localidad de Puerto Inca (Huánuco), la floración ocurre a mediados de setiembre y se prolonga hasta abril; la aparición de frutos empieza hacia junio y su caída se da entre julio y setiembre (observación personal).

El número de semillas por kilogramo va desde 130 hasta 500, las cuales no requieren de tratamientos pre-germinativos (Carvalho 2009). Ensayos han demostrado que el porcentaje de germinación es muy variable e irregular. Se reportan valores que van desde 10 por ciento hasta más de 90 por ciento, en condiciones de laboratorio y cuando el contenido de humedad es alto (Silva *et al.* 2010, Ramos 2012, Prestes *et al.* 2016). Del mismo modo, se ha evidenciado que las semillas son sensibles a la desecación. Se ha logrado hasta 92 por ciento de germinación, a partir del cuarto día, cuando el contenido de agua de las semillas está por encima del 50 por ciento; pero cuando esta llega al 19 por ciento (grado crítico), la germinación no solo se retrasa, sino que apenas alcanza el 47,5 por ciento, aunque es posible

que llegue hasta a menos de 36 por ciento (Prestes *et al.* 2016). A ello se suma que su viabilidad disminuye en corto tiempo y necesita de condiciones especiales para su almacenamiento (Carvalho 2009). En definitiva, se trataría de una especie con semillas de naturaleza recalcitrante. Es preciso mencionar que, actualmente los viveros propagan a la especie solo de manera sexual, desconociéndose las fuentes semilleras (Galván 2007).

La emergencia de las plántulas se inicia de tres a ocho semanas después de la siembra (Carvalho 2009). En vivero, cuando las plántulas son manejadas a luz plena, al cabo de tres meses, se observa rápido creciendo alcanzando hasta 0,3 m de altura, buen vigor, mayor biomasa aérea y raíces largas (Uchida y Campos 2000). En la misma línea, Putzel *et al.* (2013) evidenciaron que plántulas de la especie, en estadios iniciales, son tolerantes a la sombra, pero requieren de luz plena para continuar con su crecimiento, el cual afirman los mencionados investigadores es rápido.

A nivel de plantaciones experimentales, en general, se puede afirmar que las especies del género *Dipteryx* Schebr. presentan comportamiento satisfactorio y potencial para su instalación en plantaciones forestales operativas puras y mixtas. Así, para *Dipteryx micrantha* Harms, en los suelos aluviales de la estación biológica Cocha Cashu (Madre de Dios), Romo (2005), al cabo de dos años, observó crecimientos de 5 m de altura y 0,05 m de diámetro, cuando las plántulas crecieron en ambientes con mayor disponibilidad de luz. Del mismo modo, Ricse (2007) registró 11,0 m de altura y 0,137 m de diámetro con 100 por ciento de sobrevivencia, en suelos ácidos y degradados en Ucayali. Mientras que para *Dipteryx alata* Vogel, Mesta (2012), al cabo de tres años, encontró árboles de 5,84 m de altura y 0,063 m de diámetro en suelos degradados en Campo Verde (Ucayali).

Por su parte, *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. es la más promisoría en los planes de reforestación en la región Ucayali (Carranza 2014). A pesar que Chambers *et al.*, citados por Putzel *et al.* 2013, indican que el crecimiento es lento en condiciones naturales; no obstante, refieren los autores, que las plantaciones de shihuahuaco son potencialmente efectivas. Su análisis, es corroborado al evaluar el crecimiento de individuos de la especie en distintas comunidades aledañas a las zonas de extracción del Bosque Nacional Alexander von Humboldt (Padre Abad, Ucayali y Puerto Inca, Huánuco), donde, las tasas de crecimiento no difieren de lo encontrado en experimentos de campo. Es así que al cabo de dos años encontraron árboles de 5,42 m de altura y 0,548 m de diámetro, en promedio. En otro estudio, Carranza (2014) señala la posibilidad de tener incrementos medios anuales de 1,00

metro de altura después de tres años, esto para una plantación experimental en Tambopata (Madre de Dios). Mientras que Soudre (2016) señala que es una especie de crecimiento medio a alto, incluso en áreas degradadas por actividades antrópicas (por ejemplo, ganadería muy antigua) y establecida en sistemas puros (3,5 m x 3,5 m) tiene un Incremento Medio Anual (IMA) de 18 a 20 m³/ha/año. En el mismo territorio descrito, pero asociado a otras especies forestales o en sistemas agroforestales puede llegar a tener un IMA de 6 a 8 m³/ha/año. Toda esta experiencia válida el gran potencial que tiene la especie para desarrollarse adecuadamente en plantaciones.

1.6. PRODUCTOS Y USOS

En la literatura, como han señalado Herrero-Jáuregui *et al.* (2012), la mayoría de autores describen a *Dipteryx odorata* como una especie de uso múltiple. Esto incluye usos maderables y no maderables. La madera es de alta densidad (950 kg/m³ a 1 000 Kg/m³) y elevada durabilidad natural (Sampaio 1993). Presenta características deseables para la construcción civil, naval, de puentes, durmientes, carrocería, carpintería de exteriores y pisos (Grandtner y Chevrette 2013). Al respecto, Putzel *et al.* (2008) y MINAGRI (2015) indican que es una las maderas más solicitadas en la elaboración de pisos en general, destacan su creciente demanda y presencia en el mercado asiático en especial en China.

Sobre los usos no maderables, las semillas con altos contenidos de cumarina (40 por ciento de su peso seco), ácido oleico y linoleico son requeridos por la industria tabacalera, cosmética y del perfume. La demanda es alta, sobre todo en Europa y Estados Unidos de América. De igual manera las semillas y frutos se usan como diaforéticos, analgésicos, antiespasmódicos, antiparasitarios y en el tratamiento de problemas cardiorrespiratorios (Sampaio 1993, Carvalho 2009).

2. PROPAGACIÓN VEGETATIVA.

La propagación vegetativa o asexual es un tipo de reproducción o regeneración de las plantas, mediante el cual, células, tejidos y órganos dan origen a un nuevo individuo con las mismas características de la planta madre u *ortet* (Longman 1993, Rojas *et al.* 2004). Refiriéndose a esto, Taiz y Zeiger (2006) y Hartmann *et al.* (2011) indican que es posible obtener una planta nueva genéticamente idéntica a la planta madre, pues resaltan que las células meristemáticas vegetales tienen la capacidad fisiológica y la información genética necesaria para hacerlo, es decir, son totipotenciales. Igualmente, las células diferenciadas en ciertas condiciones tienen la capacidad de perder este estado y regresar a la condición de meristemáticas. Esto, en condiciones adecuadas, origina el crecimiento y diferenciación de tejidos somáticos (Hartmann *et al.* 2011).

Este mecanismo de reproducción natural es posible también realizarla de manera asistida con el propósito de multiplicar y conservar genotipos de interés, sea, por su situación de vulnerabilidad o por su valor económico (crecimiento, alta productividad, calidad superior, tolerancia fitosanitaria o abiótica, entre otros) (Rojas *et al.* 2004, Leakey 2014). También, permite acortar los ciclos reproductivos, ser más eficiente en la propagación cuando la vía sexual no es la mejor alternativa; además de uniformizar la época, calidad y cantidad de plántulas requeridas en los programas de reforestación (Rojas *et al.* 2004). Mesén (1998), citando a Libby y Rauter, añade que mediante la propagación vegetativa es posible obtener ganancias genéticas en corto tiempo, ya que este método es capaz de explotar los componentes aditivos y no aditivos de la varianza genética total, es decir, no solo se transfiere la información genética sino también las características fenotípicas de interés comercial, las cuales no son heredadas mediante la recombinación genética.

Esta forma de reproducción se realiza mediante los siguientes métodos: propagación por estacas, acodos, injertos, estolones, yemas, raíces, hojas, estructuras florales, gemación, apomixis y cultivo de tejidos vegetales *in vitro* (Longman 1993, Rojas *et al.* 2004, Hartmann *et al.* 2011, Leakey 2014). Cada uno de los métodos mencionados presenta sus propias características, variantes y condiciones para conseguir sus objetivos.

2.1. PROPAGACIÓN VEGETATIVA MEDIANTE EL ENRAIZAMIENTO DE ESTAQUILLAS

La propagación vegetativa mediante estacas consiste en el corte de secciones de tallos, hojas o raíces obtenidos de plantas jóvenes, brotes epicórmicos o rebrotes de tocones, las cuales bajo ciertas condiciones tienen la capacidad de formar raíces adventicias y brotes aéreos hasta convertirse en una planta independiente (Rojas *et al.* 2004, Hartmann *et al.* 2011). Esta técnica es ampliamente usada en agricultura, horticultura y silvicultura para la multiplicación de plantas elites selectas obtenidas de poblaciones naturales o de programas de mejora genética (Mesén 1998, Soudre *et al.* 2008). En la propagación de especies forestales la técnica más usada es el enraizamiento de estacas de tallo (Hartmann *et al.* 2011). Hartmann *et al.* (2011) explican que este método presenta una serie de ventajas, entre los que destacan aspectos económicos y operativos; además, indican que con pocas plantas madre es posible producir nuevas plántulas en un espacio limitado.

Sobre las estacas de tallo, Leakey (2004) indica que existen dos grandes grupos: las estacas juveniles con hojas o estaquillas y las estacas maduras sin hojas (del original en inglés: *leafy softwood cuttings* y *leafless hardwood cuttings*, respectivamente). Cada una de estas, sostiene, presenta sus propias características y factores que determinan su enraizamiento. El primer grupo, depende de la cantidad de carbohidratos actuales y producidos durante el proceso. El segundo grupo, depende de la hidrólisis y cantidades de carbohidratos almacenados en los tejidos del tallo.

Longman (1993), destaca la eficacia de las estaquillas frente a las estacas más lignificadas; la razón, explican Rojas *et al.* (2004), es porque los tejidos juveniles, en comparación con los maduros, son más vigorosos, presentan fuerte dominancia apical y se regeneran fácilmente por métodos asexuales. Finalmente, Mesén (1998) menciona que una estaquilla queda definida por una sección de entrenudo, una hoja superior o parte de ella y al menos una yema.

2.2. FACTORES EXTERNOS QUE INFLUYEN EN EL ENRAIZAMIENTO DE ESTAQUILLAS

2.2.1. EFECTO DEL SISTEMA DE PROPAGACIÓN

Existen diferentes sistemas de propagación usados en el proceso de enraizamiento de estaquillas. Existen desde los diseños más sofisticados y elaborados como los invernaderos con sistemas de nebulización y niebla intermitente, hasta los económicos de baja tecnología como los poli-propagadores sin aspersión (propagador de sub-irrigación) y las bandejas bajo tinglado (Hartmann *et al.* 2011). Cualquiera de ellos debe ser capaz de estimular la actividad fisiológica en la hoja y promover la actividad meristemática en el tallo. Por tanto, como indica Leakey (2014), estos sistemas de propagación deben garantizar un medio propicio para el transporte de fotoasimilados de la hoja a la base del tallo, y agua de la base del tallo a la hoja.

El sistema de propagación debe mantener la atmósfera con baja demanda de evaporación, brindando rangos de temperatura adecuada y permitiendo el ingreso apropiado de luz (Leakey 2004, Hartmann *et al.* 2011). Además, el sistema de propagación debe minimizar el estrés fisiológico que surge después del corte del brote, el cual puede ser originado por la pérdida de agua de los tejidos a causa de la transpiración o por la pérdida de carbohidratos a causa de la respiración de los tejidos, según refiere Leakey (2014).

Hacia la década de 1990 diversos trabajos entre el Institute of Terrestrial Ecology (ITE, *a posteriori* Centre for Ecology and Hydrology) de Escocia y el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) de Costa Rica permitieron ensayar y mejorar el propagador de sub-irrigación desarrollado por la institución británica años atrás (Mesén 1998). Respecto a estos propagadores, Leakey *et al.* (1990) mencionan que son muy efectivos en la propagación vegetativa de especies tropicales. Estos, al igual que cualquier sistema de propagación, permiten mantener la base de la estaquilla en un medio húmedo y la superficie de la hoja en condiciones de bajo déficit de presión de vapor de agua para minimizar el estrés hídrico (Leakey 2014). Mesén (1998) y Leakey (2004) sostienen que, además, de las ventajas descritas anteriormente se debe sumar su bajo costo, fácil implementación y capacidad para adaptarse a condiciones rurales.

De fácil construcción y operación, son descritos por Leakey *et al.* (1990) como una caja de madera con tapa y cubierta impermeable de polietileno transparente. El propagador se basa en el principio de capilaridad del agua, donde su ciclo de evaporación (durante el día) y

condensación (durante la noche) permiten mantener una atmósfera de alta humedad (Mesén 1998).

2.2.2. EFECTO DEL MICROAMBIENTE DE PROPAGACIÓN

Durante el proceso de enraizamiento deben darse las condiciones microclimáticas necesarias para favorecer la rizogénesis de las estaquillas. El microambiente ideal debe mantener los niveles óptimos de irradiación, temperatura del aire, humedad, temperatura del sustrato y balance de agua en las estacas (Loach, citado por Mesén 1993).

Durante el proceso de enraizamiento se requiere de cantidades adecuadas de luz para permitir la actividad fisiológica de las estaquillas (Leakey *et al.* 1990). Mesén (1993) demostró que las especies son capaces de enraizar adecuadamente cuando la irradiación máxima está entre 400 y 600 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. Pero sugiere que estos rangos deben ser evaluados para cada especie, aunque menciona que con niveles más bajos se tendrían buenos resultados. Por su parte Newton *et al.* (1992), encontraron que con una irradiación constante de 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ se tenían efectos significativos en la tasa fotosintética durante la propagación de estaquillas de *Terminalia spinosa*. Autores como Leakey (2014) recogen estas ideas, destacando que es importante que el nivel de sombreado no restrinja la actividad fotosintética de las hojas, por lo que sugiere una irradiación por encima de 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

Por otro lado, Mesén (1998) señala que las condiciones climáticas en zonas tropicales pueden superar fácilmente esos valores, por ello recomienda el uso de mallas de polietileno para contrarrestar esos niveles que pueden ser perjudiciales para las estaquillas. Igualmente, en algunas especies se ha comprobado que la calidad lumínica y los fotoperiodos largos y continuos influyen significativamente en la capacidad de enraizamiento (Hartmann *et al.* 2011).

El incremento de la irradiación trae consigo la reducción del potencial osmótico (plasmólisis) que origina la pérdida de agua en la célula y deshidratación por la acumulación de solutos extracelulares (Leakey 2004). Además, la excesiva radiación provoca la acumulación de carbohidratos, cierre de estomas, destrucción de auxinas fotosensibles y cambios en las relaciones hídricas que pueden retrasar o inhibir el enraizamiento, comentan Hartmann *et al.* (2011). La disminución de la irradiación limita la producción de carbohidratos y el suministro de auxinas desde los tejidos jóvenes de la hoja a la base del tallo de la estaca (Hartmann *et al.* 2011).

La temperatura es consecuencia directa de los niveles de irradiación y los rangos óptimos varían para cada especie (Mesén 1993). Hartmann *et al.* (2011) han sugerido que la temperatura óptima debe estar entre 21°C y 27°C, mientras que Mesén y Ruiz (2010) indican que las experiencias con especies tropicales han demostrado que la temperatura óptima está entre 20°C y 30°C, bajo este rango se ha logrado enraizar exitosamente varias de ellas. Por su parte, Soudre (2016) indica que con temperaturas por debajo de 35°C es posible propagar vegetativamente varias especies tropicales. Leakey (2004) y Hartmann *et al.* (2011) concuerdan al afirmar que altas temperaturas del aire tienden a agotar las reservas de carbohidratos, aumentan la pérdida de agua, propician el cierre de estomas y estimulan el crecimiento de yemas retardando la iniciación de la rizogénesis. Como ya se mencionó se debe proporcionar sombra al ambiente de propagación para reducir la irradiación a niveles adecuados y consecuentemente, reducir la temperatura dentro de los propagadores. Mesén (1998) recomienda el uso de mallas de polietileno (75 a 85 por ciento de sombra).

Es necesario que el propagador brinde condiciones de baja evaporación y evite la pérdida de agua de las estacas (Leakey 2004). El efecto que tiene la humedad relativa del ambiente de propagación sobre las estaquillas ha sido descrito por Mesén *et al.* (citados por Núñez 1997), quienes destacan que los altos valores y las variaciones mínimas en la humedad, permiten mantener una condición de turgencia a lo largo del proceso de enraizamiento, lo cual es crítico durante las primeras semanas.

Mesén (1998) destaca que el propagador de sub-irrigación permite mantener la humedad relativa alrededor de 90 por ciento y sobre 60 por ciento cuando la irradiación está por encima de $1\ 000\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. En trabajos con especies tropicales Leakey *et al.* (1990), encontraron que el decrecimiento de la humedad relativa de 95 por ciento a 75 por ciento, causó un incremento en el déficit de presión de vapor y afectó la capacidad de enraizamiento de las estaquillas. Es especialmente importante evitar el déficit de presión de vapor, resalta Leakey (2004), pues esta se asocia con la pérdida de agua. El déficit hídrico en sus diferentes grados puede ocasionar marchitamiento, cierre de estomas y hasta la muerte de la estaquilla. También el aumento del déficit de presión de vapor se relaciona con el incremento de ácido abscísico considerado inhibidor del enraizamiento (Loach citado por Mesén 1993).

2.2.3. EFECTO DEL SUSTRATO DE ENRAIZAMIENTO

Mesén (1998) puntualiza la necesidad de considerar al sustrato como parte integral del sistema de propagación. Por lo general, la elección del sustrato o medio de enraizamiento se basa a menudo en la disponibilidad de los materiales o la experiencia personal, comenta Leakey (2014). Hartmann *et al.* (2011), por su parte, recomiendan el uso de sustratos con buena aireación, alta capacidad de retención de agua, buen drenaje, asépticos y capaces de crear un ambiente propicio para el enraizamiento. Es igual de importante que el medio de enraizamiento no presente inconvenientes para el crecimiento de las raíces, tenga buena consistencia para mantener a las estacas en su posición, facilite la extracción e inserción de la misma, sea barato y de fácil adquisición en cualquier momento (Mesén y Leakey citados por Mesén 1998). Aparte de proporcionar humedad en la base de corte, Leakey (2014) recomienda que el medio enraizamiento deba permitir la respiración de los tejidos y evitar la anoxia, la cual estimula la putrefacción y la mortalidad.

Dentro de los muchos sustratos utilizados se destaca el uso de arena, pues esta ayuda al crecimiento de raíces ramificadas delgadas y flexibles, las cuales son apropiadas para extraer y volver a plantar (Hartmann *et al.* 2011). Diversas investigaciones han encontrado diferencias para cada especie al probar distintos sustratos. La arena fina ha sido frecuentemente usada por dar buenos resultados, incluyendo a *Cedrela odorata* (Díaz 1991), *Cordia alliodora* (Mesén 1993), *Hyeronima alchorneoides*, *Terminalia oblonga* (Núñez 1997), *Plukenetia volubilis* (Mesén y Ruiz 2010), *Cedrelinga cateniformis* (Soudre *et al.* 2011) y *Myrciaria dubia* (de Andrade 2014), por ejemplo. Otras investigaciones indican que algunas especies responden mejor a sustratos de mayor granulometría, por ejemplo, *Gmelina arborea* (Leakey *et al.* 1990), *Manilkara bidentata* (Cervantes 2011) y *Swietenia macrophylla* (Vásquez 2009) lo hacen con arena media; mientras que otras como *Amburana cearensis* (Flores 2010) y *Simarouba amara* (Soudre 2010) reportan buenos resultados con el uso de arena gruesa. En este trabajo se usó la clasificación granulométrica presentada en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de suelos propuesto por Kopecky según el tamaño de partículas de sus componentes.

Material	Característica	Tamaño (mm)
Piedra	-	Mayor de 70
Grava	Gruesa	30 – 70
	Media	5 – 30
	Fina	2 – 5
Arena	Gruesa	1 – 2
	Media	0,2 – 1
	Fina	0,1 – 0,2
Polvo	Grueso	0,05 – 0,1
	Fino	0,02 – 0,05
Limo	Grueso	0,006 – 0,02
	Fino	0,002 – 0,006
Arcilla	Gruesa	0,0006 – 0,002
	Fina	0,0002 – 0,0006
Ultra - Arcilla	-	0,00002 – 0,0002

FUENTE: Juárez y Rico (2005)

2.3. FACTORES INTERNOS QUE INFLUYEN EN EL ENRAIZAMIENTO DE ESTAQUILLAS

2.3.1. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE AUXINAS

Las auxinas son una clase de fitohormonas que están involucradas en muchos aspectos del crecimiento y desarrollo de las plantas (Ludwig-Müller 2000). A través del tiempo se ha demostrado la respuesta positiva de las auxinas en el enraizamiento de estacas, primero en horticultura y luego su uso se ha extendido al campo forestal (Hartmann *et al.* 2011). La aplicación exógena de auxinas es especialmente relevante, pues proporciona las siguientes ventajas: (1) las estaquillas enraízan más rápido y con mayor número de raíces, (2) aquellas estaquillas tratadas presentan el mayor porcentaje de enraizamiento, (3) promueven la hidrólisis del almidón y la movilización de nutrientes hacia la base del corte de la estaquilla (Leakey 2004).

La regulación fitohormonal dependerá de la especie (genotipo) y de los estímulos físicos del ambiente. Mientras que la respuesta será afectada por la concentración y proporción de cada una de estas fitohormonas (Rojas *et al.* 2004). Según Longman (1993), la respuesta de las auxinas sobre la capacidad de enraizamiento dependerá de la interacción con otros tratamientos. Como lo ha sugerido Mur (1987), a diferencia de otros metabolitos, pequeñas cantidades de estos compuestos son capaces de inducir respuestas morfogénicas en la planta.

El ácido indol-3-acético (AIA) es la auxina más común en las plantas y la primera en ser estudiada (Ludwig-Müller 2000). Sin embargo, en la mayoría de especies se ha recomendado, en extenso, el uso del ácido indol-3-butírico (AIB) y ácido 1-Naftalenácetico (ANA), ambas más efectivas que el AIA (Hartmann *et al.* 2011). El AIB es actualmente la auxina sintética más usada y la que mejor respuesta ha dado en el enraizamiento de especies hortícolas y forestales (Mesén 1998, Ludwig-Müller 2000, Marks *et al.* 2002, Hartmann *et al.* 2011, Legué *et al.* 2014).

Respecto a su aplicación los métodos más usados son: las mezclas en polvo (con talco neutro), la técnica del remejo en soluciones diluidas, la aplicación con microjeringas y la inmersión rápida en solución concentrada de la auxina (Mesén 1998, Hartmann *et al.* 2011). El método por inmersión rápida permite tratar varias estaquillas a la vez y es más económica en comparación al uso de preparados comerciales en polvo; consiste en sumergir las estaquillas de 2 a 5 mm de la base por cinco segundos en la solución auxínica (diluida en alcohol puro), la inmersión prolongada puede ocasionar intoxicación. Este método requiere la evaporación del alcohol mediante la aplicación de una corriente continua de aire antes de introducir la estaquilla en el medio de enraizamiento (Mesén 1998).

2.3.2. EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL ÁREA FOLIAR

La presencia de la hoja en la estaquilla es importante en el proceso de enraizamiento, pues esta proporciona fotoasimilados necesarios para la sobrevivencia de la estaquilla y para el crecimiento y desarrollo de los primordios radiculares (Leakey 2004). También, Hartmann *et al.* (2011), reconocen la importancia de la hoja, ya que consideran que esta es fuente de auxinas y sustancias promotoras del enraizamiento. Esto último ha sido corroborado en diversos estudios, los cuales utilizando analizadores de gas infrarrojo encontraron que la capacidad de enraizamiento se maximiza en las estacas fotosintéticamente activas, es decir en aquellas que contaban con hojas (Leakey 2014).

Para que la hoja sea capaz de cumplir un papel relevante durante el enraizamiento, debe cumplir tres condiciones: (1) ser fotosintéticamente activa, (2) no tener deficiencias nutricionales y (3) estar libre de síntomas de enfermedad o plaga (Leakey 2004). Es posible que, durante la permanencia de la estaquilla en el propagador, se presente la caída de hojas, principalmente, por el incumplimiento de lo descrito anteriormente y/o por un ambiente desfavorable.

Para maximizar la capacidad de enraizamiento, la hoja como órgano fisiológicamente activo de la estaquilla, debe equilibrar la transpiración y la fotosíntesis (Leakey 2014). Se sabe que el área foliar óptima varía para cada especie, clon, área foliar específica, densidad estomática, edad de la hoja y morfología (Leakey 2004). Por ello, como sugieren Leakey *et al.* (1990) y Mesén (1998) lo ideal es ensayar hasta lograr el área foliar que represente mejor este equilibrio. Tal como lo resalta Leakey (2014), determinar el área óptima de la hoja es un aspecto muy importante para desarrollar un protocolo de propagación exitoso, especialmente en especies difíciles de enraizar.

El efecto del área foliar ha sido descrito, entre otros, por Newton *et al.* (1992) en *Terminalia spinosa*, quienes encontraron que la eliminación total de las hojas y áreas foliares grandes (3 000 mm²) impedían el enraizamiento. Así también, la investigación permitió demostrar que el incremento del área foliar de 750 a 1 500 mm² (área foliar óptima) aumentaba la tasa de enraizamiento y longitud de las raíces. Concluyeron que las estaquillas de la especie son fáciles de arraigar siempre que las estaquillas tengan hojas para producir asimilados. Frente a esto, Leakey (2004) destaca dos situaciones: primero, cuando el área foliar es muy pequeña, se evidencia la baja disponibilidad de carbohidratos necesarios para la sobrevivencia y crecimiento del primordio radicular; segundo, cuando el área foliar es muy grande también lo es la pérdida de agua por transpiración, estrés hídrico y cierre de estomas, esto último, limita la capacidad fotosintética dificultando la difusión de CO₂. Es por lo tanto necesario equilibrar las ventajas de la fotosíntesis y las desventajas de la respiración, sentencia.

2.3.3. EFECTO DE LA POSICIÓN DE LA ESTAQUILLA EN EL BROTE

Tan importante como el área foliar es la posición original de la estaquilla en el brote y su condición de madurez en la planta madre u *ortet*. La topófisis se entiende como el efecto de la posición inicial del brote en la planta madre u *ortet* e influye en el hábito de crecimiento de la estaquilla, el cual puede ser ortotrópico o plagiotrópico (Rojas *et al.* 2004).

Dodd y Power (1988), explican, que esto se debe al estado de diferenciación fisiológica y desarrollo de los meristemos apicales en la planta madre. Sostienen que sus efectos se evidencian en diferencias morfológicas, anatómicas y fisiológicas. Lo cual se traduce en diferentes respuestas de las estaquillas durante el proceso de enraizamiento. De acuerdo con Taiz y Zeiger (2006) y Hartmann *et al.* (2011), esto se debería a la presencia de tejidos y células diferenciadas, principalmente en partes basales, las que contrastan con los tejidos apicales que presentan células con mayor posibilidad para desdiferenciarse y organizarse nuevamente.

Mesén (1998), indica que, dependiendo de la posición inicial y estado fisiológico del brote, se tendrá mayor o mejor posibilidad de enraizamiento. Menciona, además, que brotes laterales tienen más tendencia a enraizar (mayor presencia de carbohidratos), pero las plantas que se forman a partir de estos pueden tener tendencia plagiotrópica, por ello, es recomendable el uso de estacas obtenidas de brotes verticales. De igual manera, señala, que a lo largo del brote existe un gradiente de juvenilidad que influye sobre el enraizamiento y debe ser probada para cada especie, aunque de manera general, recomienda eliminar el entrenudo terminal, susceptible al marchitamiento, y los entrenudos basales demasiados lignificados.

En la propagación vegetativa de especies forestales tropicales se ha comprobado que la capacidad de enraizamiento depende de la posición inicial de la estaquilla en el brote. En *Cordia alliodora* (Mesén 1993) y *Plukenetia Volubilis* (Mesén y Ruiz 2010) se obtuvo buen enraizamiento con estaquillas de posiciones medias y basales. Mientras que en *Prosopis juliflora* (Leakey *et al.* 1990), *Khaya ivorensis* (Tchoundjeu y Leakey 1996) y *Amburana cearensis* (Flores 2010) se registró el máximo porcentaje de enraizamiento en estaquillas de secciones apicales.

2.3.4. EFECTO DE LA ACTIVIDAD FOTOSINTÉTICA

Las estaquillas dependen de la cantidad de carbohidratos actuales y producidos en la fotosíntesis durante el proceso de enraizamiento (Leakey 2004). El número de raíces y la capacidad de enraizamiento están estrechamente relacionados con la tasa fotosintética, según refiere Leakey (2004). Al respecto, trabajos realizados por Hoad y Leakey (citados por Leakey 2014) ilustran la importancia de la fotosíntesis para asegurar un enraizamiento exitoso, una buena velocidad de enraizamiento y un adecuado número de raíces por estaquilla. Mientras que Veierskov (1988) menciona que los carbohidratos en la estaquilla

mejoran la producción de raíces, siempre y cuando las condiciones fisiológicas sean favorables.

La fotosíntesis depende del número de fotones interceptados y no de la intensidad de luz (Hartmann *et al.* 2011). En el proceso de enraizamiento, la irradiación debe ser la suficiente para asegurar la generación de fotoasimilados necesarios la rizogénesis y el crecimiento de radicular (Loach citado por Mesén 1993). La baja irradiación puede ser usada, en principio, para acelerar la rizogénesis por la reducción del estrés hídrico, pero posteriormente, debe aumentarse para que el crecimiento de los primordios radiculares sea mayor (Hartmann *et al.* 2011). Es importante considerar el efecto de la longitud de onda de la luz, la intensidad lumínica y el fotoperiodo sobre la estaquilla, como ya se mencionó líneas arriba.

En estudios con *Dipteryx odorata*, Gonçalves *et al.* (2001) sugieren que la especie ha desarrollado estrategias evolutivas para optimizar la acumulación y uso de pigmentos fotosintéticos en ambientes de baja luminosidad y de protección contra la fotodestrucción en ambientes de elevada luminosidad.

2.4. FACTORES RELACIONADOS A LA CONDICIÓN DE LA PLANTA MADRE

2.4.1. EFECTO DEL ESTADO NUTRICIONAL DE LA PLANTA MADRE

El estado nutricional de la planta donante influye extensamente en la iniciación y crecimiento de las raíces de la estaquilla (Veierskov 1988, Rojas *et al.* 2004). Se considera importante la presencia de carbohidratos, nitrógeno, zinc, potasio y cualquier otro nutriente que esté involucrado en los procesos metabólicos asociados a la diferenciación y formación del sistema radicular adventicio (Hartmann *et al.* 2011).

Igual de significativo es el equilibrio entre bajos contenidos de nitrógeno y altos contenidos de carbohidratos para favorecer el enraizamiento. El nitrógeno en cantidades adecuadas favorece la síntesis de ácidos nucleicos y proteínas (Hartmann *et al.* 2011). La reducción nitrógeno en las plantas donantes, a causa de factores ambientales, explica Veierskov (1988), puede reducir la iniciación y número de raíces adventicias en la estaquilla. Por el contrario, altos niveles de nitrógeno se han correlacionado negativamente con el enraizamiento, lo que sugiere que la correlación entre las altas relaciones C / N y el enraizamiento puede deberse a niveles altos de nitrógeno (Hartmann *et al.* 2011).

La relación entre los carbohidratos y la formación de raíces adventicias es aún controvertida, afirman Hartmann *et al.* (2011). Sin embargo, los mismos autores, resaltan que las reservas de azúcares solubles (carbohidratos solubles) y carbohidratos de almacenamiento (almidones o carbohidratos insolubles) son importantes para el enraizamiento, puesto que son la base para la construcción de macromoléculas complejas, elementos estructurales y fuentes de energía. Finalmente mencionan que, aunque el contenido de carbohidratos de la planta madre y el enraizamiento a veces pueden estar correlacionados positivamente, los carbohidratos no tienen un papel regulador en el enraizamiento. Una correlación positiva entre el contenido de carbohidratos y el enraizamiento puede revelar que el suministro continuo de fotoasimilados es insuficiente para apoyar un enraizamiento óptimo.

Los carbohidratos, como principal fuente de energía de la estacilla, son importantes para activar el proceso rizogénico (Puri y Khara, citados por Núñez 1997). Pese a todo, Leakey (2014) subraya que, aunque existe la suposición general de que el éxito del enraizamiento está asociado con un balance de carbono positivo y un gradiente de concentración dentro de la estacilla, poco se sabe sobre las relaciones entorno a los procesos fisiológicos relacionados al enraizamiento y los contenidos de carbono de la planta madre.

Mesén (1993) indica que no siempre la aplicación de fertilizantes a la planta madre significa incremento en la capacidad de enraizamiento de las estaquillas. Su afirmación se basa en experiencias con *Triplochiton scleroxylon*, la cual respondió positivamente a la fertilización mineral con NPK lo que resultó en un mayor enraizamiento. Por otro lado, en *Khaya ivorensis* la aplicación excesiva de fertilizantes no solo no representó incremento en la capacidad de enraizamiento de las estaquillas, sino que el incremento de nitrógeno significó mayor mortandad. Aunque, también, reconoce que en muchas especies la fertilización actúa positivamente en el enraizamiento, pero debe buscarse el equilibrio entre las dosis y las frecuencias de aplicación.

2.4.2. EFECTO DEL ESTADO DE MADURACIÓN

La rizogénesis depende, en la mayoría de casos, de la edad fisiológica de los tejidos (Mur 1987). Hartmann *et al.* (2011) refieren que las estacas tomadas de partes juveniles enraízan con mayor facilidad que las adultas. Para Legué *et al.* (2014), la dificultad que presentan los tallos maduros para formar raíces adventicias es causada por la falta de capacidad celular para organizar meristemas en presencia de auxinas. Además, las plantas juveniles, en comparación con las maduras, son más vigorosas, presentan fuerte dominancia

apical y se regeneran fácilmente por métodos asexuales (Rojas *et al.* 2004). La presencia de callos, en muchos casos, representa un factor limitante para la formación de raíces adventicias, entre las múltiples causas se destacan el estado nutricional de la estaquilla y la edad de los tejidos (Mur 1987).

La experiencia llevada a cabo con *Amburana cearensis* permite ilustrar el efecto de la madurez de la planta madre sobre la capacidad de enraizamiento. Flores (2010) cita los trabajos de Pinedo y Manta y Schwizer; el primero obtuvo cinco por ciento de enraizamiento con estacas de ocho años; los segundos 60 por ciento de enraizamiento con estacas de dos años; y por su parte, Flores (2010) consiguió 72,5 por ciento de enraizamiento con estaquillas de dos meses de edad. Similar comportamiento se ha observado en *Eucalyptus* ssp. (Hartmann *et al.* 2011). Esto demuestra que la capacidad rizogénica disminuye al aumentar la edad ontogénica de la planta madre. Hay que agregar que Taiz y Zeiger (2006) mencionan que la inducción del enraizamiento podría complicarse por la fisiología y fase de crecimiento de la planta donante.

Por lo tanto, la propagación vegetativa requiere de material fisiológicamente juvenil o rejuvenecido con habilidad para formar raíces. Para superar la pérdida de la condición juvenil, Mesén (1998) sugiere lo siguiente: talar el árbol y utilizar los rebrotes producidos en el tocón; estimular la formación de brotes de yemas en la base de árboles en pie; injertos o uso de plántulas producidas por semillas. Cada uno de estos métodos presenta ventajas y desventajas que deben ser analizadas antes de su ejecución.

2.4.3. EFECTO DEL AMBIENTE

Los efectos del medio ambiente sobre las plantas se llaman perífisis (Dodd y Power 1988). La calidad e intensidad lumínica, el fotoperiodo, la época de colecta, la disponibilidad de CO₂ y la humedad del suelo son factores a los que se encuentra expuesta la planta donante y que afectan la capacidad de enraizamiento de las estaquillas (Mesén 1993). Algunos genes pueden ser activados o desactivados por la perífisis o ser más eficaces que otros en respuesta a tratamientos externos vinculados a su propagación vegetativa (Rojas *et al.* 2004). Hartmann *et al.* (2011) recomiendan evitar el uso de plantas con síntomas de deficiencia de nutrientes o atacadas por enfermedades e insectos; aquellas afectadas por heladas o sequías o cuyo ciclo fenológico sea de floración o fructificación.

El aumento de la intensidad lumínica estimula la producción de brotes, pero tiende a reducir ligeramente la capacidad de enraizamiento, pues se reduce la tasa de auxinas endógenas en los brotes (Hartmann *et al.* 2011). No obstante, existe discrepancia para esta afirmación, pues en algunos casos la intensidad lumínica puede inhibir o retardar la capacidad de enraizamiento, en otras promoverla o simplemente no tener influencia, porque para cada especie existe un óptimo de intensidad lumínica donde el enraizamiento es máximo (Mesén 1993).

Otro aspecto a considerar es la humedad del suelo, la cual debe ser adecuada para estimular la producción de brotes sanos y vigorosos. Climas secos y calientes reducen la formación de brotes y merman la condición fisiológica adecuada para el enraizamiento, por lo que las estaquillas estarán propensas a sufrir estrés hídrico y quemaduras (Mesén 1998). La época del año influye directamente en las condiciones climáticas a las que está expuesta la planta madre, Hartmann *et al.* (2011) y Mur (1987), basándose en varios estudios, sostienen que la capacidad de enraizamiento puede ser influenciada por las fases de crecimiento y el estadio bioquímico de la planta madre a lo largo del año.

2.5. CONSIDERACIONES ANATÓMICAS Y FISIOLÓGICAS SOBRE LA FORMACIÓN DE RAÍCES ADVENTICIAS EN ESTAQUILLAS

2.5.1. ASPECTOS ANATÓMICOS EN LA FORMACIÓN DE RAÍCES ADVENTICIAS

La formación de raíces adventicias es la etapa fundamental en la propagación vegetativa de cualquier especie (Han *et al.* 2009, Legué *et al.* 2014). La formación de raíces dependerá del tipo de tejido y las células que lo conforman; se tienen dos tipos de raíces originadas a partir de órganos preexistentes, por un lado, están las raíces laterales y por el otro, las raíces adventicias.

Las raíces laterales se forman en el periciclo de las raíces primarias, mientras que las raíces adventicias se forman en órganos sobre el suelo como hipocótilo, tallos y hojas (Legué *et al.* 2014). Una raíz adventicia se origina en células cambiales u otras células meristemáticas, su origen se da bajo circunstancias inusuales (Han *et al.* 2009, Legué *et al.* 2014). Las raíces adventicias en estacas herbáceas se originan próximas al haz vascular, pero en estacas leñosas de plantas perennes, las raíces tienen su origen en células de parénquima próximo al floema o en el floema, en el cambium, en callos o lenticelas (Hartmann *et al.* 2011).

La formación de raíces adventicias es un proceso complejo que involucra aspectos genéticos, bioquímicos, fisiológicos y anatómicos. Según Mur (1987) y Han *et al.* (2009), de manera general, el desarrollo de una raíz adventicia se divide en tres estadios, mientras que para Legué *et al.* (2014) existen cuatro etapas que han sido descritas en la propagación por estaquilla de especies arbóreas, cita los trabajos de De Klerk *et al.* y Fett-Neto *et al.* en *Eucalyptus* spp., *Malus* sp., *Pinus* spp. y *Populus* spp. De acuerdo con Han *et al.* (2009), Hartmann *et al.* (2011), Legué *et al.* (2014), estas etapas son:

- 1) *Activación*, las células se vuelven competentes para responder a los factores de señal, ocurren cambios bioquímicos y moleculares antes que cualquier evento citológico;
- 2) *Inducción*, la reactivación del ciclo celular permite la desdiferenciación de las células parenquimáticas del tallo lo que conduce progresivamente a la formación del primordio y la división celular;
- 3) *Activación del primordio radicular*, se inicia la formación progresiva de nuevos tejidos, se evidencia la diferenciación de las células meristemáticas en primordios radiculares;
- 4) *Crecimiento*, el primordio de la raíz se alarga y establecen las conexiones vasculares.

La formación de raíces adventicias es posible gracias a la capacidad organogénica de los tejidos que dependen de dos características de las células vegetales. Primero, cada célula contiene la información genética necesaria para reconstruir una nueva planta. Segundo, las células con cierto grado de madurez son capaces de diferenciarse y volver a la condición de células meristemáticas (Mur 1987, Taiz y Zeiger 2006). Además de ello, Han *et al.* (2009) sugieren que la predisposición de la estaquilla para el enraizamiento se debe a condicionamientos anatómicos (morfología celular particular) y fisiológicos (complejos estimuladores de la rizogénesis).

De manera que, existen componentes relacionados a la anatomía de la estaquilla que pueden influir en la performance para la formación de raíces adventicias. De este modo, se pueden presentar factores anatómicos relacionados al tallo como el diámetro y la longitud de la estaca, grado de lignificación, estructuras del leño y elementos del xilema (Hartmann *et al.* 2011) y factores anatómicos relacionados a la hoja como su morfología, potencial hídrico, edad, área foliar y distribución (Mur 1987).

Por otro lado, el crecimiento celular podría influir e inclusive complicar la rizogénesis (Mur 1987). Mur (1987) y Legué *et al.* (2014) destacan el aumento de la concentración endógena de inhibidores de naturaleza fenólica durante el crecimiento de la planta madre. Por ejemplo, indican que las peroxidasas, involucradas en la biosíntesis de la lignina, están también asociadas con la degradación de las auxinas, por consiguiente, con el descenso de la capacidad rizogénica. La incapacidad para formar raíces de los tallos maduros, explican Legué *et al.* (2014), se debe a la falta de capacidad celular de estos tejidos para organizar meristemas en presencia de estímulos auxínicos.

La formación de callos y raíces son eventos independientes en la mayoría de casos, pero pueden ocurrir de manera simultánea, pues las condiciones internas de la estaquilla y microambientales requeridas por ambos son semejantes (Hartmann *et al.* 2011). Mientras que para algunas especies forestales la formación del callo suele ser necesaria para la formación de raíces adventicias (Cameron 1968, OuYang *et al.* 2015, Hartmann *et al.* 2011), en otras especies se ha notado que la formación de callos no necesariamente precede a la rizogénesis, inclusive su presencia sería indeseable (Mur 1987, Flores 2010, de Andrade 2014). Por lo tanto, como sugiere Mesén (1998), la presencia de callos, en desmedro de la formación de raíces adventicias, podría deberse a desordenes ocasionados por un desbalance hormonal.

En investigaciones con *Dipteryx odorata*, Januário *et al.* (2005) encontraron moléculas de 7-hidroxi-4', 6-dimethoxyisoflavone (del original en inglés) un isoflavonoide presente en extractos crudos obtenidos de callos formados en explantes. La presencia de este metabolito secundario fue once veces mayor en callos que en raíces y otros órganos intactos, por tanto, se sugiere que los callos acumularían grandes cantidades de este flavonoide. El cual tendría implicancias en la formación de raíces adventicias.

Estudios confirmarían lo encontrado por Januário *et al.* (2005), pues como lo señalan Marks *et al.* (2002) durante la cicatrización de la herida se pueden liberar flavonoides que pueden ser inhibidores del enraizamiento adventicio. Esto ha sido corroborado por Ludwig-Müller (2000) quien menciona la existencia de inhibidores químicos del ácido indol-3-butírico de naturaleza flavonoide como el ácido N-1-Naphthylphthalmic. De acuerdo a Taiz y Zeiger (2006) y Legué *et al.* (2014), los flavonoides tienen un papel regulador en las auxinas actuando como moduladores de su transporte polar. Ante esta

evidencia debe considerarse la presencia y efecto de los callos durante la propagación vegetativa de *Dipteryx odorata*.

2.5.2. ASPECTOS FISIOLÓGICOS EN LA FORMACIÓN DE RAÍCES ADVENTICIAS

La formación de raíces en estacas es, para algunas especies, un proceso espontáneo, mencionan Acosta *et al.* (2013), pero resaltan que en especies recalcitrantes a la propagación asexual es necesaria la aplicación de reguladores del crecimiento (auxinas sintéticas) para estimular el enraizamiento. Las auxinas son compuestos químicos con actividad biológica involucradas en muchos aspectos del crecimiento y desarrollo vegetal; tales como la embriogénesis, la dominancia apical, la organogénesis, el desarrollo cambial, el desarrollo de frutos, el crecimiento del tallo y la rizogénesis (Ludwig-Müller 2000, Marks *et al.* 2002, Han *et al.* 2009, Acosta *et al.* 2013).

Las plantas sintetizan principalmente ácido indol-3-acético (AIA); mientras que otras auxinas son sintetizadas de manera natural solo por algunas especies como el ácido indol-3-butírico (AIB), ácido 4-cloroindol-3-acético (4-Cl-AIA) y ácido fenilacético (PAA) (Ludwig-Müller 2005). A pesar que el ácido indol-3-acético (AIA) es por mucho la auxina más frecuente en las plantas y fisiológicamente la más importante, su efectividad suele ser baja para lograr el enraizamiento (Mesén 1998). Por ello desde hace varios años se ha logrado sintetizar compuestos capaces de inducir y acelerar la formación de raíces adventicias. Los productos más usados son las auxinas sintéticas como el ácido indol-3-butírico (AIB), ácido 1-Naftalenácético (ANA), ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) y derivados de los ácidos benzoico y picolínico (Han *et al.* 2009, Hartmann *et al.* 2011, Acosta *et al.* 2013) (Figura 1).

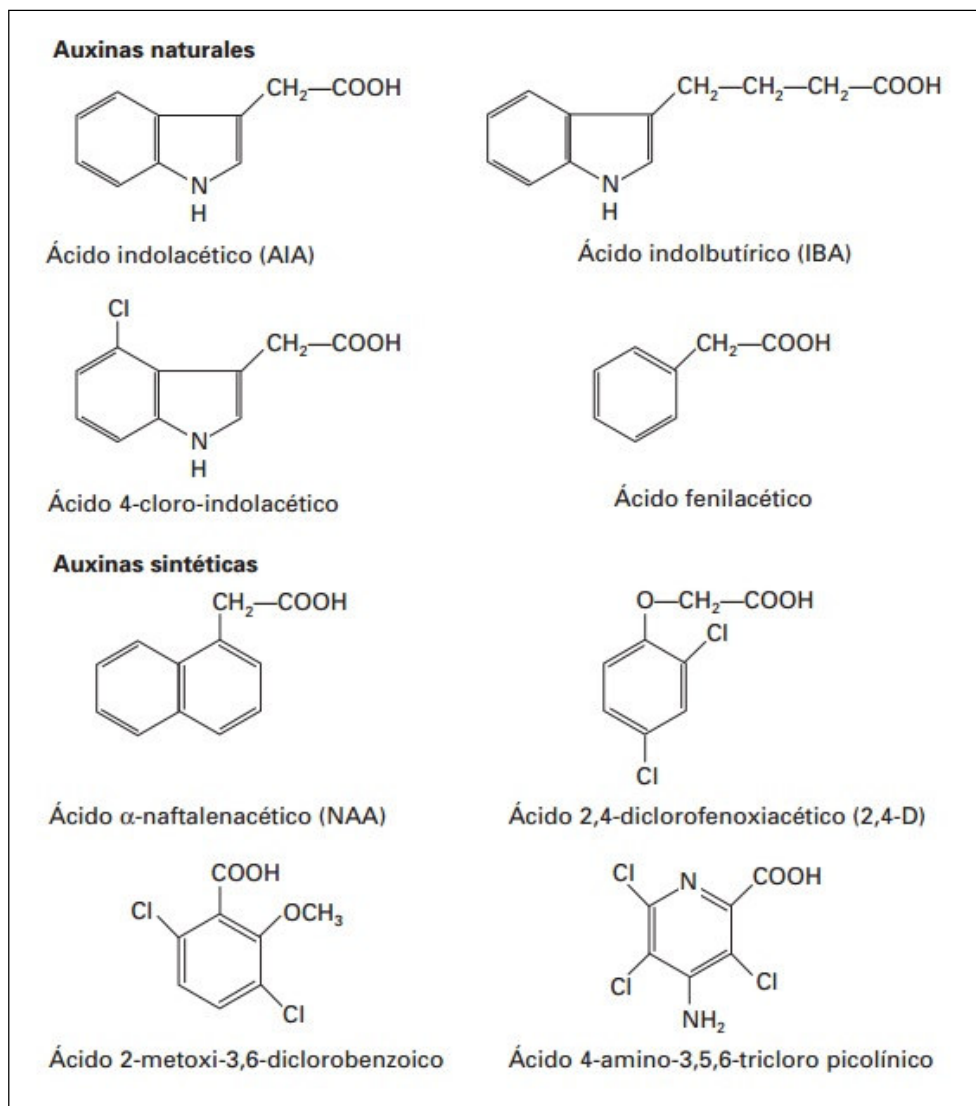


Figura 1: Estructuras químicas correspondientes a algunas auxinas de ocurrencia natural encontradas en diferentes especies vegetales y auxinas sintéticas. Fuente: Acosta *et al.* (2013).

El uso del ácido indol-3-butírico (AIB) se ha extendido desde el campo agronómico hasta el campo forestal, esto porque ha demostrado ser efectivo en la estimulación del enraizamiento de varias especies, no es tóxico en un amplio rango de concentraciones, presenta fotoestabilidad y resistencia al ataque de microorganismos, y al ser insoluble en agua permanece más tiempo en el sitio de aplicación (Mesén 1998). Además, las auxinas retardan la caída de las hojas, el cual es un síntoma de abscisión. Taiz y Zeiger (2006) aseguran que la abscisión se presenta cuando las concentraciones endógenas de auxina no se están produciendo en cantidades adecuadas y cuando la producción del ácido abscísico es mayor.

El ácido indol-3-butírico (AIB) se ha encontrado como compuesto endógeno, en forma libre y conjugada (Ludwig-Müller 2000). A pesar que son reconocidos los beneficios que tiene la aplicación exógena de este regulador del crecimiento en el enraizamiento adventicio, aún se discute su mecanismo de acción en las plantas. Estudios genéticos en *Arabidopsis thaliana* sugieren que el AIB ejerce su acción pasando por los peroxisomas, donde sufriría una reacción similar a la β -oxidación de los ácidos grasos que lo transformaría en ácido indol-3-acético (AIA) (Han *et al.* 2009, Acosta *et al.* 2013). Entonces, bajo esta premisa, la oxidación de AIB serviría como sumidero de almacenamiento de AIA. Sin embargo, otros estudios sugieren que el AIB tiene función auxínica propia sin la conversión previa a AIA (Ludwig-Müller 2000).

La biosíntesis del ácido indol-3-acético (AIA) ha sido ampliamente estudiada y se reconocen hasta tres vías dependientes del triptófano y una independiente a este aminoácido (Taiz y Zeiger 2006, Acosta *et al.* 2013). Por su parte, Ludwig-Müller (2000) indica que son tres las vías para la biosíntesis del ácido indol-3-butírico (AIB): (1) una vía análoga al AIA a través de un análogo de triptófano con una cadena lateral más larga, (2) por reacciones de alargamiento de cadena similares a las encontradas en biosíntesis de ácidos grasos utilizando AIA como base, y (3) por una vía diferente al triptófano con indol como precursor putativo. De todas ellas, indica Ludwig-Müller (2000), la segunda es la más probable. Se ha sugerido, también, que el AIB se forma por la acetilación de AIA con acetil-CoA en el grupo carboxilo (Han *et al.* 2009).

Las auxinas son sintetizadas en las regiones jóvenes y se transportan por la combinación de dos procesos, (1) el transporte a través de las células comunicantes del floema y (2) el transporte direccional (transporte polar auxínico) que es responsable de generar gradientes fisiológicamente significativas en la planta (Marks *et al.* 2002, Legué *et al.* 2014). Marks *et al.* (2002) y Segura (2013) descartan la aplicación exógena directa de auxinas y la importancia del transporte polar en el enraizamiento y crecimiento radicular.

El mecanismo de transporte auxínico es basipétalo, siendo las únicas fitohormonas transportadas de esta manera (Taiz y Zeiger 2006, Acosta *et al.* 2013). Marks *et al.* (2002) indican que, para que este proceso sea posible se requiere mantener un pH y una gradiente eléctrica a través de la membrana celular con absorción saturable dentro y fuera de la célula. Además, sostienen que, para que sea posible la formación de raíces adventicias, las células deben ser competentes y receptivas a las señales auxínicas. La auxina aplicada basalmente

puede inducir la rizogénesis por acción directa sobre las células receptoras adyacentes a la zona de tratamiento o activando la ruta del transporte polar auxínico antes de hacer efecto en las células.

Los efectos fisiológicos de las auxinas aún no son del todo claros, pero existen indicios para suponer que actuarían modificando la expresión de los genes favoreciendo la interacción entre la célula y la pared celular, y también, mediante la producción de uno o varios “factores de ablandamiento de la pared” causando un rápido incremento en la extensibilidad celular (Taiz y Zeiger 2006, Acosta *et al.* 2013, Legué *et al.* 2014). Rojas *et al.* (2004) señalan que la acción de las auxinas se sitúa a nivel de la membrana celular, modificando su permeabilidad. Esto, indican, lleva consigo la modificación del funcionamiento celular y la activación de su metabolismo. Los efectos son sobre el crecimiento celular, la atracción de nutrientes y otras sustancias al sitio de aplicación. Esto se ajusta a lo indicado en la teoría del crecimiento por acidificación indicada por Acosta *et al.* (2013). Ellos sostienen que la estimulación del crecimiento por las auxinas se debe a la secreción de protones hacia el espacio apoplástico con disminución de su pH por debajo de 5,5 y la consiguiente alteración de la estabilidad de los enlaces de la pared celular o de la actividad de ciertas enzimas. También se debe mencionar que la acción de las auxinas no es aislada, puesto que también participan el etileno, giberelinas, citoquininas y otros cofactores (Acosta *et al.* 2013).

En la propagación vegetativa, la formación de raíces adventicias es la etapa clave del proceso (Legué *et al.* 2014), esto tiene muchas implicaciones prácticas en la producción de especies agronómicas y forestales de interés comercial. Es por ello que, la mayoría de estudios sobre la función de las auxinas en el enraizamiento adventicio se han planteado como estudios de dosis-respuesta (Leakey 2004). Las investigaciones llevadas a cabo indican la necesidad de aplicar exógenamente estos reguladores, donde queda claro que las concentraciones aplicadas exógenamente varían según la especie, los clones, grado de lignificación de la estacilla, método de aplicación, sistema de propagación, entre otros (Hartmann *et al.* 2011).

Dentro de la estacilla estas variaciones dependen de la concentración endógena de auxinas, la presencia de cofactores e inhibidores del enraizamiento, y de la interacción entre estos factores (Mur 1987, Leakey *et al.* 1990, Longman 1993). Es preciso anotar que no todas las especies requieren la aplicación exógena de auxinas para el enraizamiento (Rojas *et al.* 2004, Acosta *et al.* 2013), sin embargo, existen especies difíciles de enraizar, las cuales

necesariamente requieren de esta aplicación para estimular el enraizamiento adventicio (Acosta *et al.* 2013, Leakey 2014).

En general, indican Hartmann *et al.* (2011), las estaquillas herbáceas responden bien cuando son tratadas con concentraciones bajas de auxinas sintéticas (hasta 500 mgL⁻¹) con poco tiempo de exposición y las estaquillas más lignificadas requieren altas concentraciones de auxinas (1 000 a 6 000 mgL⁻¹) expuestas a las soluciones por más tiempo. Por ejemplo, de Andrade (2014) trabajando en la propagación de estaquillas herbáceas de *Myrciaria dubia* encontró que con 324,4 mg.L⁻¹ de AIB se optimiza enraizamiento. Díaz (1991) encontró los mejores resultados en *Cedrela odorata* y *Gmelina arborea* con la aplicación de 2 000 mgL⁻¹ de AIB, mientras que Mesén (1993) con *Cordia alliodora* logró hasta 70 por ciento de enraizamiento usando una concentración de 16 000 mg.L⁻¹ de AIB.

3. ANTECEDENTES SOBRE LA PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE ESPECIES FORESTALES TROPICALES EN PROPAGADORES DE SUB-IRRIGACIÓN.

Desde el desarrollo de los propagadores de sub-irrigación y su uso en la reproducción asexual de especies forestales mediante estaquillas, se ha logrado demostrar la capacidad que tienen estos sistemas en para propagar exitosamente cual quiera especie forestal. Esta argumentación se fundamenta en las investigaciones realizadas en distintos países de América, África y Asia con especies arbóreas tropicales de diferentes ecosistemas, por ejemplo, se puede mencionar trabajos en *Acacia tortilis*, *Eucalyptus deglupta*, *Prosopis juliflora* (Leakey *et al.* 1990); *Cedrela odorata*, *Gmelina arborea* (Díaz 1991); *Terminalia spinosa* (Newton *et al.* 1992); *Ceiba pentandra*, *Debregeasia salicifolia*, *Pterocarpus indicus* (Longman 1993); *Albizia guachapele*, *Cordia alliodora* (Mesén 1993); *Khaya ivorensis* (Tchoundjeu y Leakey 1996); *Hyeronima alchorneoides*, *Terminalia oblonga* (Núñez 1997); *Pausinystalia johimbe* (Ngo-Mpeck *et al.* 2003); *Nothofagus glauca* (Santelices y Cabello 2006); *Baillonella toxisperma* (Ngo-Mpeck y Atangana 2007); *Myrciaria dubia* (de Andrade 2014) y *Swietenia macrophylla* (Azad y Matin 2015).

A nivel nacional se reportan trabajos impulsadas por el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP) y el Fondo para la Innovación, Ciencia y Tecnología (FINCyT), en colaboración con universidades locales (Soudre 2010). Estas investigaciones desarrollaron metodologías de propagación vegetativa apropiadas para cada una de las especies en estudio, principalmente, especies forestales nativas, que por su valor ecológico, comercial o situación de vulnerabilidad era necesario el desarrollo de alternativas viables para su conservación y multiplicación masiva de plántones. De este modo, se registran trabajos en *Swietenia macrophylla* (Vásquez 2009); *Amburana cearensis* (Flores 2010); *Plukenetia volubilis* (Mesén y Ruiz 2010); *Cedrela odorata*, *Simarouba amara* (Soudre 2010); *Cedrelinga cateniformis* (Soudre *et al.* 2011); *Manilkara bidentata* (Cervantes 2011) por citar algunos trabajos.

4. ANTECEDENTES SOBRE LA PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE ESPECIES DEL GÉNERO *Dipteryx* Schreb.

Al igual que con otras especies se ha probado la respuesta de especies del género *Dipteryx* Schreb. a la propagación asexual, estos trabajos son citados a continuación:

Flores (1997) probó el potencial de enraizamiento en estacas de *Dipteryx panamensis* (Pittier) Record & Mell. donde evaluó la interacción de la topófisis y microorganismos eficientes, la cual resultó significativo en el desarrollo de biomasa del tallo, hojas y raíces cuando se usaron estacas basales y medias. Logrando hasta 55 por ciento de enraizamiento.

En el ámbito local, se reportan por un lado los trabajos de Rollo (2009) y Arbe (2014) en *Dipteryx odorata* (Aubl.) Will. El primero investigó la capacidad de enraizamiento en estaquillas tratadas con leche de coco, obteniendo 15 por ciento de enraizamiento en condiciones de cama de almacigo y 6,6 por ciento de enraizamiento en propagadores de sub-irrigación con estaquillas de posiciones basales. Mientras que la segunda, a través de técnicas *in vitro*, evaluó el efecto de la citoquinina 6-bencilaminopurina en segmentos nodales, sus resultados indicaron que la especie es recalcitrante a la propagación *in vitro*.

Ramos (2012) y Zamora (2013) buscaron desarrollar protocolos de propagación *in vitro* en *Dipteryx alata* Vogel. Ninguno de los dos consiguió el enraizamiento de los explantes, aunque Zamora (2013) señala como antecedente ensayos realizados por el Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Agraria La Molina, donde solo se logró la formación de primordios radiculares de 4 mm y 3 mm en únicamente dos explantes al cabo de 65 y 75 días, respectivamente.

Silva (2016), en Brasil, se encuentra realizando estudios con *Dipteryx alata* para probar la influencia de dos épocas distintas de colecta de estaquillas y la necesidad de usar ácido indol-3-butírico (AIB) en las concentraciones 0, 3 000, 5 000 y 7 000 mg.L⁻¹ bajo propagadores de sub-irrigación.

**“página en blanco
incluida ex-profeso por
razones de
compaginación”**

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. MATERIALES.

1.1. UBICACIÓN DEL ÁREA EXPERIMENTAL

El presente trabajo se llevó a cabo en el vivero de investigación forestal del área de Investigación y Desarrollo (I + D) de la empresa Reforestadora Amazónica S.A. (RAMSA). Geográficamente, se encuentra en las coordenadas WGS84 9°27'19.1"S 74°56'21.8"W a una altitud de 192 msnm. Comprende aproximadamente 500 m² de extensión.

El campamento principal de la empresa se ubica al margen izquierdo y en la cuenca media del río Pachitea, en el distrito y provincia de Puerto Inca, Huánuco. La temperatura media anual es 24,5°C y la precipitación total anual es 2 500 mm. Las características bioclimáticas, edáficas, fisiográficas y vegetales son típicas del bosque húmedo tropical (bh-T) (ONERN 1976).

1.2. MATERIALES Y EQUIPOS

a) Material experimental

- - Estaquillas juveniles de shihuahuaco (*Dipteryx odorata* [Aublet.] Willd.)

b) Fase de experimental en vivero

Para el acondicionamiento del propagador de sub-irrigación se requirieron los siguientes insumos:

- Arena de río (sustrato)
- Grava (2 mm a 10 mm)
- Piedras de río pequeñas (<50 mm)
- Piedras de río grandes (50 mm a 100 mm)
- Agua

También se usaron las siguientes herramientas, instrumentos y equipos:

- Propagador de sub-irrigación
- Malla de polietileno de alta densidad en tejido Raschel 80 por ciento (para el ambiente de propagación)
- Tamizadores nº 20, 32 y 40
- Cilindro metálico de 200 litro y parrilla (para la esterilización de sustratos)
- Termo-higrómetros Boeco Germany
- Tubo de PVC de 0,10 m de diámetro x 0,30 m de longitud
- Nivel, regla y plancha de empastar

Para el acondicionamiento de las estaquillas se requirieron de los siguientes insumos:

- Soluciones de ácido indol-3-butírico
- Alcohol etílico 96°
- Fungicida Cupravit® OB21
- Agua

También durante la preparación de las estaquillas se usaron las siguientes herramientas, instrumentos y equipos:

- Tijeras de podar
- Algodón
- Paños absorbentes
- Calibrador digital Mitutoyo modelo 500 – 147 ($\pm 0,02$ mm de precisión)
- Balanza electrónica T-Scale (0,1 g de precisión)
- Ventilador

- Bateas y bandejas plásticas
- Mascarillas y guantes quirúrgicos

c) Fase de laboratorio

Para la preparación de las concentraciones de las soluciones fitohormonales se requirió de los siguientes materiales, insumos y equipos:

- Ácido indol-3-butírico concentrado en polvo Merck KGaA
- Alcohol etílico 96°
- Balanza analítica Sartorius Praxum 313 (0,001g de precisión)
- Autoclave Greetmed
- Micropipeta 1 ml vidrio Boro 3.3
- Fiola de 100 ml de vidrio Boro 3.3
- Frascos de vidrio
- Papel aluminio calidad extra

2. METODOLOGÍA.

2.1. ANTECEDENTES DEL MATERIAL EXPERIMENTAL

La población en estudio estuvo formada por todas las estaquillas de *Dipteryx odorata* disponibles en el jardín de multiplicación de la especie dentro del vivero. Los plantones que sirvieron como planta madre u *ortet* provienen de semilla sexual de árboles selectos de bosques naturales pertenecientes a las zonas de conservación de RAMSA, en las localidades de Puerto Inca (Puerto Inca, Huánuco) y Puerto Bermúdez (Oxapampa, Pasco).

Las semillas fueron sembradas directamente en macetero y 10 meses después trasplantadas a terreno definitivo, el cual fue acondicionado para su uso como jardín de multiplicación. Luego de dos meses, los plantones fueron cortados a 0,3 m de la base para inducir la formación de brotes, los cuales fueron cosechados cada 60 días. Este jardín fue manejado con riegos, fertilización mineral, aporques y control sanitario preventivo, según lo recomendado por Soudre *et al.* (2008).

2.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA SUSTRATOS Y CONCENTRACIONES DE ÁCIDO INDOL-3-BUTÍRICO

2.2.1. ACONDICIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PROPAGACIÓN

Como sistema de propagación se usó el propagador de sub-irrigación. Se trabajó con un propagador previamente construido según las especificaciones de Leakey *et al.* (1990) y para su habilitado se procedió según lo especificado en el Anexo 1. Para proteger el propagador de las condiciones climáticas, este se colocó bajo un ambiente especial. Dicho lugar contó con sombra proporcionada por una malla de polietileno de alta densidad en tejido Raschel de color negro (80 por ciento a tres metros del suelo) y piso de concreto nivelado, pulido y con canaletas.

Para este primer ensayo, se utilizó un sustrato diferente en cada una de las tres divisiones del propagador de sub-irrigación. Como sustrato se usó arena de río con diferente clasificación granulométrica (factor A), de acuerdo a la clasificación de suelos propuesto por Kopecky. Se trabajó con los siguientes niveles:

- Arena fina (0,1 mm a 0,2 mm)
- Arena media (0,2 mm a 1,0 mm)
- Arena gruesa (1,0 mm a 2,0 mm)

Para obtener cada una de estas granulometrías se requirió de tamizadores de diferente luz de malla. Se usaron tamizadores n° 40, 32 y 20 para tener arena fina, media y gruesa, respectivamente. Luego, cada sustrato fue lavado con abundante agua y esterilizado con vapor de agua durante dos horas. Se secaron con exposición directa al sol durante un día.

2.2.2. ACONDICIONAMIENTO DE LAS ESTAQUILLAS

La cosecha de los brotes se realizó desde las 5:30 a.m. hasta las 6:00 a.m., con la finalidad de evitar posible estrés en los brotes recién cortados a causa del calor. Se seleccionaron, al azar, brotes ortotrópicos, sanos y vigorosos. El acondicionamiento del material se realizó en un solo día y siempre bajo sombra. Cada estaquilla quedó definida por una sección de entrenudo, una hoja superior y al menos una yema. Para definir una estaquilla, los cortes se realizaron de forma biselada justo sobre cada hoja.

En promedio, las estaquillas tenían $39,99 \pm 6,37$ mm de longitud y $3,95 \pm 0,92$ mm de diámetro. La hoja fue recortada aproximadamente a $2\ 500\text{ mm}^2$ de área foliar (se dejó de dos

a tres foliolos por cada estaquilla). Durante el acondicionamiento de las estaquillas, con frecuencia se asperjó agua sobre ellas para evitar que se marchitasen.

Luego, las estaquillas fueron desinfectadas en una solución fúngica a base de oxiclورو de cobre (Cupravit® OB21 con concentración 3 gramos por litro de agua) por 15 minutos y oreadas bajo sombra durante otros 20 minutos. Finalizada esta etapa, se descartaron aquellas estaquillas que no cumplieren con las características deseadas como tamaño, diámetro, muy suculentas o muy lignificadas, vigor, calidad de hoja, entre otros.

2.2.3. PREPARACIÓN Y APLICACIÓN DEL ÁCIDO 3-INDOL BUTÍRICO EN LAS ESTAQUILLAS

En esta primera etapa experimental, se trabajó con cinco concentraciones de ácido indol-3-butírico (factor B) en formulación líquida (disuelto en alcohol etílico 96°) como sustancia promotora del enraizamiento. Se buscó determinar aquella concentración que tuviera efectos notables sobre la capacidad de enraizamiento de las estaquillas de *Dipteryx odorata*. Por ello se probaron las siguientes concentraciones:

- 0 mgL⁻¹
- 1 000 mgL⁻¹
- 3 000 mgL⁻¹
- 5 000 mgL⁻¹
- 7 000 mgL⁻¹

La preparación de las soluciones hormonales se realizó en las instalaciones de Natura Laboratorios EIRL (Pucallpa, Ucayali). Todo el material empleado durante la preparación de las concentraciones fue lavado y esterilizado en autoclave a 121°C por 15 minutos. Para la preparación de las cinco soluciones fitohormonales de ácido indol-3-butírico (AIB), se procedió como sigue:

- 1) Pesado de AIB concentrado en polvo (mg) en balanza analítica
- 2) Dilución hormonal con alcohol etílico 96° (L)
- 3) Envasado y etiquetado de cada dosis hormonal en frascos de vidrio con tapa

Los pesos de ácido indol-3-butírico y volumen de alcohol etílico 96° empleados para la preparación de cada concentración fitohormonal se especifican en la Tabla 2:

Tabla 2: Medidas para la preparación de 100 ml solución fitohormonal de ácido indol-3-butírico (AIB).

Concentración de AIB (mgL⁻¹)	Peso de AIB (mg)	Alcohol etílico 96 ° (L)
1 000	100	0,0999
3 000	300	0,0997
5 000	500	0,0995
7 000	700	0,0993

La aplicación del ácido indol-3-butírico en formulación líquida se realizó a 5 mm desde la base de la estaquilla. Se agruparon, al azar, 30 estaquillas por cada tratamiento fitohormonal. El método de aplicación fue por inmersión rápida durante cinco segundos. Para la volatilización del alcohol se usó una corriente continua de aire, generada por un ventilador durante 60 segundos, con esto se logró que la base quede impregnada solo de la fitohormona.

2.2.4. INSTALACIÓN DE LAS ESTAQUILLAS EN EL PROPAGADOR

Previo a la instalación de las estaquillas dentro del propagador, se realizaron hoyos de 20 mm de profundidad y 1,5 veces el diámetro promedio de las estaquillas, a un distanciamiento de 50 mm x 50 mm. Las estaquillas se colocaron en su respectivo sustrato y se presionó ligeramente alrededor de su tallo para asegurarlas al medio de enraizamiento. Todas las estaquillas fueron colocadas verticalmente en el hoyo con las hojas orientadas hacia un mismo sentido. Se siguió el croquis según el diseño experimental y los tratamientos propuestos (Figura 2). Cada sustrato y cada tratamiento hormonal fue codificado para su identificación.

Se tomó registro de la temperatura y humedad relativa dentro y fuera del propagador de sub-irrigación, para ello se empleó termo-higrómetros. El registro se hizo diariamente cada dos horas desde las 7:00 a.m. hasta las 5:00 p.m. De igual manera se inspeccionó el

propagador a fin detectar y corregir problemas sanitarios, y manejar adecuadamente las condiciones dentro del mismo.

2.3. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE LAS VARIABLES

2.3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se utilizó un arreglo factorial en parcelas divididas con diseño en bloques completamente al azar. Dentro de las parcelas divididas, las parcelas principales les correspondieron a los sustratos (factor A) y las parcelas secundarias fueron asignadas a las concentraciones de ácido indol-3-butírico (factor B). El factor A contó con tres niveles y el factor B con cinco formando un arreglo factorial 3A x 5B.

La combinación de factores en sus distintos niveles resultó en 15 tratamientos con tres repeticiones por tratamiento y 10 estaquillas por unidad experimental (Tabla 3). La muestra estuvo formada por 450 estaquillas.

Tabla 3: Descripción de tratamientos evaluados en la primera etapa experimental.

N°	Tratamiento	Código	Sustrato	Concentración de AIB (mgL ⁻¹)
1	T1	a ₀ b ₀	Arena fina	0
2	T2	a ₀ b ₁	Arena fina	1 000
3	T3	a ₀ b ₂	Arena fina	3 000
4	T4	a ₀ b ₃	Arena fina	5 000
5	T5	a ₀ b ₄	Arena fina	7 000
6	T6	a ₁ b ₀	Arena media	0
7	T7	a ₁ b ₁	Arena media	1 000
8	T8	a ₁ b ₂	Arena media	3 000
9	T9	a ₁ b ₃	Arena media	5 000
10	T10	a ₁ b ₄	Arena media	7 000
11	T11	a ₂ b ₀	Arena gruesa	0
12	T12	a ₂ b ₁	Arena gruesa	1 000
13	T13	a ₂ b ₂	Arena gruesa	3 000
14	T14	a ₂ b ₃	Arena gruesa	5 000
15	T15	a ₂ b ₄	Arena gruesa	7 000

En la Figura 2 se presenta la distribución de tratamientos dentro del propagador. La aleatorización se realizó en dos etapas. Primero, se aleatorizó los niveles del factor sustrato

en las parcelas principales dentro de cada bloque. Segundo, se aleatorizó los niveles del factor concentración de AIB en las parcelas secundarias de cada parcela principal.

	Arena fina					Arena gruesa					Arena media				
Bloque I	T2	T1	T4	T5	T3	T12	T13	T15	T4	T11	T10	T9	T7	T8	T6
Bloque II	T2	T3	T4	T1	T5	T14	T15	T11	T13	T12	T8	T10	T6	T9	T7
Bloque III	T3	T4	T1	T5	T2	T15	T11	T13	T14	T12	T9	T6	T8	T10	T7

Figura 2: Croquis de distribución de tratamientos dentro del propagador de sub-irrigación usados en el primer ensayo.

Se trabajó con el siguiente modelo lineal:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \delta_k + (\alpha\delta)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ijk} : Es la respuesta observada en la unidad experimental con el nivel i del factor sustrato, nivel j del factor ácido indol-3-butírico en el k-ésimo bloque.

μ : Efecto de la media general.

α_i : Efecto del sustrato en el i-ésimo nivel.

β_j : Efecto del ácido indol-3-butírico en el j-ésimo nivel.

$(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción entre el i-ésimo nivel de sustrato y el j-ésimo nivel del ácido indol-3-butírico.

δ_k : Efecto del k-ésimo bloque.

$(\alpha\delta)_{ik}$: Efecto de la interacción entre el i-ésimo nivel del sustrato y el k-ésimo bloque, es el error asociado al tipo de sustrato (Parcela principal, ϵ_i).

ϵ_{ijk} : Efecto aleatorio de variación o error del modelo (parcela secundaria).

Para:

i: 1, 2 y 3 niveles del factor sustrato.

j: 1, 2, 3, 4 y 5 niveles del factor ácido indol-3-butírico.

k: 1, 2 y 3 bloques.

2.3.2. VARIABLES EVALUADAS

Semanalmente se siguió el proceso de enraizamiento desde el séptimo día de instalado el propagador de sub-irrigación hasta el día 45. La evaluación semanal consistió en sacar, al azar, tres estaquillas de cada tratamiento y visualizar sus cambios durante el proceso de enraizamiento, esto sirvió para notar y seguir los cambios durante el proceso y decidir el momento adecuado del levantamiento del ensayo. Posteriormente, las estaquillas revisadas fueron colocadas nuevamente dentro del propagador en su tratamiento respectivo.

Para el análisis estadístico e interpretación de los resultados se consideró los datos obtenidos en la evaluación final (día 45) de las siguientes variables:

a. Porcentaje de sobrevivencia

Se expresó como la proporción de estaquillas vivas respecto al total de estaquillas instaladas para cada tratamiento y repetición. Se consideró como estaquillas muertas a aquellas que presentaron más del 50 por ciento de su tallo necrosado y perdieron la totalidad de sus folíolos.

b. Porcentaje de enraizamiento

Se expresó como la porción de estaquillas que enraizaron respecto al total de estaquillas instaladas para cada tratamiento y repetición. Se consideró como estaquilla enraizada cuando esta presentó por lo menos una raíz no menor a 5 mm de longitud (Mesén 1998).

c. Número de raíces por estaquilla

Se contó el número de raíces en cada estaquilla para cada uno de los tratamientos y repeticiones. Se expresó como el promedio de raíces en cada estaquilla.

d. Longitud promedio de raíces

Se midió la longitud (mm) de cada raíz y se tomó la longitud promedio de raíces por estaquilla. Esta medición se realizó con calibrador digital y se hizo para cada tratamiento y repetición.

e. Porcentaje de formación de brotes

Se expresó como la proporción de estaquillas con brotes aéreos o yemas respecto al total de estaquillas instaladas para cada tratamiento y repetición. Se consideró como brote a la formación en la parte superior de la estaquilla de más de 2 mm de longitud.

f. Porcentaje de formación de callos

Se expresó como la proporción de estaquillas con callos respecto al total de estaquillas instaladas para cada tratamiento y repetición. Se consideró como callo a toda masa indiferenciada de células formadas en la base de la estaquilla (Acosta *et al.* 2013).

g. Porcentaje de defoliación

Se expresó porcentualmente como la cantidad de estaquillas sin hojas respecto al total de estaquillas usadas para cada tratamiento y repetición. Se consideró como estaquillas defoliadas a aquellas que habían perdido la totalidad de sus folíolos.

2.3.3. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos en la evaluación final fueron transcritos, sistematizados y ordenados para generar una base de datos en la suite ofimática *Microsoft Excel*. El análisis estadístico de los efectos principales e interacción de factores se realizó mediante el análisis de la varianza (ANOVA).

Si el ANOVA individual rechazaba la hipótesis nula con una aceptación de $p < 0,05$ se procedió a realizar la prueba de comparación de medias de Tukey al 95 por ciento de

confianza (nivel de significancia $\alpha=0,05$) para determinar la naturaleza de las diferencias de los tratamientos. Adicionalmente se graficó cada variable para observar su respuesta en cada nivel del factor.

El procesamiento y ejecución de las pruebas estadísticas se realizó con el *software InfoStat* versión estudiantil 2016-e. Para cada variable se comprobó el cumplimiento de los supuestos requeridos por el ANOVA, considerándose:

- Normalidad; se realizó la prueba de Shapiro-Wilk modificado para comprobar la hipótesis de normalidad (Di Rienzo *et al.* 2011). Adicionalmente, se construyó un diagrama Q-Q plot normal de los residuos obtenidos versus los cuantiles teóricos de una distribución normal.
- Homogeneidad de varianzas; para validar el supuesto de homocedasticidad se realizó la prueba de Levene. También, se construyó un gráfico de dispersión de los residuos versus los valores predichos (Montgomery, citado por Di Rienzo *et al.* 2011).
- Errores independientes; para verificar este supuesto se construyó un gráfico de dispersión de los residuos en función de la variable que se presumía podía generar dependencias sobre las observaciones (Snedecor 1971, Di Rienzo *et al.* 2011).

Previo al análisis de la varianza, si las variables no cumplían con estos supuestos fue necesaria la transformación de datos. Para la normalización y homogenización de varianzas, se consideró lo siguiente:

- Transformación angular arcoseno (raíz (p)): con $p \in [0,1]$ (arcoseno de la raíz cuadrada de la proporción) expresado en grados, para variables discontinuas de distribución binomial (Snedecor 1971, Di Rienzo *et al.* 2011).
- Transformación raíz cuadrada $\sqrt{y + c}$ donde c es una constante, para variables de conteo (Snedecor 1971).

Posteriormente, para su interpretación, los valores transformados fueron convertidos a las unidades originales.

2.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA POSICIÓN DE ESTAQUILLA Y ÁREA FOLIAR

2.4.1. ACONDICIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PROPAGACIÓN

El segundo ensayo se instaló 60 días después de terminado el primero. Para la continuación se consideró los mejores resultados obtenidos en la prueba anterior, es decir, el sustrato y la concentración de ácido indol-3-butírico que tuvieron efectos significativamente positivos en la capacidad de enraizamiento de la especie. Para el habilitado del sistema de propagación se siguió el método descrito en el ensayo anterior.

2.4.2. ACONDICIONAMIENTO DE LAS ESTAQUILLAS

Las estaquillas fueron colectadas de brotes ortotrópicos, sanos y vigorosos seleccionados al azar a tempranas horas de la mañana, entre las 5:30 a.m. y 6:00 a.m. El material fue transportado al área de propagación en bateas plásticas para su acondicionamiento. Las estaquillas se obtuvieron de cortes oblicuos justo sobre cada nudo, en esta segunda etapa experimental se consideró:

a. Posición de la estaquilla en el brote

Se usaron estaquillas de $35,32 \pm 7,93$ mm de longitud y $3,70 \pm 0,75$ mm de diámetro, en promedio. Se probó el efecto de la posición de la estaquilla en el brote (**factor C**) sobre la capacidad de enraizamiento de *Dipteryx odorata*. Para ello cada brote fue dividido en tres niveles:

- Posición basal (primer tercio del brote)
- Posición media (segundo tercio del brote)
- Posición apical (último tercio del brote)

b. Área foliar

Para el acondicionamiento de las estaquillas se consideró recortar las hojas hasta un área foliar determinada para comprobar su efecto en la propagación vegetativa de la especie. Para el cálculo de las áreas foliares se tomaron muestras representativas de folíolos y se procesaron con el *software Image Pro-Plus v.2.1*.

Sobre cartulina se hicieron plantillas con área foliar específica las cuales fueron usadas el día de la instalación y sirvieron como molde para cortar los folíolos, según el tratamiento. Se usaron los siguientes niveles de área foliar (**factor D**):

- Área foliar 1 000 mm²
- Área foliar 2 000 mm²
- Área foliar 3 000 mm²

Acondicionadas las estaquillas se desinfectaron en solución de Cupravit® OB21 (3 por ciento de concentración) por 15 minutos y oreadas bajo sombra por 20 minutos. Se descartaron aquellas estaquillas que no cumplieren con las características deseadas (longitud, diámetro, grado de lignificación, vigor, calidad de hoja, etc.). Todas las estaquillas fueron tratadas con una sola concentración de ácido indol-3-butírico por cinco segundos. Se volatilizó el alcohol con una corriente continua de aire durante 60 segundos.

2.4.3. INSTALACIÓN DE LAS ESTAQUILLAS EN EL PROPAGADOR

Para la instalación de las estaquillas se procedió de igual manera que en el primer ensayo, pero siguiendo su propio diseño, distribución y codificación (Figura 3). Se colocaron termo-higrómetros dentro y fuera del propagador para monitorear la temperatura y humedad relativa. Diariamente se inspeccionó el propagador para prevenir y controlar problemas que pudieran afectar el proceso de enraizamiento.

2.5. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES

2.5.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se empleó un arreglo factorial con diseño en bloques completamente al azar. Se ensayó el efecto e interacción de tres posiciones de estaquilla (factor C) y tres niveles de área foliar (factor D) sobre la capacidad de enraizamiento de estaquillas de *Dipteryx odorata*. Se formó un arreglo factorial 3C x 3D.

La combinación de niveles de los factores en estudio resultó en nueve tratamientos con tres repeticiones y 10 estaquillas por unidad experimental (Tabla 4). La muestra estuvo representada por 270 estaquillas.

Tabla 4: Descripción de tratamientos evaluados en la segunda etapa experimental.

Nº	Tratamiento	Código	Posición de estaquilla	Área foliar (mm ²)
1	T1	c ₀ d ₀	Basal	1 000
2	T2	c ₀ d ₁	Basal	2 000
3	T3	c ₀ d ₂	Basal	3 000
4	T4	c ₁ d ₀	Media	1 000
5	T5	c ₁ d ₁	Media	2 000
6	T6	c ₁ d ₂	Media	3 000
7	T7	c ₂ d ₀	Apical	1 000
8	T8	c ₂ d ₁	Apical	2 000
9	T9	c ₂ d ₂	Apical	3 000

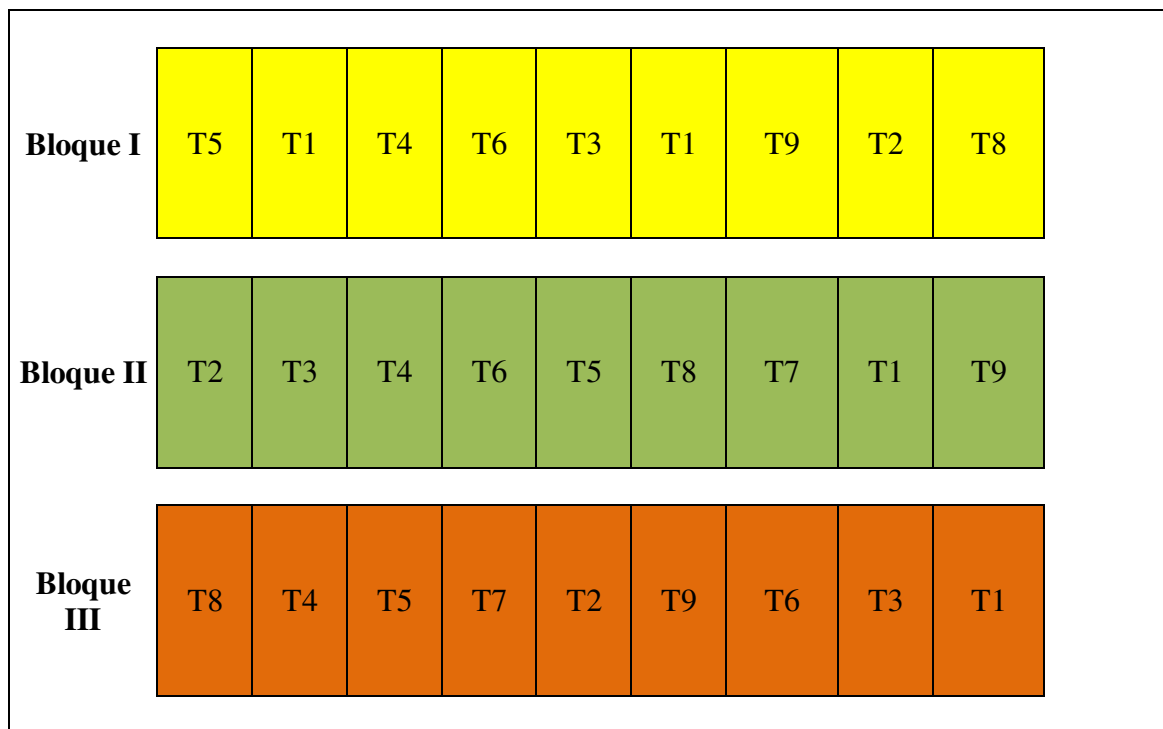


Figura 3: Croquis de distribución de tratamientos dentro del propagador de sub-irrigación usados en el segundo ensayo.

Se trabajó con el siguiente modelo lineal:

$$Y_{ijk} = \mu + \delta_k + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ijk} : Es la respuesta observada en la unidad experimental con el nivel i del factor posición de la estaquilla, nivel j del factor área foliar en el k-ésimo bloque.

μ : Efecto de la media general.

δ_k : Efecto del k-ésimo bloque.

α_i : Efecto del factor posición de la estaquilla en el i-ésimo nivel.

β_j : Efecto del factor área foliar en el j-ésimo bloque.

$(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción entre el i-ésimo nivel de la posición de estaquilla y el j-ésimo nivel del área foliar

ε_{ijk} : Efecto del error experimental.

Para:

i: 1, 2 y 3 niveles del factor la posición de la estaquilla.

j: 1, 2 y 3 niveles del área foliar.

k: 1, 2 y 3 bloques.

2.5.2. VARIABLES EVALUADAS

Se hizo seguimiento semanal del proceso de enraizamiento y al cabo de 30 días se realizó la evaluación final. Para el monitoreo semanal se retiró, al azar, tres estaquillas de cada tratamiento esto sirvió para notar y seguir los cambios durante el proceso de enraizamiento y decidir el momento adecuado del levantamiento del ensayo. Luego de la inspección cada estaquilla fue colocada nuevamente dentro del propagador respetando su tratamiento.

Para la evaluación de las variables se empleó el método descrito en el primer ensayo, considerándose las siguientes variables:

- Porcentaje de sobrevivencia

- Porcentaje de enraizamiento
- Número de raíces por estaquilla
- Longitud promedio de raíces
- Porcentaje de formación de brotes
- Porcentaje de formación de callos
- Porcentaje de defoliación

2.5.3. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Con los datos obtenidos se generó una base de datos en *Microsoft Excel*. Para el procesamiento y ejecución del análisis estadístico se utilizó el *software InfoStat* versión estudiantil 2016-e. El análisis de los efectos principales e interacción entre factores se hizo mediante el análisis de la varianza (ANOVA).

Para aquellas variables significativas cuyo ANOVA rechazaba la hipótesis nula con un nivel aceptación $p < 0,05$ se procedió a emplear la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para determinar la naturaleza de las diferencias de los tratamientos. Adicionalmente se graficó cada variable cuyo ANOVA fuera significativo para observar el comportamiento y tendencia de la variable en cada nivel del factor.

Se verificó el cumplimiento de los supuestos requeridos por el ANOVA:

- Normalidad; se realizó la prueba de Shapiro-Wilk modificado para comprobar la hipótesis de normalidad y se construyó un diagrama Q-Q plot normal de los residuos obtenidos versus los cuantiles teóricos de una distribución normal (Di Rienzo *et al.* 2011).
- Homogeneidad de varianzas; se validó el supuesto de homocedasticidad de los residuos con la prueba de Levene y se construyó un gráfico de dispersión de los residuos versus los valores predichos (Montgomery, citado por Di Rienzo *et al.* 2011).
- Errores independientes; se construyó un gráfico de dispersión de los residuos en función de la variable que se presumía podía generar dependencias sobre las observaciones (Snedecor 1971, Di Rienzo *et al.* 2011).

Previo al análisis de la varianza, si las variables no cumplían con estos supuestos fue necesaria la transformación de datos. Para la normalización y homogenización de varianzas, se consideró lo siguiente:

- Transformación angular arcoseno (raíz (p)): con $p \in [0,1]$ (arcoseno de la raíz cuadrada de la proporción) expresado en grados, para variables discontinuas de distribución binomial (Snedecor 1971, Di Rienzo *et al.* 2011).
- Transformación raíz cuadrada $\sqrt{y + c}$ donde c es una constante, para variables de conteo (Snedecor 1971).

Posteriormente, para su interpretación, los valores transformados fueron convertidos a sus unidades originales.

**“página en blanco
incluida ex-profeso por
razones de
compaginación”**

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. EFECTO DE LOS SUSTRATOS Y CONCENTRACIONES DE ÁCIDO INDOL-3-BUTÍRICO.

1.1. CONDICIONES MICROCLIMÁTICAS DEL PROCESO

Este trabajo fue llevado a cabo en el vivero de investigación forestal de la empresa Reforestadora Amazónica (RAMSA) (Puerto Inca, Huánuco) durante la transición de la época de lluvias a seca de la Amazonia peruana, entre los meses de abril y junio. En la Tabla 5 se presentan las condiciones climáticas durante el ensayo:

Tabla 5: Condiciones microclimáticas en el propagador de sub-irrigación y en el ambiente de propagación registradas durante 45 días, Puerto Inca (Huánuco, Perú).

	Condiciones en el propagador de sub-irrigación		Condiciones en el ambiente de propagación	
	Media	Rango	Media	Rango
Temperatura del aire (°C)	28,3	22,4 – 33,9	29,9	19,1 – 36,2
Humedad relativa (%)	81,1	72,0 – 94,0	69,2	40,0 – 92,0

La temperatura promedio en el propagador estuvo dentro del rango aceptado en la propagación vegetativa de otras especies forestales tropicales, pues como mencionan Mesén y Ruiz (2010), la experiencia ha demostrado que la temperatura óptima oscila entre 20°C y 30°C. En este rango se ha logrado enraizar exitosamente varias de ellas. Por otro lado, el propagador de sub-irrigación permitió mantener un ambiente de alta humedad, condición necesaria para minimizar el estrés hídrico en la estacuela. Esto se debería a la recirculación del agua, la cual permitiría mantener un bajo déficit de presión de vapor. Esto, como lo describe Leakey (2004), es adecuado para minimizar las desventajas que podría ocasionar el estrés hídrico durante el proceso de enraizamiento.

En el ambiente de propagación se registró la mayor variación microclimática. Se observó un mayor rango de temperatura, con mínimos de 19°C y máximos alrededor de los 36°C.

Mientras que la humedad relativa llegó hasta 40 por ciento. Las causas de este amplio rango serían las condiciones climáticas generales a lo largo del proceso de enraizamiento, con diferentes niveles de intensidad lumínica, lluvias eventuales de diferente duración e intensidad, nubosidad y vientos.

En horas de mayor incidencia solar (entre las 11:00 a.m. y las 3:00 p.m.), la aspersión de agua alrededor del propagador y en el ambiente de propagación permitió reducir la temperatura de 2 a 3°C, así como recuperar y prolongar un microclima de alta humedad. Esta actividad fue especialmente importante, pues evitó el estrés en las estaquillas.

1.2. **CAPACIDAD DE ENRAIZAMIENTO EN ESTAQUILLAS JUVENILES DE *Dipteryx odorata***

De acuerdo con la información obtenida y a partir del resumen de probabilidades del ANOVA individual (p-valor) presentadas en la Tabla 6 con un criterio de aceptación $p < 0,05$, se indica que la aplicación del ácido indol-3-butírico (AIB) tuvo efecto significativo sobre el porcentaje de enraizamiento y el crecimiento radicular (número de raíces por estaquilla y longitud promedio de raíces). Lo mismo para la formación de callos ($p < 0,05$).

Por su parte, el sustrato fue significativo ($p < 0,05$) en la sobrevivencia y formación de callos. Es preciso mencionar que en el análisis *post-hoc* se consideraron los efectos principales de los factores en la respuesta de estas variables. Los factores interactuaron en la formación de brotes ($p < 0,01$). No hubo efecto significativo ($p > 0,05$) de los factores en cuestión sobre la defoliación.

Cabe resaltar que se analizó la capacidad de enraizamiento en función del porcentaje de enraizamiento, número de raíces por estaquilla y longitud promedio de raíces. Estas variables sirvieron para apoyar las decisiones de elección de los mejores tratamientos en la propagación vegetativa de *Dipteryx odorata*. Las demás variables evaluadas sirvieron para explicar el comportamiento de la especie durante el proceso, mas no fueron determinantes en la selección de los tratamientos.

Tabla 6: p-valor y significancia estadística obtenidos en el análisis de la varianza individual para el efecto de los sustratos y las concentraciones de ácido indol-3-butírico (AIB).

p-valor y significación estadística								
Fuente de variación	gl	Supervivencia	Enraizamiento	Crecimiento radicular		Formación de callos	Formación de brotes	Defoliación
				Número de raíces	Longitud de raíces			
Sustratos	2	0,039 *	0,409 ^{ns}	0,113 ^{ns}	0,186 ^{ns}	0,002 **	0,012 ^{ns}	0,642 ^{ns}
Concentraciones de AIB	4	0,343 ^{ns}	0,004 *	0,027 *	0,009 **	0,015 *	0,012 **	0,249 ^{ns}
Interacción	8	0,690 ^{ns}	0,182 ^{ns}	0,507 ^{ns}	0,697 ^{ns}	0,803 ^{ns}	0,536 **	0,186 ^{ns}
Cuadrado Medio del Error	24	89,53	84,08	0,09	5,91	31,62	52,14	22,32

* Significativo con $p < 0,05$; ** Significativo con $p < 0,01$; ^{ns} No significativo con $p > 0,05$

1.3. EFECTOS DE LAS CONCENTRACIONES DEL ÁCIDO INDOL-3-BUTÍRICO

Planteado este objetivo, se observó que la aplicación exógena del ácido indol-3-butírico (AIB) tuvo efecto significativo ($p < 0,05$) en la rizogénesis, diferenciándose las distintas concentraciones ensayadas. Como se detalla en la Tabla 7, la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0,05$) indica que el mayor porcentaje de enraizamiento fue 38,89 por ciento alcanzado con 3 000 mgL⁻¹ de AIB. La misma prueba indica que el enraizamiento no fue significativamente diferente con las concentraciones de 1 000 y 5 000 mgL⁻¹ de AIB. En contraste, las concentraciones extremas (0 y 7 000 mgL⁻¹ de AIB) presentaron los menores porcentajes de enraizamiento.

Igualmente, el ácido indol-3-butírico (AIB) resultó importante para las variables que definen el crecimiento radicular. Con una concentración de 3 000 mgL⁻¹ de AIB se obtuvo $1,92 \pm 1,12$ raíces por estacuela con $43,9 \pm 27,0$ mm de longitud promedio. La respuesta de estas variables en las concentraciones de 1 000 y 5 000 mgL⁻¹ de AIB no se diferenció significativamente de lo obtenido con 3 000 mgL⁻¹, según la prueba de rango múltiple de Tukey a un nivel de confianza de 95 por ciento.

Las concentraciones extremas fueron significativas entre ellas. Con 7 000 mgL⁻¹ de AIB se consiguió, en promedio, 2,26 ± 0,70 raíces por estacilla de 58,4 ± 32,1 mm de longitud, superior a los demás tratamientos hormonales y al testigo. Los resultados indican que la ausencia de AIB (testigo) arrojó los menores valores para estas variables, bajo este tratamiento se obtuvo 0,81 ± 0,42 raíces por estacilla de 12,5 ± 11,8 mm de longitud, significativamente menor a los demás tratamientos.

Las variables formación de callos y formación de brotes, presentaron diferencias significativas con las diferentes concentraciones del ácido indol-3-butírico (AIB). Estas variables sirvieron para entender el comportamiento de la especie durante su proceso de enraizamiento, los detalles de la prueba *post-hoc* de Tukey para estas variables y las mencionadas líneas arriba se detallan a continuación:

Tabla 7: Efectos de la concentración de ácido indol-3-butírico en la capacidad de enraizamiento y variables relacionados a la rizogénesis en estaquillas de *Dipteryx odorata*.

Concentración de AIB (mgL ⁻¹)	Enraizamiento (%)	Crecimiento radicular		Formación de callos (%)	Formación de brotes (%)
		Número de raíces (N°)	Longitud de raíces (mm)		
		0	11,11 b		
1 000	23,33 ab	2,08 ± 0,93 ab	36,5 ± 24,2 ab	3,33 a	12,22 ab
3 000	38,89 a	1,92 ± 1,12 ab	43,9 ± 27,0 ab	10,00 ab	13,33 ab
5 000	25,56 ab	2,01 ± 1,07 ab	43,8 ± 24,0 ab	10,00 ab	10,00 ab
7 000	17,78 b	2,26 ± 0,70 a	58,4 ± 32,1 a	15,56 b	2,22 a
Error estándar	3,06	0,31	3,70	1,87	2,41
DMS	12,73	1,27	0,73	5,96	10,03

Valores promedios para las variables porcentuales y medias ± desviación estándar para las variables expresadas en números. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de rango múltiple Tukey ($p < 0,05$).

1.3.1. ENRAIZAMIENTO

Según el análisis de la varianza (ver detalles en el Anexo 2) y la prueba de rango múltiple de Tukey presentado en la Tabla 7, se indica que el enraizamiento es significativamente influenciado por la aplicación exógena del ácido indol-3-butírico (AIB) en sus distintas concentraciones ($p < 0,05$). Se obtuvo el máximo porcentaje de enraizamiento con una concentración de $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB (38, 89 por ciento), dicho concentración concuerda con lo señalado por Soudre *et al.* (2008), quienes indican que la mayoría de especies forestales tropicales enraízan adecuadamente con concentraciones de entre $2\ 000$ y $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de la auxina en cuestión.

En la Figura 4, se observa el comportamiento creciente del enraizamiento en el intervalo desde la concentración de $1\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ a $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de ácido indol-3-butírico (AIB) y descendente al aumentar la concentración de la auxina. Esto indicaría que en la propagación vegetativa de *Dipteryx odorata* se requiere de cierta cantidad óptima de AIB para iniciar la rizogénesis. Este comportamiento es similar a la tendencia encontrada en la propagación asexual de otras especies tropicales.

Al respecto, Mesén (1998) y Hartmann *et al.* (2011) advierten que el aumento de la concentración exógena de auxina aplicada en estacas, provoca un efecto estimulador en la formación de raíces adventicias hasta cierto valor máximo, a partir del cual cualquier incremento tiene un efecto inhibitor. En este ensayo, en efecto, se corroboró que el porcentaje de enraizamiento alcanza su valor máximo con $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de ácido indol-3-butírico (AIB), después de esta concentración, al incrementar la cantidad de AIB el enraizamiento empieza a decaer, obteniéndose el menor valor con $7\ 000$ de AIB.

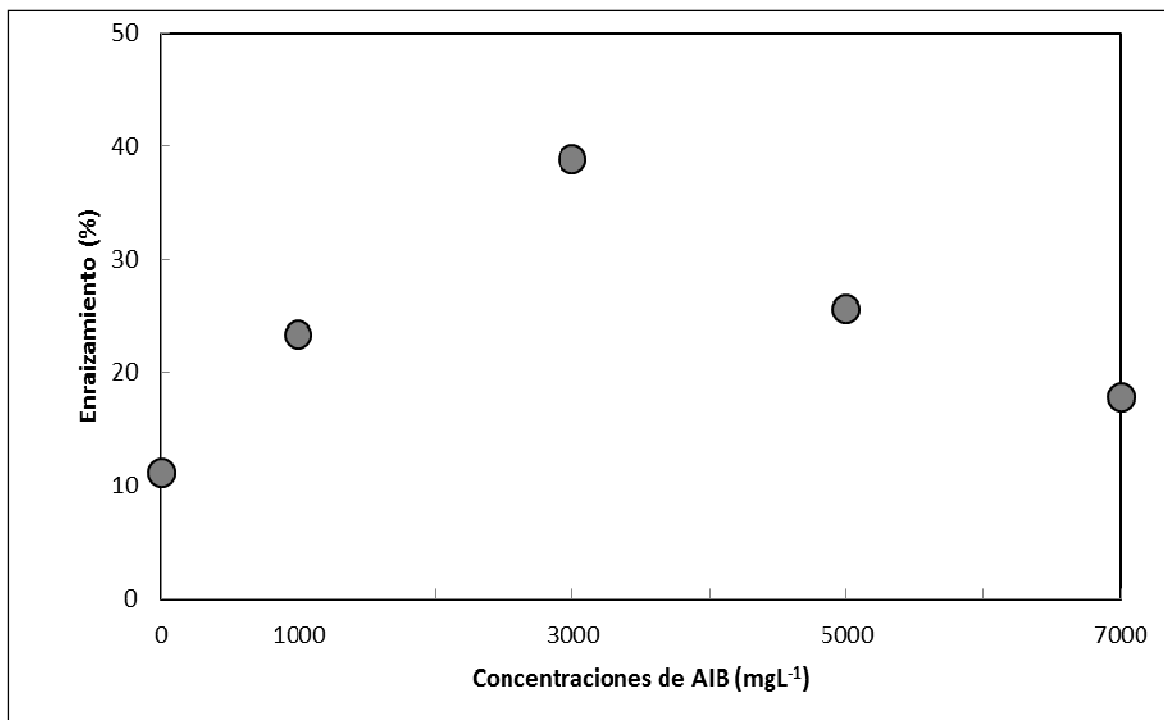


Figura 4: Efecto de las concentraciones de ácido indol-3-butírico (AIB) sobre el enraizamiento de estacas de *Dipteryx odorata*.

Los resultados encontrados para el porcentaje de enraizamiento en estacas de *Dipteryx odorata* son comparables con otras investigaciones realizadas en especies forestales tropicales (Leakey *et al.* 1990, Tchoundjeu y Leakey 1996, Núñez 1997, Vásquez 2009, Soudre *et al.* 2011, de Andrade 2014, Azad y Matin 2015), no tropicales (Cameron 1968, OuYang *et al.* 2015) y lo indicado en la teoría (Ludwig- Müller 2000, Han *et al.* 2009, Hartmann *et al.* 2011, Legué *et al.* 2014), respecto al efecto positivo de la aplicación exógena del ácido indol-3-butírico (AIB). En todos estos trabajos se evidencia que las especies requieren de una concentración óptima de AIB para iniciar el enraizamiento y alcanzar valores aceptables en dicha variable. Sin embargo, cualquier concentración, por debajo o por encima de este óptimo, arroja bajos porcentajes de enraizamiento.

Por otro lado, en un trabajo con estacas de *Dipteryx odorata*, Rollo (2009) encontró 6,6 por ciento de enraizamiento usando agua de coco como sustancia promotora del enraizamiento. Existen algunos detalles que deben considerarse para poder explicar las diferencias entre el presente trabajo y el mencionado. Primero, es discutible el efecto que tiene el agua de coco sobre el enraizamiento. Segundo, la edad de las estacas usadas por Rollo (2009) fueron de cuatro meses de edad a diferencia de las estacas usadas en este trabajo que fueron de

dos meses. Tercero, la longitud media de las estaquillas usadas por Rollo (2009) fue 80 mm frente a las $38,83 \pm 6,35$ mm de largo usadas en esta prueba.

De acuerdo con Longman (1993), Leakey (2004) y Hartmann *et al.* (2011), factores como la edad y tratamientos en la estaquilla (léase tratamientos hormonales, sistema de propagación, dimensiones de estaquilla, área foliar, etc.) tienen efectos sobre la capacidad de enraizamiento, por lo tanto, el tratamiento con agua de coco, la edad de los brotes y las dimensiones de las estaquillas empleadas por Rollo (2009) pudieron no ser las adecuadas para la especie. Estas diferencias permitirían deducir lo siguiente: primero, *Dipteryx odorata* es sensible a los tratamientos hormonales aplicados para su enraizamiento, en consecuencia, requiere de un estímulo auxínico exógeno, ello haría pensar que se trataría de una especie difícil de propagar vegetativamente. Segundo, las características anatómicas y fisiológicas de la estaquilla tienen efectos sobre el enraizamiento. Tercero, individuos (variedades, clones o procedencias) de la especie responden de distinta manera a la propagación vegetativa, es preciso mencionar que el material vegetativo empleado por Rollo (2009) proviene de la localidad de Macuya (Puerto Inca, Huánuco).

Por último, es importante destacar que cuando no se aplicó el ácido indol-3-butírico (AIB) se obtuvo el más bajo porcentaje de enraizamiento (11,11 por ciento), pero el hecho de que, en ausencia de un estímulo hormonal externo, las estaquillas de shihuahuaco sean capaces de enraizar haría pensar que estas cuentan con ciertas auxinas endógenas, pero no en las cantidades adecuadas para asegurar un enraizamiento exitoso. Además, de la presencia y concentración endógena de auxinas, Acosta *et al.* (2013) refieren que la velocidad de biosíntesis, conjugación, hidrólisis de conjugados (oxidación descarboxilativa y no descarboxilativa) e intensidad del transporte (importación y exportación) son factores que ejercen influencia en la acción de las auxinas. Con ello se ha probado la hipótesis que sostiene que la propagación asexual de *Dipteryx odorata* es viable y que requeriré de una cierta concentración óptima de ácido indol-3-butírico ($3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$), pues sus efectos no son sustituidos por estímulos endógenos, es decir, el tratamiento auxínico deriva aditivamente en el enraizamiento, sin interacción significativa, de acuerdo al análisis de la varianza.

1.3.2. NÚMERO DE RAÍCES POR ESTAQUILLA

Los resultados obtenidos en el análisis de la varianza individual y en la prueba de Tukey ($\alpha=0,05$) (ver detalles en Anexo 3) evidencian que la existencia de diferencias significativas entre las concentraciones del ácido indol-3-butírico (AIB) para el número de raíces por estaquilla ($p<0,05$). Con la aplicación de $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB se tuvo $1,92 \pm 1,12$ raíces por estaquilla. Resultado que no se diferenció significativamente de los tratamientos $1\ 000$ y $5\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB, pero sí de lo encontrado con $7\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB y el testigo.

Con la aplicación de $7\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de ácido indol-3-butírico (AIB) se tuvo $2,26 \pm 0,70$ raíces en promedio tres veces más que las estaquillas que no fueron tratadas con AIB ($0,81 \pm 0,42$ por estaquilla). Estos resultados sugieren que la aplicación de AIB influyó tanto en la formación de raíces adventicias como en la mayor emisión de estas.

En la Figura 5 se observa que el número promedio de raíces en estaquillas tratadas con ácido indol-3-butírico mostró un comportamiento descendente de $1\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ a $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ y creciente a partir de esta concentración hasta $7\ 000\ \text{mgL}^{-1}$. Esta tendencia ha sido observada en otras especies forestales tropicales por Leakey *et al.* (1990), Mesén (1993), Tchoundjeu y Leakey (1996), Soudre *et al.* (2011), de Andrade (2014), entre otros.

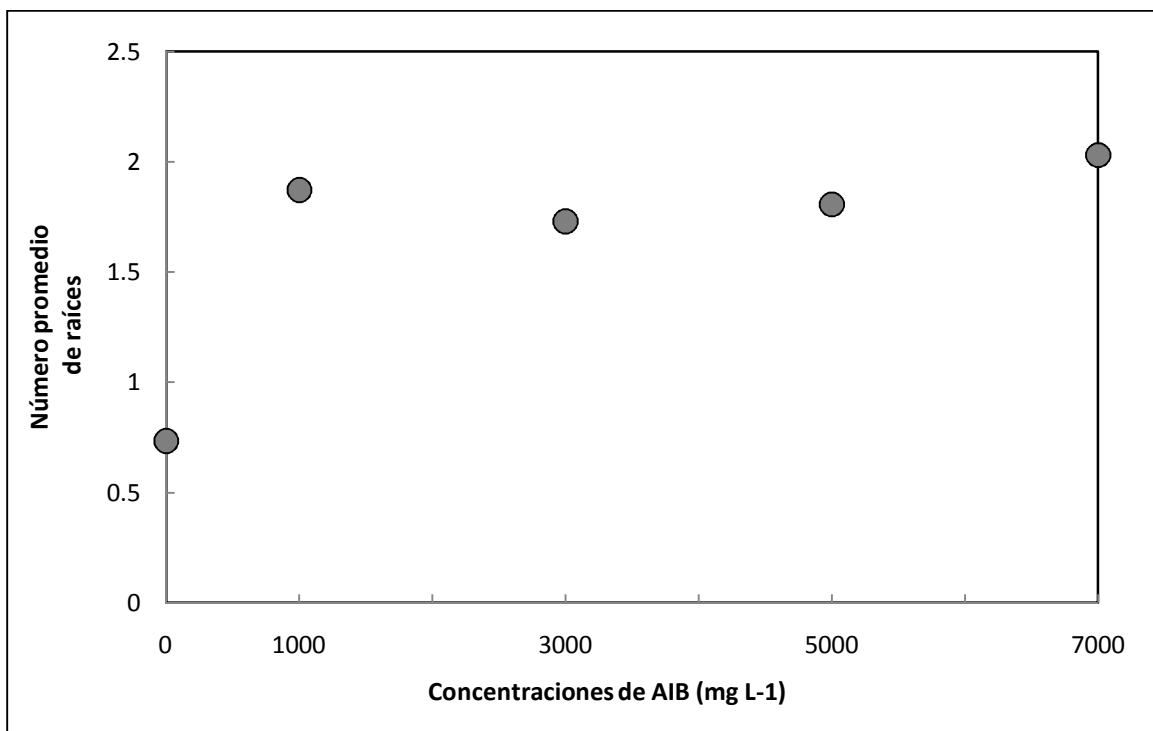


Figura 5: Efecto de las concentraciones de ácido indol-3-butírico (AIB) en el número de raíces por estaquilla.

El efecto de la aplicación exógena del ácido indol-3-butírico (AIB) sobre el número de raíces por estacilla, se debería a la acción que tienen las auxinas en la división celular. También, como lo ha sugerido Leakey (2004), la aplicación exógena de AIB aumenta el número de raíces mediante la hidrólisis del almidón, movilización de azúcares y nutrientes a la base de la estacilla. Por lo tanto, y en función a los resultados obtenidos, se podría afirmar que para *Dipteryx odorata* es necesaria la aplicación de AIB para lograr un número aceptable de raíces por estacilla, sin interacción significativa de tratamientos, de acuerdo al análisis de la varianza.

1.3.3. LONGITUD PROMEDIO DE RAÍCES

Los resultados obtenidos al evaluar la longitud promedio de raíces señalan que la aplicación del ácido indol-3-butírico (AIB) fue altamente significativo en el crecimiento longitudinal de las raíces ($p < 0,01$) (ver detalles del análisis estadístico en el Anexo 4). En estacillas tratadas con $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB se obtuvo raíces de $43,9 \pm 27,0$ mm, en promedio.

Con la aplicación de $1\ 000$, $3\ 000$ y $5\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, con un nivel de confianza del 95 por ciento, de acuerdo a la prueba de Tukey. En estacillas tratadas con $7\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB las raíces crecieron hasta seis veces más que cuando no se aplicó AIB (testigo). Es decir, las estacillas que recibieron la concentración más alta de la fitohormona lograron que sus raíces crezcan $58,4 \pm 32,1$ mm, en promedio, mientras que, en aquellas libres de tratamiento hormonal, sus raíces crecieron $12,5 \pm 11,8$ mm, en promedio.

En la Figura 6 es posible observar que la longitud promedio de las raíces adventicias de *Dipteryx odorata* responden positivamente al incremento de las concentraciones del ácido indol-3-butírico (AIB), incrementándose desde $1\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ hasta $7\ 000\ \text{mgL}^{-1}$. Entonces, es evidente que la aplicación exógena de AIB es favorable para el crecimiento radicular. Es decir, existen efectos del AIB tanto para el número de raíces como para su crecimiento longitudinal, mostrándose en todos los casos significativamente mayor al testigo.

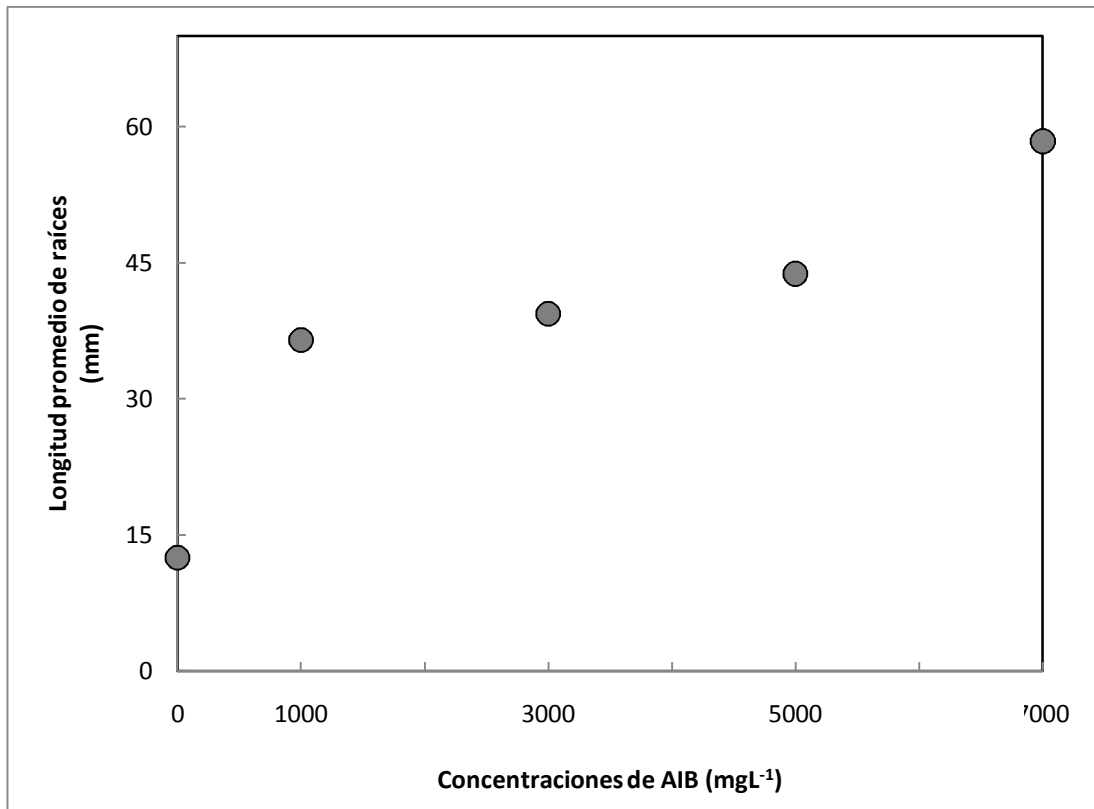


Figura 6: Efecto de las concentraciones del ácido indol-3-butírico (AIB) en la longitud promedio de raíces.

Respecto a las longitudes alcanzadas con las concentraciones de ácido indol-3-butírico (AIB), se puede sostener que al igual como sucede con el número de raíces, en *Dipteryx odorata*, el transporte de carbohidratos (estimulado por la acción auxínica) favorecería la elongación de los primordios radiculares, esto se ilustra en la Figura 7. Por tanto, como indican Acosta *et al.* (2013), la auxina ejerce acción sobre la pared celular ayudando a su extensibilidad; además, esto ha sido reportado en otras especies, donde se indica una relación directa entre el crecimiento longitudinal de las raíces adventicias como consecuencia del incremento de las concentraciones exógenas de AIB, por ejemplo, en *Amburana cearensis* (Flores 2010), *Plukenetia volubilis* (Mesén y Ruiz 2010) y *Swietenia macrophylla* (Azad y Matin 2015).



(a) Estaquilla enraizada sin la aplicación de AIB. (b) Estaquilla enraizada con la aplicación de 7000 mgL^{-1} de AIB

Figura 7: Comparativo del número y longitud de raíces por estaquilla de *Dipteryx odorata* según tratamiento hormonal. Ambas estaquillas fueron instaladas en arena fina.

1.3.4. FORMACIÓN DE CALLOS

El análisis de la varianza presentado demuestra que la formación de callos ($p < 0,05$) estuvo influenciada por la presencia de la fitohormona en sus diferentes concentraciones (Tukey; $\alpha = 0,05$) (ver detalles del análisis estadístico en el Anexo 5). Se verificó el aumento de la presencia relativa de callos a medida que aumentaba la concentración del ácido indol-3-butírico (AIB). Se obtuvieron los valores máximos con $7\ 000 \text{ mgL}^{-1}$ de AIB (15,56 por ciento) y los mínimos con $1\ 000 \text{ mgL}^{-1}$ de AIB (3,33 por ciento), mientras que las concentraciones de $3\ 000$ y $5\ 000 \text{ mgL}^{-1}$ de AIB, no se diferenciaron significativamente, en ambas se obtuvo 10 por ciento.

En la Figura 8, se observa que, dentro de los tratamientos hormonales, el incremento de la concentración de AIB favoreció la presencia de callos. Según Hartmann *et al.* (2011), la formación de raíces adventicias y callos son sucesos de ocurrencia simultánea pero independientes uno del otro, que requerirían de condiciones internas y ambientales similares.

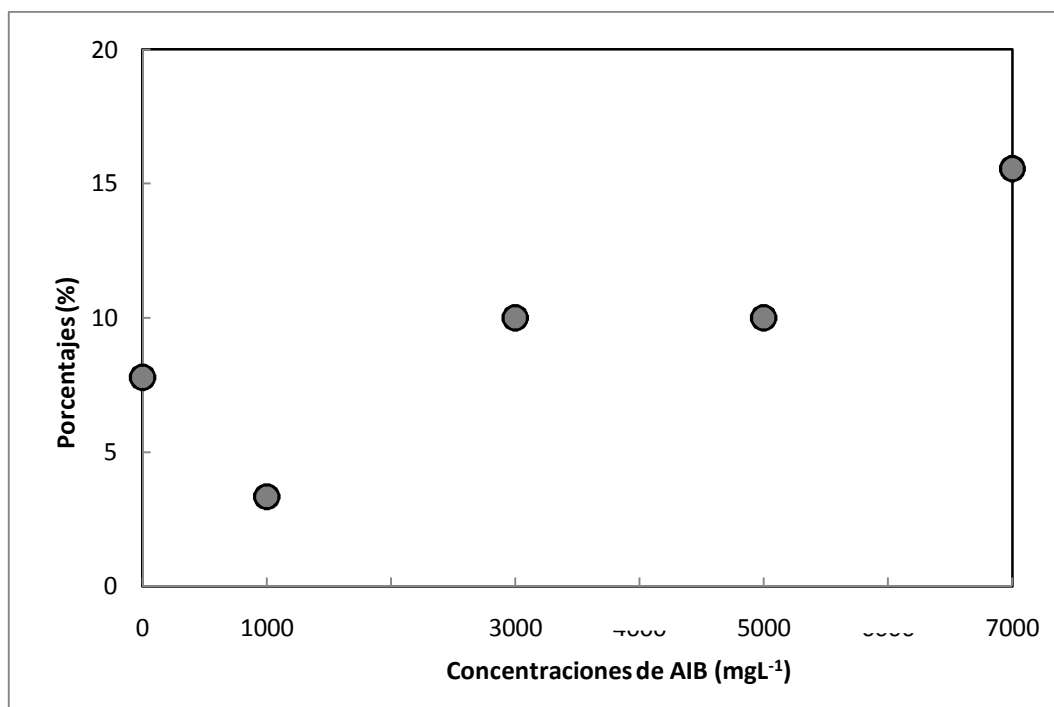


Figura 8: Efectos del ácido indol-3-butírico (AIB) en la formación de callos en la base de las estaquillas de *Dipteryx odorata*.

La relación entre la formación de callos y el enraizamiento ha sido ampliamente discutida. Cameron (1968) y OuYang *et al.* (2015) indican que la formación de callos es necesaria para la formación de raíces adventicias. Sin embargo, como lo ha señalado Mur (1987), al menos en estaquillas, la formación de callos no necesariamente precede a la formación de raíces. En este trabajo se ha conseguido evidenciar que estos procesos serían fisiológicamente independientes.

Los resultados obtenidos para esta variable indican que altas concentraciones de ácido indol-3-butírico (AIB) favorecieron la formación de callos, pero redujeron el enraizamiento, por lo que existiría un aparente antagonismo entre ambos eventos. Se verificó que la formación de raíces adventicias se origina en la base de la estaquilla y en zonas opuestas a los callos, mas no directamente de ellas, esto se ilustra en la Figura 9. Ello permite afirmar que la presencia de callos no precede a la formación de raíces y que su presencia podría perjudicar la formación del primordio radicular, por tanto, su aparición y crecimiento serían características no deseadas en la propagación vegetativa por estaquillas de *Dipteryx odorata*.



Figura 9: Efecto de la presencia de callos en la emisión de raíces. En la estaquilla enraizada (derecha) la raíz emerge opuesta al callo.

1.3.5. FORMACIÓN DE BROTES

Durante el análisis estadístico se evidenció significancia estadística del tratamiento auxínico en la aparición de brotes ($p < 0,01$) (ver detalles en el Anexo 6). La Figura 10 muestra un ligero aumento de la presencia de brotes de $1\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB (12,22 por ciento) a $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB (13,33 por ciento), a partir del cual disminuye hasta $5\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB (10,00 por ciento). La prueba de rango múltiple de Tukey con un nivel de confianza del 95 por ciento indica que estas tres concentraciones no difieren significativamente. Pero existe una disminución significativa con $7\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB (2,22 por ciento).

En todos los tratamientos se produjeron brotes, en estaquillas enraizadas y no enraizadas, por lo que su presencia aparentemente no tendría efecto sobre el desarrollo radicular de las estaquillas de *Dipteryx odorata*. También, durante las inspecciones de seguimiento del proceso se notó que en las estaquillas tratadas con ácido indol-3-butírico (AIB) la formación de raíces precedió a la formación de brotes. De este modo, los resultados presentados y la evidencia estadística, permiten suponer que la presencia AIB habría retrasado la formación de brotes favoreciendo la rizogénesis. Por otro lado, en estaquillas sin tratamiento hormonal (testigo) se registró el más alto porcentaje de brotes, los cuales podrían tener un efecto antagónico durante el proceso, pues competirían por carbohidratos (Mesén 1993).

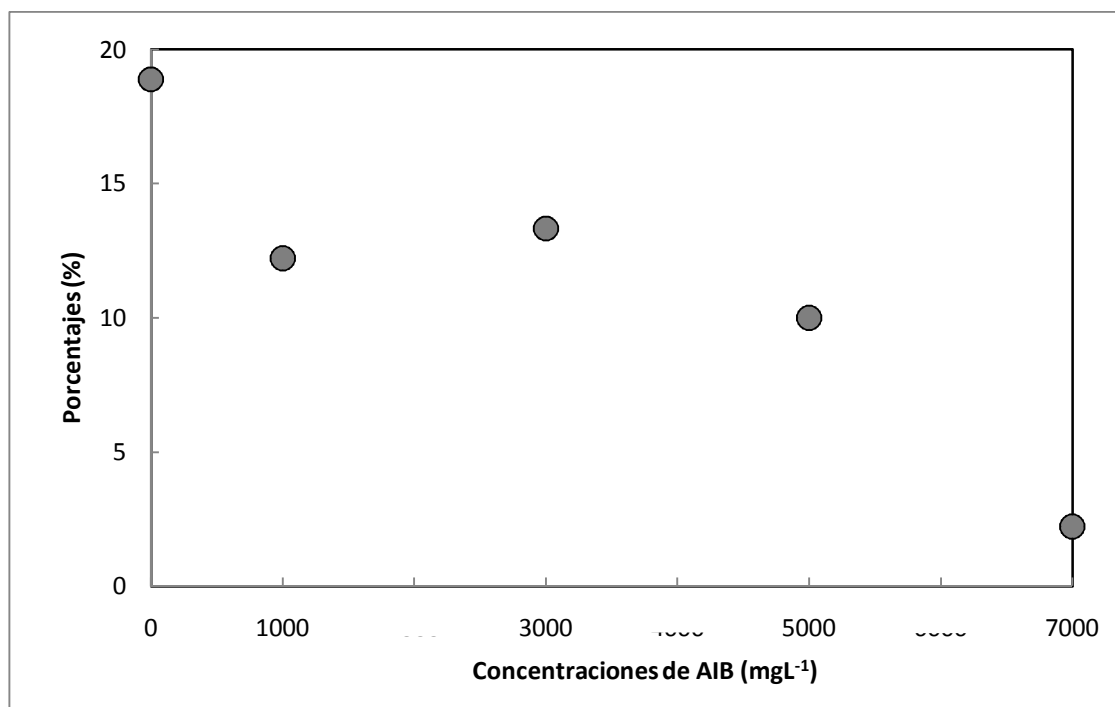


Figura 10: Efectos del ácido indol-3-butírico (AIB) en la formación de brotes o yemas laterales en estaquillas de *Dipteryx odorata* después de 45 días.

Mesén (1993) demostró en *Cordia alliodora*, que la aparición y crecimiento de brotes se dio antes que la raíz en estaquillas que no fueron tratadas con AIB, similar comportamiento fue reportado por Díaz (1991) en *Cedrela odorata* y Mesén y Ruiz (2010) en *Plukenetia volubilis*. En *Dipteryx odorata* se observó igual comportamiento para estaquillas sin tratamiento auxínico. No obstante, la presencia de brotes no tendría efecto sobre la capacidad de enraizamiento; esto siempre y cuando, la formación del primordio radicular preceda a la formación del brote, lo que se conseguiría con la aplicación de 3 000 mgL⁻¹ de AIB.

Lo expuesto se confirma con lo indicado por Taiz y Zeiger (2006) quienes señalan que la formación de brotes se debe a un balance entre auxinas y citoquininas. Como ya se ha demostrado en *Dipteryx odorata* una cantidad de óptima de AIB no solo produciría un buen enraizamiento, si no que tendría efectos sobre el balance hormonal influyendo en todos los eventos fisiológicos de la estaquilla. Hartmann *et al.* (2001) señalan que la formación y crecimiento de brotes puede ser respuesta a las altas temperaturas y al balance hormonal. Considerando que la temperatura promedio del propagador fue $28,3 \pm 2,8$ °C (valor dentro del rango aceptado), entonces, existiría la posibilidad que la formación de brotes se deba al balance hormonal, más que a las condiciones microclimáticas del proceso.

1.4. EFECTOS DE LOS SUSTRATOS

Se planteó comprobar el efecto del sustrato como parte integral del sistema de propagación. Se demostró que este fue significativo e importante para mantener a las estaquillas en condiciones adecuadas. Los detalles de la prueba de rango múltiple de Tukey ($\alpha=0,05$) para las variables significativas en el análisis de la varianza ($p<0,05$) se presentan en la Tabla 8. Se observa que la sobrevivencia en arena fina fue 58,67 por ciento, significativo y superior a los otros sustratos y junto a ello se evidencia el menor porcentaje de formación de callos (1,33 por ciento).

Tabla 8: Efectos los medios de enraizamiento en variables relacionados al enraizamiento de estaquillas de *Dipteryx odorata*.

Sustratos	Sobrevivencia (%)	Formación de callos (%)
Arena fina	58,67 a	1,33 a
Arena media	40,67 ab	8,00 a
Arena gruesa	37,67 b	18,67 b
Error Estándar	2,43	1,18
DMS	12,24	5,96

Se expresan los valores promedios de las variables. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de comparación de medias de Tukey ($p<0,05$).

1.4.1. SOBREVIVENCIA

Según los resultados obtenidos en el análisis de la varianza (ver detalles en el Anexo 7) y la prueba de rango múltiple de Tukey presentado en la Tabla 8, se indica que la arena fina como medio de enraizamiento permitió alcanzar los más altos valores de sobrevivencia (58,67 por ciento) diferenciándose significativamente de los otros sustratos. La sobrevivencia deriva del efecto principal del sustrato, sin interacción de tratamientos.

Se puede atribuir que esto fue posible gracias a que la arena fina permitió crear un ambiente propicio, logrando un adecuado balance entre oxígeno y agua, lo que favoreció la sobrevivencia de las estaquillas. Estas características del sustrato apuntan a que este es el medio más adecuado para propagar vegetativamente a *Dipteryx odorata*. Características que estarían acorde con lo recomendado por Leakey (2014), quien sostiene que el medio de

enraizamiento debe permitir la respiración de los tejidos y evitar la anoxia, la cual estimula la putrefacción y la mortalidad, particularidades que no fueron observadas en arena fina.

Los resultados indican una relación inversa entre el porcentaje de sobrevivencia y el aumento de la granulometría del sustrato. Esta relación ha sido reportada en *Cedrela odorata*, *Gmelina arborea* (Díaz 1991); *Cordia alliodora* (Mesén 1993); *Terminalia oblonga* (Núñez 1997); *Baillonella toxisperma* (Ngo-Mpeck y Atangama 2007) y *Plukenetia volubilis* (Mesén y Ruiz 2010), en ellas se obtuvo altos porcentajes de sobrevivencia con arena fina, observándose que fue significativamente superior a otros medios de enraizamiento.

Durante el proceso de enraizamiento se retiraron estaquillas con signos de oxidación y necrosado de tejidos desde la base del tallo hacia el ápice, la mayoría de ellas había perdido sus hojas (Figura 11). Para este ensayo se consideraron como estaquillas muertas a aquellas que presentasen más del 50 por ciento de su tallo necrosado.

Las observaciones realizadas durante el ensayo abren la posibilidad para sugerir que una de las causas de la mortalidad se debió a la presencia de compuestos fenólicos, pues como indican Taiz y Zeiger (2006), la presencia de ciertos compuestos fenólicos es causa común de baja sobrevivencia cuando se trabaja en la propagación vegetativa. Dichos compuestos tienden a acumularse en la base de explantes al poco tiempo de realizado el corte, agregan Taiz y Zeiger (2006).

Primero, el comportamiento del tejido necrosado y sus características son similares a los resultados reportados por Arbe (2014) en *Dipteryx odorata*, y Ramos (2012) y Zamora (2013) en *Dipteryx alata*. En estos estudios se demostró que la oxidación de tejidos y la exudación de fenoles fue la principal causa de muerte de explantes, en ambas especies se observó la oxidación y posterior necrosado de los tejidos, empezando desde la base del tallo. También, Hartmann *et al.* (2011) reconocen que uno de las principales limitantes de la propagación vegetativa es la oxidación de fenoles, compuestos que son liberados a través de los cortes de los tejidos.

Segundo, refiriéndose a las características físicas del sustrato, se sabe que muchos compuestos fenólicos son solubles en agua (Taiz y Zeiger 2006), entonces, surge la posibilidad que la presencia y acumulación de estos metabolitos secundarios podría estar involucrada en la mortalidad de estaquillas de *Dipteryx odorata*. Al respecto, se observó

que, de los tres sustratos empleados, la arena gruesa era el que presentaba el menor contenido de humedad y mayor mortalidad de estaquillas, por ello, se plantea la posibilidad que al presentar menos humedad fue menos probable que estos compuestos pudieran disolverse, lo que daría una mayor acumulación en la base de la estaquilla.



Figura 11: Estaquilla de *Dipteryx odorata* que evidencia la necrosis del tejido desde la base hasta la parte apical.

1.4.2. FORMACIÓN DE CALLOS

La formación de callos no fue un evento común, pero fue significativamente influenciado por la granulometría del sustrato. En el análisis estadístico se indica que el sustrato fue altamente significativo ($p < 0,01$) al igual que el ácido indol-3-butírico ($p < 0,05$), pero no existió interacción entre ambos factores, por lo que se analizó los efectos principales sobre la formación de callos, los detalles de este análisis se presentan en el Anexo 8.

La prueba de rango múltiple de Tukey ($\alpha = 0,05$) indica significancia entre los tipos de sustrato para esta variable. En arena fina se encontró 1,33 por ciento y en arena media 8,00 por ciento de formación de callo, las cuales no se diferenciaron significativamente. Característica deseable si se consideran los efectos negativos de la presencia de callos. Por su parte, con arena gruesa se registró 18,67 por ciento de callos, lo que representa el 65 por ciento del total de estaquillas que formaron callos. Estos resultados sugieren que el

incremento del tamaño de partículas y la formación de callos se relacionan de manera directa.

Considerando las características del sustrato, con arena gruesa el contenido de agua fue menor, por tanto, los espacios porosos fueron ocupados por moléculas de oxígeno. La relación entre oxígeno y presencia de callos, fue corroborado por Ernst y Holtzhausen (1987) quienes notaron, en la propagación de estacas de *Persea americana*, que la mayor presencia de callos se correspondía directamente con el incremento de oxígeno en el medio de enraizamiento.

Bajo condiciones del propagador de sub-irrigación existe evidencia que indicaría que la presencia de callos guarda relación con la granulometría del sustrato. Por ejemplo, Vásquez (2009) encontró que, con arena gruesa, estaquillas de *Swietenia macrophylla* alcanzaban hasta 76 por ciento de formación de callos. Soudre (2010) concuerda e indica que estaquillas de *Simarouba amara* pueden llegar a formar hasta 89 por ciento de callos con arena gruesa y gravilla. Sin embargo, Flores (2010) encontró que para *Amburana cearensis* el uso de arena fina favorecía la formación de callos hasta 54 por ciento y con arena gruesa esta se reducía a 21,3 por ciento. Tal situación haría suponer que bajo condiciones similares la formación de callos estaría, además, predispuesta por la naturaleza de la especie y otros factores exógenos involucrados a lo largo el proceso de enraizamiento.

Hasta ahora existe evidencia que indicaría que en *Dipteryx odorata* la formación de callos dependería del sustrato y de la concentración de ácido indol-3-butírico (AIB). La discusión llevada a cabo, respecto a estas formaciones, arrojan indicios para suponer que su presencia no es deseable en la propagación vegetativa de la especie.

1.5. EFECTOS DE INTERACCIÓN ENTRE FACTORES

La interacción no fue significativa ($p > 0,05$) para las variables porcentaje de enraizamiento, número de raíces por estaquilla y longitud promedio de raíces. Sin embargo, con arena fina se presentó el mayor porcentaje de enraizamiento para todas las concentraciones de ácido indol-3-butírico (AIB). Se registró que el mayor valor para esta variable fue con la combinación de arena fina y $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB (57 por ciento), con este tratamiento se logró tener estaquillas con $1,82 \pm 0,88$ raíces y $26,50 \pm 9,36$ mm de longitud. Estos resultados pueden considerarse adecuados según lo indicado por Mesén (1998) quien afirma que, con longitudes de raíces entre 10 y 20 mm, las estaquillas están aptas para el repique y

continuar su proceso de crecimiento con las practicas normales de vivero para cada especie. En *Guazuma crinita* y *Gmelina arborea* (observación personal) es posible tener plántulas de crecimiento normal repicándolas con dos raíces por estaquilla y longitudes alrededor de 20 mm. Es preciso indicar que en el propagador únicamente se busca la formación de raíces adventicias de las estaquillas, mas no el crecimiento de plántulas.

Se observó el comportamiento y características de las raíces en cada sustrato. En arena fina, sin considerar la concertación fitohormonal, se obtuvo elevada sobrevivencia y el mayor porcentaje de enraizamiento con $2,02 \pm 0,99$ raíces por estaquilla. En promedio, las longitudes de raíz fueron las más cortas con $29,11 \pm 15,03$ mm y se caracterizaron por ser delgadas, con poca o nula ramificación, poco flexibles, ligeramente sinuosas, de color amarillento a blanuzco cerca a la cofia y distribuidas alrededor de la estaquilla (Figura 12-a). En contraste, la arena gruesa presentó elevada mortalidad y el menor porcentaje de enraizamiento, el promedio de raíces por estaquilla fue $2,00 \pm 0,87$, pero las estaquillas enraizadas en este sustrato tuvieron las raíces más largas $76,83 \pm 26,94$ mm. Las raíces se caracterizaron por ser gruesas, ramificadas hacia la base, flexibles, muy sinuosas, de color marrón rojizo y amarillento en la cofia (Figura 12-b).

Lo expuesto, reflejaría lo dicho por Leakey (2014), quien sostiene que los requerimientos para la iniciación de raíces adventicias están afectados por factores genéticos y el estado fisiológico de la planta, mientras que la elongación de las raíces es más sensible a factores ambientales, en este caso las características del sustrato arena gruesa permitió un mayor crecimiento longitudinal de las raíces. No obstante, en este sustrato el enraizamiento fue pobre. Por último, como ya se indicó, no es necesario que las estaquillas formen un gran sistema radicular, basta que cumplan ciertas características en número y longitud de raíces para asegurar su crecimiento en vivero.



(a) Estaquilla enraizada usando arena fina como medio de enraizamiento. (b) Estaquilla enraizada usando arena gruesa como medio de enraizamiento. Ambas imágenes corresponden al día 45 en el propagador de sub-irrigación

Figura 12: Comparativo entre sistemas radiculares de estaquillas de *Dipteryx odorata* según el medio de enraizamiento, ambas fueron tratadas con la misma concentración de AIB.

Como se ha mencionado, los resultados revelan que la capacidad de enraizamiento tuvo efectos significativos de la concentración del ácido indol-3-butírico (AIB) mostrando diferencias en sus distintos niveles (prueba de rangos múltiple de Tukey, $\alpha=0,05$). Lográndose evidenciar que en *Dipteryx odorata* la aplicación exógena de esta auxina favorece el enraizamiento, el número de raíces y la longitud de estas.

El mayor porcentaje de enraizamiento se logró con $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de ácido indol-3-butírico (AIB), pero los mejores resultados relacionados el crecimiento radicular (número de raíces y la longitud promedio de raíces por estaquilla) fueron significativamente mayores con $7\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB. Es decir, una misma concentración de la auxina no tuvo el mismo

efecto para las variables estudiadas. Esto se debería a que los requerimientos auxínicos no son iguales a lo largo de proceso de rizogénesis (Taiz y Zeiger 2006).

Investigaciones han encontrado que en la propagación vegetativa de especies forestales los requerimientos auxínicos no siempre son iguales, es decir, la concentración adecuada para una variable no necesariamente da los mejores resultados en otras variables relacionadas a la propagación vegetativa (Tchoundjeu y Leakey 1996, Santelices y Cabello 2006, Vásquez 2009, Azad y Matin 2015). Al respecto, Leakey (2004) refiere que varios autores, además, de cuantificar el porcentaje de enraizamiento usan otras mediciones como el número de raíces por estacuela, la longitud media y total de raíces producidas, peso seco de raíces, entre otras. Curiosamente resalta que, estas medidas a menudo no están relacionadas con el porcentaje de enraizamiento y probablemente es solo cuando estas medidas están bien correlacionadas que hay una buena medición de la capacidad de enraizamiento. Aunque, también refiere, basándose en la experiencia, que la falta de relación en las variables evaluadas no es algo definitivo, si no que dependería de las particularidades de cada especie frente a su propagación vegetativa.

Dicho esto, y considerando las implicancias prácticas y económicas del uso del ácido indol-3-butírico (AIB), se podría afirmar que con una concentración de $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ se consigue un buen porcentaje de enraizamiento y valores aceptables en el crecimiento radicular. Tomando como base la evidencia estadística y los costos que representa trabajar con altas concentraciones de AIB ($7\ 000\ \text{mgL}^{-1}$) y si bien existen efectos sobre el crecimiento radicular, el porcentaje de enraizamiento es bajo, no pudiéndose justificar su uso ni técnica ni económicamente, puesto que en este tipo de trabajos se prioriza el enraizamiento como variable principal de la propagación vegetativa, pues el crecimiento del sistema radicular y de la estacuela como plántula se dará en condiciones normales de vivero. Por lo tanto, se tomó como base el tratamiento hormonal de $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB y el uso de arena fina como sustrato para la continuación del trabajo en campo.

2. EFECTO DE LA POSICIÓN DE LA ESTAQUILLA Y EL ÁREA FOLIAR.

2.1. CONDICIONES MICROCLIMÁTICAS DEL PROCESO

El resumen meteorológico registrado durante el proceso de enraizamiento de *Dipteryx odorata* se presenta en la Tabla 9. Esta segunda parte experimental se realizó durante la época seca de la Amazonía peruana, entre agosto y septiembre.

Tabla 9: Condiciones microclimáticas en el propagador de sub-irrigación y en el ambiente de propagación registradas durante 30 días, Puerto Inca (Huánuco, Perú).

	Condiciones en el propagador de sub-irrigación		Condiciones en el ambiente de propagación	
	Media	Rango	Media	Rango
Temperatura del aire (°C)	29,5	23,6 – 33,6	30,8	23,7 – 36,2
Humedad relativa (%)	79,5	67,0 – 94,0	68,0	40,0 – 92,0

La temperatura promedio en el propagador estuvo dentro del rango recomendado por Mesén y Ruiz (2010) y Hartmann *et al.* (2011). Esta fue ligeramente mayor a lo registrado en el primer ensayo ($28,3 \pm 2,8$ °C), no obstante, fue adecuada y permitió la sobrevivencia y enraizamiento de las estaquillas de *Dipteryx odorata*.

La humedad relativa registrada en el propagador de sub-irrigación fue menos variable que la humedad relativa del ambiente de propagación. En esta época del año fue necesario mantener la atmósfera del propagador con alta humedad y baja demanda de evaporación de agua conforme a lo señalado por Leakey (2004). Para ello se recurrió a la aspersion de agua alrededor del propagador, esto permitió reducir la temperatura del aire y elevar la humedad. Esta actividad se realizó en horas de mayor incidencia solar, desde las 10:00 a.m. hasta las 3:00 p.m., con una frecuencia de entre 30 y 40 minutos.

Fue notorio que desde la instalación hasta el levantamiento del ensayo el clima fue volviéndose más caluroso y seco. Entonces, tomando como base el registro meteorológico, se puede afirmar que el propagador de sub-irrigación brindó condiciones adecuadas a las estaquillas durante el proceso de enraizamiento. Además, lo registrado corroboraría lo

indicado por Mesén (1998) y Leakey (2004), quienes destacan su efectividad frente a otros sistemas de propagación más sofisticados.

2.2. CAPACIDAD DE ENRAIZAMIENTO EN ESTAQUILLAS JUVENILES DE *Dipteryx odorata*

El p-valor para cada variable, de acuerdo a su ANOVA individual, se presenta en la Tabla 10. Con un criterio de aceptación $p < 0,05$, se indica que la interacción de la posición de estacua y el área foliar fue significativa para el porcentaje de sobrevivencia, porcentaje de enraizamiento, número de raíces por estacua y porcentaje de defoliación. Para el análisis de estas variables no se consideró los efectos principales, ya que al existir efecto de interacción sobre la variable respuesta, el efecto de un factor depende del nivel en que se encuentre el otro. La posición de estacua fue significativa ($p < 0,05$) para la longitud promedio de raíces y porcentaje de brotes. En este caso se analizó los efectos principales de la posición de estacua. El porcentaje de formación de callos no fue significativa para los factores en cuestión ($p > 0,05$).

Se estudió la capacidad de enraizamiento de estaquillas de *Dipteryx odorata* en función del porcentaje de enraizamiento, número de raíces por estacua y longitud promedio de raíces. La prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ permitió establecer diferencias entre los tratamientos.

Tabla 10: P-valor y significancia estadística obtenidos en el análisis de la varianza individual para el efecto de la posición de estacua y el área foliar.

p-valor y significación estadística								
Fuente de variación	gl	Sobrevivencia	Enraizamiento	Crecimiento radicular		Formación de callo	Formación de brotes	Defoliación
				Número de raíces	Longitud de raíces			
Posición de estacua	2	<0,0001 **	0,0001 **	0,2483 ^{ns}	0,0325 *	0,6138 ^{ns}	<0,0001 **	0,0002 **
Área foliar	2	0,0147 *	0,0058 *	0,0098 *	0,3599 ^{ns}	0,3102 ^{ns}	0,1120 ^{ns}	<0,0001 **
Interacción	4	0,0028 *	0,0002 **	0,0212 *	0,0538 ^{ns}	0,1344 ^{ns}	0,0650 ^{ns}	0,0001 **
Cuadrado Medio del Error	16	83,56	58,44	0,06	1,94	37,21	35,95	52,30

* Significativo con $p < 0,05$; ** Significativo con $p < 0,01$; ^{ns} No significativo con $p > 0,05$

2.3. EFECTOS DE INTERACCIÓN ENTRE LA POSICIÓN DE ESTAQUILLA Y ÁREA FOLIAR

El diseño experimental planteado buscó encontrar la posible interacción entre los factores posición de estaquilla y área foliar en la propagación vegetativa de *Dipteryx odorata*. De este modo se advierte que la respuesta de la posición de la estaquilla en presencia del área foliar es diferente en cada uno de sus niveles, de acuerdo al ANOVA. Esta interacción fue significativa ($p < 0,05$) para el porcentaje de sobrevivencia, porcentaje de enraizamiento, número de raíces por estaquilla y porcentaje de defoliación. Por este motivo se planteó la prueba de rango múltiple de Tukey, con un nivel de confianza del 95 por ciento (significancia $\alpha = 0,05$), es decir, se analizó las posiciones de estaquilla en cada una de las áreas foliares.

La prueba de rango múltiple de Tukey para las variables cuyo ANOVA fue significativo ($p < 0,05$) se presentan en la Tabla 11, con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Este análisis indica que la sobrevivencia alcanzada fue 96,67 por ciento con la interacción de estaquillas apicales y 3 000 mm² de área foliar. Dicho tratamiento resultó significativamente mayor al resto. Mientras que las estaquillas basales con recorte de 1 000 mm² de área foliar presentaron la menor sobrevivencia dentro de todos los tratamientos (3,33 por ciento).

El enraizamiento resultó notablemente mayor en estaquillas de posición apical, que, en aquellas de posición media y basal, incrementándose con el área foliar. De este modo, se obtuvo 73,33 por ciento de enraizamiento como respuesta al efecto de interacción entre estaquillas apicales y 3 000 mm² de área foliar. En estaquillas de posición basal y media el enraizamiento no fue mayor al 20 por ciento.

El número de raíces por estaquilla presentó $2,33 \pm 0,33$ raíces producto de la interacción de estaquillas de posición apical y 3 000 mm² de área foliar. Este tratamiento fue mayor que las otras combinaciones de factores, pero no fue significativo con el tratamiento formado por estaquillas basales y 3 000 mm² de área foliar, de acuerdo con la prueba de Tukey, esto a un nivel de confianza del 95 por ciento. Las estaquillas de posición media no se diferenciaron en ninguno de los niveles de área foliar.

La defoliación fue significativamente menor en estaquillas apicales con área foliar de 3 000 mm², las cuales presentaron apenas 2,50 por ciento de defoliación. En contraste, los mayores valores porcentuales para esta variable se registraron en estaquillas basales y se incrementó cada vez que el área foliar era menor. Al cabo de 30 días, ninguna de las estaquillas basales

recortadas a 1 000 mm² de área foliar presentó hojas, es decir el 100 por ciento de las estaquillas bajo este tratamiento perdieron sus folíolos.

Tabla 11: Efectos de interacción de la posición de estaquilla y el área foliar en variables relacionados al enraizamiento de estaquillas de *Dipteryx odorata*.

Tratamientos	Enraizamiento (%)	Número de raíces (N°)	Sobrevivencia (%)	Defoliación (%)
Basal – 1 000	0,00 c	0,00 b	3,33 d	100,00 d
Basal – 2 000	6,67 bc	1,33 ± 1,15 ab	33,33 cd	13,33 abc
Basal – 3 000	20,00 bc	2,78 ± 0,39 a	50,00 bc	14,17 abc
Media – 1 000	33,33 b	1,37 ± 0,32 ab	80,00 ab	36,67 c
Media – 2 000	20,00 bc	1,22 ± 1,07 ab	60,00 abc	7,50 ab
Media – 3 000	10,00 bc	1,00 ± 1,00 ab	56,67 abc	10,00 ab
Apical – 1 000	10,00 bc	1,00 ± 0,00 ab	63,33 abc	30,00 bc
Apical – 2 000	36,67 b	1,83 ± 0,63 ab	90,00 ab	14,17 abc
Apical – 3 000	73,33 a	2,33 ± 0,33 a	96,67 a	2,50 a
Error estándar	4,41	0,14	5,28	4,18
DMS	22,20	0,70	26,55	21,01

Valores promedios para las variables porcentuales y medias ± desviación estándar para las variables expresadas en números. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de rango múltiple Tukey ($p < 0,05$).

2.3.1. ENRAIZAMIENTO

Se determinó que la respuesta del porcentaje de enraizamiento fue efecto de la interacción entre la posición de estaquilla y el área foliar. Según lo indicando en el ANOVA, existe diferencia altamente significativa para la interacción de los factores ($p < 0,01$) (ver detalles del análisis estadístico en Anexo 9).

Analizando al porcentaje de enraizamiento como componente principal de la capacidad de enraizamiento, se observó que este respondía positivamente al efecto de interacción. Con el tratamiento formado por estaquillas de posición apical y 3 000 mm² de área foliar, se obtuvo el porcentaje más alto de enraizamiento (73,3 por ciento). Notándose que en esta posición el

incremento de la variable respuesta al aumentar del área foliar. Como se detalla en la Tabla 11 estos resultados son significativamente mayores a los obtenidos con estaquillas de posición basal y media con cualquier nivel de área foliar. Esto sugiere que posiblemente el enraizamiento responda a las características anatómicas y fisiológicas de las estaquillas.

Se aprecia en la Figura 13, que el enraizamiento disminuye en dirección basipétala y depende del área foliar. En estaquillas apicales, se observa el mayor porcentaje de enraizamiento, el cual se corresponde directamente al aumentar el área foliar. Similar comportamiento puede notarse en estaquillas basales, pero con valores muy por debajo de los alcanzados con estaquillas apicales. En estaquillas de posición media no se observan diferencias significativas, pero si un comportamiento numéricamente descendente frente al incremento del área foliar.

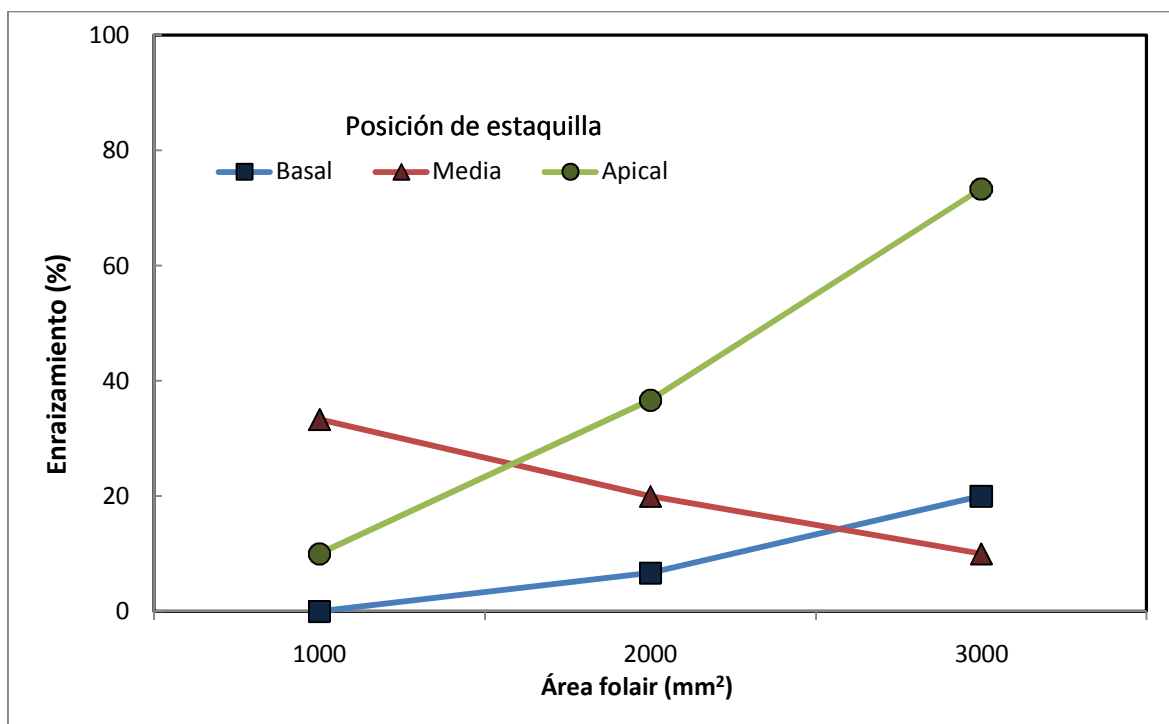


Figura 13: Efecto de interacción de la posición de la estaquilla y el área foliar sobre el enraizamiento de estaquillas de *Dipteryx odorata*.

Con esta evidencia se refleja que el potencial de enraizamiento en estaquillas de *Dipteryx odorata* se reduce desde las partes juveniles hacia las partes fisiológicamente más maduras, es decir, una disminución a partir del segundo entrenudo desde el ápice. También el recorte de área foliar tiene efecto sobre el enraizamiento, demostrándose que la respuesta de esta variable es favorecida con el incremento de la superficie foliar.

En este gráfico también es posible observar, que las estaquillas de posición media, respecto al área foliar, no siguen la tendencia esperada para este tipo de estaquillas, es decir un comportamiento intermedio entre las posiciones basales y apicales. Con esto se sugiere que, aunque físicamente fue posible establecer la sección media del brote, fisiológicamente esta no existiría o la transición de las secciones apicales a basales sería mínima. Por tanto, en *Dipteryx odorata*, las estaquillas de posición media serían en realidad estaquillas apicales o estaquillas basales.

En otro orden de ideas, los resultados obtenidos son diferentes a lo observado por Rollo (2009) durante la propagación vegetativa de la misma especie, él reportó que con estaquillas de posiciones basales el enraizamiento era mayor (7,5 por ciento) que lo obtenido con estaquillas de posiciones apicales (6,6 por ciento). De hecho, los valores obtenidos por Rollo (2009) son similares a lo indicado en el presente estudio para estaquillas basales (8,89 por ciento), pero son significativamente menores a lo alcanzado con estaquillas apicales (73,33 por ciento). Esto se debería, entre otras cosas, a las diferencias anatómicas y fisiológicas de las estaquillas usadas en ambos ensayos. En la descripción del material vegetativo empleado por Rollo (2009), se indica rasgos que la asemejarían más a una estaca (anatomía y edad), quizás por ello obtuvo mejores resultados en posiciones basales, ya que estas al funcionar como una estaca dependerían de la hidrólisis y cantidades de carbohidratos almacenados en los tejidos del tallo (Leakey 2004).

En investigaciones relacionadas a la propagación vegetativa de especies forestales, se sabe que algunas especies enraízan mejor con estaquillas de posiciones basales, señalando que esto se debería a una mayor acumulación de carbohidratos de reserva. Esto ha sido reportado en *Cordia alliodora* (Mesén 1993), *Swietenia macrophylla* (Vásquez 2009) y *Plukenetia Volubilis* (Mesén y Ruiz 2010). Por otro lado, los resultados encontrados en este trabajo concuerdan con lo hallado en *Prosopis juliflora* (Leakey *et al.* 1990), *Khaya ivorensis* (Tchoundjeu y Leakey 1996) y *Amburana cearensis* (Flores 2010).

La posición de la estaquilla es uno de los principales factores que influye en la capacidad de emisión y formación de raíces (Taiz y Zeiger 2006, Hartmann *et al.* 2011). Considerando la anatomía y fisiología de las estaquillas de posición apical, estas tendrían mejor respuesta a los estímulos de la aplicación exógena del ácido indol-3-butírico; además, sus células estarían más predispuestas a retornar a una condición meristemática. Esta afirmación puede ser corroborada con la investigación de Marks *et al.* (2002), quienes sugieren que la

ocurrencia del enraizamiento adventicio presupone la existencia de células receptoras a las señales exógenas y a los niveles endógenos de auxinas.

Por otro lado, el bajo valor relativo para esta variable encontrado en estaquillas basales se debería a la presencia de tejidos y células diferenciadas, a las cuales le sería más difícil desdiferenciarse y organizarse nuevamente. Al respecto Mur (1987) y Dodd y Power (1988), señalan que las diferentes respuestas de la capacidad rizogénica a lo largo del brote serían consecuencia de la juvenilidad, grado de lignificación, niveles endógenos de fitohormonas, contenidos de reserva y presencia de cofactores de enraizamiento. Con los resultados obtenidos, al parecer en *Dipteryx odorata*, la iniciación de los primordios radiculares sería efecto de la acción auxínica y de la receptividad de las células ante estos estímulos, más que de la disponibilidad y almacenamiento de carbohidratos.

En función a los resultados y la experiencia con otras especies, es posible afirmar que existiría una relación directa entre la tasa fotosintética y el área foliar durante el enraizamiento de estaquillas de *Dipteryx odorata*. Entonces, ello permitiría explicar porque las estaquillas con mayor área foliar lograron ser más eficientes en el enraizamiento. Como lo ha señalado Leakey (2004), la presencia de la hoja en la estaquilla es importante en el proceso de enraizamiento, pues al ser fotosintéticamente activa es fuente continua de carbohidratos necesarios para la emisión y crecimiento radicular.

Además, a la luz de los resultados que indican diferencias a lo largo del tallo, también existirían diferencias relacionadas a la posición y fisiología de la hoja. Dodd y Power (1988), indican que las diferencias presentes en edad, grado de incidencia solar, gradientes en contenido de agua y nutrientes de los elementos foliares a lo largo del brote tendrían efecto en el enraizamiento. Es decir, no solo el área foliar sino también la ubicación de los folíolos podría influir en la capacidad de enraizamiento.

En la propagación vegetativa de especies tropicales se ha discutido sobre el nivel adecuado del área foliar. En este ensayo se comprobó que una reducción del 50 por ciento de la hoja permite equilibrar la transpiración y la fotosíntesis, en beneficio del enraizamiento. Anatómicamente, las hojas de *Dipteryx odorata* presentan de cinco a siete folíolos (Spichiger *et al.* 1990) y el recorte a 3 000 mm² significó dejar de dos o tres folíolos garantizando un adecuado enraizamiento.

Otro aspecto a considerar es la temperatura y humedad relativa dentro del propagador. Al analizar las condiciones microclimáticas durante el proceso de enraizamiento (29,5°C de temperatura y 79,5 por ciento de humedad relativa) es posible afirmar que el propagador no presentó inconvenientes para la actividad fisiológica de las estaquillas. Inclusive en estaquilla apicales y con grandes áreas foliares, ya que como indica Mesén (1998) éstas pueden ser susceptibles a marchitarse. La evidencia está en que ante situaciones de estrés hídrico el primer efecto biofísico visible es la pérdida de turgencia, que posteriormente afectará las actividades de expansión celular y elongación radicular (Taiz y Zeiger 2006). Síntomas que no fueron observados en los tratamientos con área foliar de 3 000 mm², ni en otro tratamiento. Por ello, en *Dipteryx odorata* las grandes áreas foliares permitieron que la estaquilla mantenga una fuente continua de carbohidratos sin riesgo a presentar síntomas de estrés.

2.3.2. NÚMERO DE RAÍCES POR ESTAQUILLA

El número de raíces por estaquilla fue respuesta del efecto de interacción según el ANOVA ($p < 0,05$) (ver detalles en Anexo 10). En la Figura 14, se observa que estaquillas de posición basal y 3 000 mm² de área foliar obtuvieron los valores más altos para esta variable. Con la combinación de estaquillas de posición basal y 3 000 mm² de área foliar se logró $2,78 \pm 0,39$ raíces por estaquilla, lo cual no se diferenció de lo obtenido en estaquillas apicales y 3 000 mm² ($2,33 \pm 0,33$), de acuerdo a la prueba de Tukey ($p < 0,05$). En estaquillas de posición basal, hubo una mayor respuesta de esta variable al incrementarse el área foliar. En estaquillas de posición media, la combinación de tratamientos no se diferenció estadísticamente.

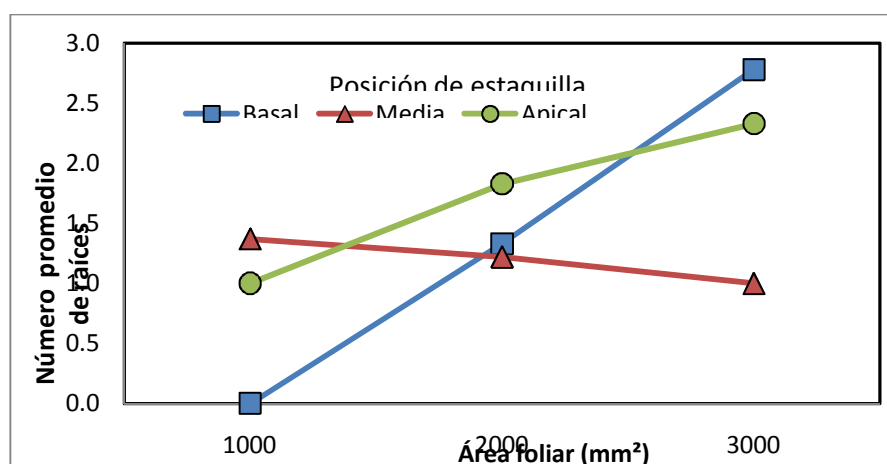


Figura 14: Efecto de interacción de la posición de la estaquilla y el área foliar sobre el número de raíces por estaquilla en *Dipteryx odorata*.

Revisando la anatomía de la estaquilla y citando a Marks *et al.* (2002), el mayor número de raíces en estaquillas de sección apical se debería a la presencia de sitios competentes para la iniciación y crecimiento radicular. En este trabajo se ha logrado evidenciar esta relación. En la Figura 15 se observa el efecto del área foliar en estaquillas de posición apical. En la Figura 15-a se presenta una estaquilla con recorte de 1 000 mm², en la Figura 15-b un recorte de 2 000 mm² y en la Figura 15-c un recorte de 3 000 mm² de área foliar.

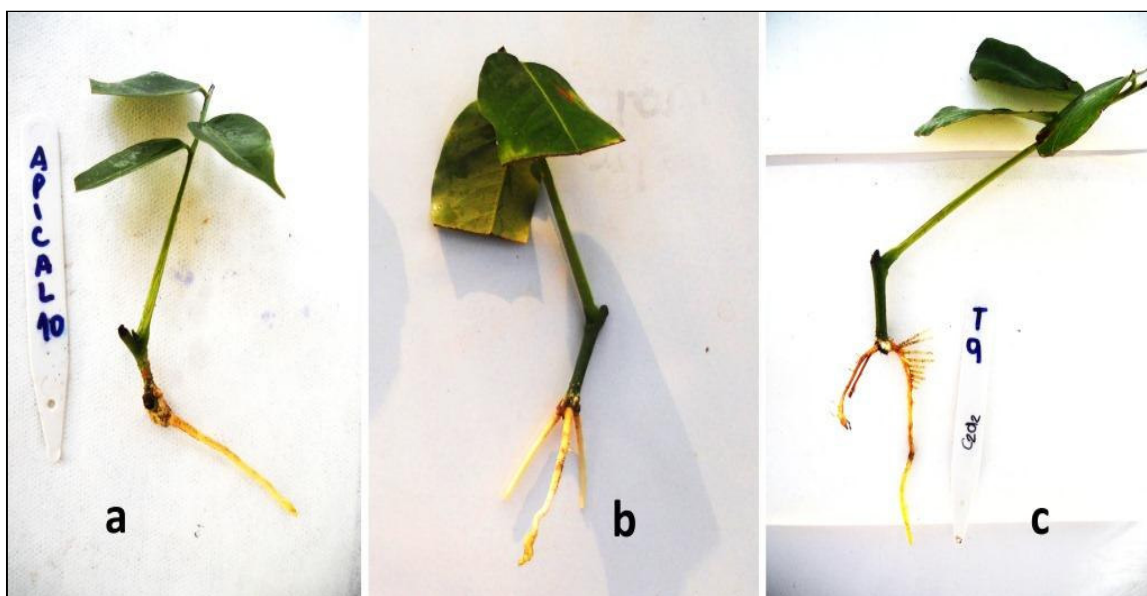


Figura 15: Efectos de la interacción de la posición de la estaquilla y el área foliar sobre el número promedio de raíces por estaquilla de *Dipteryx odorata*.

Considerando el efecto de interacción y la tendencia que presenta el número de raíces, es posible afirmar que al igual como sucede con el enraizamiento, las estaquillas que tuvieron un recorte de 3 000 mm² lograron ser más eficientes en la fotosíntesis. Esto permitió que los carbohidratos obtenidos se destinaran a la producción de macromoléculas asociadas a la formación raíces. Como refiere Leakey (2004), la capacidad de enraizamiento (entiéndase por enraizamiento y número de raíces) está estrechamente relacionada con la tasa fotosintética y la movilización e hidrólisis de carbohidratos.

Los resultados encontrados son similares a lo reportado en *Cedrela odorata*, *Gmelina arborea* (Díaz 1991), *Swietenia macrophylla* (Vásquez 2009) y *Amburana cearensis* (Flores 2010), donde las posiciones apicales y el mayor área foliar significaron el mayor número de raíces por estaquilla. De hecho, varias son las especies que presentan buenos resultados con áreas foliares grandes, por ejemplo, en *Platymiscium pinnatum*, el área foliar de 6 000 mm²

favoreció el mayor porcentaje de enraizamiento, así como el mayor número de raíces por estaquilla (Núñez 1997); similares resultados se obtuvieron en *Triplochiton scleroxylon* con áreas de 5 000 mm² (Leakey 2004). Por su parte, Mesén (1998) recomienda que *Swietenia macrophylla* podría mejorar su capacidad de enraizamiento con áreas foliares superiores a 5 000 mm².

Sin embargo, existen especies en las cuales el incremento del área foliar no necesariamente se corresponde con un mayor número de raíces por estaquilla, por ejemplo, en *Cordia alliodora* (Mesén 1993) y *Khaya ivorensis* (Tchoundjeu y Leakey 1996) los mejores resultados se tuvieron con 1 000 mm². Esto se debería a la especie, el grado de nutrición, morfología foliar, capacidad fotosintética y las condiciones ambientales durante el proceso de enraizamiento.

2.3.3. SOBREVIVENCIA

La evaluación mediante el análisis de la varianza indica que la sobrevivencia de las estaquillas depende significativamente de los efectos de interacción de la posición de estaquilla y área foliar ($p < 0,01$) (ver detalles en Anexo 11). En la Tabla 11, se indica que la sobrevivencia es muy variable para las distintas posiciones de estaquilla y áreas foliares. Levantado el ensayo se observó que la mayor sobrevivencia de estaquillas fue 96,67 por ciento, correspondiente a estaquillas de posición apical y 3 000 mm² de área foliar, de acuerdo a la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

En la Figura 16 se aprecia que la sobrevivencia en estaquillas de posición basal y apical muestran tendencia positiva al incremento del área foliar. En cambio, en estaquillas de posición media, el porcentaje de sobrevivencia con área foliar 2 000 mm² y 3 000 mm² no es significativa, mientras que con 1 000 mm² es significativamente mayor.

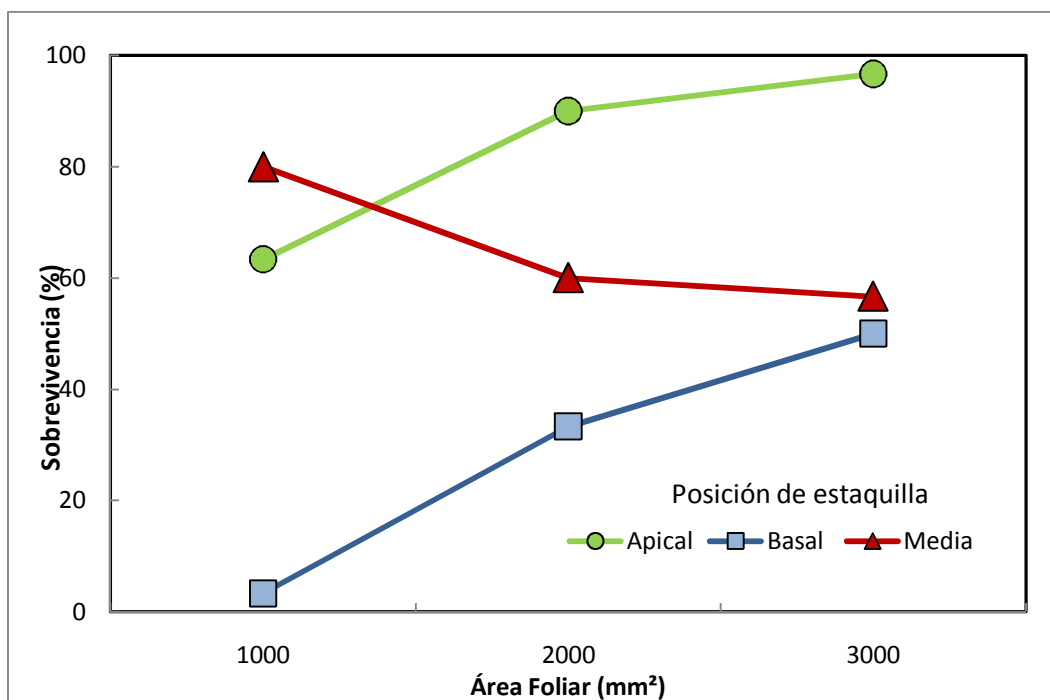


Figura 16: Efecto de interacción de la posición de estaquilla y el área foliar sobre la sobrevivencia de estaquillas de *Dipteryx odorata*.

Con los resultados obtenidos se aprecia que la mortalidad aumenta hacia las partes basales y con la reducción del área foliar. Entonces, un área foliar pequeña puede tener implicancia en la producción de fotoasimilados, posiblemente al reducir la cantidad de folíolos (a un folíolo por estaquilla) también lo hizo la tasa de fotosintética. Por consiguiente, y como refiere Leakey (2004), la sobrevivencia de las estaquillas depende de la cantidad de carbohidratos actuales y de los producidos por la fotosíntesis durante el proceso de enraizamiento.

Para poder corroborar esta afirmación se debe considerar los resultados encontrados en esta investigación, los cuales son contrarios a lo observado Rollo (2009) en *Dipteryx odorata*, quien encontró que la mayor cantidad de estaquillas vivas eran basales. En dicha investigación se consideró que las estaquillas basales tendrían mayores reservas de carbohidratos lo cual fue positivo para la sobrevivencia. Sin embargo, en este trabajo se han encontrado indicios que esto no sería así, además, recogiendo las ideas de Hartmann *et al.* (2011), los carbohidratos serían importantes, pero no tienen un papel regulador en el enraizamiento. Para las estaquillas de esta especie sería más importante el suministro continuo de fotoasimilados que los carbohidratos almacenados en el tallo. Existe evidencia en *Pausinystalia johimbe* (Ngo-Mpeck *et al.* 2003), *Swietenia macrophylla* (Vásquez 2009)

y *Amburana cearensis* (Flores 2010), donde se demuestra la importancia del área foliar como fuente de carbohidratos, a través de la fotosíntesis.

Lo presentado hasta ahora revela la importancia de la fotosíntesis durante enraizamiento de la especie. La fotosíntesis es un proceso que depende de la capacidad de los pigmentos para interceptar fotones y no de la intensidad lumínica (Hartmann *et al.* 2011). Al respecto, Gonçalves *et al.* (2001) sugieren que *Dipteryx odorata* ha desarrollado estrategias evolutivas para optimizar la acumulación y uso de pigmentos fotosintéticos en ambientes de baja luminosidad y de protección contra la fotodestrucción en ambientes de elevada luminosidad. Con lo concluido en la mencionada investigación y la información encontrada en el presente estudio, se tiene que independientemente de los niveles de radiación a las que estuvieron expuestas las estaquillas, sus folíolos no tuvieron inconvenientes para la fotosíntesis, logrando optimizar el proceso, inclusive el proceso puede ser favorecido con una mayor área foliar. Los resultados y los antecedentes refuerzan la importancia del área foliar y la fotosíntesis durante el proceso de propagación vegetativa de *Dipteryx odorata*.

2.3.4. DEFOLIACIÓN

La defoliación fue respuesta del efecto de interacción de la posición de estaquilla y el área foliar, esta interacción fue altamente significativa ($p < 0,01$) (ver detalles en Anexo 12). Se registró que el porcentaje más bajo de defoliación se dio en estaquillas apicales, diferenciándose significativamente en cada área foliar, de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). Así, en estaquillas de posición apical con 3 000 mm², la defoliación fue de 2,50 por ciento. Un comportamiento totalmente opuesto se observa en estaquillas basales con 1 000 mm² de área foliar, donde la defoliación fue mayor y significativamente diferente a los demás tratamientos (100 por ciento).

Las evaluaciones semanales demostraron que la defoliación está asociada con la mortalidad de las estaquillas. Por ello, fue posible notar que el número de estaquillas muertas aumentaba conforme estas perdían sus hojas. Posiblemente, la falta de suministros de carbohidratos fue causa de la elevada mortalidad. Esto derivaría del rápido agotamiento de las reservas de carbohidratos en el tallo y la ausencia de un órgano fotosintéticamente activo que puede suplir este déficit, esto de acuerdo a lo señalado por Leakey (2004). Por su parte Veierskov (1988) sugiere que existe una gradiente de concentración de carbohidratos que disminuye hacia la base del brote. El mismo autor indica que las estaquillas precisan de una fuente continúa de fotoasimilados para poder continuar con su proceso normal de

rizogénesis, el cual como ya se ha descrito con anterioridad es producido en las hojas. La relación entre defoliación y capacidad de enraizamiento ha sido comprobada por Leakey (2014) en *Triplochiton scleroxylon*.

En general se observa que con áreas foliares mayores a 2 000 mm² el porcentaje de defoliación disminuye significativamente. Estos resultados son alentadores, pues las estaquillas que mantienen sus hojas pueden continuar con un desarrollo normal en vivero. Como lo indica Mesén (1998), a pesar que las estaquillas logren enraizar sin la presencia de hojas será imposible que puedan sobrevivir.

El bajo porcentaje de defoliación reportado en estaquillas apicales podrían, también, apuntar a las elevadas concentraciones de auxinas endógenas disponibles en esta sección del brote. Puesto que estas, además, de inducir en la formación de raíces adventicias, retrasan la abscisión de hojas, flores y frutos (Segura 2013). Esta consideración se fundamenta con los resultados presentados por las estaquillas apicales, ya que estas al presentar mayores reservas de auxinas endógenas evitan la pérdida de hojas, variabilidad que no pudo ser explicada en el primer ensayo por la sola presencia del ácido indol-3-butírico. Por lo que se sugiere que en el enraizamiento de *Dipteryx odorata* la presencia de auxinas endógenas son necesarias para evitar la defoliación, en beneficio del enraizamiento.

2.4. EFECTOS DE LA POSICIÓN DE ESTAQUILLA

En esta segunda etapa experimental se planteó los efectos de la posición de la estaquilla en el proceso de enraizamiento. Se obtuvo significancia ($p < 0,05$) en la longitud promedio de raíces y en el porcentaje de formación de brotes. Por lo tanto, se hicieron inferencias sobre el efecto principal de este factor. Los resultados de este análisis se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12: Efectos las posiciones de estaquilla en variables relacionados al enraizamiento de estaquillas de *Dipteryx odorata*.

Posición de estaquilla	Longitud de raíces (mm)	Formación de brotes (%)
Basal	22,6 ± 22,0 b	14,02 b
Media	20,5 ± 14,7 b	12,21 b
Apical	38,1 ± 7,3 a	37,00 a
Error estándar	0,46	2,00
DMS	1,94	7,29

Se expresan promedios para las variables porcentuales y medias \pm desviación estándar para las variables expresadas en números. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de rango múltiple Tukey ($p < 0,05$).

Con la prueba de Tukey se observó que las estaquillas de posición apical presentaron los mayores valores para la longitud promedio de raíces ($38,1 \pm 7,3$ mm) y se diferenciaron significativamente de las estaquillas de posición basal y media. También, la posición de la estaquilla fue significativa para la formación de brotes ($p < 0,05$), encontrándose diferencia entre las posiciones. El mayor porcentaje de brotes se dio en estaquillas apicales (37 por ciento), de acuerdo a la prueba de rango múltiple de Tukey ($\alpha = 0,05$).

2.4.1. LONGITUD PROMEDIO DE RAÍCES

El análisis estadístico para esta variable indica significancia para el efecto de posición de estaquilla ($p < 0,05$) (ver detalles en el Anexo 13). La prueba de rango múltiple de Tukey ($\alpha = 0,05$) señala que, con estaquillas de posición apical, se consiguió el mayor crecimiento longitudinal de raíces con $38,1 \pm 7,3$ mm, en promedio. Resultando significativamente mayor a lo obtenido con otras posiciones, como se aprecia en la Tabla 12.

En la Figura 17 se muestra la distribución de longitudes de raíz de *Dipteryx odorata* para cada posición de estaquilla, donde se aprecia que la longitud promedio de las raíces se incrementa hacia el ápice. Además, este gráfico indica que el 75 por ciento de las raíces originadas en estaquillas apicales tuvieron una longitud menor o igual a 40 mm, similar comportamiento fue observado en estaquillas basales. Sin embargo, en esta última posición se observa que menos de la mitad (segundo cuartil) de las estaquillas enraizadas tuvieron 33,16 mm longitud de raíz y un 25 por ciento de estas no formo raíces.

Por otro lado, el rango intercuartílico para estaquillas basales indica una alta variabilidad central. En cambio, el rango intercuartílico para las estaquillas de posición apical, indica menor dispersión central, lo cual sugiere que con estaquillas apicales se obtiene longitudes de raíces más homogéneas.

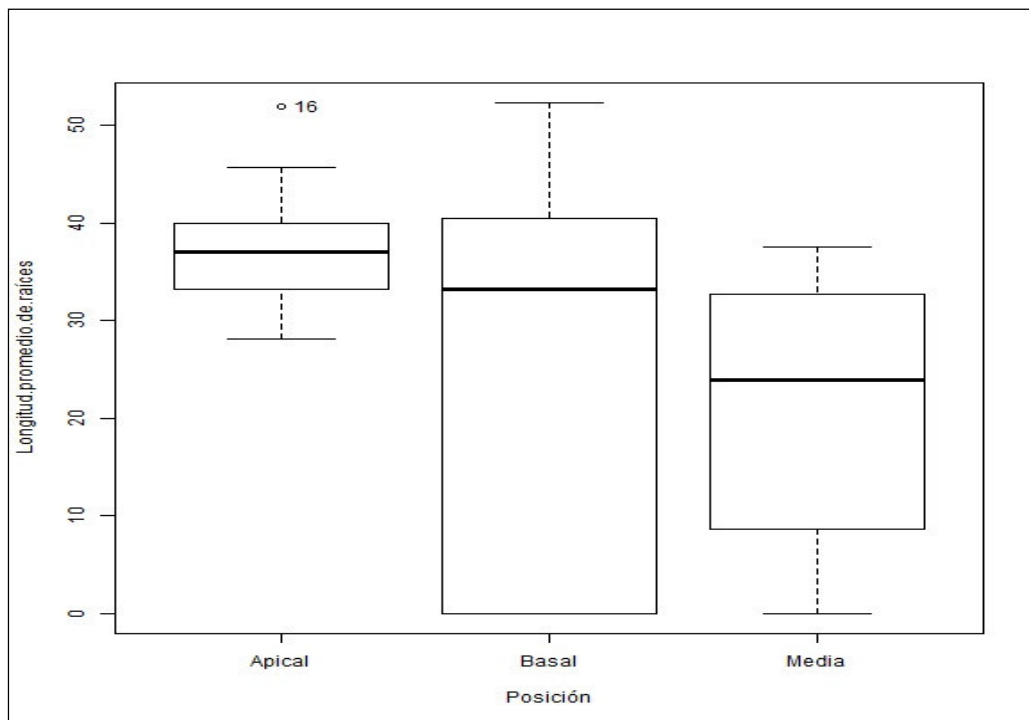


Figura 17: Distribución de la longitud promedio de raíces en estaquillas de *Dipteryx odorata* después de 30 días.

Probablemente las condiciones fisiológicas y características anatómicas de los tallos influyeron en el crecimiento de las raíces. Es preciso mencionar que las secciones apicales cuentan con células capaces de desdiferenciarse más fácilmente que las células de los tejidos más maduros; al mismo tiempo, cuentan con mayores cantidades de auxinas endógenas (Hartmann *et al.* 2011). Por consiguiente, las células de secciones apicales de *Dipteryx odorata* serían más competentes en la rizogénesis y crecimiento del primordio radicular. Además, se han presentado suficientes pruebas para indicar que el efecto auxínico resulta significativo en el crecimiento radicular, auxinas que en su mayoría se concentran en porción apical del brote.

El efecto de la posición de la estaquilla sobre la longitud promedio de raíces ha sido reportado en un número importante de árboles tropicales. Al parecer las características de las estaquillas apicales permiten un mejor crecimiento radicular en *Swietenia macrophylla*

(Vásquez 2009), *Amburana cearensis* (Flores 2010), *Cedrela odorata* (Soudre 2010), *Simarouba amara* (Soudre 2010), *Cedrelinga cateniformis* (Soudre *et al.* 2011), por ejemplo. Al parecer en las mencionadas especies y en *Dipteryx odorata* la fisiología, grado de lignificación y presencia de algunas estructuras anatómicas en la base del brote podría no favorecer la emisión ni crecimiento el primordio radicular. Por ello, las estaquillas de posiciones apicales presentaron mejores características que favorecieron el crecimiento de las raíces.

2.4.2. FORMACIÓN DE BROTES

La respuesta de la formación de brotes tuvo efecto de la posición de la estaquilla, de acuerdo al análisis de la varianza, por lo tanto, se acepta la hipótesis que sugiere que al menos una posición de estaquilla tuvo efecto sobre la variable respuesta ($p < 0,01$) (ver detalles en el Anexo 14). Según los resultados de la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$), las estaquillas de posición apical se diferencian significativamente de las estaquillas de posición basal y media. En estaquillas pertenecientes al primer grupo, se observa hasta tres veces más la presencia de brotes que en otras posiciones.

Como ya se mencionó, existe la posibilidad que la presencia de brotes se deba al balance hormonal de la estaquilla. Como explican Taiz y Zeiger (2006) y Segura (2013), la presencia de auxinas promueve la dominancia apical y las citoquininas la formación de brotes laterales. Considerando esto, se podría afirmar que el balance entre ambas fitohormonas fue positivo para la auxina, pues como indican Hartmann *et al.* (2011), las secciones apicales cuentan con mayores cantidades de auxinas endógenas; además debe considerarse el efecto del ácido indol-3-butírico (ABI), puesto que todas las estaquillas recibieron $3\ 000\ \text{mgL}^{-1}$ de AIB.

La presencia de brotes se dio en estaquillas enraizadas y no enraizadas. Durante el monitoreo del proceso se observó que los brotes vegetativos no impidieron la formación ni el crecimiento longitudinal de las raíces (Figura 18). Se evidenció que la formación de brotes fue posterior a la formación de las raíces, esto quizás se deba al efecto retardante y/o inhibidor del tratamiento auxínico sobre la aparición de brotes (Taiz y Zeiger 2006). Por otro lado, los fotoasimilados producidos fueron directamente al primordio radicular, sin desvío a los brotes, ya que estos aún no se habían formado.

La presencia simultánea de raíces y brotes en estaquillas apicales de *Dipteryx odorata* indicaría que ambos eventos continuaron sus procesos fisiológicos de manera independiente. Además, esta evidencia señala el adecuado funcionamiento de la hoja como órgano fotosintéticamente activo de la estaquilla durante la propagación vegetativa, en otras palabras, las reservas y suministros de carbohidratos fueron suficientes para sostener ambos eventos sin desmedro de ninguno.



Figura 18: Estaquilla apical de *Dipteryx odorata* enraizada, se observa la presencia de brotes aéreos sin afectar el sistema radicular.

2.4.3. FORMACIÓN DE CALLOS

La formación de callos no fue significativa para los factores en estudios, de acuerdo al análisis de la varianza ($p > 0,05$) (ver detalles en Anexo 15). Sin embargo, su presencia parece ser una respuesta común en la propagación vegetativa de especies forestales. Lo cual es fácilmente corroborado en la literatura e investigaciones que mencionan la formación de

callos durante el enraizamiento de especies forestales tropicales (Rojas *et al.* 2004, Vásquez 2009, Soudre 2010, Flores 2010, Zamora 2013, de Andrade 2014).

Para especies del género *Dipteryx* la rizogénesis y la formación de callos parecen ser eventos independientes, incluso la aparición de callos resultaría perjudicial para la emergencia del primordio radicular. En *Dipteryx odorata*, Rollo (2009) describe la presencia de callos y no la asocia con la formación de raíces adventicias (Figura 19-a). En condiciones del propagador de sub-irrigación, Rollo (2009) registró 38 por ciento de callos frente al 6 por ciento obtenido en la presente investigación. En ambos ensayos, la presencia de callos no es respuesta del efecto de la posición de la estacilla ($p>0,05$). Los resultados del presente trabajo, además, indican que ni el área foliar ni la interacción de estos factores influye en la formación de callos, con un nivel de confianza del 95 por ciento.

Ramos (2012) y Zamora (2013) en la propagación *in vitro* de *Dipteryx alata* observaron la formación de callos antes que la formación de primordios radiculares. Zamora (2013), evidenció la acumulación excesiva de callos en la base de los explantes y los asoció con la ausencia de raíces (Figura 19-b).



Figura 19: Formación de callos en especies del género *Dipteryx* durante su propagación vegetativa.

Como consideración final y en base a la evidencia estadística, es posible señalar que no todas las estaquillas de shihuahuaco (*Dipteryx odorata*) se comportaron de manera similar

durante el proceso de enraizamiento. De acuerdo con Longman (1993), la capacidad de enraizamiento depende de las características genotípicas y fenotípicas de la planta madre, así como de los tratamientos aplicados en la estacilla y condiciones climáticas a las que está expuesta.

En el presente trabajo el material vegetativo se obtuvo de un jardín de multiplicación formado por 79 individuos provenientes de dos lugares diferentes, por ello, para reducir el error experimental las estaquillas fueron distribuidas aleatoriamente en todos los tratamientos.

Sin embargo, como señalan Mesén (1993), Rojas *et al.* (2004) y Leakey (2004), existe un fuerte componente asociado a la genética de la planta madre, el cual no fue considerado en la presente investigación, pues como se sabe individuos, variedades y clones de una misma especie pueden responder de manera desigual a los diferentes tratamientos aplicados en su propagación vegetativa. Por lo demás, no siempre un árbol pese a sus características fenotípicas deseables es capaz de dar buenos esquejes (Rojas *et al.* 2004). El procedimiento presentado como parte de esta investigación podría optimizarse y ser más eficiente si se evalúa la capacidad rizogénica de cada individuo y prole, con lo que se estaría avanzando hacia la mejora genética de la especie.

Por último, los resultados obtenidos en ambos ensayos son alentadores y sugieren que es factible la implementación exitosa de un programa operativo en vivero considerando el método asexual para la obtención de plántulas de *Dipteryx odorata*. Sin embargo, es necesario realizar más estudios que validen o ajusten el uso de esta metodología, he incluyen los efectos de otros factores asociados a la propagación vegetativa de la especie.

Es preciso considerar que estos resultados no son definitivos, sino que contribuyen a entender el comportamiento de la especie frente a los cuatro factores más importantes que están involucrados en su propagación vegetativa. Asimismo, debe considerarse el enraizamiento de especies forestales como parte fundamental de un programa de mejoramiento genético, por ello los valores obtenidos en este trabajo deben ser tomados como referencia para futuras investigaciones.

V. CONCLUSIONES

- 1) Fue posible propagar vegetativamente a *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd., con ello se contribuyó al conocimiento de la especie para su propagación mediante estaquillas juveniles.
- 2) El ácido indol-3-butírico permitió incrementar de forma significativa el enraizamiento, número de raíces por estaquilla y longitud promedio de raíces a una concentración de 3000 mgL⁻¹.
- 3) La arena fina como medio de enraizamiento tuvo efecto significativo en la sobrevivencia de las estaquillas.
- 4) La posición de estaquilla fue importante en el enraizamiento, número de raíces por estaquilla, longitud promedio de raíces y sobrevivencia; con estaquillas apicales se obtuvieron las mejores respuestas.
- 5) Se estableció los efectos del área foliar en la capacidad de enraizamiento; con un recorte de 3 000 mm² se aseguró un adecuado enraizamiento y número de raíces por estaquilla.
- 6) El mayor éxito en la propagación vegetativa de esta especie fue obtenido con sustrato arena fina y la aplicación exógena de 3 000 mgL⁻¹ de ácido indol-3-butírico, y con el tratamiento formado por la combinación de estaquillas apicales y área foliar de 3 000 mm².

**“página en blanco
incluida ex-profeso por
razones de
compaginación”**

VI. RECOMENDACIONES

- El proceso de rizogénesis en *Dipteryx odorata* podría estar condicionado genotípicamente, razón por la cual debería considerarse ensayos de las procedencias para seleccionar los individuos más aptos para la propagación vegetativa.
- Promover investigaciones orientadas a caracterizar los rasgos fisiológicos y anatómicos de las estaquillas.
- Considerar los efectos de la época de cosecha sobre la capacidad de enraizamiento, así como el estado nutricional de la planta madre u *ortet*.
- Probar el sustrato más adecuado para la sobrevivencia y crecimiento de la estaquilla enraizada en fase de vivero; así mismo monitorear su adaptación y crecimiento en campo.

**“página en blanco
incluida ex-profeso por
razones de
compaginación”**

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, M; Sánchez, J; Bañón, M. 2013. Auxinas. *In* Azcón-Bieto, J; Talón, M. (coord.). Fundamentos de Fisiología Vegetal. 2 ed. Madrid, España, McGraw-Hill-Interamericana. p 377-398.
- Andrade, JKC de. 2014. Propagação vegetativa com o uso de estacas herbáceas de camucamu (*Myrciaria dubia* (Kunth) McVaugh) em câmaras de subirrigação. Tesis Mg. Sc. Boa Vista, Brasil, Universidade Federal de Roraima. 64 p.
- Arbe, KA. 2014. Efecto de bencil aminopurina y ácido indolbutírico en la propagación *in vitro* de segmentos nodales de *Dipteryx odorata* Harms (Shihuahuaco). Tesis Ingeniero Forestal. Pucallpa, Perú, Universidad Nacional de Ucayali. 64 p.
- Azad, S; Matin, A. 2015. Effect of Indole-3-Butyric Acid on Clonal Propagation of *Swietenia macrophylla* through Branch Cutting. *Journal of Botany* (2015): 1-7.
- Brako, L; Zarucchi, J. 1993. Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Peru. Saint Louis, Missouri, Estados Unidos de América, Missouri Botanical Garden. 1286 p. (Serie Monographs in systematic botany from the Missouri Botanical Garden, 0161-1542, v. 45).
- Canuto, DSO; Silva, AM da; Moraes, MA de; Silva, CLSP da; Moraes, MLT de; Sá, ME de. 2008. Variabilidade genética de populações naturais de *Dipteryx alata* Vog. por médio de caracteres nutricionais em sementes. *Revista Instituto Florestal de São Paulo* 20 (2): 155-163.
- Carranza, J. 2014. Diagnóstico del potencial semillero de especies forestales diferentes a la caoba en las Comunidades del Purús. Informe de consultoría. APECO (Asociación Peruana para la Conservación de la Naturaleza) (coord.). Lima, Perú. 114 p. Proyecto Fortalecimiento institucional del ECOPURUS para la administración de su reserva comunal y la gestión de recursos forestales no maderables. Anexo 6.
- Carvalho, PER. 2009. Cumaru-Ferro (*Dipteryx odorata*). Colombo, Brasil, EMBRAPA Florestas. 8p. (Comunicado técnico, n° 225).

- Cervantes, DD. 2011. Propagación vegetativa de quinilla (*Manilkara bidentata* ADC) mediante el enraizamiento de estaquillas utilizando cámara de sub-irrigación en el distrito de Morales, Provincia de San Martín. Tesis Ingeniero Agrónomo. Tarapoto, Perú, Universidad Nacional de San Martín. 98 p.
- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Gonzales, LA; Tablada, EM; Díaz, MP; Robledo, CW; Balzarini, MG. 2011. Estadística para las Ciencias Agropecuarias. 6 ed. Córdoba, Argentina, Editorial Brujas. 329 p.
- Díaz, ERA. 1991. Técnicas de enraizamiento de estacas juveniles de *Cedrela odorata* L. y *Gmelina arborea* Linn. Tesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 93 p.
- Dodd, RS; Power, AB. 1988. Clarification of the Term Topophysis. *Silvae Genetica* 37 (1): 14-15.
- Ernst, AA; Holtzhausen, LC. 1987. Callus development. A possible aid in rooting avocado cuttings. 1st World Avocado Congress (10, 1987, Pretoria, Sudáfrica). Pretoria, Sudáfrica, Avocado Growers' Association: 39-41 p.
- Flores, JA. 1997. Observaciones sobre la propagación vegetativa por estacas de almendro (*Dipteryx panamensis*), con énfasis en la topófisis y el uso de microorganismos eficaces, en condiciones de vivero de la región tropical húmeda de Costa Rica (en línea). Tesis Ingeniero Agrónomo, Guácimo, Costa Rica, Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda. Consultado el 17 de ene. de 2016. Disponible en <https://goo.gl/LS4Mwv>
- Flores, M. 2010. Evaluación del efecto de cinco dosis de fitohormona, tres tipos de sustrato y tres rasgos de morfotipo en el enraizamiento de estaquillas juveniles de *Amburana cearensis* (Allemão) A.C. Smith (ishpingo), en ambientes controlados, en Pucallpa-Ucayali-Perú. Tesis Ingeniero Forestal. Pucallpa, Perú, Universidad Nacional de Ucayali. 106 p.
- Flores, Y. 2014. Árboles Nativos de la Región Ucayali, Perú. 1 ed. Pucallpa, Perú, s.e. 439 p.
- Francisco, VMCR. 2010. Filogenia Molecular e Morfológica da Tribo Dipterygeae (Papilionoideae, Leguminosae). Tesis Ph.D. Rio de Janeiro, Brasil, Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 77 p.

- Galván, O. 2007. Estudio de demanda de germoplasma de especies forestales maderables nativas de la Región Ucayali. Informe de consultoría. INCAGRO/ INIA-IIAP-ICRAF (coord.). Pucallpa, Perú, Instituto Nacional de Investigación Agraria. s.p. Proyecto Establecimiento, manejo y conservación de fuentes de germoplasma de especies forestales comerciales nativas de la amazonia peruana, en el marco de la Iniciativa Amazónica.
- Gonçalves, JFC; Marengo, RA; Vieira, G. 2001. Concentration of photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence of mahogany and tonka bean under two light environments. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal* 13 (2): 149-157.
- Grandtner, MM; Chevrette, J. 2013. Dictionary of Trees, Volume 2: South America: Nomenclature, Taxonomy and Ecology. 1 ed. Londres, Reino Unido, Academic Press. 1172 p.
- Han, H; Zhang, S; Sun, X. 2009. A review on the molecular mechanism of plants rooting modulated by auxin. *African Journal of Biotechnology* 8 (3): 348-353.
- Hartmann, HT; Kester, DE; Davies, FT; Geneve; R. 2011. Hartmann & Kester's Plant Propagation: Principles and Practices. 8 ed. Upper Saddle River, New Jersey, Estados Unidos de América, Prentice Hall. 915 p.
- Herrero-Jáuregui, C; Sist, P; Casado, M. 2012. Population structure of two low-density neotropical tree species under different management systems. *Forest Ecology and Management* 280 (2012):31-39.
- ILDIS (International Legume Database & Information Service, País de Gales). 2015. List of names matching *Dipteryx odorata* (en línea, sitio web). Consultado 15 de ene. 2017. Disponible en <https://goo.gl/kLexVr>
- Januário, AH; Lourenço, MV; Domézio, LA; Prieto, RCLR; Castilho, MS; Tomazela, DM; Silva, MFGF da; Vieira, PC, Fernandes, JB; França, SC. 2005. Isolation and Structure Determination of Bioactive Isoflavones from Callus Culture of *Dipteryx odorata*. *Chemical Pharmaceutical Bulletin* 53 (7): 740-742.
- Juárez, E; Rico, A. 2005. Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos. México DF, México, Limusa. v. 1, t.1, 644 p.

- Leakey, RRB; Mesén, JF; Tchoundjeu, Z; Longman, KA; Dick, J. McP; Newton, AC; Matin, A. Grace, J; Munro, RC; Muthoka, PN. 1990. Low-technology techniques for the vegetative propagation of tropical trees. *Commonwealth Forestry Review* 69 (3): 247-257.
- Leakey, RRB. 2004. Physiology of vegetative reproduction. *In* Burley, J; Evans, J; Youngquist, JA. (eds). *Encyclopaedia of Forest Sciences*. Academic Press, Londres, Reino Unido. p. 1655-1668.
- Leakey, RRB. 2014. Plant Cloning: Macropropagation. *In*: Neal Van Alfen (ed). *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. Academic Press, San Diego, Estados Unidos de América. p. 349-359.
- Legué, V; Rigal, A; Bhalerao, RP. 2014. Adventitious root formation in tree species: involvement of transcription factors. *Physiologia Plantarum* (Special Issue: Plant Vascular Biology) 151 (2): 192-198.
- Longman, KA. 1993. Rooting Cuttings of tropical Trees. *Tropical Trees: Propagation and Planting Manuals*. Londres, Reino Unido, Commonwealth Science Council. v. 1, 86 p.
- Ludwig-Müller, J. 2000. Indole-3-butyric acid in plant growth and development. *Plant Growth Regulation* 32 (2): 219-230.
- Marks, TR; Ford, Y-Y; Cameron RWF; Goodwin, C; Myers, PE; Judd, HL. 2002. A role for polar auxin transport in rhizogenesis. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 70 (2): 189-198.
- Maués, MM. 2006. Estratégias reprodutivas de espécies arbóreas e sua importância para o manejo e conservação florestal: Floresta Nacional do Tapajós (Belterra-PA). Tese Ph. D. Brasília DF, Brasil, Universidade de Brasília. 209 p.
- Mesén, JF. 1993. Vegetative propagation of Central American hardwoods. Ph.D. Tesis. Edimburgo, Escocia, University of Edinburgh. 230 p.
- Mesén, JF. 1998. Enraizamiento de estacas juveniles de especies forestales: uso de propagadores de sub-irrigación. Turrialba, Costa Rica, IICA. 36 p. (Serie técnica Manual técnico nº 30).

- Mesén, JF; Ruiz, H. 2010. Efecto del ácido indolbutírico y tipo de estaquilla en el enraizamiento de sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.). *Agronomía Costarricense* 34 (2): 259-267.
- Mesta, C. 2012. Evaluación del desarrollo de *Dipteryx alata* Vogel (Shihuahuaco) en plantaciones juveniles mixtas instaladas en suelos degradados de la zona de Campo Verde-Ucayali. Tesis Ingeniero Forestal. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 160 p.
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). 2015. Anuario Perú Forestal en Número año 2014. Servicio Forestal y de Fauna Silvestre. Lima, Perú. 204 p.
- Mur, CC. 1987. Factores que condicionan el enraizamiento de estaquillas de especies forestales. *Revista Montes* 14: 27-31.
- Newton, AC; Muthoka, PN; Dick, J. McP. 1992. The influence of leaf area on the rooting physiology of leafy stem cuttings of *Terminalia spinosa* Engl. *Trees* 6 (4): 210-215.
- Ngo-Mpeck, M.-L; Tchoundjeu, Z; Asaah, E. 2003. Vegetative propagation of *Pausinystalia johimbe* (K. Schum) by leafy stem cuttings. *Propagation of Ornamental Plants* 3 (2): 3-10.
- Ngo-Mpeck, M.-L; Atangama, A. 2007. Rooting of leafy stem cuttings of *Baillonella toxisperma*. *Forest Science* 53 (5): 571-579.
- Núñez, BY. 1997. Propagación vegetativa de Cristóbal (*Platymiscium pinnatum* Benth), Pilon (*Hyeronima alchorneoides* Allemão) y Surá (*Terminalia oblonga* Ruiz & Pavón), mediante el enraizamiento de estacas juveniles. Tesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 150 p.
- Prestes, DCV; Garcia, LC; Sousa, SGA de. 2016. Comportamento de sementes de Cumaru (*Dipteryx odorata*/Fabaceae) submetidas à dessecação. In Tavares, AM; Kano, C; Krug, C; Dairiki, JK. (eds). Anais. Anais da XII Jornada de iniciação científica da EMBRAPA Amazônia Ocidental. (12, 2015, Manaus, Brasil). Manaus, Brasil, EMBRAPA Amazônia Ocidental. p 59-60.
- Putzel, L, Padoch, C; Pinedo-Vásquez, M. 2008. The Chinese timber trade and the logging of Peruvian Amazonia. *Conservation Biology* 22(6): 1659-1661.

- Putzel, L; Padoch, C; Ricse, A. 2013. Putting Back the Trees: Smallholder Silvicultural Enrichment of Post-Logged Concession Forest in Peruvian Amazonia. *Small-scale Forestry* 12 (3): 421-436.
- ONERN (Oficina Nacional de Recursos Naturales, Perú). 1976. Mapa Ecológico del Perú. Guía explicativa. Lima, Perú. 147 p.
- OuYang, F; Wang, J; Yue, Li. 2015. Effects of cutting size and exogenous hormone treatment on rooting of shoot cuttings in Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.]. *New Forest* 46 (1): 91-105.
- Ramos, E. 2012. Evaluación de tres tratamientos de desinfección y cuatro medios de cultivo para el establecimiento *in vitro* de explantes seleccionados de *Dipteryx alata* Vogel (shihuahuaco). Tesis Ingeniero Forestal. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 71 p.
- Ricse, A. 2007. Rehabilitación de suelos forestales en ultisoles degradados en el Bosque Nacional Alexander von Humboldt, Región Ucayali. Subdirección Nacional de Investigación Forestal, INIA. Pucallpa, Perú. 38 p.
- Rojas S; García, J; Alarcón, M. 2004. Propagación asexual de plantas: Conceptos básicos y Experiencias con especies amazónicas. Bogotá, Colombia, CORPOICA, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural; Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria. 55 p.
- Rollo, A. 2009. Methods of vegetative propagation of useful agroforestry species in Peruvian Amazon. Tesis Mg. Sc. Praga, República Checa, Czech University of Life Sciences Prague. 50 p.
- Romo, M. 2005. Efecto de la luz en el crecimiento de plántulas de *Dipteryx micrantha* “Shihuahuaco” trasplantadas a sotobosque, claros y plantaciones. *Ecología Aplicada* 4 (1-2): 1-8.
- Sampaio, TBP. 1993. Cumaru. In Clay, JW; Clement, CR. (eds). Selected species and strategies to enhance income generation from Amazonia forests. Roma, Italia, FAO. p 196-201.

- Santelices, R; Cabello, Á. 2006. Efecto del ácido indolbutírico, del tipo de cámara de arraigamiento, del substrato, y del árbol madre en la capacidad de arraigamiento de estacas de *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser. *Revista Chilena de História Natural* 79 (1): 55-64.
- Santos, W; Freitas, MLM; Delastra, C; Souza, FB; Torres-Dini, D; Moraes, MA; Machado, JAR; Aguiar, AV; Moraes, MLT; Sabbenn, AM. 2014. Genetic variation in *Dipteryx alata* progenies in Brazil. IUFRO (International Union of Research Organizations). 2014 IUFRO Forest Tree Breeding Conference (39, 2014, Praga, República Checa). Praga, República Checa. IUFRO/Faculty of Forestry and Wood Sciences (Czech University of Life Sciences Prague). 92 p.
- Segura, J. 2013. Citoquininas. In Azcón-Bieto, J; Talón, M. (coord.). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. 2 ed. Madrid, España, McGraw-Hill-Interamericana. p 421-444.
- Silva, FL da; Felipe, SHS; Leão, NVM; Shimizu, ES. 2010. Teste de germinação de sementes de cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.) sob diferentes substratos e temperaturas. *Anais. 1ª Semana de Integração, Ciência, Arte e Tecnologia*. (s.e., 2010, Castanhal, Brasil). São Paulo, Brasil, IFSP. (4 p).
- Silva, ACC. 2016. Época e regulador vegetal na propagação de baru (*Dipteryx alata* Vogel) por estaquia (correo electrónico). Dourados, Brasil, Fundação Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul.
- Snedecor, GW. 1971. *Métodos estadísticos: Aplicados a la investigación agrícola y biológica*. Tercera impresión. México DF, México, CECOSA. 626 p.
- Soares, MHM; Carvalho, JOP de. 1998. Importância ecológica das espécies *Bagassa guianensis* (tatajuba), *Copaifera multijuga* (copaíba), *Dipteryx odorata* (cumaru), *Hymenaea courbaril* (jatobá) e *Tabebuia serratifolia* (ipê-amarelo) em floresta natural na Amazônia brasileira. Belém, Brasil, EMBRAPA Amazônia Oriental. 3 p. (Comunicado técnico, nº 87).
- Soares, AAV; Santos, AM; Carvalho, D de; Rosado, SCS. 2014. Genetic Variability of *Dipteryx alata* Vog. (Fabaceae) in a Provenance and Progeny Trial. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 8 (16): 169-175.

- Soudre, M; Mesén, JF; Castillo, D del; Guerra, H. 2008 (eds). Memoria. Bases técnicas para la propagación vegetativa de árboles tropicales mediante enraizamiento de estaquillas. Congreso internacional de IIAP (2008, Pucallpa, Perú). Pucallpa, Perú, IIAP. 108 p.
- Soudre, M. 2010. Informe final de resultados y lecciones aprendidas. Pucallpa, Perú. PROVEFOR, IIAP. 21 p. Proyecto Desarrollo tecnológico apropiado para la propagación vegetativa aplicado a la producción intensiva de semilla vegetativa de especies maderables valiosas en las regiones Loreto y Ucayali. (Contrato n° 013-PIBAP-FINCYT-IIAP-2007).
- Soudre, M; Mueras, L; Limache, A; Guerra, H; Mesén, JF; Pérez, F. 2011. Propagación vegetativa de tornillo (*Cedrelinga cateniformis*) mediante enraizamiento de estacas juveniles en propagador de sub-irrigación. Folia Amazónica 20 (1-2): 83-94.
- Soudre, M. 2016. Propagación vegetativa y silvicultura de shihuahuaco (*Dipteryx odorata*) (Correspondencia personal). Puerto Inca, Perú, RAMSA.
- Souza, RN de; Aparício, PS; Aparício, WCS; Sotta, ED; Guedes, MC; Oliveira, LPS. 2011. Distribuição diamétrica, espacial e volumetria de *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd (cumaru) na Florestal Estadual do Amapá – FLOTA – AP. In V Simpósio Latino-americano sobre Manejo Florestal (s.e., 2011, Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria). Schneider, PR; Finger, CAG; Fleig, FD; Longhi, SJ; Farias, JA; Elesbão, LEG; Schneider, PSP (eds.). Anales. Santa Maria, Brasil, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. p. 714-720. Tema: Sustentabilidad forestal
- Spichiger, R; Méroz, J; Loizeau, P-A; Stutz de Ortega, L. 1989. Los árboles del Arborétum Jenaro Herrera. v.1. Moraceae a Leguminosae (Contribución a la Flora de la Amazonia Peruana). Boissiera 43: 1-359.
- Taiz, L; Zeiger, E. 2006. Fisiología Vegetal. 3 ed. Castelló de la Plana, España, Universitat Jaume I Publicacions. v.2, 1338 p.
- Tchoundjeu, Z; Leakey, RRB. 1996. Vegetative propagation of African mahogany: effects of auxin, node position, leaf area and cutting length. New Forest 11 (2): 125-136.

- Uchida, T; Campos, MAA. 2000. Influência do sombreamento no crescimento de mudas do cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.-Fabaceae), cultivadas em viveiro. *Acta Amazônica* 30 (1): 107-114.
- Vásquez, ALM. 2009. Propagación vegetativa de caoba (*Swietenia macrophylla*) mediante el enraizamiento de estaquillas juveniles en cámaras de sub-irrigación, en Pucallpa-Perú. Tesis Ingeniero Forestal, Iquitos, Perú, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. 61 p.
- Veierskov, B. 1988. Relations between carbohydrates and adventitious root formation. *In* Davis, TD; Haissig, BE; Sankhla, N (eds). *Adventitious Root Formation in Cuttings*. vol. 2. Portland, Oregon, Estados Unidos de América, Dioscorides Press. p.70-78.
- Vison, CC; Kanashiro, M; Sebbenn, AM; Williams, TCR; Harris, SA, Boshier, DH. 2015. Long-term impacts of selective logging on two Amazonian tree species with contrasting ecological and reproductive characteristics: inferences from Eco-gene model simulations. *Heredity* 115 (2): 130-139.
- Zamora, SC. 2013. Efecto de tres sustancias promotoras en el enraizamiento *in vitro* de *Dipteryx alata* Vogel. Tesis Ingeniero Forestal, Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 129 p.

**“página en blanco
incluida ex-profeso por
razones de
compaginación”**

VIII. ANEXOS

ANEXO 1 REQUERIMIENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN Y HABILITADO DEL PROPAGADOR DE SUB-IRRIGACIÓN.

a. Materiales

Se recomienda el uso de madera dura resistente a la humedad. El diseño se basa en las especificaciones brindadas por Leakey *et al.* (1990). Las dimensiones son las recomendadas por Longman (1993).

Marco principal: 10 piezas de madera de 0,75 m x 0,10 m x 2,50 m

6 piezas de madera de 0,75 m x 0,10 m x 1,00 m

2 piezas de madera de 0,75 m x 0,03 m x 1,50 m

4 piezas de madera de 0,08 m x 0,05 m x 0,70 m

4 piezas de madera de 0,08 m x 0,05 m x 1,00 m

Tapa: 2 piezas de madera de 0,75 m x 0,02 m x 3,00 m

4 piezas de madera de 0,75 m x 0,02 m x 1,50 m

Plástico transparente grueso doble ancho

Bisagras y clavos

b. Dimensiones recomendadas

- Largo total del propagador: 2,50 m
- Ancho total del propagador: 1,00 m
- Altura frontal del propagador: 0,70 m

- Altura posterior del propagador: 1,00 m

c. **Habilitado**

Para el habilitado del propagador de sub-irrigación (Figura 1), se procede como sigue: en la base del propagador se coloca una capa delgada de arena fina, luego en forma ascendente se colocan capas sucesivas de piedras grandes (50 mm a 100 mm), piedras pequeñas (<50 mm) y grava (5 mm a 10 mm) dentro de los primeros 0,25 m del propagador. Los siguientes 50 mm llevan la capa del medio de enraizamiento. A través de un tubo de PVC (0,10 m de diámetro) se introducen 60 litros de agua, evitando la saturación del sustrato.



Figura 1. Propagador de sub-irrigación construido según las especificaciones de Leakey *et al.* (1990), se observa las divisiones para cada uno de los medios de enraizamiento.

ANEXO 2
EFFECTO DE LOS SUSTRATOS Y CONCENTRACIONES DEL ÁCIDO INDOL-3-BUTÍRICO.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL ENRAIZAMIENTO

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable porcentaje de enraizamiento.

Se observa que con un p-valor igual a 0,0040 y con un nivel de aceptación $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula, es decir, al menos una concentración de ácido indol-3-butírico tuvo efecto significativo sobre la variable enraizamiento. Por ello, se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para determinar la naturaleza de estas diferencias. El análisis estadístico se presenta a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Enraizamiento	45	0,67	0,40	33,21

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	127,65	2	63,82	0,33	0,7347
Sustrato	432,22	2	216,11	1,13	0,4086
Sustrato*Bloque	765,78	4	191,45	2,28	0,0906
Concentración AIB	1723,31	4	430,83	5,12	0,0040
Concentración AIB*Sustrato	1065,83	8	133,23	1,58	0,1818
Error	2017,84	24	84,08		
Total	6132,63	44			

Prueba de rangos múltiples de Tukey Alfa=0,05 DMS=12,73410

Error: 84,0766 gl: 24

Concentración AIB	Medias	n	E.E.
3000	38,89	9	3,06 A
5000	25,56	9	3,06 A B
1000	23,33	9	3,06 A B
7000	17,78	9	3,06 B
0	11,11	9	3,06 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo.

Para el cumplimiento de los supuestos de los residuos del modelo empleado para el ANOVA fue necesario la transformación de la variable porcentaje de enraizamiento. Se empleó la transformación angular arcoseno (raíz (p)). A continuación, se presenta el análisis considerando la variable transformada:

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y con el método gráfico Q-Q plot normal se comparó los residuos obtenidos con los cuantiles teóricos de una distribución normal (Figura 2) (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H_0 : los residuos tienen distribución normal.

H_1 : los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral)
RDUO Enraizamiento	45	0,00	6,77	0,97	0,7273

Con un p-valor igual a 0,7273 mayor al p-valor nominal (0,05), es posible afirmar que no existe suficiente evidencia estadística para rechazar el supuesto de distribución normal.

De acuerdo a la Figura 2, se puede indicar que el modelo cumple con el supuesto de normalidad, ya que los residuos tienden a alinearse a la recta equidistante de los cuantiles normales (recta de 45°). Por lo tanto, no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de los datos para la variable porcentaje de enraizamiento.

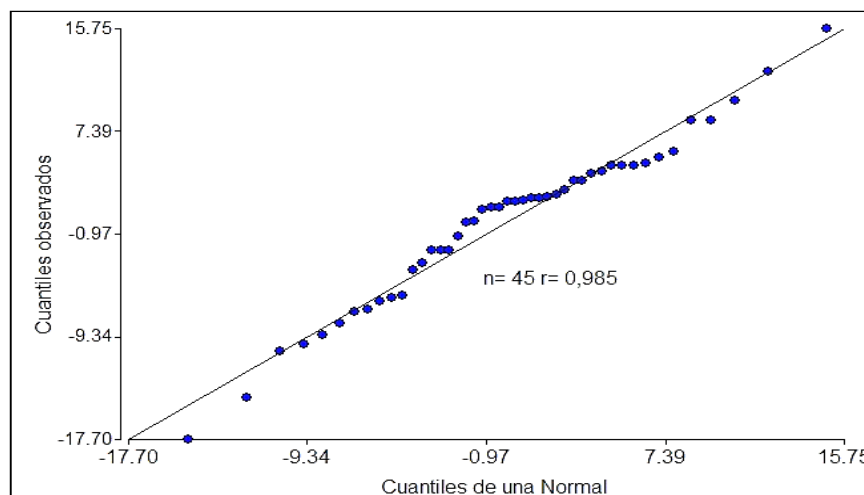


Figura 2. Q-Q plot (normal) para la variable porcentaje de enraizamiento (transformada) obtenido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se verificó el cumplimiento de este supuesto mediante la prueba de Levene. Se realizó un ANOVA de una vía usando como variable dependiente el valor absoluto de los residuos. Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H_0 : $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$; donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H_1 : Al menos dos varianzas son distintas.

El resultado de la prueba de Levene es presentado en la Tabla 1. Con un p-valor calculado el cual es mayor al valor de significación nominal ($p < 0,05$), es posible afirmar que no existen indicios para no aceptar el supuesto de igual de varianza.

Tabla 1. Prueba de Levene mediante el ANOVA del valor absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas para la variable enraizamiento.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	357,35	14	25,52	1,85	0,0778
Error	414,71	30	13,82		
Total	772,05	44			

Adicionalmente, se construyó un gráfico de dispersión de residuos versus valores predichos (Figura 3). Se observó una nube de puntos sin patrón alguno lo que indicaría que los errores del modelo son homocedásticos.

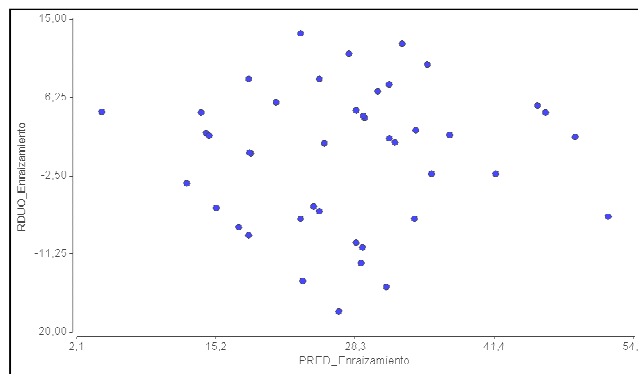


Figura 3. Residuos en función de predichos con errores homocedásticos para la variable enraizamiento.

- Independencia de errores

En la Figura 4 se observa la falta de agrupamiento de los residuos, positivos y/o negativos, lo que indica la ausencia de correlación o marca la independencia de los datos.

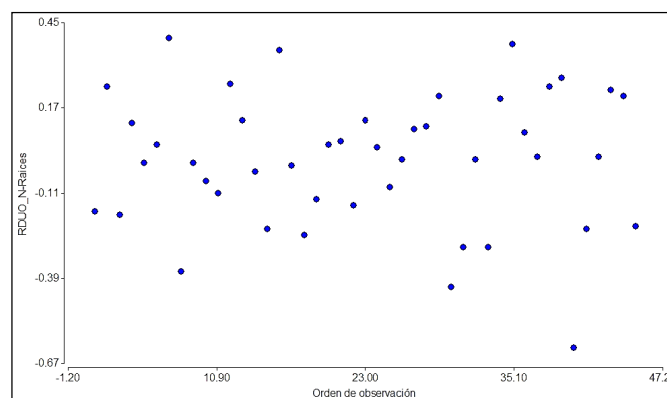


Figura 4. Dispersión de residuos en función del orden de toma de datos.

ANEXO 3

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL NÚMERO DE RAÍCES POR ESTAQUILLA

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable número de raíces por estaquilla.

Se observa que con un p-valor igual a 0,0216 y un nivel de aceptación nominal $p < 0,05$ es posible rechazar la hipótesis nula, es decir, al menos una concentración de ácido indol-3-butírico tuvo efecto significativo en la respuesta de la variable número de raíces por estaquilla. En este caso se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para determinar la naturaleza de estas diferencias. Este análisis es presentado a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Número de raíces	45	0,57	0,21	50,53

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Sustrato	5,21	2	2,61	4,37	0,0985
Bloque	0,58	2	0,29	0,34	0,7140
Sustrato*Bloque	2,38	4	0,60	0,71	0,5944
Concentración AIB	11,82	4	2,96	3,51	0,0216
Sustrato*Concentración AIB	6,57	8	0,82	0,98	0,4784
Error	20,21	24	0,84		
Total	46,77	44			

Prueba de rango múltiple de Tukey Alfa=0,05 DMS=1,27427

Error: 0,8419 gl: 24

Concentración AIB	Medias	n	E.E.		
7000	2,26	9	0,31	A	
1000	2,08	9	0,31	A	B
5000	2,01	9	0,31	A	B
3000	1,92	9	0,31	A	B
0,00	0,81	9	0,31		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo.

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y con el método gráfico Q-Q plot normal se comparó los residuos obtenidos con los cuantiles teóricos de una distribución normal (Figura 5) (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: los residuos tienen distribución normal.

H₁: los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral)
RDUO N°-raíces	45	0,00	0,68	0,98	0.9201

Con un p-valor 0,9201 mayor al p-valor nominal ($p < 0,05$) es posible sostener que no existen suficientes evidencias estadísticas para rechazar el supuesto de distribución normal, según la prueba de Shapiro-Wilk.

De acuerdo a la Figura 5, se puede indicar que el modelo cumple con el supuesto de normalidad, ya que los residuos tienden a alinearse a la recta de los cuantiles normales, por lo tanto, no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de los datos.

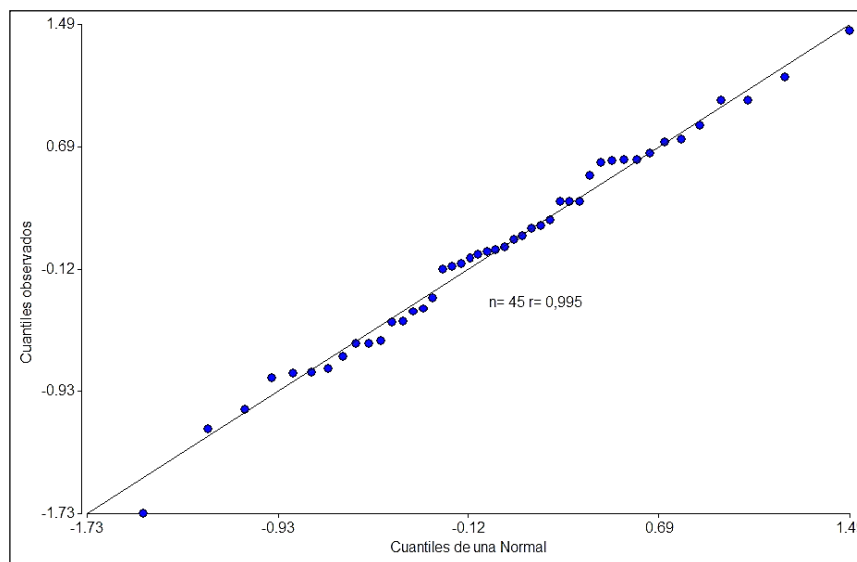


Figura 5. Q-Q plot (normal) para la variable número de raíces por estacilla construido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se verificó el cumplimiento de este supuesto mediante la prueba de Levene. Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H₁: Al menos dos varianzas son distintas.

De acuerdo a la prueba de Levene, el p-valor obtenido (0,625) es mayor al p-valor de significación nominal (0,05). Por lo tanto, no existe suficiente evidencia estadística para no aceptar la homocedasticidad de los errores, por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 2. Prueba de Levene mediante el ANOVA del absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas para la variable número de raíces por estaquilla.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	3,42	14	0,24	1,94	0,0625
Error	3,77	30	0,13		
Total	7,19	44			

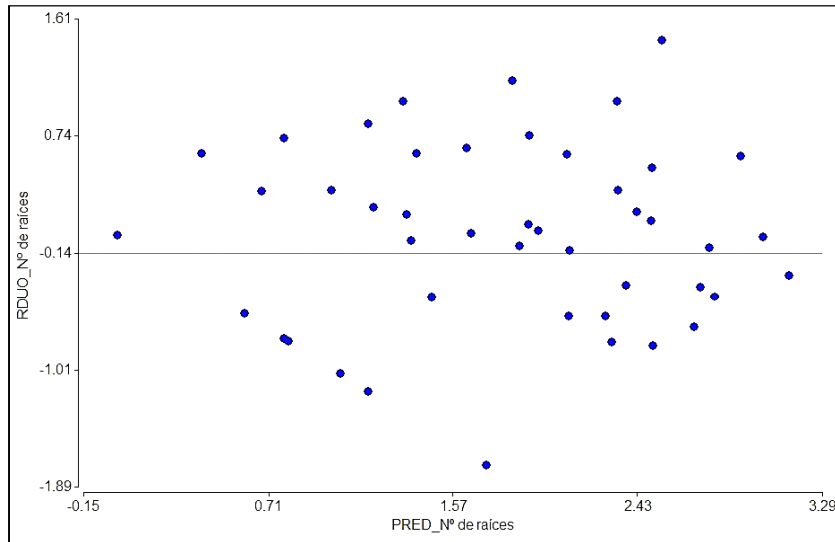


Figura 6. Residuos en función de predichos con errores homocedásticos para la variable número de raíces por estaquilla.

- Independencia de errores

En la Figura 7 se observa la falta de agrupamiento de los residuos lo que indica la ausencia de correlación o señala la independencia de los datos.

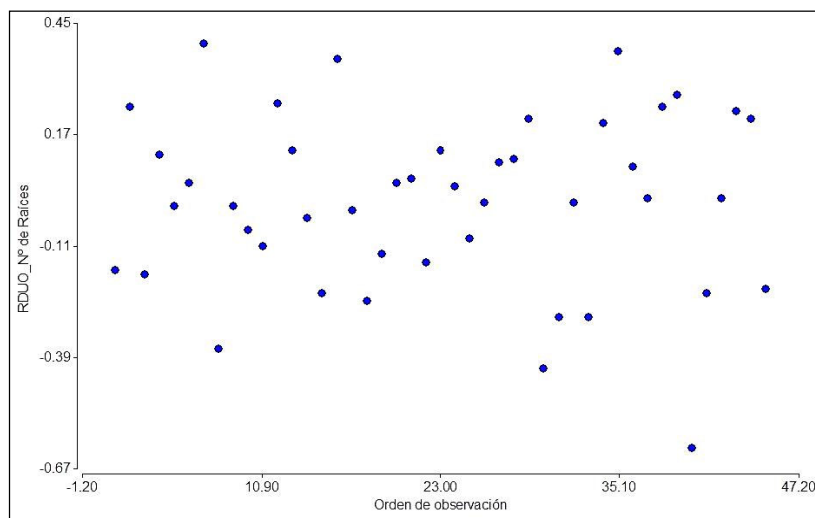


Figura 7. Dispersión de los residuos en función del orden de toma de datos para la variable número de raíces por estaquilla.

ANEXO 4

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA LONGITUD PROMEDIO DE RAÍCES

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable longitud promedio de raíces.

Con un p-valor igual a 0,0009 y un nivel de aceptación $p < 0,05$ es posible rechazar la hipótesis nula, es decir, al menos una concentración de ácido indol-3-butírico tuvo efecto significativo sobre la variable longitud promedio de raíces. En este caso se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para determinar la naturaleza de estas diferencias. Este análisis es presentado a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Longitud de raíces	45	0,61	0,28	62,30

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Sustrato	42,68	2	21,34	2,64	0,1856
Bloque	9,85	2	4,92	0,83	0,4468
Error del sustrato	32,30	4	8,07	1,37	0,2749
Concentración AIB	101,96	4	25,49	4,31	0,0090
Sustrato*Concentración AIB	32,57	8	4,07	0,69	0,6972
Error	141,80	24	5,91		
Total	361,15	44			

Prueba de rango múltiples Tukey Alfa=0,05 DMS=3,37568

Error: 5,9083 gl: 24

Concentración AIB	Medias	n	E.E.		
7000	58,4	9	0,81	A	
3000	43,9	9	0,81	A	B
5000	43,8	9	0,81	A	B
1000	36,5	9	0,81	A	B
0	12,5	9	0,81		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo.

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y con el método gráfico Q-Q plot normal se comparó los residuos obtenidos con los cuantiles teóricos de una distribución normal (Figura 8) (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: los residuos tienen distribución normal.

H₁: los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral)
Longitud de raíces	45	3,90	2,86	0,96	0,0730

De acuerdo con lo obtenido en la prueba de Shapiro-Wilk, se concluye que no existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, pues con un p-valor (0,0730) mayor al valor nominal de aceptación, se sostiene el supuesto de que afirma la distribución normal de los datos.

En la Figura 8 se aprecia que los residuos tienden a alinearse a la recta equidistante, lo que sugiere que no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de los datos.

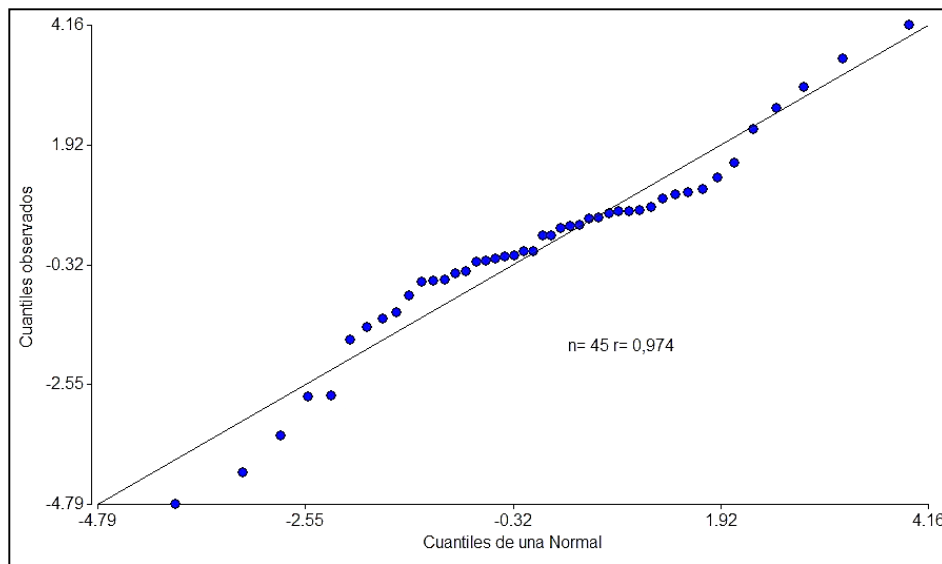


Figura 8. Q-Q plot (normal) para la variable longitud promedio de raíces obtenido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se verificó el cumplimiento de este supuesto mediante la prueba de Levene. Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H₁: Al menos dos varianzas son distintas

En la Tabla 3 se presenta el análisis estadístico según la prueba de Levene, indicando que el p-valor del tratamiento (0,0919) el cual es mayor al valor de significación nominal (0,005), por lo tanto, el supuesto de igual de varianza puede ser sostenido.

Tabla 3. Prueba de Levene mediante el ANOVA del absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas para la variable longitud promedio de raíces.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	26,65	14	1,90	1,77	0,0919
Error	32,19	30	1,07		
Total	68,83	44			

En la Figura 9, se identifica el cumplimiento del supuesto de varianza constante, ya que los residuos no presentan ningún patrón o agrupamiento.

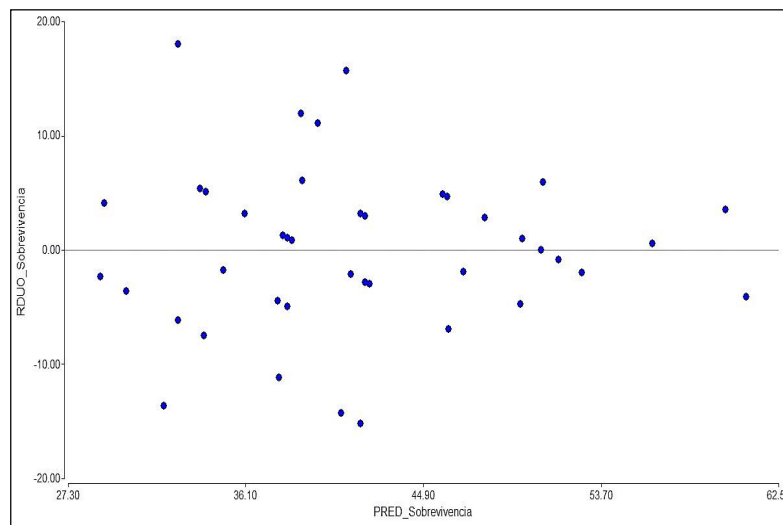


Figura 9. Distribución de residuos en función de predichos con errores homocedásticos.

- Independencia de errores

Se observa la falta de agrupamiento de los residuos, esto indica la ausencia de correlación o dependencia de los errores (Figura 10).

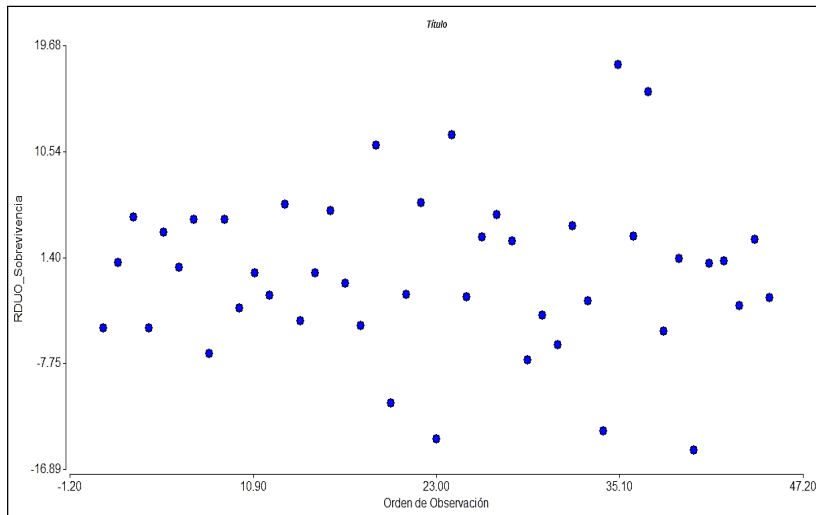


Figura 10. Dispersión de los residuos en función del orden de toma de datos.

ANEXO 5

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA SOBREVIVENCIA

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable sobrevivencia.

Con un p-valor igual a 0,0388 y un nivel de aceptación $p < 0,05$ es posible rechazar la hipótesis nula, es decir, al menos un sustrato tuvo efecto significativo sobre la variable sobrevivencia de las estaquillas. Se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para determinar la naturaleza de las diferencias encontradas. Este análisis es presentado a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV (%)
Sobrevivencia	45	0,56	0,20	22,42

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	48,67	2	24,34	0,28	0,7728
Sustrato	1442,13	2	721,06	8,15	0,0388
Error del sustrato	353,84	4	88,46	0,99	0,4329
Concentración AIB	423,96	4	105,99	1,18	0,3431
Concentración AIB*Sustrato	499,79	8	62,47	0,70	0,6902
Error	2148,76	24	89,53		
Total	4917,14	44			

Prueba de rango múltiples de Tukey Alfa=0,05 DMS=12,23998

Error: 88,4606 gl: 4

Sustrato	Medias	n	E.E	
Arena fina	50,13	15	2,43	A
Arena media	39,28	15	2,43	A B
Arena gruesa	37,22	15	2,43	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo.

Para el cumplimiento de los supuestos de los residuos del modelo del ANOVA fue necesaria la transformación de la variable porcentaje de sobrevivencia. Se empleó la transformación angular arcoseno (raíz (p)). A continuación, se presenta el análisis considerando la variable transformada.

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y se construyó un gráfico Q-Q plot normal para validar visualmente este supuesto (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H_0 : los residuos tienen distribución normal.

H_1 : los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral)
Residuo de sobrevivencia	45	0,00	6,99	0,97	0,5659

De acuerdo con el análisis estadístico, es posible afirmar que no existe evidencia estadística para no aceptar el supuesto de distribución normal, pues el p-valor obtenido en la prueba de

Shapiro-Wilk es mayor al valor nominal de aceptación, lo que supone la aceptación de la hipótesis nula, la cual plantea la normalidad de los datos.

De acuerdo con la Figura 11, los residuos tienden a alinearse a la recta que representa la distribución normal, por lo tanto, no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de datos.

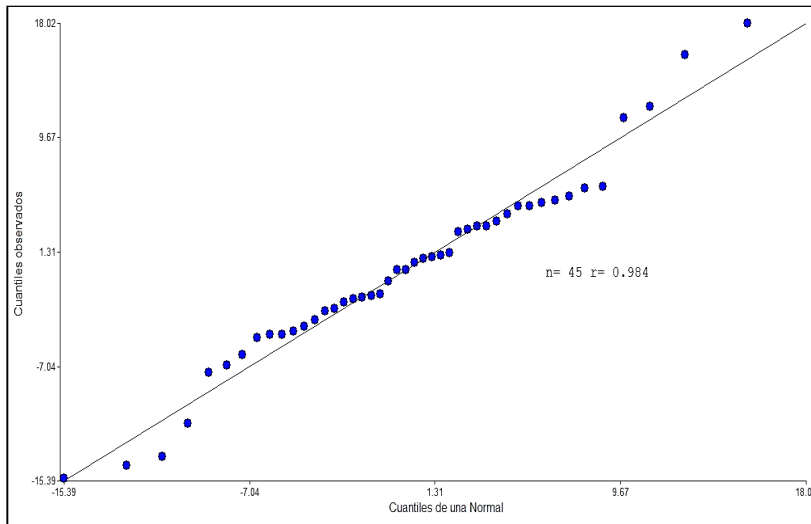


Figura 11. Q-Q plot (normal) para la variable porcentaje de sobrevivencia construido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se empleó la prueba de Levene. Las hipótesis que se sometieron a prueba fueron:

H₀: $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H₁: Al menos dos varianzas son distintas.

La prueba de Levene arrojó un p-valor igual a 0,896 para la sobrevivencia, el cual es mayor al valor de significación nominal, lo que permite aceptar la hipótesis nula, por tanto, el supuesto de igual de varianza puede ser sostenido.

Tabla 4. Prueba de Levene mediante el ANOVA del absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas para la variable sobrevivencia.

F, V,	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	367,13	14	26,22	1,79	0,0896
Error	440,57	30	14,69		
Total	907,70	44			

En la Figura 12 se verifica el cumplimiento del supuesto de varianza constante, ya que los residuos no presentan ningún patrón y/o agrupamiento, por lo tanto se puede decir que los errores son homocedásticos.

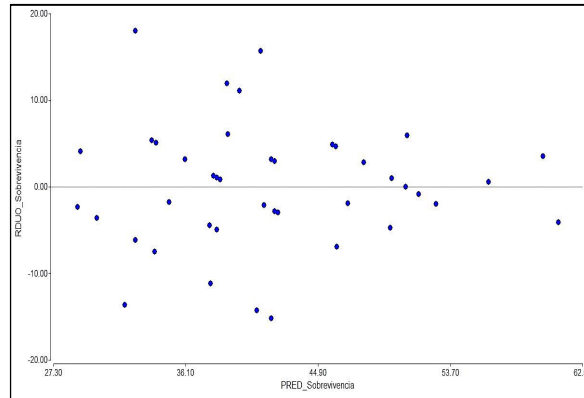


Figura 12. Distribución de residuos en función de predichos con errores homocedásticos.

- Independencia de errores

Se observa, en la Figura 13, la falta de agrupamiento de los residuos positivos y/o negativos, esto indica la ausencia de correlación o dependencia de datos.

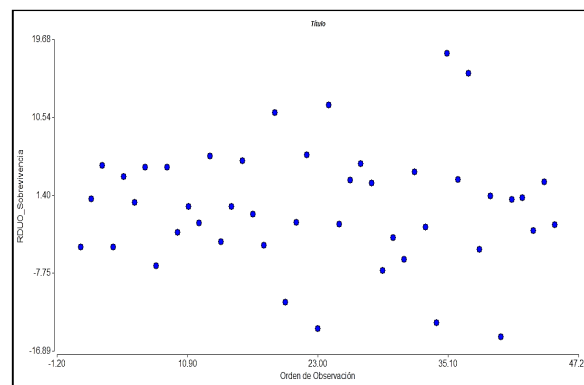


Figura 13. Dispersión de los residuos en función del orden de toma de datos.

ANEXO 6

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA FORMACIÓN DE CALLOS

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable formación de callos.

Con un p-valor igual a 0,0024 y un nivel de aceptación $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula, es decir, al menos un sustrato tuvo efecto significativo sobre la variable formación de callos. Igualmente, con un p-valor de 0,0147 mayor al nivel de aceptación se rechaza la hipótesis nula, es decir al menos una concentración de ácido indol-3-butírico (AIB) tuvo efecto significativo sobre la variable en cuestión. No se presentó interacción significativa de factores.

Se utilizó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para determinar la naturaleza de estas diferencias. Este análisis es presentado a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Formación de callos	45	0,77	0,58	32,77

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Sustrato	1630,65	2	815,33	38,84	0,0024
Bloque	207,89	2	103,95	3,29	0,0547
Sustrato*Bloque	83,96	4	20,99	0,66	0,6233
Concentración AIB	488,32	4	122,08	3,86	0,0147
Sustrato*Concentración AIB	140,40	8	17,55	0,55	0,8034
Error	758,99	24	31,62		
Total	3310,21	44			

Prueba de rango múltiple de Tukey Alfa=0,05 DMS=5,96225

Error: 20,9898 gl: 4

Sustrato	Medias	n	E.E.	
Arena gruesa	24,98	15	1,18	A
Arena media	16,15	15	1,18	B
Arena fina	10,34	15	1,18	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Prueba de rango múltiple de Tukey Alfa=0,05 DMS=7,80983

Error: 31,6244 gl: 24

Concentración AIB	Medias	n	E.E.	
7000	22,49	9	1,87	A
5000	17,57	9	1,87	A B
3000	17,44	9	1,87	A B
0	16,09	9	1,87	A B
1000	12,21	9	1,87	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo

Para el cumplimiento de los supuestos de los residuos del modelo empleado en el ANOVA fue necesaria la transformación de la variable porcentaje de callos. Se empleó la

transformación angular arcoseno (raíz (p)). A continuación, se presenta el análisis considerando la variable transformada.

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y con el método gráfico Q-Q plot normal se verificó la distribución normal del conjunto de datos (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H_0 : los residuos tienen distribución normal.

H_1 : los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO Formación-callos	45	0,00	4,15	0,97	0,7581

Del análisis estadístico es posible afirmar que no existe suficiente evidencia estadística para no aceptar la hipótesis nula la cual indica la normalidad de datos, pues con un p-valor (0,7581) mayor al valor nominal de aceptación ($p < 0,05$), es posible sostener esta afirmación.

En la Figura 14 se observa que el modelo cumple con el supuesto de normalidad, ya que los residuos tienden a alinearse a la recta de cuantiles normales.

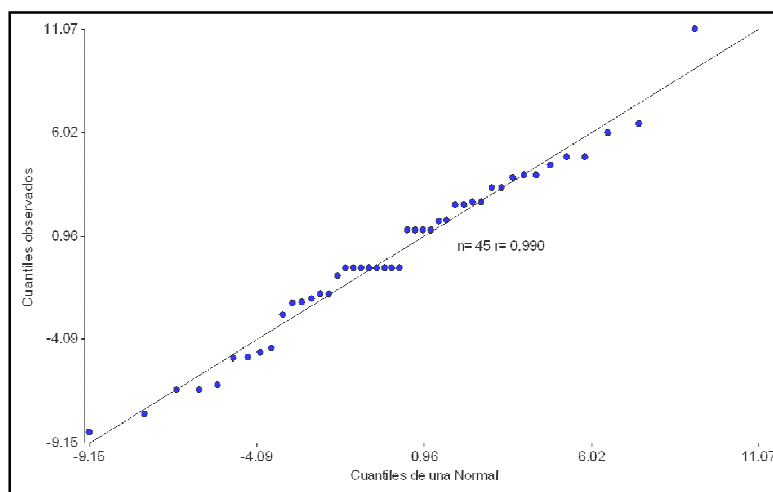


Figura 14. Q-Q plot (normal) obtenido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se verificó el cumplimiento de este supuesto mediante la prueba de Levene. Las hipótesis que se sometidas a prueba fueron:

$H_0: \sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H_1 : Al menos dos varianzas son distintas.

De acuerdo a la prueba de Levene, el p-valor del tratamiento es mayor al valor de significación nominal, por lo tanto, el supuesto de igualdad de varianzas puede ser sostenido.

Tabla 5. Prueba de Levene mediante el ANOVA del absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas formación de callos.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	85,45	14	6,10	1,809	0,0848
Error	101,24	30	3,37		
Total	266,69	44			

En la Figura 15, no se observa tendencia o agrupamiento de los residuos, por lo tanto, se puede afirmar que los errores son homocedásticos.

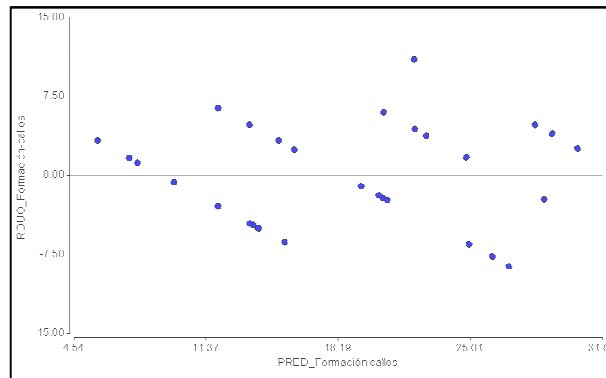


Figura 15. Distribución de residuos en función de predichos con errores homocedásticos.

- Independencia de errores

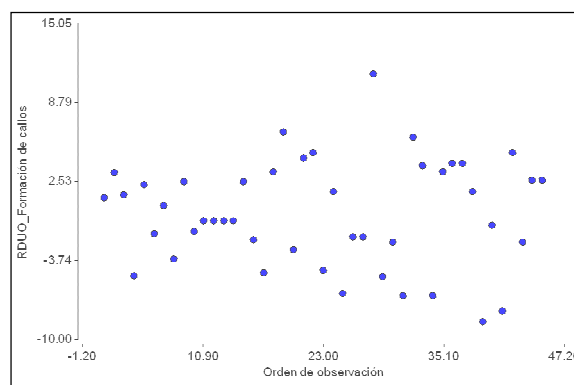


Figura 16. Dispersión de dispersión de los residuos en función del orden de toma de datos. Se observa la falta de agrupamiento de los residuos, positivos y/o negativos, lo que indica la ausencia de correlación o independencia.

ANEXO 7

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA FORMACIÓN DE BROTES

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable formación de brotes.

Con un p-valor igual a 0,0121 y un nivel de aceptación $p < 0,05$ es posible rechazar la hipótesis nula, es decir, al menos una concentración de ácido indol-3-butírico tuvo efecto significativo sobre la variable formación de brotes. Por ello, se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para determinar la naturaleza de estas diferencias. Este análisis es presentado a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Brotos (asen)	45	0,68	0,41	38,56

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Sustrato	94,36	2	47,18	0,73	0,5362
Bloque	59,79	2	29,89	0,57	0,5712
Sustrato*Bloque	258,12	4	64,53	1,24	0,3216
Concentración AIB	842,60	4	210,65	4,04	0,0121
Sustrato*Concentración AIB	1353,47	8	169,18	3,24	0,0120
Error	1251,39	24	52,14		
Total	3859,71	44			

Prueba de rango múltiple de Tukey Alfa=0,05 DMS=22,17314

Error: 52,1412 gl: 24

Concentración AIB	Medias	n	E.E.		
0	24,30	9	2,41	A	
3000	20,48	9	2,41	A	B
1000	19,94	9	2,41	A	B
5000	17,73	9	2,41	A	B
7000	11,17	9	2,41	B	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo.

Para el cumplimiento de los supuestos de los residuos del modelo utilizado en el ANOVA fue necesaria la transformación de la variable porcentaje de formación de brotes. Se empleó la transformación angular arcoseno (raíz (p)). A continuación, se presenta el análisis estadístico considerando la variable transformada.

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y se construyó un gráfico Q-Q plot normal para validar este supuesto (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: los residuos tienen distribución normal.

H_1 : los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO Brotes (asen)	45	0.00	5,33	0,97	0,6845

Obtenido el estadístico W, y un p-valor igual a 0,6845 mayor al valor nominal de aceptación ($p < 0,05$), es posible afirmar que no existen suficientes evidencias estadísticas para no aceptar el supuesto de normalidad.

Al analizar la Figura 17 se puede afirmar que el modelo cumple con el supuesto de normalidad, ya que los residuos tienden a alinearse a la recta equidistante, lo cual indica que no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de los datos.

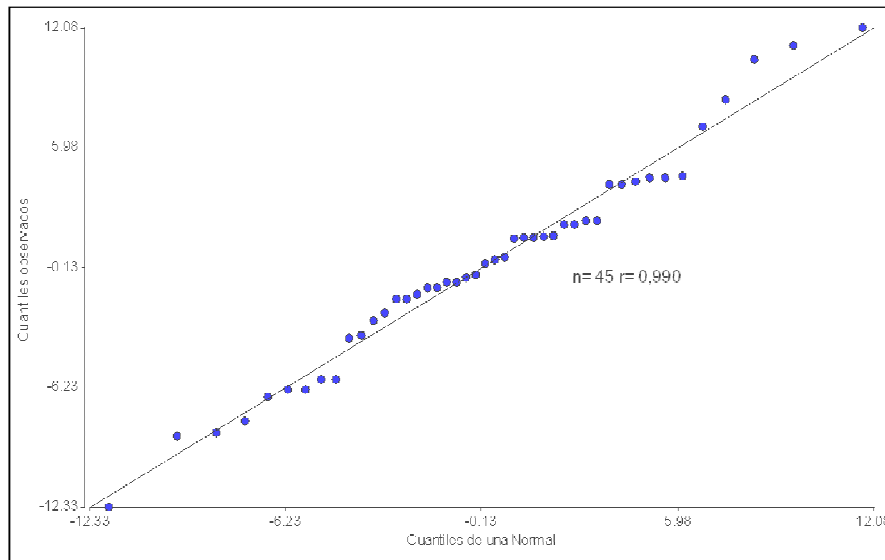


Figura 17. Q-Q plot (normal) para la variable formación de brotes construido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se usó la prueba de Levene. Las hipótesis que se sometidas a prueba fueron:

H_0 : $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H_1 : Al menos dos varianzas son distintas.

De acuerdo a la Tabla 6 el p-valor del tratamiento ($p=0,899$) es mayor al valor de significación nominal, por lo tanto, el supuesto de igual de varianza puede ser sostenido.

Tabla 6. Prueba de Levene mediante el ANOVA del absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas formación de brotes.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	231,52	14	16,54	1,78	0,0899
Error	278,15	30	9,27		
Total	509,67	44			

En la Figura 18 no se observa tendencia o agrupamiento de datos, por lo tanto, no existe evidencia para no aceptar la homogeneidad de varianzas.

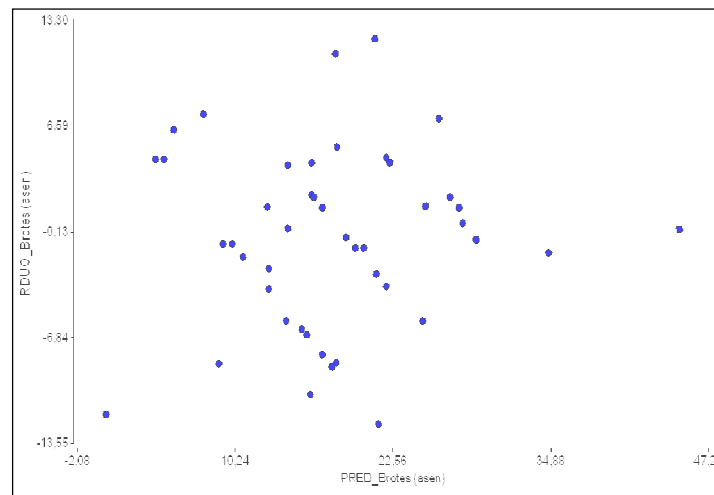


Figura 18. Gráfico de residuos en función de predichos con errores homocedásticos.

- Independencia de errores

En la Figura 19 se observa la falta de agrupamiento de los residuos lo que indica la ausencia de correlación o dependencia de los errores. Por lo tanto, se concluye que los datos están distribuidos independientemente.

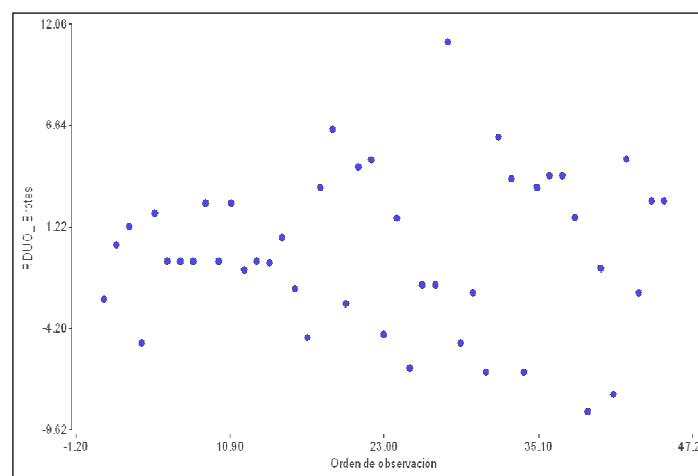


Figura 19. Dispersión de los residuos en función del orden de toma de dato

ANEXO 8
ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA DEFOLIACIÓN

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable defoliación.

Se observa que con p-valor igual a 0,2487 para el factor concentración de ácido indol-3-butírico y un p-valor de 0,6423 para el factor sustrato y con un nivel de aceptación $p < 0,05$ se acepta la hipótesis nula, es decir, la respuesta del porcentaje de defoliación es igual en todos los tratamientos.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Defoliación	45	0,59	0,24	39,89

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Sustrato	70,64	2	35,32	0,50	0,6423
Bloque	10,65	2	5,33	0,23	0,7973
Sustrato*Bloque	285,08	4	71,27	3,06	0,0360
Concentración AIB	134,99	4	33,75	1,45	0,2487
Sustrato*Concentración AIB	292,41	8	36,55	1,57	0,1864
Error	558,93	24	23,29		
Total	1352,70	44			

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo

Para el cumplimiento de los supuestos de los residuos del modelo del ANOVA fue necesaria la transformación de la variable porcentaje de defoliación. Se empleó la transformación angular arcoseno (raíz (p)). A continuación, se presenta el análisis considerando la variable transformada.

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y con el método gráfico Q-Q plot normal se comparó la distribución normal del conjunto de datos (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: los residuos tienen distribución normal.

H₁: los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO Defoliación	45	0,00	3,56	0,98	0.9163

De acuerdo a la prueba de Shapiro-Wilk no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula la cual señala que los datos tienen distribución normal, ya que al contar con un p-valor= 0,9163 mayor al valor nominal de aceptación ($p < 0,05$), se acepta este supuesto.

De acuerdo a la Figura 20, se observa que el modelo cumple con el supuesto de normalidad, ya que los residuos tienden a alinearse a la recta de los cuantiles normales, por lo tanto no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de los datos.

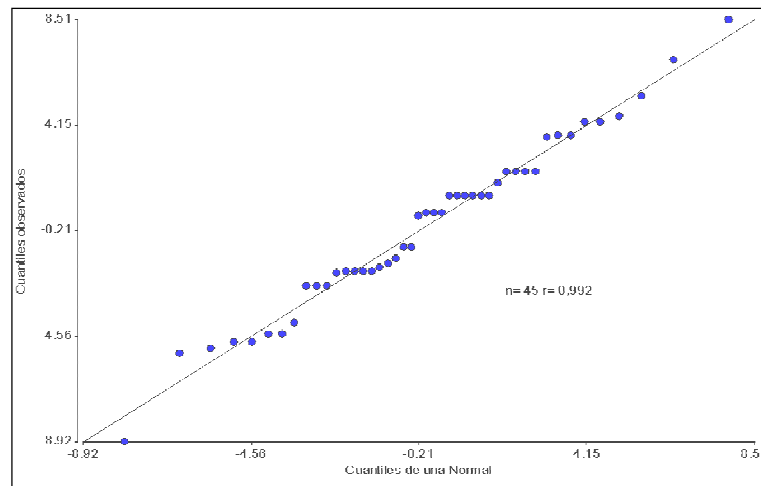


Figura 20. Q-Q plot (normal) para la variable porcentaje de defoliación obtenido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se verificó el cumplimiento de este supuesto mediante la prueba de Levene. Las hipótesis que se sometidas a prueba fueron:

H₀: $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H₁: Al menos dos varianzas son distintas.

De acuerdo a la prueba de Levene, el p-valor del tratamiento (0,3762) es mayor al valor de significación nominal (0,05), por lo tanto, el supuesto de igual de varianza puede ser sostenido.

Tabla 7. Prueba de Levene mediante el ANOVA del absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas para la variable defoliación.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	63,06	14	4,50	1,13	0,3762
Error	119,91	30	4,00		
Total	182,97	44			

En la Figura 21, no se observa tendencia o agrupamiento que pruebe falta de cumplimiento del supuesto de homogeneidad de varianzas.

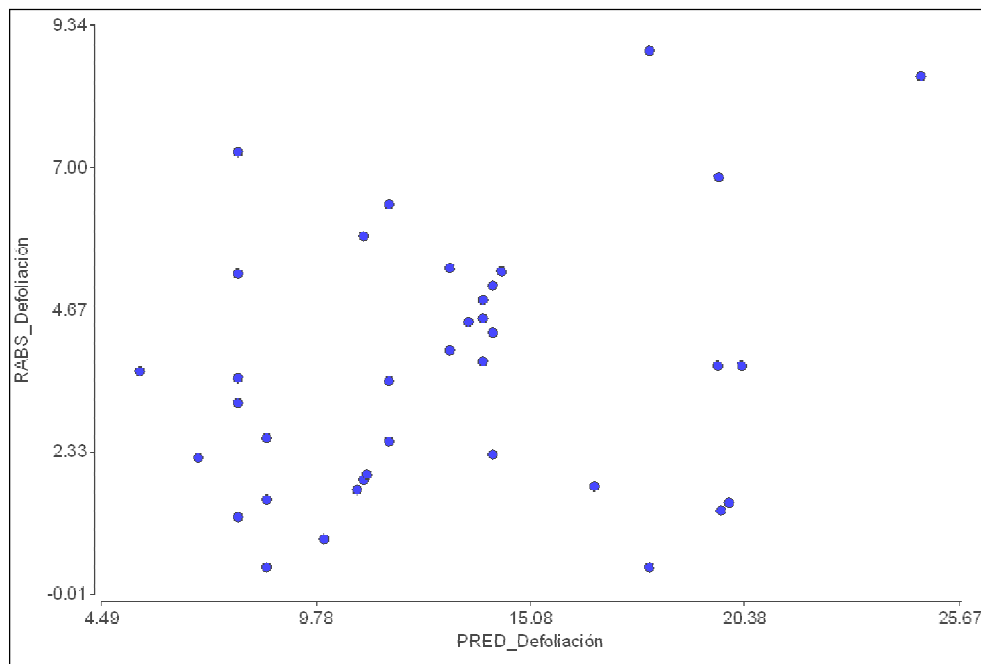


Figura 21. Distribución de residuos en función de predichos con errores homocedásticos.

- Independencia de errores

En la Figura 22 se observa la falta de agrupamiento de los residuos, positivos y/o negativos, lo que indica la ausencia de correlación o dependencia de los datos.

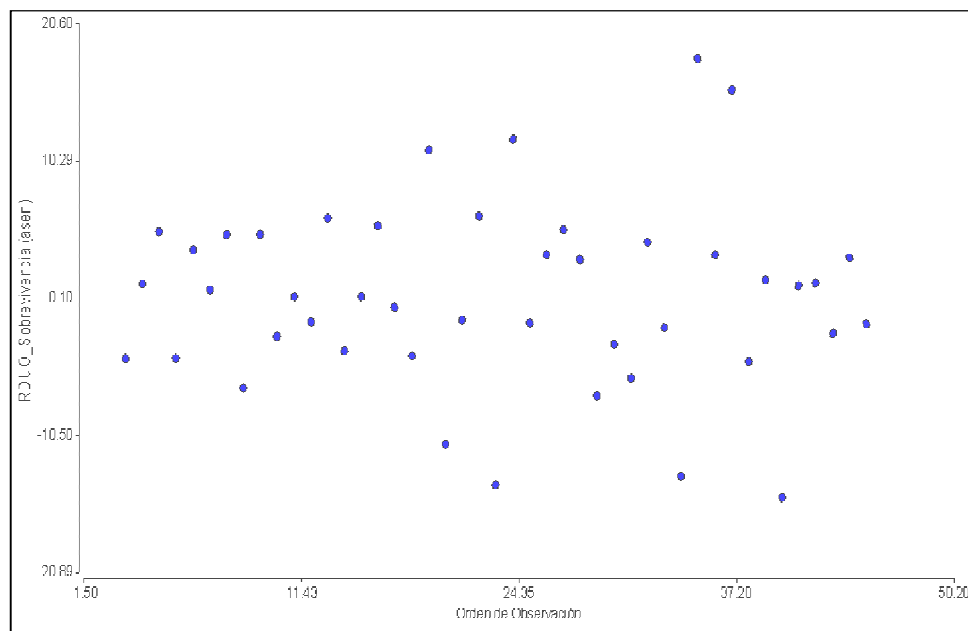


Figura 22. Dispersión de los residuos en función del orden de toma de datos.

ANEXO 9

EFECTO DE LA POSICIÓN DE ESTAQUILLA Y EL ÁREA FOLIAR ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL ENRAIZAMIENTO

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable porcentaje de enraizamiento.

Se observa que con un p-valor igual a 0,002 para la interacción de los factores posición de estaquilla y área foliar, y con un nivel de aceptación $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto, existen pruebas para indicar que la respuesta de la variable porcentaje de enraizamiento depende significativamente de la interacción de factores. La prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ permitió determinar la naturaleza de estas diferencias. Este análisis se presenta a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Enraizamiento	27	0,85	0,76	28,28

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0,84	2	0,42	0,01	0,9929
Posición	2071,82	2	1035,91	17,73	0,0001
Área foliar	843,31	2	421,66	7,22	0,0058
Posición*Área foliar	2504,16	4	626,04	10,71	0,0002
Error	934,97	16	58,44		
Total	6355,10	26			

Prueba de rango múltiple de Tukey Alfa=0,05 DMS=22,20404

Error: 58,4353 gl: 16

Posición	Área foliar	Medias	n	E.E.		
Apical	3000	73,33	3	4,41	A	
Apical	2000	36,67	3	4,41	A	B
Media	1000	33,33	3	4,41		B
Basal	3000	20,00	3	4,41		B C
Media	2000	20,00	3	4,41		B C
Apical	1000	10,00	3	4,41		B C
Media	3000	10,00	3	4,41		B C
Basal	2000	6,67	3	4,41		B C
Basal	1000	0,00	3	4,41		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo

Para el cumplimiento de los supuestos de los residuos del modelo del ANOVA fue necesaria la transformación de la variable porcentaje de enraizamiento. Se empleó la transformación angular arcoseno (raíz (p)). A continuación, se presenta el análisis considerando la variable transformada.

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y con el método gráfico Q-Q plot normal se comparó los residuos obtenidos con los cuantiles teóricos de una distribución normal (Figura 23) (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: los residuos tienen distribución normal.

H₁: los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
RDUO Enraizamiento	27	0,00	6,00	0,95	0,4848

Con un p-valor 0,4848 mayor al valor nominal de aceptación ($p < 0,05$) se acepta la hipótesis nula. Por lo tanto, no existe suficiente evidencia estadística para no aceptar el supuesto de normalidad.

De acuerdo a la Figura 23, se puede indicar que el modelo cumple con el supuesto de normalidad, ya que los residuos tienden a alinearse a la recta normal, por lo tanto, no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de los datos.

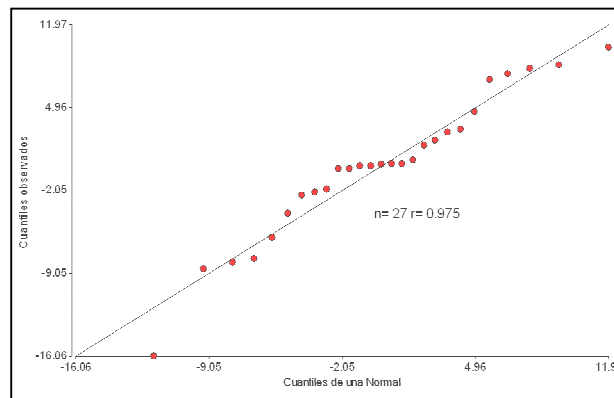


Figura 23. Q-Q plot (normal) obtenido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se verificó el cumplimiento de este supuesto mediante la prueba de Levene. Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H_1 : Al menos dos varianzas son distintas.

De acuerdo a la prueba de Levene, el p-valor del tratamiento (0,5631) es mayor al valor de significación nominal ($p < 0,05$), por lo tanto, el supuesto de igualdad de varianzas puede ser sostenido.

Tabla 8. Prueba de Levene mediante el ANOVA del absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas para la variable enraizamiento.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	66,48	8	8,31	0,86	0,5631
Error	173,20	18	9,62		
Total	439,68	26			

En la Figura 24, no se observa tendencia que pruebe falta de cumplimiento del supuesto de homogeneidad de varianzas.

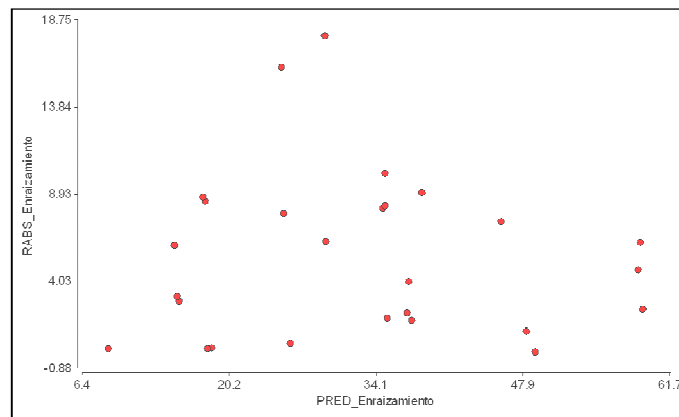


Figura 24. Distribución de residuos en función de predichos con errores homocedásticos.

- Independencia de errores

Según lo presentado en la Figura 25, se observa la falta de agrupamiento de los residuos, positivos y/o negativos, lo que indica la ausencia de correlación o dependencia de los errores.

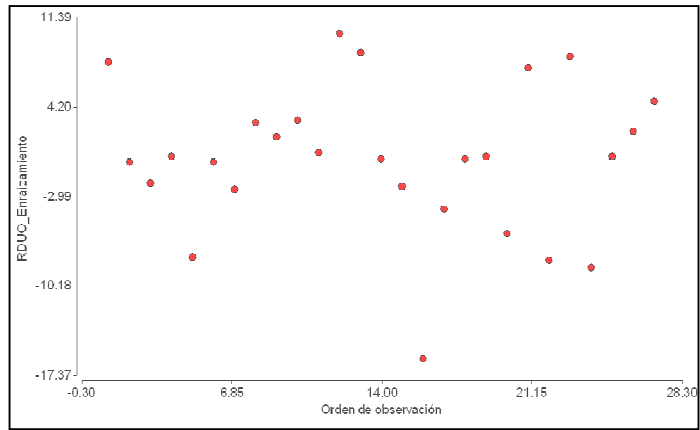


Figura 25. Dispersión de los residuos en función del orden de toma de datos.

ANEXO 10

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL NÚMERO DE RAÍCES POR ESTAQUILLA

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable número de raíces por estaquilla.

Se observa que con un p-valor igual a 0,0212 para la interacción de los factores posición de estaquilla y área foliar y con un nivel de aceptación $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula, es decir, la respuesta de la variable número de raíces por estaquilla depende significativamente de la interacción de factores. La prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ permitió determinar la naturaleza de estas diferencias. Este análisis se presenta a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
N-raíz-ajustado	27	0,68	0,48	15,81

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	0,14	2	0,07	1,18	0,3333
Posición	0,18	2	0,09	1,52	0,2483
Área foliar	0,73	2	0,36	6,27	0,0098
Posición*Área foliar	0,91	4	0,23	3,91	0,0212
Error	0,93	16	0,06		
Total	2,88	26			

Prueba de rango múltiple de Tukey Alfa=0,05 DMS=0,69959

Error: 0,0580 gl: 16

Posición	Área foliar	Medias	n	E.E.		
Basal	3000	2,78	3	0,14	A	
Apical	3000	2,33	3	0,14	A	
Apical	2000	1,83	3	0,14	A	B
Media	1000	1,37	3	0,14	A	B
Basal	2000	1,33	3	0,14	A	B
Media	2000	1,22	3	0,14	A	B
Media	3000	1,00	3	0,14	A	B
Apical	1000	1,00	3	0,14	A	B
Basal	1000	0,00	3	0,14		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo

Para el cumplimiento de los supuestos de los residuos del modelo fue necesaria la transformación de la variable número de raíces por estaquilla. Se empleó la transformación raíz cuadrada de la proporción. A continuación, se presenta el análisis estadístico considerando la variable transformada.

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y con el método gráfico Q-Q plot normal se comparó los residuos del modelo con los cuantiles de una distribución normal (Figura 26) (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H_0 : los residuos tienen distribución normal.

H_1 : los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilk (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO_N-raíz-ajustado	27	0,00	0,19	0,92	0,1092

De acuerdo a la prueba de Shapiro-Wilk y con un p-valor mayor al valor de significancia nominal, se acepta la hipótesis nula, por lo tanto, no hay suficiente evidencia estadística para rechazar el supuesto de distribución normal.

Según la Figura 26 se observa que el modelo cumple con el supuesto de normalidad, ya que los residuos tienden a alinearse a la recta normal, por lo tanto, no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de los datos.

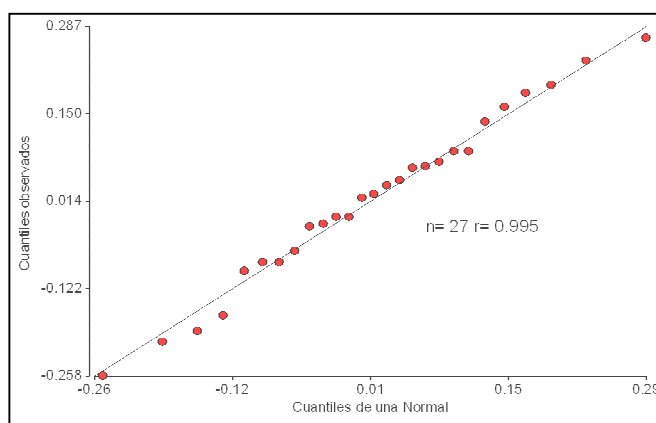


Figura 26. Q-Q plot (normal) obtenido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se verificó el cumplimiento de este supuesto mediante la prueba de Levene. Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H_0 : $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H_1 : Al menos dos varianzas son distintas.

De acuerdo a la prueba de Levene, el p-valor del tratamiento (0,0956) es mayor al valor de significación nominal, por tanto, el supuesto de igual de varianza puede ser sostenido.

Tabla 9. Prueba de Levene mediante el ANOVA del valor absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas número de raíces por estaquilla.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	0,08	8	0,01	2,07	0,0956
Error	0,09	18	4,8E-03		
Total	0,17	26			

En la Figura 27, no se observa tendencia y/o agrupamiento que indique falta de cumplimiento del supuesto de homogeneidad de varianzas.

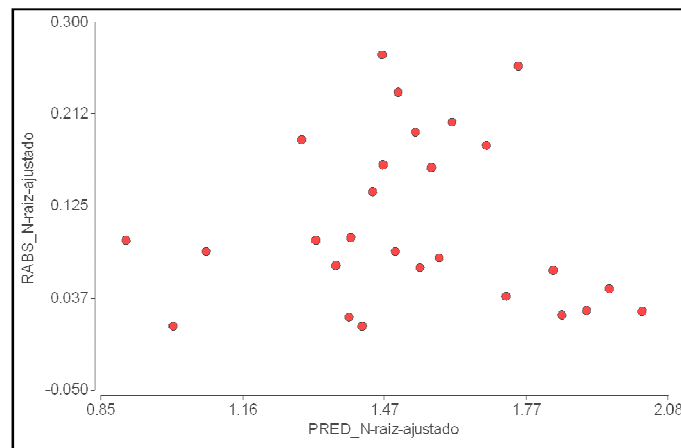


Figura 27. Distribución de residuos en función de predichos con errores homocedásticos.

- Independencia de errores

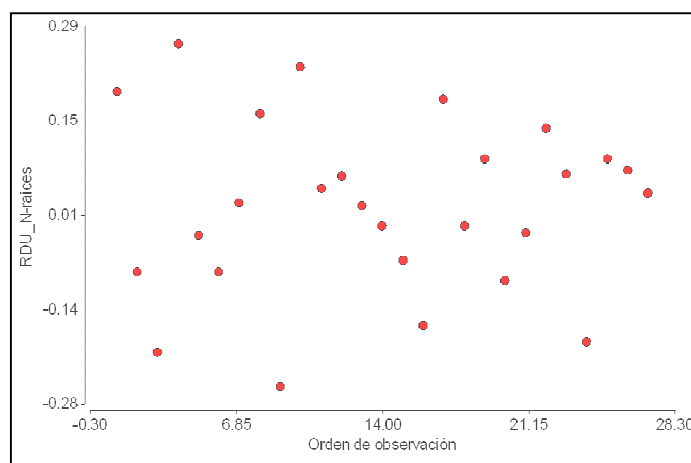


Figura 28. Dispersión de los residuos en función del orden de toma de datos. Se observa la falta de agrupamiento de los residuos, positivos y/o negativos, lo que indica la ausencia de correlación o dependencia de los errores.

ANEXO 11
ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA SOBREVIVENCIA

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable porcentaje de sobrevivencia.

Con un p-valor igual a 0,028 para la interacción de los factores posición de estaquilla y área foliar y con un nivel de aceptación $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula, es decir, la respuesta de la variable porcentaje de enraizamiento depende significativamente de la interacción de factores. En este caso se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para determinar la naturaleza de estas diferencias. Este análisis se presenta a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sobrevivencia-Transformación	27	0,88	0,80	17,95

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	126,64	2	63,32	0,76	0,4848
Posición	6400,60	2	3200,30	38,30	<0,0001
Área foliar	928,05	2	464,03	5,55	0,0147
Posición*Área foliar	2139,17	4	534,79	6,40	0,0028
Error	1337,00	16	83,56		
Total	10931,46	26			

Prueba de rango múltiple de Tukey Alfa=0,05 DMS=26,55216

Error: 83,5624 gl: 16

Posición	Área foliar	Medias	n	E.E.				
Apical	3000	96,67	3	5,28	A			
Apical	2000	90,00	3	5,28	A	B		
Media	1000	80,00	3	5,28	A	B	C	
Apical	1000	63,33	3	5,28	A	B	C	D
Media	2000	60,00	3	5,28	A	B	C	D
Media	3000	56,67	3	5,28		B	C	D
Basal	3000	50,00	3	5,28			C	D
Basal	2000	33,33	3	5,28				D
Basal	1000	3,33	3	5,28				E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo

Para el cumplimiento de los supuestos de los residuos del modelo del ANOVA fue necesaria la transformación de la variable porcentaje de sobrevivencia. Se empleó la transformación angular arcoseno (raíz (p)). A continuación, se presenta el análisis considerando la variable transformada.

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y con el método gráfico Q-Q plot normal se verificó la distribución normal del conjunto de datos (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: los residuos tienen distribución normal.

H₁: los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilk (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO_Sobrevivencia	27	0,00	7,17	0,97	0,7875

De acuerdo a la prueba estadística no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, pues con un p-valor (0,7875) mayor al valor nominal de aceptación ($p < 0,05$) se mantiene el supuesto de normalidad.

De acuerdo a la Figura 29, se observa que el modelo cumple con el supuesto de normalidad, ya que los residuos tienden a alinearse a la recta normal, por lo tanto, no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de los datos.

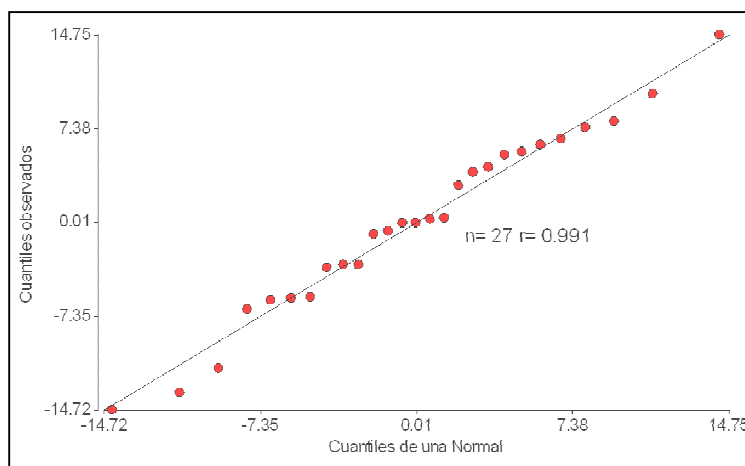


Figura 29. Q-Q plot (normal) obtenido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se verificó el cumplimiento de este supuesto mediante la prueba de Levene. Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H₁: Al menos dos varianzas son distintas.

De acuerdo a la prueba de Levene, el p-valor del tratamiento (0,2975) es mayor al valor de significación nominal, por lo tanto, el supuesto de igual de varianza puede ser sostenido.

Tabla 10. Prueba de Levene mediante el ANOVA del absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas para la variable sobrevivencia.

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	178,39	8	22,30	1,31	0,2975
Error	305,26	18	16,96		
Total	483,65	26			

En la Figura 30, no se observa tendencia y/o agrupamiento que señale la falta de cumplimiento del supuesto de homogeneidad de varianzas.

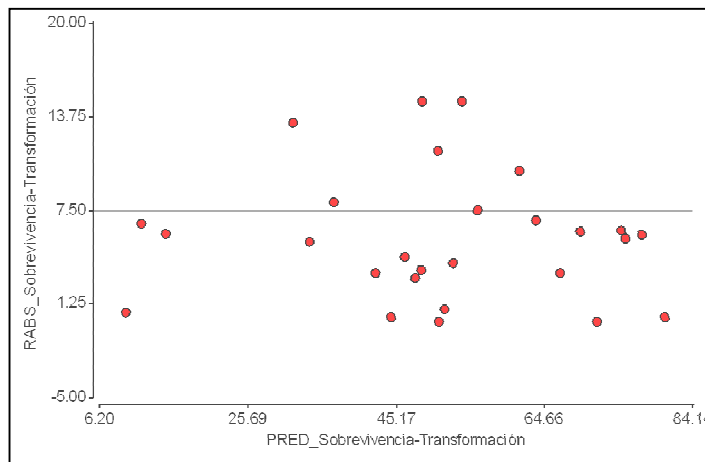


Figura 30. Distribución de residuos en función de predichos con errores homocedásticos.

- Independencia de errores

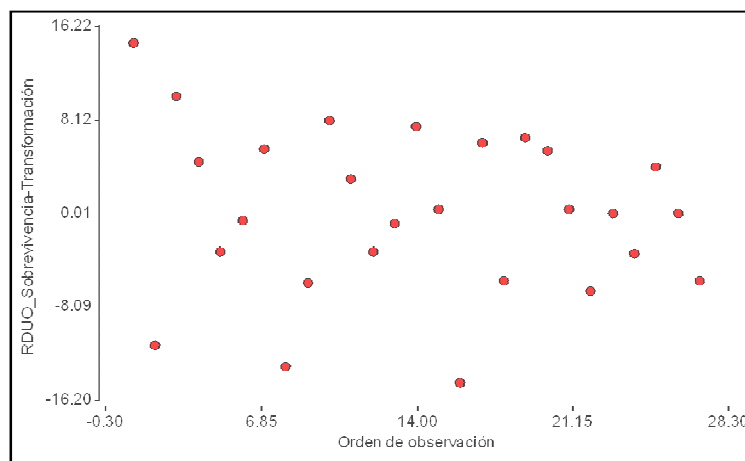


Figura 31. Dispersión de los residuos en función del orden de toma de datos. Se observa la falta de agrupamiento de los residuos, positivos y/o negativos, por lo tanto, se indica la ausencia de correlación.

ANEXO 12
ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA DEFOLIACIÓN

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable defoliación.

Se observa que con un p-valor igual a 0,0001 para la interacción de los factores posición de estacilla y área foliar y con un nivel de aceptación $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula, es decir, la respuesta de la variable porcentaje de enraizamiento depende significativamente de la interacción de factores. En este caso se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para determinar la naturaleza de estas diferencias. Este análisis se presenta a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Defoliación-Transformado	27	0,93	0,89	26,06

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	11626,22	10	1162,62	22,23	<0,0001
Bloque	277,71	2	138,86	2,65	0,1010
Posición	1644,95	2	822,47	15,73	0,0002
Área foliar	6923,04	2	3461,52	66,18	<0,0001
Posición*Área foliar	2780,53	4	695,13	13,29	0,0001
Error	836,85	16	52,30		
Total	12463,07	26			

Prueba de rango múltiple Tukey Alfa=0,05 DMS=21,00666

Error: 52,3029 gl: 16

Posición	Área foliar	Medias	n	E.E.				
Basal	1000	80,90	3	4,18	A			
Media	1000	36,85	3	4,18		B		
Apical	1000	33,21	3	4,18		B	C	
Apical	2000	20,75	3	4,18		B	C	D
Media	3000	18,43	3	4,18		B	C	D
Basal	2000	18,03	3	4,18		B	C	D
Basal	3000	17,14	3	4,18		B	C	D
Media	2000	15,32	3	4,18			C	D
Apical	3000	9,10	3	4,18				D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo.

Para el cumplimiento de los supuestos de los residuos del modelo del ANOVA fue necesaria la transformación de la variable porcentaje de defoliación. Se empleó la transformación angular arcoseno (raíz (p)). A continuación, se presenta el análisis considerando la variable transformada.

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y con el método gráfico Q-Q plot normal se verificó la distribución normal del conjunto de datos (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: los residuos tienen distribución normal.

H₁: los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilk (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO_Defoliación-Transformación	27	0,00	5,67	0,93	0,1985

De acuerdo a la prueba de Shapiro-Wilk no hay evidencias para rechazar la hipótesis nula, es decir, se puede mantener el supuesto de distribución normal.

Según la Figura 32, se observa que el modelo cumple con el supuesto de normalidad, ya que los residuos tienden a alinearse a la recta normal, por lo tanto, no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de los datos.

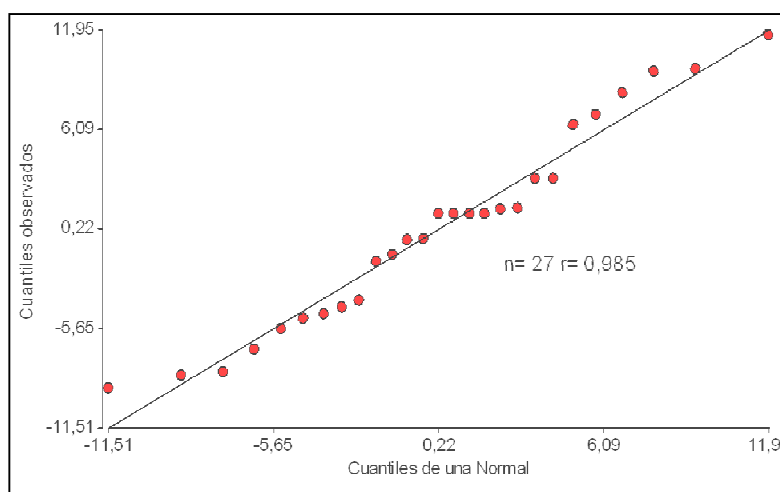


Figura 32. Q-Q plot (normal) obtenido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se verificó el cumplimiento de este supuesto mediante la prueba de Levene. Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H₁: Al menos dos varianzas son distintas.

De acuerdo a la prueba de Levene, el p-valor del tratamiento (0,3281) es mayor al valor de significación nominal, por lo tanto, el supuesto de igual de varianza puede ser sostenido.

Tabla 11. Prueba de Levene mediante el ANOVA del absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas para la variable defoliación.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	87,78	8	10,97	1,25	0,3281
Error	158,15	18	8,79		
Total	245,93	26			

En la Figura 33 no se observa tendencia que pruebe falta de cumplimiento del supuesto de homogeneidad de varianzas.

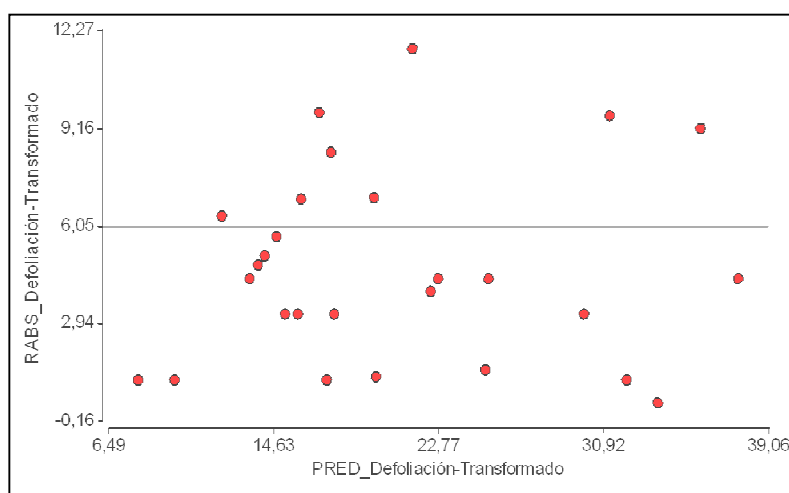


Figura 33. Distribución de residuos en función de predichos con errores homocedásticos.

- Independencia de errores

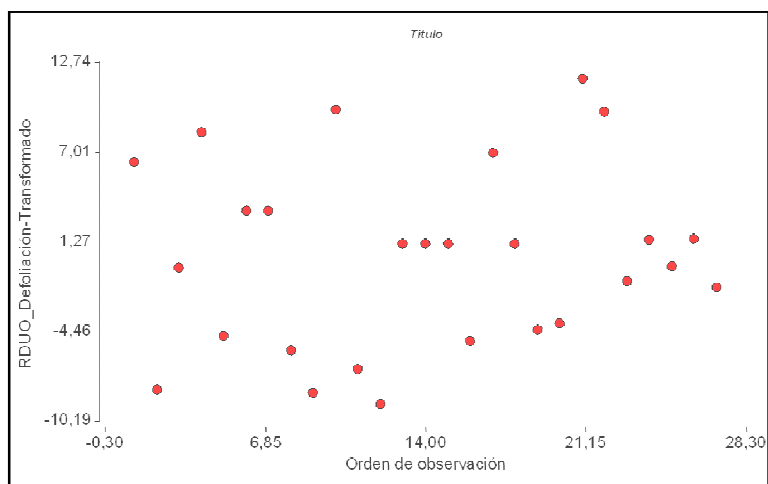


Figura 34. Dispersión de los residuos en función del orden de toma de datos. Se observa la falta de agrupamiento de los residuos, positivos y/o negativos, lo que indica la ausencia de dependencia.

ANEXO 13

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA LONGITUD PROMEDIO DE RAÍCES

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable longitud promedio de raíces.

Con un p-valor igual a 0,0325 y un nivel de aceptación $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula, es decir, al menos una posición de estacilla tiene efecto significativo sobre la variable enraizamiento. En este caso se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para determinar la naturaleza de estas diferencias. Este análisis se presenta a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Longitud-raíces	27	0,60	0,35	21,50

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	2,41	2	1,20	0,62	0,5499
Posición	16,58	2	8,29	4,28	0,0325
Área foliar	4,23	2	2,11	1,09	0,3599
Posición*Área foliar	22,75	4	5,69	2,93	0,0538
Error	31,02	16	1,94		
Total	76,99	26			

Prueba de rango múltiple de Tukey Alfa=0,05 DMS=1,69376

Error: 1,9390 gl: 16

Posición	Medias	n	E.E.	
Apical	3,81	9	0,46	A
Basal	2,26	9	0,46	B
Media	2,05	9	0,46	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo.

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y con el método gráfico Q-Q plot normal se verificó la distribución normal del conjunto de datos (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: los residuos tienen distribución normal.

H₁: los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilk (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO_Longitud-raíces	27	0,00	1,09	0,93	0,1747

De acuerdo a la prueba de Shapiro-Wilk se puede afirmar que no hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal, pues el p-valor (0,1747) es mayor al valor nominal de aceptación ($p < 0,05$).

En la Figura 35, se observa que el modelo cumple con el supuesto de normalidad, ya que los residuos tienden a alinearse a la recta normal, por lo tanto, no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de los datos.

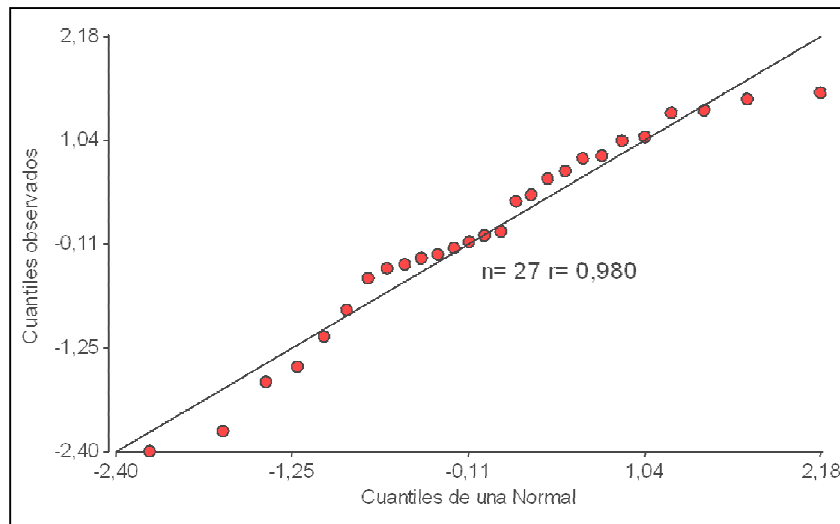


Figura 35. Q-Q plot (normal) obtenido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se verificó el cumplimiento de este supuesto mediante la prueba de Levene. Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H₁: Al menos dos varianzas son distintas.

De acuerdo a la prueba de Levene, el p-valor del tratamiento (0,0658) es mayor al valor de significación nominal, por lo tanto, el supuesto de igual de varianza puede ser sostenido.

Tabla 12. Prueba de Levene mediante el ANOVA del absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas para la variable longitud promedio de raíces.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	5,58	8	0,70	2,32	0,0658
Error	5,41	18	0,30		
Total	10,99	26			

En la Figura 36, no se observa tendencia que pruebe falta de cumplimiento del supuesto de homogeneidad de varianzas.

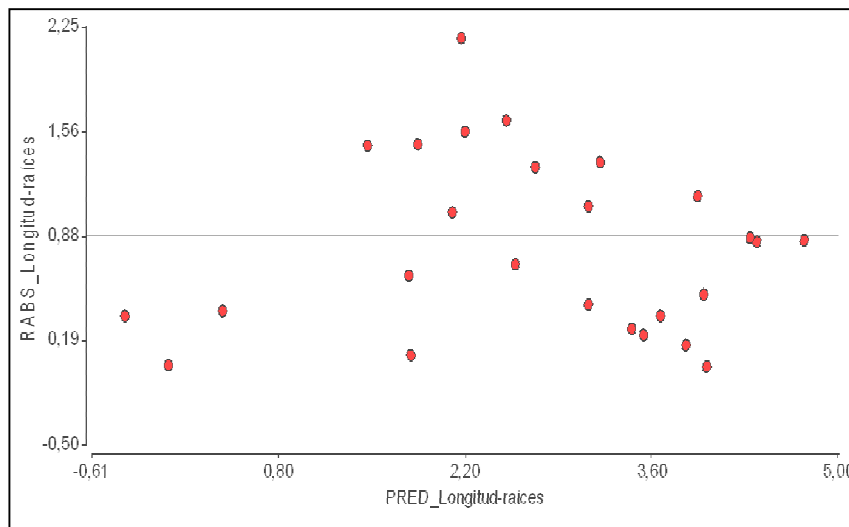


Figura 36. Distribución de residuos en función de predichos con errores homocedásticos.

- Independencia de errores

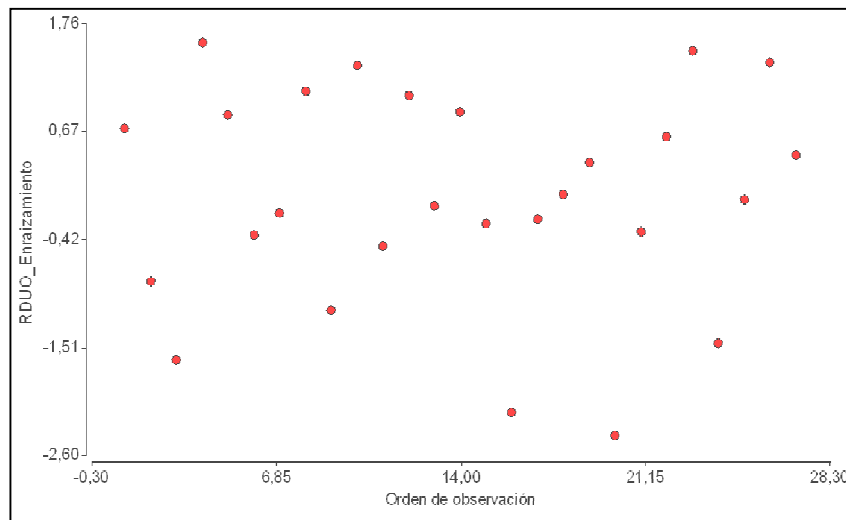


Figura 37. Dispersión de los residuos en función del orden de toma de datos. Se observa la falta de agrupamiento de los residuos lo que indica la ausencia de dependencia o marca la independencia de datos.

ANEXO 14

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA FORMACIÓN DE BROTES

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable formación de brotes.

Con un p-valor igual a 0,0650 y un nivel de aceptación $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula, es decir, al menos una posición de estacilla tiene efecto significativo sobre la variable porcentaje de formación de brotes. En este caso se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para determinar la naturaleza de estas diferencias. Este análisis se presenta a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Brotos Transformación	27	0,88	0,80	28,45

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	17,30	2	8,65	0,24	0,7889
Posición	3438,48	2	1719,24	47,82	<0,0001
Área foliar	181,07	2	90,54	2,52	0,1120
Posición*Área foliar	395,04	4	98,76	2,75	0,0650
Error	575,21	16	35,95		
Total	4607,10	26			

Prueba de rango múltiple de Tukey Alfa=0,05 DMS=7,29326

Error: 35,9505 gl: 16

Posición	Medias	n	E.E.	
Apical	37,00	9	2,00	A
Basal	14,02	9	2,00	B
Media	12,21	9	2,00	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo.

Para el cumplimiento de los supuestos de los residuos del modelo fue necesaria la transformación de la variable porcentaje de formación de brotes. Se empleó la transformación angular arcoseno (raíz (p)). A continuación, se presenta el análisis considerando la variable transformada

c. Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y con el método gráfico Q-Q plot normal se comparó la distribución normal del conjunto de datos (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H_0 : los residuos tienen distribución normal.

H_1 : los residuos no tienen distribución normal.

Shapiro-Wilk (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO_Brotos_Transformación	27	0,00	4,70	0,98	0,9134

De acuerdo con la prueba de Shapiro-Wilk (modificado) se puede afirmar que no existe suficiente evidencia para rechazar el supuesto de distribución normal, pues el p-valor 0,9134 es mayor al valor nominal de aceptación ($p < 0,05$).

Como se muestra en la Figura 38, modelo cumple con el supuesto de normalidad, ya que los residuos tienden a alinearse a la recta de los cuantiles normales, por lo tanto, no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de los datos.

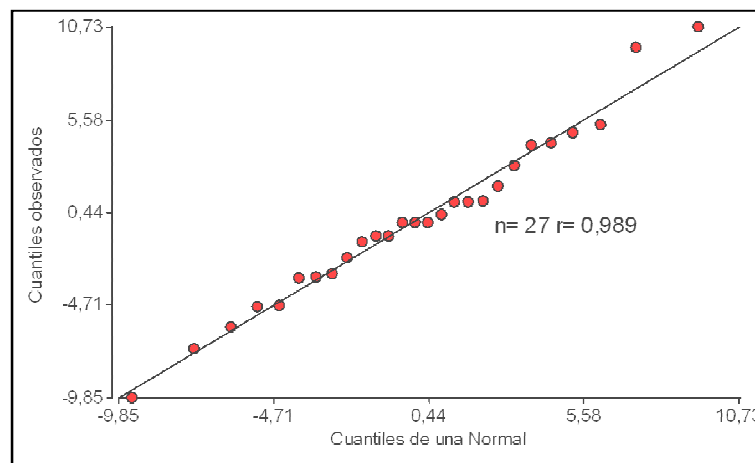


Figura 37. Q-Q plot (normal) obtenido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se verificó el cumplimiento de este supuesto mediante la prueba de Levene. Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H_0 : $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H_1 : Al menos dos varianzas son distintas.

De acuerdo a la prueba de Levene, el p-valor del tratamiento (0,0510) es mayor al valor de significación nominal, por lo tanto, el supuesto de igual de varianza puede ser sostenido.

Tabla 13. Prueba de Levene mediante el ANOVA del absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas para la variable formación de brotes.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	128,71	8	16,09	2,50	0,0510
Error	116,03	18	6,45		
Total	244,74	26			

En la Figura 39, no se observa tendencia que pruebe falta de cumplimiento del supuesto de homogeneidad de varianzas.

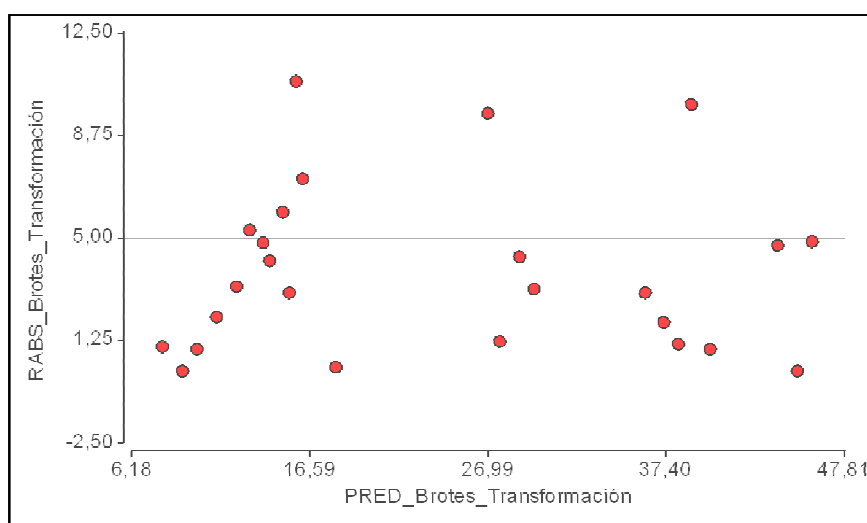


Figura 39. Dispersión de residuos en función de predichos con errores homocedásticos.

- Independencia de errores

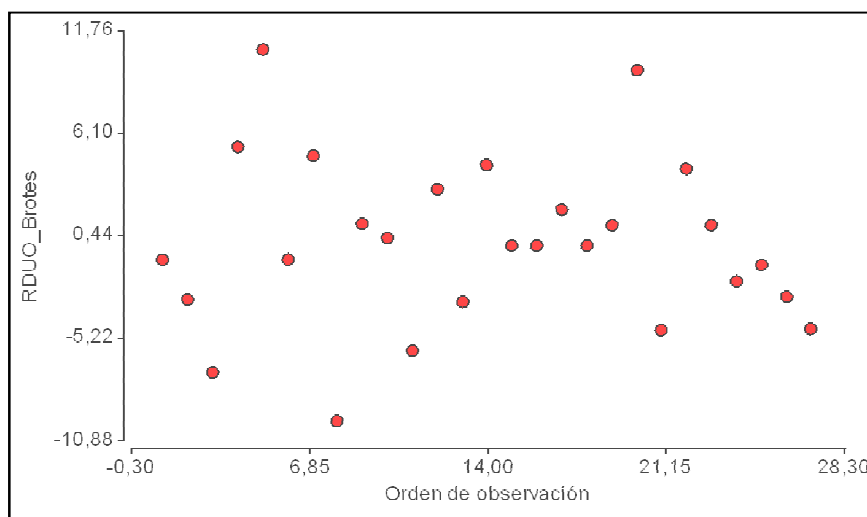


Figura 40. Dispersión de los residuos en función del orden de toma de datos. Se observa la falta de agrupamiento de los residuos positivos y/o negativos indica la ausencia de correlación.

ANEXO 15

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA FORMACIÓN DE CALLOS

a. Análisis estadístico y prueba de Tukey para la variable formación de callos.

Se observa que los p-valor de los factores posición de estaquilla y aérea foliar son menores al nivel de aceptación $p < 0,05$ por lo tanto se acepta la hipótesis nula, es decir, la respuesta es la formación de callos es igual en todos los tratamientos. Este análisis se presenta a continuación:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Callos-Transformación	27	0,47	0,14	43,96

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Bloque	112,39	2	56,20	1,28	0,3037
Posición	44,02	2	22,01	0,50	0,6138
Área foliar	110,24	2	55,12	1,26	0,3102
Posición*Área foliar	359,98	4	89,99	2,06	0,1344
Error	699,75	16	43,73		
Total	1326,37	26			

b. Validación de supuestos de los residuos del modelo

Para el cumplimiento de los supuestos de los residuos del modelo fue necesaria la transformación de la variable porcentaje de callos. Se empleó la transformación angular arcoseno (raíz (p)). A continuación, se presenta el análisis considerando la variable transformada

- Normalidad

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk (modificado por Mahibbur y Govindarajulu) y con el método gráfico Q-Q plot normal se verificó la distribución normal del conjunto de datos (Di Rienzo *et al.* 2011). Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: los residuos tienen distribución normal.

H₁: los residuos no tienen distribución normal.

En este caso no hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal, pues el p-valor 0,2901 es mayor al valor nominal de aceptación ($p < 0,05$).

Shapiro-Wilk (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO_Callos-Transformación	27	0,00	5,19	0,94	0,2901

Con la Figura 41 se puede indicar que el modelo cumple con el supuesto de normalidad, ya que los residuos tienden a alinearse a la recta normal, por lo tanto, no existe suficiente evidencia para no aceptar la normalidad de los datos

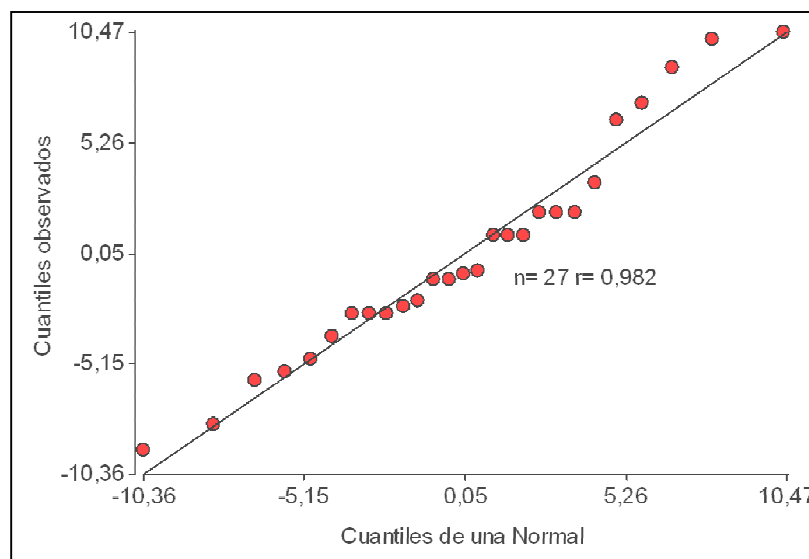


Figura 41. Q-Q plot (normal) obtenido a partir de un modelo con errores normales.

- Homogeneidad de varianzas

Se verificó el cumplimiento de este supuesto mediante la prueba de Levene. Las hipótesis sometidas a prueba fueron:

H₀: $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \dots = \sigma^2_n$, donde σ^2_i es la varianza del tratamiento.

H₁: Al menos dos varianzas son distintas.

De acuerdo a la prueba de Levene, el p-valor del tratamiento (0,1595) es mayor al valor de significación nominal, por tanto, el supuesto de igual de varianza puede ser sostenido.

Tabla 14. Prueba de Levene mediante el ANOVA del absoluto de los residuos para verificar la homogeneidad de varianzas para la variable formación de callos.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	111,22	8	13,90	1,73	0,1595
Error	144,79	18	8,04		
Total	256,01	26			

En la Figura 42, no se observa tendencia que pruebe falta de cumplimiento del supuesto de homogeneidad de varianzas.

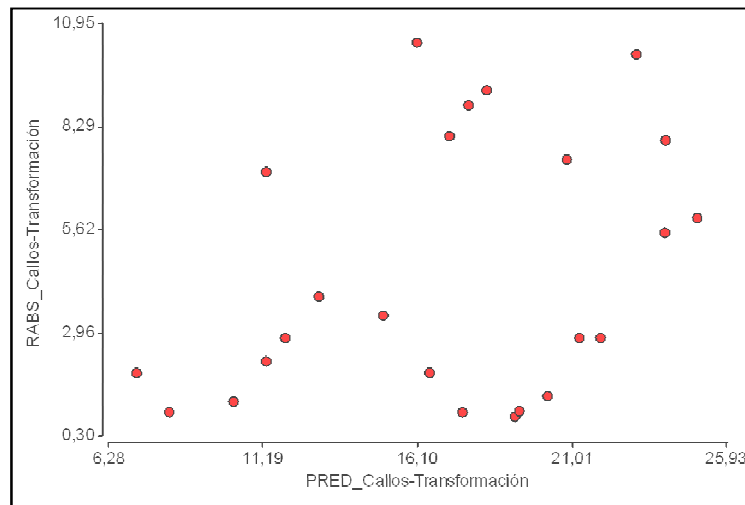


Figura 42. Distribución de residuos en función de predichos con errores homocedásticos.

- Independencia de errores

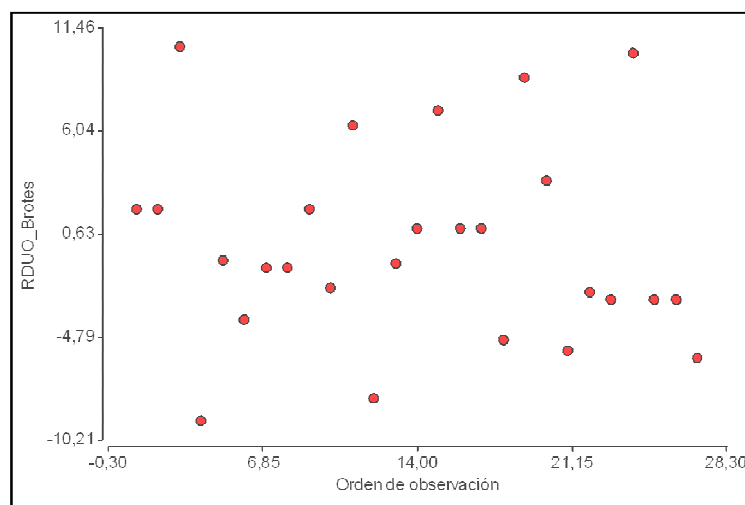


Figura 43. Dispersión de los residuos en función del orden de toma de datos. Se observa la falta de agrupamiento de los residuos, positivos y/o negativos, lo que indica la ausencia de correlación.