

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES

**ÁREA FOLIAR Y PERÍODO DE ENRAIZAMIENTO PARA LA
PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE MELINA (*Gmelina arborea*
Roxb.) EN VIVERO, LA PALMA DE PUERTO JIMÉNEZ, GOLFITO**

Tesis con formato artículo científico para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Ciencias
Forestales con énfasis en Manejo Forestal

Presentado por
Juan Pablo Villegas Espinoza

Campus Omar Dengo
Heredia, Costa Rica

2016

Área foliar y período de enraizamiento para la propagación vegetativa de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en vivero, La Palma de Puerto Jiménez, Golfito.

Trabajo de graduación bajo la modalidad de tesis con formato artículo científico.
Licenciatura en Ingeniería en Ciencias Forestales con énfasis en Manejo Forestal.

Miembros del tribunal examinador:

M.Sc. Tomás Marino Herrera
Decano Facultad Tierra y Mar

M.Sc. Gustavo Vargas Rojas
Representante Dirección EDECA

M.Sc. Rafael Murillo Cruz
Tutor del trabajo

M.Sc. Carlo Ávila Arias
Lector del trabajo

M.Sc. William Hernández Castro
Lector del trabajo

Bach. Juan Pablo Villegas Espinoza
Postulante del trabajo

Agradecimientos

Este trabajo tan importante en mi vida profesional, se lo quiero agradecer en primera instancia a Dios por permitirme cumplir una etapa más en mi vida, por nunca abandonarme en los momentos más difíciles y tenerme con salud para lograr mis metas.

A mi familia, Villegas Villalobos y Espinoza Molina, por el apoyo incondicional que me han brindado durante este proceso, ya que todos de una u otra manera me han enseñado lo importante que es la superación personal.

Quiero agradecerle a mi tutor de tesis: Rafael Murillo Cruz, de quien he aprendido mucho, por sus aportes durante el desarrollo del trabajo y apoyo para poder cumplir con los objetivos planteados, por sus consejos tan valiosos, por confiar en mí y por exigir siempre algo más.

A mis lectores: Carlos Ávila Arias y William Hernández Castro, les agradezco mucho, por ser parte importante de este trabajo, por la dedicación y consejos tan valiosos que me brindaron en su momento.

A Wilberth Alvarado, de quien voy a estar siempre agradecido por su valiosa participación y colaboración en el trabajo de campo.

Y Muy especialmente a Manuel Spínola por su tiempo, dedicación y apoyo incondicional, ya que con su ayuda logré concluir mi trabajo; muchas gracias de todo corazón.

Dedicatoria

He dedicado mucho esfuerzo, tiempo y sacrificio para concluir este trabajo, por estas razones, quiero dedicarle este logro tan importante en mi vida a dos personas que significan mucho en mi vida: mi madre, Ligia María Espinoza Molina y mi padre, Santiago Villegas Villalobos. Ellos han dado su máximo esfuerzo durante este proceso, muchas gracias por su paciencia, consejos, por confiar en mí y siempre desearme lo mejor, espero algún día poder pagarles todo lo que han hecho por mí.

A mi querida novia: Jennifer Méndez Elizondo, por ayudarme a seguir adelante, por estar conmigo en los momentos buenos y no tan buenos; muchas gracias por todo.

A mi querido abuelito: Gabelo Villegas González, quien ha sido todo un ejemplo de vida; y a la memoria de mis dos abuelitas: María Eugenia Molina Moraga y Lidia Villalobos, quienes fueron y seguirán siendo parte importante en mi existencia.

Índice General

Contenido	Página
AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA	III
ÍNDICE DE CUADROS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
1. RESUMEN GENERAL.....	XI
2. GENERAL ABSTRACT	XII
3. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
4. REFERENCIAS	5
5. ARTÍCULOS COMPLETOS	8
5.1 Influencia del área foliar remanente sobre el enraizamiento en esquejes de genotipos superiores de <i>Gmelina arborea</i> Roxb.....	8
Resumen.....	8
Abstract	9
Introducción	9
Materiales y métodos	11
Resultados y discusión	15

Conclusiones.....	34
Referencias	35
5.2 Período óptimo de enraizamiento en esquejes de genotipos superiores de <i>Gmelina arborea</i> Roxb., en vivero.	39
Resumen.....	39
Abstract	39
Introducción	40
Materiales y métodos	42
Resultados y discusión	45
Conclusiones	68
Referencias.....	69
5. CONCLUSIONES GENERALES	72

Índice de cuadros

Capítulo 1. Influencia del área foliar remanente sobre el enraizamiento en esquejes de genotipos superiores de *Gmelina arborea* Roxb.

Contenido	Página
Cuadro 1. Estadísticos descriptivos para las variables de entrada determinados a los esquejes de <i>Gmelina arborea</i> previo al enraizamiento.	15
Cuadro 2. Estadísticos descriptivos para las variables de entrada determinados a los esquejes de <i>Gmelina arborea</i> de cada clon previo al enraizamiento.	16
Cuadro 3. Prueba de medias para el diámetro y la biomasa verde por cada tratamiento evaluado previo al enraizamiento de esquejes de <i>Gmelina arborea</i>	17
Cuadro 4. Modelos estadísticos explicativos basados en el enraizamiento de esquejes de <i>Gmelina arborea</i> según AIC.	20
Cuadro 5. Detalle del diámetro de los esquejes de <i>Gmelina arborea</i> que enraizaron y los que no.	23
Cuadro 6. Altura mínima, máxima y promedio para cada tratamiento de reducción de área foliar.	26
Cuadro 7. Prueba de medias sobre la altura final por clon para los esquejes enraizados de <i>Gmelina arborea</i>	26
Cuadro 8. Prueba de medias sobre el área foliar final por clon para los esquejes enraizados de <i>Gmelina arborea</i>	29
Cuadro 9. Prueba de medias sobre la biomasa final y sus componentes para cada tratamiento de reducción de área foliar en <i>Gmelina arborea</i>	31
Cuadro 10. Prueba de medias sobre la biomasa total por clon para los esquejes enraizados de <i>Gmelina arborea</i>	31
Cuadro 11. Matriz de correlación de Pearson para variables registradas en los esquejes de <i>Gmelina arborea</i> evaluados.	32

Capítulo 2. Período óptimo de enraizamiento en esquejes de genotipos superiores de *Gmelina arborea* Roxb., en vivero.

Contenido	Página
Cuadro 1. Estadísticos descriptivos para las variables de entrada, evaluadas a los esquejes de <i>Gmelina arborea</i> previo al enraizamiento	45
Cuadro 2. Estadísticos descriptivos y prueba de medias para las variables de entrada, determinados a los esquejes de <i>Gmelina arborea</i> en cada clon previo al enraizamiento	46
Cuadro 3. Estadísticos descriptivos y prueba de medias para las variables de entrada, determinados a los esquejes de <i>Gmelina arborea</i> para cada tratamiento previo al enraizamiento.....	47
Cuadro 4. Matriz de correlación de Pearson para las variables de salida registradas en los esquejes de <i>Gmelina arborea</i> evaluados	50
Cuadro 5. Prueba de medias por clon para los esquejes enraizados de <i>Gmelina arborea</i>	51
Cuadro 6. Modelos estadísticos explicativos basados en el enraizamiento de esquejes de <i>Gmelina arborea</i> según AIC	52
Cuadro 7. Ecuaciones de modelos estadísticos explicativos basados en el enraizamiento de esquejes de <i>Gmelina arborea</i>	56
Cuadro 8. Prueba de medias sobre la altura final de los esquejes enraizados de <i>Gmelina arborea</i> para cada tratamiento	56
Cuadro 9. Ecuaciones de modelos estadísticos explicativos, utilizando variables de entrada como covariables según la altura promedio de las plantas de <i>Gmelina arborea</i>	59
Cuadro 10. Prueba de medias sobre la altura final según el material genético evaluado para los esquejes enraizados de <i>Gmelina arborea</i>	61
Cuadro 11. Prueba de medias sobre la biomasa de raíz, aérea y total para cada tratamiento según los esquejes enraizados de <i>Gmelina arborea</i>	64

Cuadro 12. Prueba de medias sobre la biomasa de raíz, aérea y total según el material genético evaluado para los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*..... 65

Cuadro 13. Ecuaciones de modelos estadísticos explicativos, utilizando variables de entrada como covariables, según la biomasa seca final, promedio de las plantas de *Gmelina arborea* 66

Índice de figuras

Capítulo 1. Influencia del área foliar remanente sobre el enraizamiento en esquejes de genotipos superiores de *Gmelina arborea* Roxb.

Contenido	Página
Figura 1. (A) Moldes correspondientes a las áreas foliares evaluadas, (B) Procedimiento para la reducción del área foliar de los esquejes, (C) Área foliar reducida.	12
Figura 2. (A) Separación de la planta en follaje y raíz, (B) Medición de la altura de las plantas, (C) Medición del peso verde de la raíz.....	14
Figura 3. Histograma de biomasa verde para los esquejes de todos los tratamientos	16
Figura 4. Efecto de cuatro áreas foliares sobre el porcentaje de enraizamiento de esquejes de <i>Gmelina arborea</i>	18
Figura 5. Modelo de regresión basado en el enraizamiento ~ tratamiento + biomasa verde de entrada de los esquejes que enraizaron	21
Figura 6. Histograma de enraizamiento de los esquejes de <i>Gmelina arborea</i> según la biomasa verde de entrada en gramos.	22
Figura 7. Modelo de regresión basado en la correlación entre el enraizamiento (sobrevivencia) y diámetro.....	23
Figura 8. Modelo de regresión para el enraizamiento basado en la biomasa verde (g) de entrada + diámetro (mm) para esquejes de clones de <i>Gmelina arborea</i>	24
Figura 9. Efecto de cuatro áreas foliares sobre la altura final promedio de las plantas de <i>Gmelina arborea</i>	25

Figura 10. Efecto de los tratamientos de reducción de área foliar sobre el área foliar final de los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*. 27

Figura 11. Efecto de los tratamientos de reducción de área foliar sobre el área foliar final de los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*. 28

Figura 12. Efecto de los tratamientos de reducción foliar sobre la biomasa final promedio de los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*. 30

Capítulo 2. Período óptimo de enraizamiento en esquejes de genotipos superiores de *Gmelina arborea* Roxb., en vivero.

Contenido Página

Figura 1. (A) Separación de la planta en follaje y raíz, (B) Medición de la altura de las plantas, (C) Medición de la biomasa verde de la raíz..... 44

Figura 2. Efecto de los tratamientos sobre la biomasa verde al finalizar el periodo de enraizamiento de los esquejes de *Gmelina arborea*. 48

Figura 3. Efecto de los tratamientos sobre el porcentaje de enraizamiento de esquejes de *Gmelina arborea* 51

Figura 4. Modelo de regresión logística basado en el enraizamiento ~ Tratamiento + Diámetro ... 53

Figura 5. Modelo de regresión logística basado en la correlación entre el enraizamiento y diámetro 54

Figura 6. Modelo de regresión basado en la correlación entre el enraizamiento y biomasa verde de entrada 54

Figura 7. Distribución de la altura final de las plantas de *Gmelina arborea* según el número de días de enraizamiento 57

Figura 8. Modelo lineal general basado en la altura ~ Tratamiento + Diámetro (covariable) 60

Figura 9. Modelo lineal general basado en la altura ~ Tratamiento + Longitud (covariable): 60

Figura 10. Modelo lineal general basado en la altura ~ Tratamiento + Biomasa verde de entrada (covariable).....	61
Figura 11. Distribución de la biomasa seca final de las plantas de <i>Gmelina arborea</i> según el número de días de enraizamiento.	62
Figura 12. Efecto en el número de días de enraizamiento sobre la biomasa seca del sistema radicular, biomasa aérea y biomasa total de las plantas de <i>Gmelina arborea</i>	63
Figura 13. Modelo lineal general basado en la biomasa final ~ Tratamiento + diámetro (covariable)	67
Figura 14. Modelo lineal general basado en la biomasa final ~ Tratamiento + Longitud (covariable)	67
Figura 15. Modelo lineal general basado en la Biomasa final ~ Tratamiento + Biomasa verde de entrada (covariable)	68

ÁREA FOLIAR Y PERÍODO DE ENRAIZAMIENTO PARA LA PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE MELINA (*Gmelina arborea* Roxb.) EN VIVERO, LA PALMA DE PUERTO JIMÉNEZ, GOLFITO

1. RESUMEN GENERAL

Gmelina arborea es actualmente una de las especies de mayor utilización en la industria forestal costarricense, debido a su capacidad para reproducirse vegetativamente, rápido crecimiento, alta productividad, excelente capacidad de rebrote y facilidad de adaptarse a condiciones de sitios diversos. Sin embargo, a nivel de vivero es importante establecer los pasos por seguir en la producción de material vegetativo de alta calidad que será utilizado en futuras plantaciones. De manera que, el objetivo de la presente investigación fue determinar el área foliar adecuada y establecer el periodo óptimo de enraizamiento en la propagación vegetativa de clones superiores de *Gmelina arborea* dentro de túneles de enraizamiento. Se realizaron dos ensayos consecutivos, en los cuales se utilizaron clones de melina 5, 6 y 9, de los cuales se obtuvo esquejes apicales y se colocaron en túneles de enraizamiento. En el primer ensayo los tratamientos aplicados consistieron en la reducción del área foliar (8, 12, 16 y 20 cm²), y, en el segundo ensayo se evaluaron cuatro periodos de enraizamiento (9, 12, 15 y 18 días). Las variables evaluadas fueron cuatro: porcentaje de enraizamiento, altura final, área foliar final y biomasa total de las plantas. Se realizaron análisis de varianza, pruebas de medias Tukey ($\alpha = 0,05$) y coeficiente de correlación de Pearson, con el software estadístico InfoStat; se aplicó regresión logística basada en modelos según el Criterio de Información de Akaike mediante el software estadístico "R". En el ensayo 1 se reportó un enraizamiento promedio de 75,8 %, influenciado por el diámetro y biomasa verde, los cuales reportaron 78% de correlación. Los tratamientos de 16 cm² y 20 cm² presentaron mejores resultados en el porcentaje de enraizamiento y altura de las plantas. Se hallaron diferencias significativas entre los tratamientos, en las variables área foliar final y biomasa total, y fue el tratamiento de 20 cm² el que presentó mayor valor para ambas variables. EL clon 5 presentó mejores resultados en el área foliar y biomasa total. En el ensayo 2, se obtuvo en promedio 98% de enraizamiento; el tratamiento a los 15 días logró 100% de enraizamiento, sin embargo, no se presentaron diferencias significativas. La altura media de las plantas arrojó diferencias significativas; a los 15 días reportó mayor crecimiento (9,71 cm), pero después de este período disminuyó en un 7%. El tratamiento de 15 días registró mayor biomasa seca total, sin embargo, únicamente se indicaron diferencias estadísticas con el tratamiento de 18 días. La biomasa seca total señaló diferencias estadísticas en los clones, siendo el clon 9 el de mayor promedio (0,27 g). En general, el área foliar de 20 cm² y el periodo de enraizamiento de 15 días influyeron positivamente en la propagación vegetativa de clones de melina.

LEAF AREA AND ROOTING PERIOD FOR VEGETATIVE PROPAGATION MELINA (*Gmelina arborea* Roxb.) IN NURSERY, LA PALMA OF PUERTO JIMÉNEZ, GOLFITO

2. GENERAL ABSTRACT

Gmelina arborea is currently one of the species most utilized in Costa Rican forest industry due to amazing characteristics such as the ability to easily reproduce, fast growth, high productivity, excellent reborte capacity and adaptiveness to an acceptable variety of weather and landscape conditions. This species' s nursery level is important to establish the next steps in the production of high-quality plant material that will be used in future badges of production, therefore the objective of this research is to determine the appropriate leaf area, and set the optimum period of rooting in the vegetative propagation of superior clones of *Gmelina arborea* in rooting tunnels. We applied two consecutive tests, in which Melina clones 5, 6 and 9, which apical cuttings were obtained and placed in rooting tunnels were used were made. In the first trial the treatments applied consisted in reducing the leaf area (8, 12, 16 and 20 cm²), furthermore in the second trial rooting four periods (9, 12, 15 and 18 days) were evaluated. The variables evaluated were: percentage of rooting, final height, final leaf area and total biomass of plants. analysis of variance, Tukey means tests ($\alpha = 0.05$) and Pearson correlation coefficient with statistical software InfoStat was performed, based on logistic regression models were applied according to the Akaike Information Criterion using the statistical software "R ". In Study 1, an average of 75.8% rooting, influenced by the diameter and green biomass, which reported 78% correlation. There were also Treatments of 16 cm² and 20 cm² which showed better results in the rooting percentage and plant height. We were able to observe significant differences between treatments which reported in variable end leaf area and total biomass, with 20 cm² treatment presented the highest value for both variables. The Clone 5 variable presented better results in leaf area and total biomass. In trial 2, it was obtained on average 98% rooting, treatment at 15 days 100% rooting obtained, however, no significant differences were presented. The average height of the plants showed significant differences at 15 days reported higher growth (9.71 cm), after this period decreased by 7%. The Treatment of 15 days reported an increase of total dry biomass, however, only this experiment showed statistical difference with the treatment of 18 days. The total dry biomass showed statistical differences in the clones, with the clone 9, the highest average (0.27 g). In general, the leaf area of 20 cm² and rooting period 15 days positively influenced the vegetative propagation of clones of Melina.

3. INTRODUCCIÓN GENERAL

Las plantaciones forestales en los últimos años se han convertido en la principal fuente de madera en Costa Rica con un 73.7% (ONF, 2011); parte importante del desarrollo exitoso de las plantaciones es la alta productividad de la mismas, la cual depende en gran medida del nivel de calidad de las plántulas provenientes de los viveros (Gomes, Couto, Leite, Xavier, y García, 2002). Es por ello que el mejoramiento genético se ha orientado a la clonación de especies de interés comercial, con el fin de aumentar las ganancias genéticas y acelerar los ciclos de cosecha de las especies forestales (Murillo y Badilla, 2005).

Gmelina arborea Roxb, es una de las especies de rápido crecimiento que mayormente ha sido establecida en sistemas de producción forestal, ya sea en plantaciones puras o en distintos arreglos de sistemas agroforestales, en las regiones tropicales y sub-tropicales; lo anterior, debido principalmente a su acelerada tasa de crecimiento y productividad, retorno de la inversión y posibilidades de transformación de su madera (Ávila, Murillo, Murillo y Sandoval, 2015; Dvorak, 2004; Rojas y Murillo, 2004; Rojas, Arias, Moya, Meza, Murillo y Arguedas, 2004; Araya, Murillo, Aguilar y Rocha, 2005; Indira, 2006).

En la actualidad la melina (*Gmelina arborea* Roxb.) es la especie forestal que más se comercializa en Costa Rica y es de las más utilizadas en plantaciones, por su facilidad de propagar vegetativamente, capacidad de enraizamiento, adaptabilidad a gran cantidad de sitios y por la versatilidad de la madera, en la elaboración de productos primarios y secundarios, principalmente en la fabricación de material de embalaje, para la industria de construcción y para la fabricación de muebles (Cardoza, 2009; ONF, 2014, Rojas *et al.*, 2004, Rojas, 2005 y Solano, 2010). La melina ha estado en el mercado de nuestro país desde hace más de 15 años, siendo una de las especies de mayor conocimiento en el procesamiento y comercialización de la madera (Serrano y Moya, 2011).

A nivel de vivero, Murillo y Guevara (2013) reportaron que la melina fue la especie de mayor producción en los viveros forestales de Costa Rica en el 2012, con casi

un 50% de los 7 millones (aproximadamente) de plantas producidas en ese año y posiblemente la de mayor tasa de plantación nacional con fines comerciales. Pese a la importancia que tiene la especie en nuestro país, no se cuenta con información detallada y actualizada de su reproducción vegetativa, con el fin de estandarizar los procesos durante el enraizamiento de los esquejes de melina para mejorar y garantizar la productividad y calidad de material clonal en la cantidad y calidad necesaria (Ávila, 2013 y Moraes, Fonseca y Rui, 2014).

Conocer los procesos que intervienen en la producción de plántulas ayuda a mejorar los factores productivos y de calidad de las mismas (Moraes *et al.*, 2014); es importante definir las técnicas apropiadas para el enraizamiento, lo cual está en función de factores ambientales y propios de los esquejes. Actualmente, la propagación vegetativa por esqueje es el principal medio de reproducción de la melina, la cual es considerada una de las principales técnicas de propagación de plántulas debido a la aplicabilidad técnica, operación y menor costo de producción (Xavier, Wendling y Da Silva, 2009), convirtiéndose en una herramienta importante para aumentar la competitividad y productividad (Rodríguez, Xavier, Silva, Amaral y Rosado, 2011). El enraizamiento de las plantas es una variable por considerar, ya que define mejor la viabilidad económica en los viveros (Campos, Pereira, Saraiva, Graziotti y De Barros, 2010).

Se entiende por estaca o esqueje una porción de la planta que se colecta y la misma es capaz de adquirir autonomía fisiológica bajo condiciones ambientales favorables (Gárate, 2010). Dicho proceso reproductivo es fundamental en la propagación vegetativa de muchas especies forestales (Fett, Fett, Vieira, Pasquali, Termignoni, 2001 y Ferreira, Alfenas, Goncalves, García, Cardoso y Penchel, 2004), es decir en la reproducción clonal de genotipos seleccionados por sus características superiores (Xavier *et al.*, 2009).

El enraizamiento de esquejes está relacionado con una serie de factores, entre los que se destacan la constitución genética (Alfenas, Zauza, Mafía y Assis, 2004), la juventud del jardín clonal, condiciones ambientales (iluminación, temperatura,

humedad relativa), el medio de enraizamiento y uso de tratamientos hormonales (Xavier *et al.*, 2009; Muñoz, Vargas, López y Soto, 2009). Adicionalmente, existen otros factores importantes de tomar en cuenta en el proceso de enraizamiento de esquejes, como el manejo de la planta madre con el fin de obtener brotes juveniles, su estado nutricional, la época de la cosecha, el diámetro del esqueje, la longitud de los esquejes y la presencia de hojas y yemas (Gárate, 2010).

En el periodo de enraizamiento es de vital importancia determinar el área foliar óptima para que las plantas puedan desarrollarse exitosamente, al ser las hojas quienes sintetizan los carbohidratos que serán repartidos en los diferentes órganos de la planta (Meza y Bautista, 1999). Hartmann, Kester, Davies y Geneve (2011) apuntan que, la reducción de la biomasa foliar ejerce una fuerte influencia en la estimulación del proceso de enraizamiento de los esquejes. En ese mismo sentido, las hojas son las encargadas de transportar auxinas y carbohidratos hasta la base de los esquejes, de ahí la influencia directa y significativa en el inicio del enraizamiento (Gárate, 2010). Entre los objetivos de la reducción del área foliar se encuentran evitar el efecto "paraguas", el cual podría perjudicar la eficiencia del riego y provocar exceso de transpiración de las plantas; además de propiciar un mayor equilibrio entre los efectos positivos y negativos de la fotosíntesis y la transpiración, mediante el intercambio gaseoso (Campos *et al.*, 2010).

Se han realizado esfuerzos para desarrollar nuevas técnicas de enraizamiento de esquejes juveniles, con el fin de obtener material seleccionado a corto plazo que cumpla las características necesarias para aumentar la producción y la productividad (Díaz, 1991). A nivel del proceso productivo, es indispensable definir el número de días óptimo que los esquejes deben permanecer dentro del enraizador, ya que cada día posterior a ese lapso, representa un costo que no será cubierto con mayor calidad de las plantas; al contrario, los esquejes enraizados cada vez tendrán raíces más débiles, suculentas y escasas (Mesén, 1998 y Gárate, 2010). El período que los esquejes deben permanecer en los túneles de enraizamiento varía para cada especie, y está directamente relacionado con su velocidad de enraizamiento. En la mayoría de las especies forestales el

enraizamiento de los esquejes se cumple entre los 30 y 50 días (Rojas, García y Alarcón, 2004; Gárate, 2010).

El uso de jardines clonales permite la propagación intensiva de rebrotes que serán utilizados en el proceso de enraizamiento (Xavier y da Silva, 2010). Se requiere producir plantas con alta calidad genética y fisiológica, para lograr el éxito de plantaciones forestales. Además, para que un vivero funcione de la mejor manera, este debe: a) Producir en tiempo, la cantidad suficiente de plantas para satisfacer la demanda, b) producir plantas sanas y de buena calidad genética y fisiológica y c) lograrlo al menor costo posible (Meza, Ruiz y Navejas, 2009).

Al ser la melina una especie de gran importancia y ante los problemas citados anteriormente, que se presentan en los viveros, la presente investigación tuvo como objetivo determinar el área foliar adecuada y establecer el periodo óptimo de enraizamiento en la propagación vegetativa de clones superiores de *Gmelina arborea* dentro de túneles de enraizamiento.

Se desarrollaron dos capítulos para cumplir con el objetivo de la investigación: el primero consistió en determinar el área foliar adecuada para garantizar el enraizamiento y mejor desarrollo de esquejes de melina dentro de túneles de enraizamiento; y en el segundo, se estableció el período óptimo que los esquejes de melina deben permanecer en los túneles de enraizamiento para aumentar la producción en cantidad y calidad de las plantas. Ambos capítulos se elaboraron bajo las normas de publicación de la Revista Forestal Mesoamericana Kurú.

4. REFERENCIAS

- Alfenas, A., Zauza, E., Mafía, T. y Assis, T. (2004). Clonagem e doenças do eucalipto. Vicososa, 442.
- Araya, E., Murillo, O., Aguilar, G. y Rocha, O. (2005). Relaciones genéticas en una colección de clones de *Gmelina arborea* (Roxb) reveladas con marcadores AFLP. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 2 (6), 1-14.
- Ávila, C. (2013). Selección temprana de clones de *Gmelina arborea* Roxb. con base en su comportamiento fisiológico en vivero versus plantación, en el Pacífico Sur de Costa Rica. (Tesis de maestría). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Ávila, C., Murillo, R., Murillo, O. y Sandoval, C. (2015). Interacción genotipo sitio para dos conjuntos clonales de *Gmelina arborea* Roxb., en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 12 (29), 02-14.
- Campos, R., Pereira, T., Saraiva, G., Graziotti, P. y De Barros, N. (2010). Influence of leaf area reduction on clonal production of Eucalyptus seedlings. *Cerne*, 16(3): 251-257.
- Cardoza, F. (2009). Determinación de la rentabilidad de la producción de madera de la especie *Gmelina arborea*. Economía e inversiones forestales y agroforestales en el trópico. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Díaz, E. (1991). Técnicas de enraizamiento de estacas juveniles de *Cedrela odorata* L. y *Gmelina arborea* Linn. (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Dvorak, W. (2004). World view of *Gmelina arborea*: opportunities and challenges. *New Forests*, 28, 111-126.
- Ferreira, E., Alfenas, A., Goncalves, R., García, H., Cardoso, R. y Penchel, R. (2004). Determinação do tempo ótimo do enraizamento de miniestacas de clones de *Eucalyptus* spp. Revista *Árvore*, 28 (2), 183-187.
- Fett, A., Fett, J., Vieira, L., Pasquali, G., Termignoni, R. y Ferreira, A. (2001). Distinct effects of auxin and light on adventitious root development in *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus globules*. *Tree Physiology*, 21, 457-464.
- Gárate, M. (2010). Técnicas de propagación por estacas. Ucayali, Perú: Universidad Nacional de Ucayali.
- Gomes, J., Couto, L., Leite, H., Xavier, A., y García, S. (2002). Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. Revista *Árvore*, 26 (6), 655-664.
- Hartmann, H., Kester, D., Davies, F. y Geneve, R. (2011). Plant propagation. Principles and practices. 8th ed. Boston, US. Prentice Hall. 915 p.

- Indira, E. (2006). Provenance variations in *Gmelina arborea* with particular reference to tree form. *Journal of Tropical Forest Science*, 18 (1), 36-50 pp.
- Mesén, F. (1998). Enraizamiento de estacas juveniles de especies forestales: uso de propagadores de sub-irrigación. CATIE. Proyecto de Semillas Forestales-PROSEFOR, (Serie Técnica. Manual Técnico No. 30). Turrialba, Costa Rica. 36 p.
- Meza, N. y Bautista, D. (1999). Estimación del área foliar en plantas jóvenes de níspero (*Manilkara achras* [Miller] Fosberg) sometidas a dos ambientes de luz. *Bioagro*, 11(1): 24-28.
- Meza, R., Ruiz, F. y Navejas, J. (2009). Guía para la producción de planta y plantación con especies nativas. La Paz, México. Consultado 12 agosto 2015. Recuperado de: <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1628/Guia%20para%20la%20produccion%20de%20planta%20y%20plantacion%20con%20especies%20nativas.pdf?sequence=1>
- Moraes, C., Fonseca, R. y Rui, M. (2014). Influencia das folhas no enraizamento de miniestacas de híbridos de eucalipto. *Nucleus*, 11(1): 101-106.
- Muñoz, L., Vargas, J., López, J. y Soto, M. (2009). Effect of cutting age and substrate temperature on rooting of *Taxus globosa*. *New forests*, 38, 187-196.
- Murillo, O. y Badilla, Y. (2005). Propagación vegetativa de la teca en Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica: Cartago, Costa Rica.
- ONF. (2011). Usos y aportes de la madera en Costa Rica, Estadísticas 2011. Heredia, Costa Rica: ONF.
- ONF. (2014). Usos y aportes de la madera en Costa Rica: Estadísticas 2014. Heredia, Costa Rica: ONF.
- Rodrigues, S., Xavier, A., Silva, L., Amaral, L. y Rosado, A. (2011). Enraizamiento de miniestacas de clones híbridos de *Eucalyptus globulus*. *Revista Árvore*, 35 (3), 425-434.
- Rojas, F. (2005). Principales especies forestales introducidas en Costa Rica. *Kurú (Costa Rica)*, 2 (4): 1-13.
- Rojas, F. y Murillo, O. (2004). Botánica y ecología. En: Manual para productores de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O. y Arguedas, M. (2004). Manual para productores de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica: Botánica y ecología. Cartago, Costa Rica: ITCR.
- Serrano, R y Moya, R. (2011). Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú (Costa Rica)*, 8 (21): 1-12.

Solano, G. (2010). Caracterización molecular de clones de *Gmelina arborea* mediante el uso de marcadores moleculares AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphism). (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana: Bogotá, Colombia.

Xavier, A., Wendling, A. y Da Silva, R. (2009). Silvicultura clonal: princípios e técnicas. Vicoso, Brasil: Universidade Federal de Vicoso.

Xavier, A. y da Silva, R. (2010). Evolução da silvicultura clonal de *Eucalyptus* no brasil. *Agronomía Costarricense*, 34 (1): 93-98.

5. ARTÍCULOS COMPLETOS

5.1 Influencia del área foliar remanente sobre el enraizamiento en esquejes de genotipos superiores de *Gmelina arborea* Roxb.

Juan Pablo Villegas Espinoza¹

Rafael Murillo Cruz²

Carlos Ávila Arias³

William Hernández Castro⁴

Resumen

Se determinó el área foliar adecuada para el enraizamiento y mejor desarrollo de esquejes de *Gmelina arborea* dentro de túneles de enraizamiento. La melina es actualmente una de las especies de mayor utilización en la industria forestal costarricense debido a su rápido crecimiento y variedad de usos. Se utilizaron esquejes apicales de clones de melina número 5, 6 y 9, y se colocaron en túneles de enraizamiento. Los tratamientos aplicados consistieron en reducción del área foliar (8, 12, 16 y 20 cm²), la cual fue medida a partir de moldes de hojas de plástico cuadrículadas. A las 3 semanas se evaluaron las variables: porcentaje de enraizamiento, altura final, área foliar final y biomasa total de las plantas. Se realizó análisis de varianza, pruebas de medias Tukey ($\alpha = 0,05$) y coeficiente de correlación de Pearson, con el software estadístico InfoStat; se aplicaron modelos de regresión logística mediante el software estadístico "R". Se reportó un enraizamiento promedio de 75,8 %, influenciado por el diámetro y biomasa verde, los cuales reportaron 78% de correlación. Los tratamientos de 16 cm² y 20 cm² presentaron mejores resultados en el porcentaje de enraizamiento y altura de las plantas. Se reportaron diferencias significativas entre los tratamientos, en las variables área foliar final y biomasa total, siendo el tratamiento de 20 cm² el que presentó mayor valor para ambas variables. EL clon 5 arrojó mejores resultados en área foliar y biomasa total. El área foliar de 20 cm² mostró resultados satisfactorios para mejorar la calidad del proceso de enraizamiento.

Palabras claves: *Gmelina arborea*, Área foliar, Enraizamiento, Esqueje, Clon, Costa Rica.

¹ Universidad Nacional, Escuela de Ciencias Ambientales; Heredia, Costa Rica; juan.villegas.espinoza@una.cr

² Universidad Nacional, Instituto de Investigación y Servicios Forestales; Heredia, Costa Rica; murillorafael5454@yahoo.com

³ Universidad Nacional, Instituto de Investigación y Servicios Forestales; Heredia, Costa Rica; carloshenriquea79@gmail.com

⁴ Universidad Nacional, Instituto de Investigación y Servicios Forestales; Heredia, Costa Rica; william.hernandez.castro@una.cr

Abstract

To determine if the leaf area is necessary to ensure the better development of root cuttings for *Gmelina arborea* in their rooting tunnels. Melina is currently one of the most utilized species in Costa Rica's forestry industry due to its rapid growth, variety of uses and quick return in investment. In the interest of this investigation we used Melina clones 5, 6 and 9 with apical cuttings, which were obtained and placed in embedded tunnels. The treatment consisted in reducing the leaf area (8 cm², 12 cm², 16 cm² and 20 cm²) by measuring the graph paper molds. The evaluation criteria items were Rooting percentage, final height, final leaf area and total biomass of plants within 3 weeks of rooting variables. There were different measuring methods such as ANOVA, Tukey mean test ($\alpha = 0,05$) and Pearson correlation coefficient with statistical software InfoStat that were applied based on logistic regression by using the statistical software "R". Rooting average 75.75% influenced by the diameter and green biomass, reporting 78% correlation was reported, and also treatments of 16 cm² and 20 cm², which showed more conclusive results in variable rooting and plant height percentages. Significant differences between treatments were reported in variable end leaf area and total biomass with 20 cm² treatment presented the highest value for both variables. Clone 5 was the one that presented the best results in the variables leaf area and total biomass. The leaf area of 20 cm² showed good results to improve the quality of the rooting process.

Keywords: *Gmelina arborea*, Leaf area, Rooting, Cutting, Clone, Costa Rica.

Introducción

En la actualidad la melina (*Gmelina arborea* Roxb.) es la especie forestal que más se comercializa en Costa Rica y es de las más utilizadas en plantaciones, por su rápido crecimiento, adaptabilidad a gran cantidad de sitios y por la versatilidad de la madera, en la elaboración de productos primarios y secundarios, principalmente en la fabricación de material de embalaje, para la industria de construcción y para la fabricación de muebles (Cardoza, 2009; ONF, 2014 y Rojas, 2005). La melina ha estado en el mercado de nuestro país desde hace más de 15 años, siendo una de las especies de mayor conocimiento en el procesamiento y comercialización de la madera (Serrano y Moya, 2011).

A nivel de vivero, Murillo y Guevara (2013) reportaron que la melina fue la especie de mayor producción en los viveros forestales de Costa Rica en el 2012, con casi un 50% de los 7 millones (aproximadamente) de plantas producidas en ese año. Pese a la importancia que tiene la especie en nuestro país, no se cuenta con información detallada de su reproducción vegetativa, con el fin de estandarizar los procesos durante el enraizamiento de los esquejes o estacas de melina. Por esta razón es fundamental conocer la fase de reproducción en vivero de esta especie para mejorar la productividad y calidad de la misma (Ávila, 2013); el enraizamiento de las plantas es una variable por considerar, ya que define mejor la viabilidad económica en los viveros (Campos, Pereira, Saraiva, Graziotti y De Barros, 2010).

En el periodo de enraizamiento es de vital importancia determinar el área foliar óptima para que las plantas puedan desarrollarse exitosamente, al ser las hojas las que sintetizan los carbohidratos, los cuales serán repartidos en los diferentes órganos de la planta (Meza y Bautista, 1999). Hartmann, Kester, Davies y Geneve (2011) apuntan que, la reducción de la biomasa foliar ejerce una fuerte influencia en la estimulación del proceso de enraizamiento de los esquejes. En ese mismo sentido, las hojas son las encargadas de transportar auxinas y carbohidratos hasta la base de los esquejes, de ahí la influencia directa y significativa en el inicio del enraizamiento (Gárate, 2010). Lo anterior evidencia que, la presencia de cierta área foliar en los esquejes es un factor clave para un óptimo enraizamiento.

Entre los objetivos de la reducción del área foliar se encuentran, evitar el efecto "paraguas", el cual podría afectar la eficiencia del riego y provocar exceso de transpiración de las plantas; además, propiciar un mayor equilibrio entre los efectos positivos y negativos de la fotosíntesis y la transpiración, mediante el intercambio gaseoso (Campos *et al.*, 2010 y Gárate, 2010). Por otra parte, Díaz (1991), agrega que la presencia de hojas puede causar desecación de los esquejes y causar la muerte, sin embargo, las hormonas que se sintetizan en las hojas pueden contribuir a la formación de raíces. La pérdida de agua por transpiración en los esquejes es una de las principales causas que ocasiona la muerte de las plantas antes de la formación de raíces; este problema radica en que no se tiene un mecanismo para estandarizar ni homogeneizar la cantidad de área foliar con que se está trabajando a nivel de vivero (Noberto, Chalfun, Pasqual, Veiga, Pereira y Mota, 2001).

Para minimizar los efectos negativos en el proceso de enraizamiento, Alfenas, Zauza, Mafía, y Assis (2004), recomiendan reducir en una tercera parte la lámina total de la hoja de los esquejes. Por otra parte, Xavier, Wendling y Da Silva (2009) señalan que en la producción clonal de eucalipto lo más común es reducir el área foliar en un 50 %. En el caso de la teca, en el protocolo de propagación vegetativa realizado por Murillo y Badilla (2005), a los esquejes se les eliminó $\frac{1}{4}$ de la lámina foliar obteniendo más de 70% de enraizamiento. En melina, Rojas *et al.* (2004) plantea dejar solo una hoja del esqueje y reducir $\frac{1}{5}$ de su lámina, sin embargo, no se ha determinado cuál debería ser la reducción óptima de la lámina en los esquejes.

En general, durante el proceso de enraizamiento, el porcentaje óptimo en la reducción del área foliar varía para cada especie (Mesén, 1998); información que actualmente no se conoce para la melina. Queda evidenciada la importancia de conocer el efecto del tamaño de la lámina foliar en enraizamiento de esquejes provenientes de clones superiores en calidad de melina. Por tal razón, el presente estudio tuvo como objetivo determinar el área foliar óptima para garantizar el enraizamiento y mejor desarrollo de los esquejes de *G. arborea* dentro de los túneles de enraizamiento.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el vivero de reproducción vegetativa de especies forestales del Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional de Costa Rica (INISEFOR-UNA); como se puede indicar, se cuenta con un invernadero y túneles de enraizamiento con las condiciones adecuadas para la reproducción vegetativa de genotipos de melina.

El vivero se ubica en el cantón de Golfito, distrito Puerto Jiménez, localidad La Palma (entre las coordenadas geográficas N 8°36'49" y W 83°26'10"), Puntarenas, Costa Rica. La precipitación media anual varía entre 3500 y 4000 mm; se encuentra en el piso basal tropical de 0 a 500 m s.n.m., con una temperatura media anual de 24 a 28°C (Kappelle y Castro, 2002) y en la zona de vida, bosque muy húmedo premontano, transición a basal de acuerdo con la clasificación de Holdridge (Bolaños y Watson, 1993).

Descripción de la investigación

Se redujo el área foliar de los esquejes de melina en diferentes proporciones, dos días antes de ser cosechados y colocados en los túneles de enraizamiento (Villegas, Murillo, Ávila y Hernández, 2012). Para la reducción del área foliar, se utilizó como referencia el experimento realizado por Ofori, Newton, Leakey y Grace (1996) y Shiembo, Newton y Leakey (1996). Para tal efecto se utilizaron moldes elaborados con láminas cuadrículadas, transparentes, de plástico, y de diferentes tamaños, según cada tratamiento establecido (figura 1).



Figura 1. (A) Moldes correspondientes a las áreas foliares evaluadas, (B) Procedimiento para la reducción del área foliar de los esquejes, (C) Área foliar reducida.

Se utilizaron únicamente esquejes apicales (Murillo y Badilla, 2005), seleccionados aleatoriamente en el jardín clonal, de los clones 5, 6 y 9 provenientes del Programa de Investigación y Extensión de la Zona Sur del INISEFOR-UNA.

Una vez cosechados los esquejes, se cortaron a una medida estándar de 8 cm, se pesaron para obtener biomasa verde, luego se les aplicó Acido Indol-Butírico con una concentración de 3000 ppm e inmediatamente se colocaron en un jiffy y se introdujeron en los túneles de enraizamiento. En el proceso desde la cosecha hasta la colocación en jiffy de cada esqueje, se mantuvieron secos para evitar cualquier tipo de contaminación, por ejemplo, por medio de la savia; dicho procedimiento fue rápido para evitar su deshidratación. Mantener un buen control de temperatura, humedad, iluminación y estrés hídrico, durante la manipulación de los esquejes, es indispensable para lograr un adecuado enraizamiento (Soto, 2004, Murillo y Badilla, 2005).

Diseño experimental

El ensayo contó con cuatro repeticiones (4 túneles de enraizamiento); cada repetición se convirtió en un bloque completo al azar. En cada bloque se evaluaron 120 esquejes (30 esquejes por cada tratamiento, de los cuales 10 eran de cada uno de los clones mencionados anteriormente). Es decir, cada repetición fue de 120 esquejes, para un total de 480 plantas que se evaluaron en el ensayo. La dimensión de cada túnel de enraizamiento fue de 7 metros de largo por 1,20 metros de ancho (área 8.4 m²).

Variables independientes

Las variables independientes o de clasificación evaluadas fueron los tratamientos de reducción del área foliar, a saber:

- Tratamiento 1: Reducción del área foliar de los esquejes a 8 cm²
- Tratamiento 2: Reducción del área foliar de los esquejes a 12 cm²
- Tratamiento 3: Reducción del área foliar de los esquejes a 16 cm²
- Tratamiento 4: Reducción del área foliar de los esquejes a 20 cm²

Variables dependientes

Se clasificaron en dos grupos: datos de entrada (para cada esqueje se midió la longitud total, diámetro en la base y biomasa verde) y datos de salida (para cada planta se determinó el porcentaje de enraizamiento, altura final, área foliar final, biomasa verde y seca aérea y de raíz y biomasa total).

Datos de entrada: Proceso realizado previo al enraizamiento de los esquejes.

- **Longitud:** Los esquejes se trabajaron con una longitud estándar de 8 cm.
- **Diámetro:** Se midió el diámetro en la base de cada esqueje con un vernier digital.
- **Biomasa verde:** Se determinó el peso verde de cada esqueje con una balanza digital (precisión de 0,0 g).

Datos de salida: Posterior al enraizamiento, son las variables clave analizadas para determinar el mejor tratamiento.

1. Porcentaje de enraizamiento o sobrevivencia: Se determinó dividiendo la cantidad de plantas en las que se apreciaba sus raíces saliendo del jiffy, entre la totalidad del tratamiento y multiplicando ese dato por 100.

$$\% \text{ enraizamiento} = \frac{\text{Plantas enraizadas por tratamiento}}{\text{Total de plantas por tratamiento}} \times 100$$

2. Altura final de las plantas: Se midió la distancia desde el cuello de la raíz hasta la yema terminal o apical (figura 2).

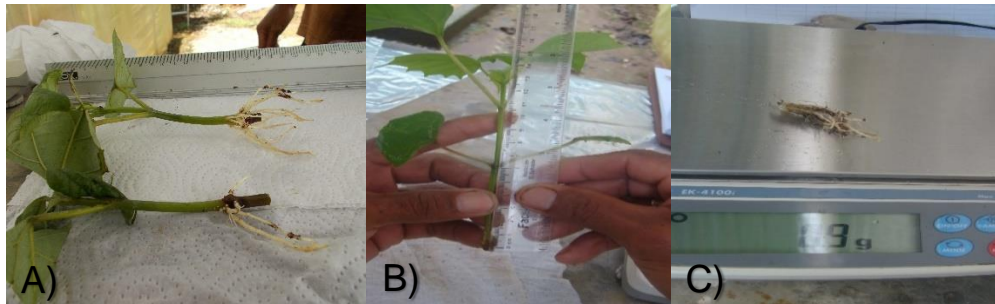


Figura 2. (A) Separación de la planta en follaje y raíz, (B) Medición de la altura de las plantas, (C) Medición del peso verde de la raíz.

3. Área foliar final: La biomasa foliar fue llevada al Laboratorio de Recursos Fitogenéticos de la Escuela de Agrarias de la Universidad Nacional (ECA-UNA) donde se determinó el área foliar final por medio de un escáner LI-COR Leaf area meter (LI-3100C).

4. Biomasa verde y seca total de las plantas: Una vez conocido el peso verde final de cada tejido por separado (follaje y raíz), las plantas se introdujeron en un horno de secado a una temperatura de 70° C hasta lograr peso constante. Luego con una balanza de precisión se procedió a cuantificar el peso seco de la biomasa aérea o follaje, radicular y total.

Análisis de datos

Se realizó mediante el software estadístico InfoStat, versión 2013. Para cada una de las variables de entrada se realizaron medidas estadísticas resumen y para las variables de salida un Análisis de varianza (ANOVA) y una Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para comparar las medias de los tratamientos y poder determinar dónde se encontraban las diferencias significativas entre ellos. Mediante la significancia estadística ($\alpha = 0,05$) se tuvo certeza que la diferencia observada entre dos o más tratamientos es el resultado del efecto del tratamiento y no del azar (Fallas, 2011).

La variable porcentaje de enraizamiento se analizó mediante el software estadístico “R” versión 3.1.0, 2014. Se utilizó la regresión logística basada en modelos mediante el Criterio de Información de Akaike (AIC, Akaike Information Criterion), el cual, trata de obtener el modelo que proporcione mejores predicciones entre los modelos existentes (Caballero, 2011). La selección del modelo que se ajustó mejor a los datos se realizó a partir del valor mínimo del AIC, el cual se trabajó a un 85% para lograr una mejor apreciación de los resultados (Vinuesa, 2008).

Además, se ejecutó un análisis de correlación de datos utilizando el coeficiente de Pearson, en el cual se midió el grado de asociación entre todas las variables dependientes e independientes del ensayo. Este análisis, proporciona información (dirección o sentido y cercanía o fuerza de la correlación) sobre la relación lineal entre dos variables (Lahura, 2003).

Resultados y discusión

Se presentan los estadísticos descriptivos para las variables de entrada, determinados de manera general y por clon (Cuadro 1 y 2, respectivamente) para los esquejes incluidos en la presente investigación.

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos para las variables de entrada determinados a los esquejes de *Gmelina arborea* previo al enraizamiento.

Variables de entrada	n	Media	D.E	C.V (%)
Diámetro (mm)	480	4,19	0,83	19,7
Biomasa verde (g)	480	2,21	0,86	38,8

DE: Desviación estándar, **CV:** Coeficiente de variación

El diámetro basal de los esquejes registró un valor promedio de 4,19 mm; el mismo varió entre 2,08 y 6,04 mm, además presentó un menor coeficiente de variación en comparación con el registrado para la biomasa verde. Tanto el diámetro como la longitud de los esquejes son factores determinantes en el proceso de enraizamiento, según Baggio (1982), citado por Díaz (1991); esto se debe al contenido de sustancias de reserva de los esquejes.

Por su parte, la variable biomasa verde presentó un coeficiente de variación mayor, explicado principalmente por las diferencias en los tratamientos de área foliar entre los esquejes. Dicho coeficiente de variación se reducirá significativamente utilizando esquejes de una longitud

homogénea (como los de la presente investigación), con diámetros, lo más uniformes posibles, mediante el manejo del jardín clonal y el mejor tratamiento de área foliar que se describirá en párrafos posteriores.

Se registró un valor mínimo y máximo para biomasa verde de 0,40 g y 5,40 g, respectivamente, con un valor promedio de 2,21 g. El 62,7% de los esquejes se concentraron entre 1,5 y 3 gramos (figura 3).

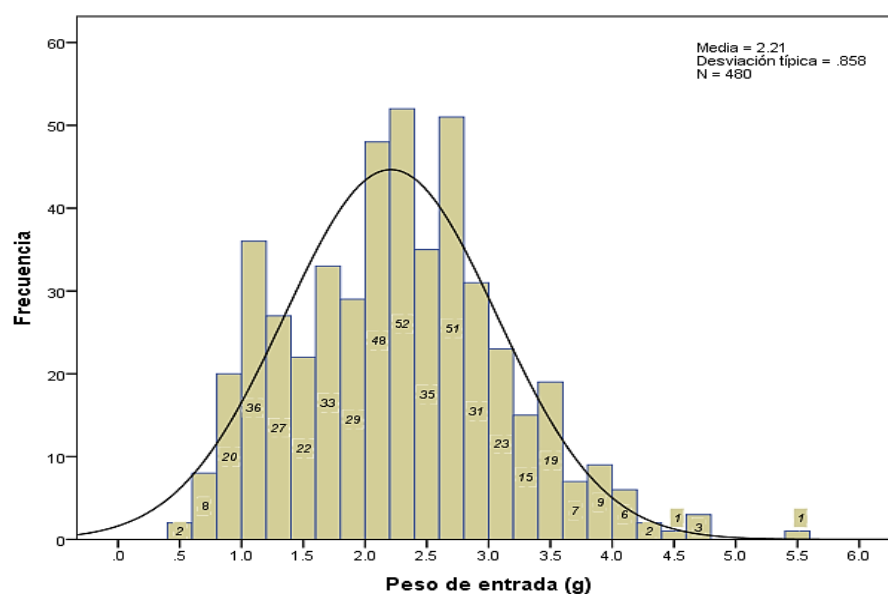


Figura 3. Histograma de biomasa verde para los esquejes de todos los tratamientos.

Se aprecia la típica distribución normal de los datos utilizados en la presente investigación, lo que brinda seguridad del análisis con estadística paramétrica.

Cuadro 2. Estadísticos descriptivos para las variables de entrada determinados a los esquejes de *Gmelina arborea* de cada clon previo al enraizamiento.

Clones	Variable	n	Media	DE	CV (%)
5	Diámetro (mm)	160	4,28	0,83	19,35
	Biomasa verde (g)		2,27	0,79	34,65
6	Diámetro (mm)	160	4,27	0,90	21,08
	Biomasa verde (g)		2,32	1,06	45,77
9	Diámetro (mm)	160	4,03	0,73	17,99
	Biomasa verde (g)		2,03	0,65	31,87

DE: Desviación estándar, CV: Coeficiente de variación

El diámetro promedio para los esquejes obtenidos de los 3 clones, varió entre 4,03 mm y 4,28 mm; el clon 5 registró el valor promedio mayor para dicha variable y el clon 9 el menor; sin embargo, la diferencia entre el clon 5 y el 9 fue de tan sólo 0,25 mm, es decir, el material que se cosecha del jardín de multiplicación, al menos para los clones evaluados, es muy homogéneo, explicado por el plan de manejo intensivo que se le da al jardín y el desarrollo de cada planta madre. Por otra parte, el coeficiente de variación para el diámetro fue muy similar para los tres clones (cuadro 2).

Con respecto a la biomasa verde, el clon 6 mostró un valor promedio mayor, muy similar al del clon 5; sin embargo, fue el que obtuvo el coeficiente de variación más alto. El clon 9 registró la media más baja en ambas variables evaluadas.

Se presenta el análisis estadístico sobre las variables: diámetro y biomasa verde para cada uno de los tratamientos evaluados (Cuadro 3).

Cuadro 3. Prueba de medias para el diámetro y la biomasa verde por cada tratamiento evaluado previo al enraizamiento de esquejes de *Gmelina arborea*.

Tratamiento	Diámetro (mm)		Tratamiento	Biomasa verde (g)	
	Media	CV (%)		Media	CV (%)
2	4,61 a	17,05	4	2,55 a	29,84
3	4,34 b	15,38	2	2,47 a	31,94
4	4,11 c	17,03	3	2,39 a	29,15
1	3,71 d	23,48	1	1,42 b	46,11

DE: Desviación estándar, **CV:** Coeficiente de variación

Se registraron diferencias significativas en cuanto al diámetro entre tratamientos, con una diferencia de 24,2 % entre los tratamientos que registraron el menor y mayor diámetro, tratamiento 1 y 2, respectivamente.

En el caso de la biomasa verde, era de esperarse que el tratamiento 4 registrara el valor mayor, y el tratamiento 1, el menor, debido propiamente a la cantidad de biomasa foliar que se le dejó a cada tratamiento; sin embargo, el orden de los tratamientos 2 y 3 no era lo esperado, ya que el tratamiento 2 fue el que presentó mayor diámetro en los esquejes utilizados, lo que finalmente lo ubicó por encima del tratamiento 3, en cuanto a biomasa verde.

De la misma manera, la selección al azar de los esquejes, expresada en el acomodo de los tratamientos en cuanto al diámetro, explica que no se registraran diferencias estadísticas entre los tratamientos 4, 2 y 3 en cuanto a biomasa, pero sí entre ellos y el tratamiento 1, por haber registrado también el valor menor en cuanto al diámetro.

Una vez analizadas las variables previo al enraizamiento, denominadas “de entrada”, a continuación se presentan los resultados en cuanto a parámetros registrados, posterior al enraizamiento (de salida), a saber: porcentaje de enraizamiento, altura final, área foliar final, biomasa verde y seca aérea y de raíz y biomasa total.

No se registraron diferencias significativas en cuanto al porcentaje de enraizamiento entre los tratamientos de reducción de biomasa foliar de los esquejes que se colocarían en los túneles de enraizamiento (figura 4). El enraizamiento se determinó en función de los esquejes que lograron enraizar al final del proceso.

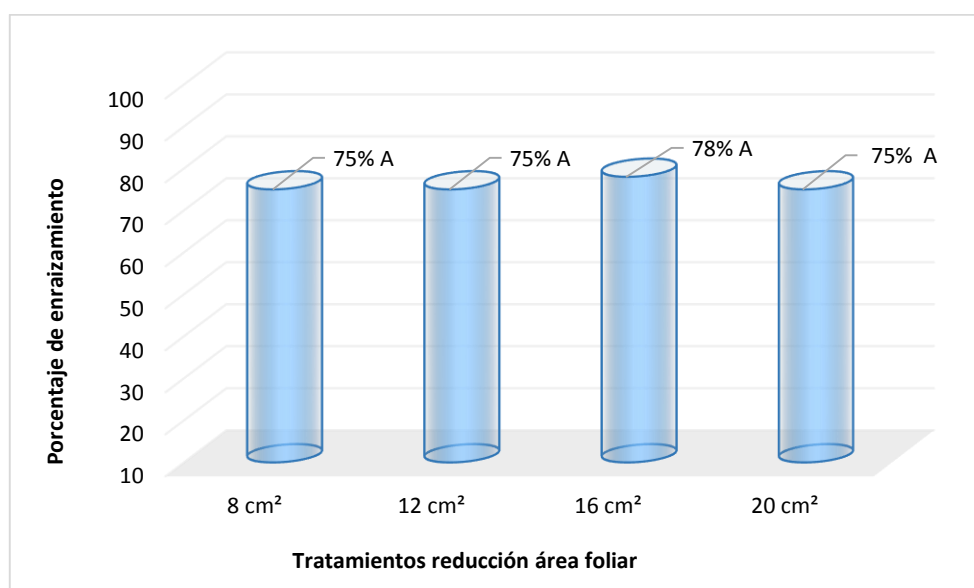


Figura 4. Efecto de cuatro áreas foliares sobre el porcentaje de enraizamiento de esquejes de *Gmelina arborea*. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Se obtuvo un promedio general de 75,75% de enraizamiento para los cuatro tratamientos; este promedio es mayor al obtenido por Ruiz (2005) para la misma especie de 70% de enraizamiento. En teca, Murillo y Badilla (2013), reportan porcentajes de enraizamiento entre 60 y 70% en jardines clonales; ese rango de porcentaje obtenido en jardines clonales fue superado en el presente estudio.

Sin embargo, Villegas *et al.* (2012) reportaron 97,80% de enraizamiento en melina, lo cual evidencia que se pueden obtener porcentajes de enraizamiento mayores.

Aunque estadísticamente no se registraron diferencias significativas, la reducción del área foliar de los esquejes de melina a 16 cm² previo a la cosecha (tratamiento 3), presentó el porcentaje de enraizamiento más alto, con 78%. La diferencia registrada entre el tratamiento con el mayor y menor enraizamiento fue de 3%, lo cual representa una diferencia de 4 plantas, cuya diferencia es muy poco significativa desde el punto de vista práctico en el proceso productivo del vivero cuando se trata de producción a pequeña escala; sin embargo, puede representar una diferencia importante en viveros de reproducción vegetativa que producen más de cien mil plantas anuales. Esa diferencia tan pequeña deja abierta la posibilidad de evaluar áreas foliares mayores en donde sí se pudiesen registrar diferencias significativas.

Díaz (1991) probó diferentes áreas foliares para el enraizamiento de melina (25, 50 y 100 cm²); en cuanto al área foliar de 50 cm², logró obtener el mayor porcentaje de enraizamiento y el de 25 cm² el menor (71% y 59%, respectivamente), sin llegar a registrar diferencias estadísticamente significativas. En ese mismo estudio, los autores no encontraron una relación directa entre el tamaño del área foliar de los esquejes y el porcentaje de enraizamiento, concordando con los resultados registrados en la presente investigación.

Tchoundjeu *et al.* (2002) lograron registrar un patrón entre el área foliar y el porcentaje de enraizamiento en su investigación con *Prunus africana*, donde evaluaron cinco áreas foliares (0, 5, 10, 20 y 25 cm²) para el enraizamiento de los esquejes; los resultados mostraron diferencias en el porcentaje de enraizamiento, ya que la capacidad para enraizar aumentó proporcionalmente al área foliar hasta los 20 cm² con un 79%, donde se estabilizó al obtener el mismo enraizamiento a los 25 cm² de área foliar.

Por su parte, Mesén (1998) reportó buenos resultados en el enraizamiento de varias especies forestales (*Acacia mangium*, *Albizia guachapele*, *Alnus acuminata*, *Cedrela odorata*, *Gmelina arborea*, *Swietenia macrophylla*, entre otras), utilizando áreas foliares entre 10 y 50 cm². Los anteriores resultados evidencian la influencia positiva que tiene la presencia de hojas y su tamaño en la estimulación del proceso de enraizamiento (Moraes, Fonseca y Rui, 2014). La influencia de la

biomasa foliar sobre el enraizamiento puede estar relacionado con la actividad fotosintética durante la propagación, ya que con menor área foliar, el proceso de fotosíntesis se reduce y por ende ocurre menor capacidad de enraizamiento; esta es una justificación más para conocer el área foliar mínima y máxima para lograr un porcentaje de enraizamiento óptimo (Mesén, Newton y Laekey, 1997).

Se probaron distintos modelos para una mejor explicación del porcentaje de enraizamiento. Se determinó que el modelo basado en el tratamiento +biomasa verde de entrada (g), es el que mejor se ajustó a los datos (cuadro 4). Vinuesa (2008) apunta que el modelo con menor AIC es el que presenta un mejor ajuste, a lo que Caballero (2011) agrega que el mejor modelo proporciona la aproximación más cercana a la realidad en estudio, en este caso, al proceso de enraizamiento. Por otra parte, un resultado que debe resaltarse es que los modelos basados solamente en el tratamiento o solamente en el clon o la combinación de ambas variables, son los que menos se ajustaron; es decir, son las variables que influyen en menor medida en el porcentaje de enraizamiento.

Lo anterior se deduce al no haberse registrado diferencias significativas en el porcentaje de enraizamiento entre tratamientos, y por la homogeneidad de la base genética utilizada para seleccionar los tres clones evaluados.

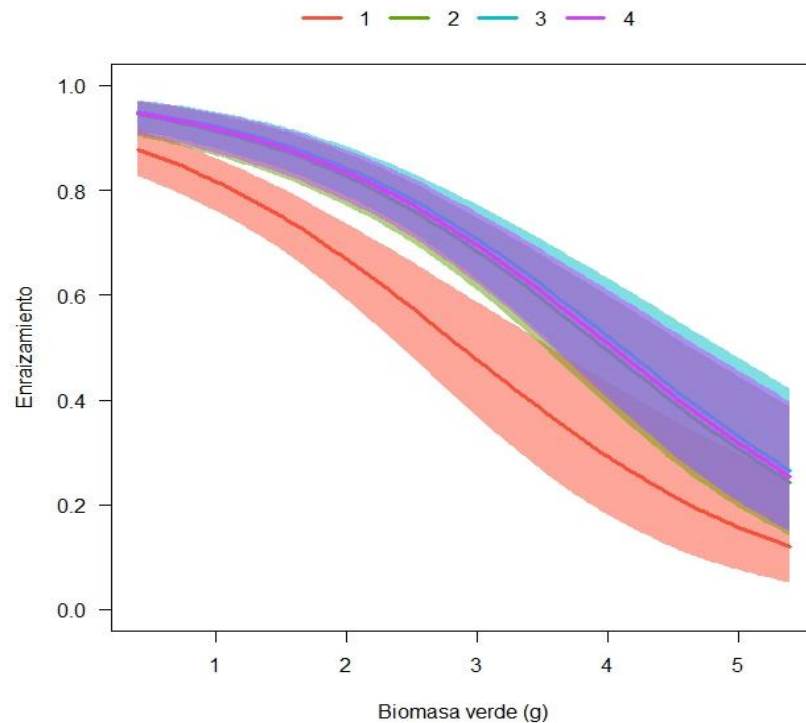
Cuadro 4. Modelos estadísticos explicativos basados en el enraizamiento de esquejes de *Gmelina arborea* según AIC.

Modelo	AIC	D. AIC	K	Peso de Akaike
Tratamiento + biomasa verde de entrada	511,5	0	5	0,355
Tratamiento+ biomasa verde de entrada + Diámetro	512	0,5	6	0,276
Clon+ Diámetro + biomasa verde de entrada+ Tratamiento	512,8	1,3	8	0,182
Diámetro + biomasa verde de entrada	514,1	2,4	3	0,093
Diámetro	514,7	3,2	2	0,072
Biomasa verde de entrada	514,7	3,3	2	0,069
Tratamiento + Diámetro	515,5	4,1	5	0,047
Clon	535,7	24,2	3	<0,001
Tratamiento	538,3	26,8	4	<0,001
Tratamiento +Clon	541,1	29,6	6	<0,001

AIC: Criterio de Información de Akaike (AIC, por sus siglas en inglés), **D. AIC:** Diferencia de AIC entre el mejor modelo y los demás; **K:** Es el número de parámetros independientes estimados dentro del modelo; **Peso de Akaike:** La probabilidad de que sea el mejor modelo.

El mejor modelo presentó un 35,5 % de probabilidad de ajustarse a los datos, según el peso de Akaike, con una diferencia de 7,9 % por encima del segundo mejor modelo, el cual considera las mismas variables del mejor modelo, pero incluye el diámetro (mm) de entrada de los esquejes a los túneles de enraizamiento. Lo anterior representa que, la biomasa verde tiene influencia en el enraizamiento, comparado con el tratamiento como tal.

Al respecto, el tratamiento de 8 cm² fue el que mostró menor porcentaje de enraizamiento, ligado directamente a la biomasa verde de entrada de los esquejes y a los tratamientos de 12, 16 y 20 cm² que mostraron mayor enraizamiento. De esta manera, áreas foliares iguales o menores de 8 cm² pueden disminuir el porcentaje de enraizamiento, ya que la biomasa verde está directamente relacionada con el peso del esqueje (Figuras 5).



Tratamientos: 1= 8 cm², 2= 12 cm², 3= 16 cm², 4= 20 cm²

Figura 5. Modelo de regresión basado en el enraizamiento ~ tratamiento + biomasa verde de entrada de los esquejes que enraizaron.

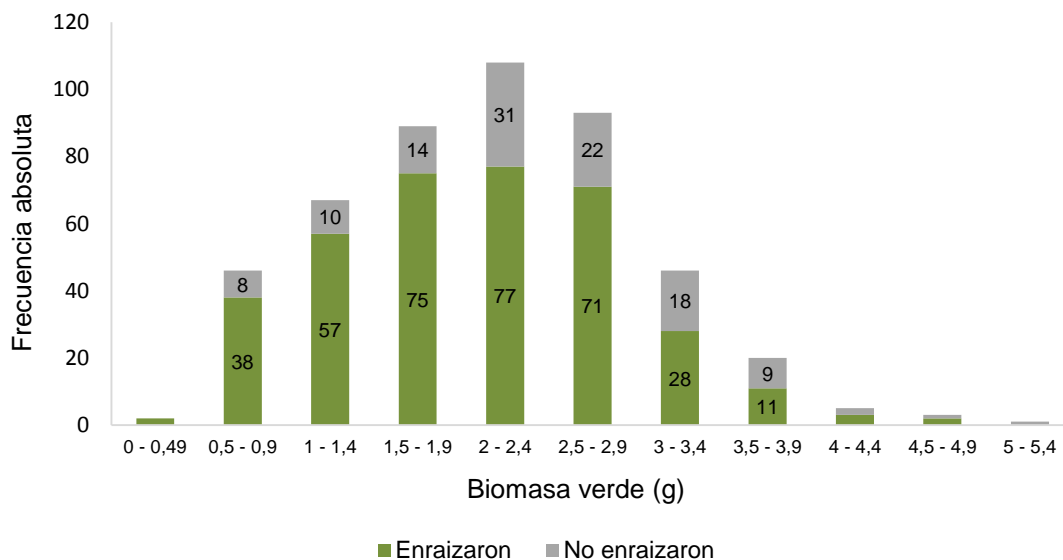


Figura 6. Histograma de enraizamiento de los esquejes de *Gmelina arborea* según la biomasa verde de entrada en gramos.

En general de los 480 esquejes de melina del ensayo, se reportó 75,83% de enraizamiento (364 esquejes), del cual, el 58,3% (280 esquejes) pesó entre 1 y 2,9 gramos, por otra parte, los que pesaron menos de 1 y más de 3 gramos, reportaron 8,33 y 9,17% de enraizamiento respectivamente. En el caso de los que no enraizaron, se presentó una distribución similar, del 24,17% (116 esquejes) de mortalidad, el 17,71% corresponde a pesos entre 1,5 y 3,5 gramos, con 85 esquejes.

Es importante mencionar que la biomasa verde promedio de entrada de los esquejes que enraizaron fue de 2,11 g y los que no lograron enraizar fue de 2,52 g; es decir, la biomasa verde de entrada de los esquejes que enraizaron está por debajo del promedio general (2,21 g); esto reflejó una leve tendencia que a menor biomasa verde de los esquejes, hasta 0,5 g (figura 6) el porcentaje de enraizamiento es mayor.

En general, los esquejes del ensayo tenían un diámetro promedio de 4,19 mm, con un mínimo de 2,08 mm y un máximo de 6,04 mm. Los esquejes que no enraizaron registraron en promedio 9,5% mayor diámetro que los que sí lograron enraizar (cuadro 5).

Cuadro 5. Enraizamiento de esquejes de *Gmelina arborea* según valores de diámetro en milímetro.

Esquejes	Media (mm)	Mínimo (mm)	Máximo(mm)	C.V (%)
Enraizaron	4,10	2,08	6	20,25
No enraizaron	4,49	2,75	6,04	16,68

Los esquejes que lograron enraizar en el presente ensayo registraron un diámetro promedio de 4,10 mm, el cual se encuentra dentro del rango de diámetros evaluado por Leakey *et al.* (1990) para el enraizamiento de melina. En ambas investigaciones el porcentaje de enraizamiento fue superior al 75%.

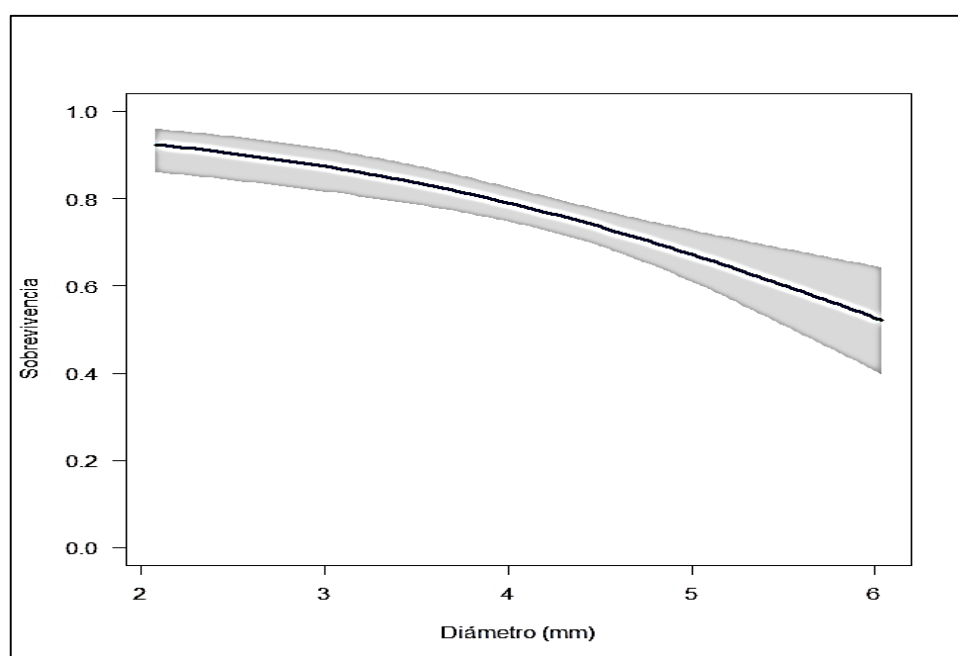


Figura 7. Modelo de regresión basado en la correlación entre el enraizamiento (sobrevivencia) y diámetro.

Ligado a los anteriores resultados, se obtuvo una correlación negativa de un 20% entre el diámetro y el enraizamiento. Es decir, a mayor diámetro, menor porcentaje de enraizamiento (figura 7), lo que implica que, esquejes con mayor diámetro tienen menor probabilidad de enraizar que los esquejes con menor valor.

Estos resultados concuerdan con lo mencionado por Landis, Dumroese y Haase (2010), quienes señalaron que el diámetro del tallo tiende a estar correlacionado con el enraizamiento de las plantas. En el caso de la presente investigación, la correlación fue negativa.

Esa misma correlación negativa se presentó entre la biomasa verde de entrada y el enraizamiento; por lo cual, a mayor biomasa verde, menor porcentaje de enraizamiento de las plantas. Dicha correlación que se presentó entre las variables enraizamiento-diámetro y enraizamiento-biomasa verde, fue producto de la alta correlación que existe entre el diámetro y la biomasa verde, con un 60,8 %.

En resumen, esquejes con mayor diámetro y mayor biomasa verde de entrada tienen probabilidades de enraizamiento considerablemente menores, situación contraria ocurre con esquejes que presentan menor biomasa verde de entrada y menor diámetro; en este caso, las probabilidades de enraizar son mayores (figura 8). Dicho patrón no coincide con lo mencionado por Mesén (1998), quien indica que en general para muchas especies forestales, incluida *G. arborea* se utilizan esquejes más gruesos para el enraizamiento (con rangos de 3 a 6 cm en longitud y 3 a 6 mm en diámetro).

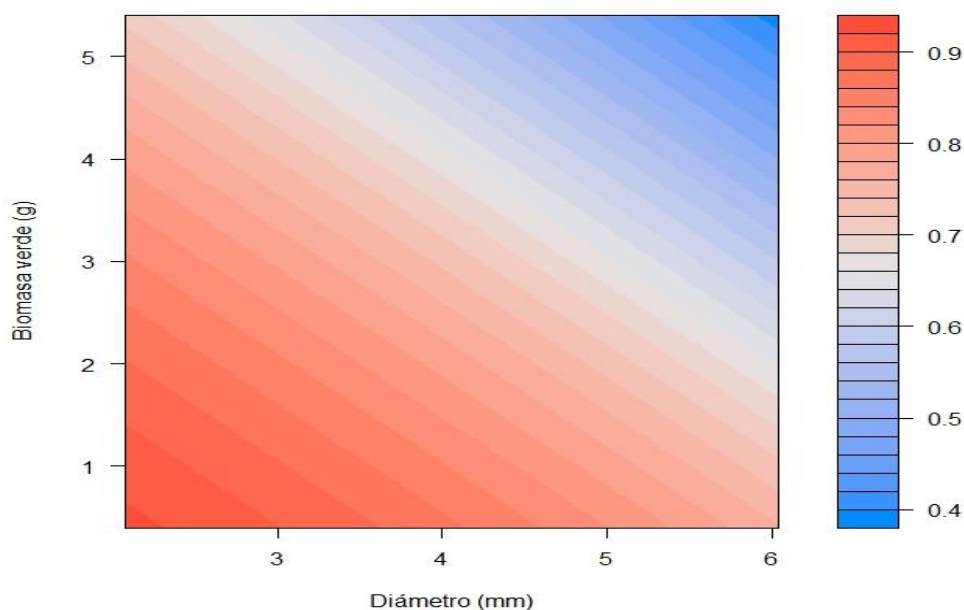


Figura 8. Modelo de regresión para el enraizamiento basado en la biomasa verde (g) de entrada + diámetro (mm) para esquejes de clones de *Gmelina arborea*.

Teóricamente, según el modelo de regresión anterior (figura 8), si se desea tener un porcentaje de enraizamiento mayor al 75% en los esquejes de clones de melina, los esquejes deben ingresar a los

túneles con un peso entre 0,5 y 3 gramo y diámetro entre 2 y 4 mm. Lo anterior es parte de las directrices y pautas que los resultados aquí obtenidos deben dar para que la producción de plantas en el vivero sea más eficiente.

De la misma manera que con el porcentaje de enraizamiento, la reducción del área foliar a 16 cm² registró los mejores resultados en cuanto a la altura final de las plantas, con un promedio de 10,74 cm y una diferencia de 6,6 % con respecto al tratamiento de 12 cm², el cual presentó el menor crecimiento en altura (figura 9). Se observaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos; así, los tratamientos 1 y 2 son iguales entre sí, pero el tratamiento 3 es diferente a ellos. A nivel de producción en el vivero, este resultado tiene significancia práctica, ya que si a los esquejes se les deja 16 cm² de área foliar, las plantas llegarán a tener las mayores alturas en comparación con dejarles 8 cm², 12 cm² o 20 cm².

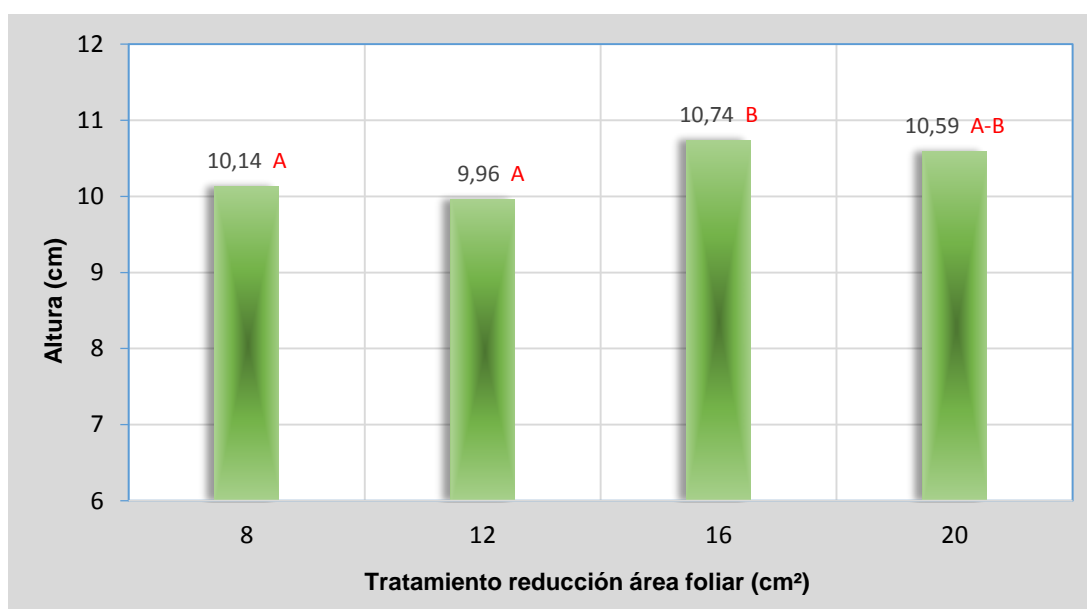


Figura 9. Efecto de cuatro áreas foliares sobre la altura final promedio de las plantas de *Gmelina arborea*. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

El coeficiente de variación en la altura de las plantas fue similar para cada uno de los tratamientos (cuadro 6); sin embargo, cabe resaltar que aumentó conforme se incrementaba la cantidad de biomasa foliar remanente en los esquejes de hasta 16 cm², luego a los 20 cm², la variación en la altura de los esquejes disminuye sin mostrar diferencias significativas. Por tanto, sugiere que

esquejes con áreas foliares mayores es más difícil lograr uniformidad en la altura final de las plantas enraizadas.

Cuadro 6. Altura mínima, máxima y promedio para cada tratamiento de reducción de área foliar.

Tratamiento	Media (cm)	D.E	E:E	CV (%)	Mín	Máx
8 cm²	10,14	0,93	0,10	9,21	7,30	12,50
12 cm²	9,96	1,13	0,12	11,32	6,70	12,90
16 cm²	10,74	1,52	0,16	14,16	7,50	15,40
20 cm²	10,59	1,47	0,15	13,87	8,10	15,50

DE: Desviación estándar, **EE:** Error estándar, **CV:** Coeficiente de variación

Por otra parte, se aprecia cómo las plantas con los tratamientos de mayor área foliar (16 y 20 cm²) mostraron mejores crecimientos en altura; probablemente sea por la mayor producción fotosintética de las hojas de melina; esto por tener mayor área foliar para realizar tal proceso, ya que la altura inicial de las plantas sirve de estimación de la capacidad fotosintética de las mismas (Landis *et al.*, 2010). Caso contrario ocurrió con el estudio realizado por Campos *et al.* (2010) con esquejes de eucalipto, donde se redujo el área foliar a 0, 25, 50 y 75%, mostrando diferencias significativas en la altura, la reducción al 0 y 25% registraron más crecimiento en altura que los tratamientos con mayor porcentaje de área foliar.

Esta diferencia en los resultados de ambos estudios, evidencias que la reducción del área foliar influye en el crecimiento en altura de las plantas y varía de acuerdo a la capacidad fotosintética de cada especie.

Cuadro 7. Prueba de medias sobre la altura final por clon para los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*.

Clon	Media (cm)
5	10,34 A
6	10,30 A
9	10,24 A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

En la prueba Tukey, el uso de clones no presentó diferencias estadísticamente significativas (cuadro 7), es decir, no causó efecto significativo en los resultados, por lo tanto, el efecto clon no influyó en el crecimiento en altura, ni en el porcentaje de enraizamiento anteriormente mencionado.

En la figura 10 se aprecia el área foliar final de los esquejes enraizados según los tratamientos evaluados y las diferencias estadísticas entre ellos.

Se evidencia, una relación directa entre la cantidad de área foliar inicial de los esquejes de acuerdo con los tratamientos establecidos y la cantidad de área foliar al finalizar el enraizamiento. Se registraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos 3 y 4, en cambio el 1 y 2 (8 cm² y 12cm², respectivamente) fueron iguales. El tratamiento de 20 cm² fue el que presentaba mayor área foliar inicial, y, de la misma manera registró mayor área foliar final.

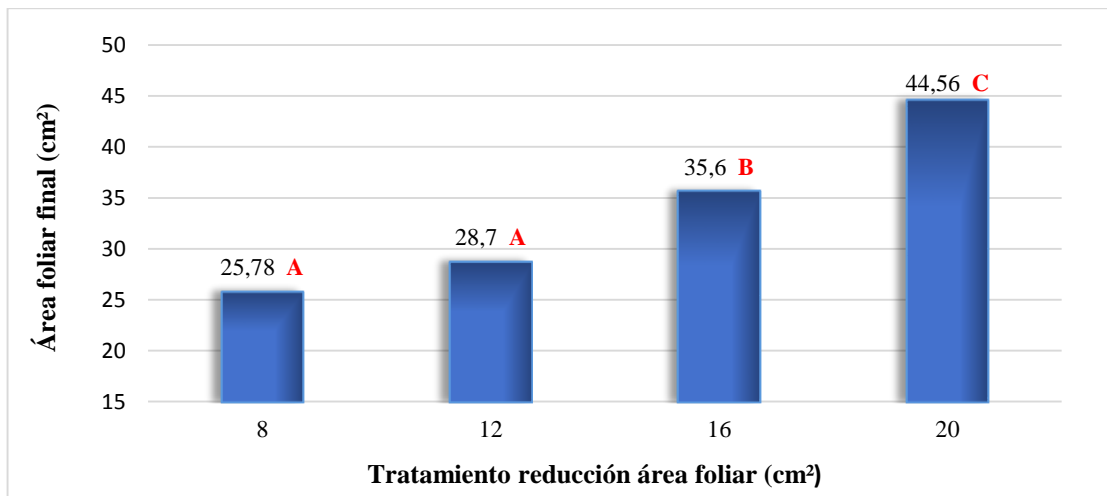


Figura 10. Efecto de los tratamientos de reducción de área foliar sobre el área foliar final de los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Según Gárate (2010), es necesaria una superficie foliar mínima con el fin de asegurar la fotosíntesis necesaria para lograr el enraizamiento de los esquejes.

En los tratamientos de 8 y 12 cm² no se presentaron diferencias estadísticas, caso contrario ocurrió con los tratamientos de mayor área foliar (16 y 20 cm²), donde el tratamiento de 20 cm² presentó diferencias significativas de más de 16% en área foliar final, con respecto al tratamiento de 16 cm², es decir, al finalizar el proceso de enraizamiento el tratamiento de 20 cm² presentó 8,96 cm² más de área foliar.

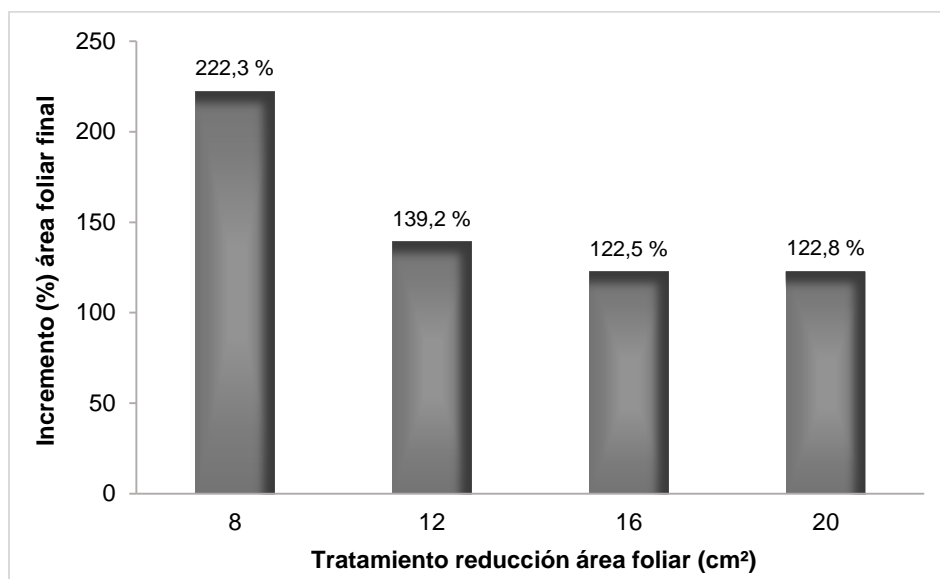


Figura 11. Incremento porcentual de los tratamientos de reducción de área foliar sobre el área foliar final de los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

A partir de la biomasa foliar inicial para cada tratamiento, se registraron incrementos entre 122,5 y 222,3 % (figura 11). El mayor incremento en área foliar durante las tres semanas dentro de los túneles de enraizamiento correspondió a los esquejes con tratamiento de 8 cm².

En los incrementos de área foliar, ocurre lo contrario a lo que se evidencia en la figura 10, ya que no existe una relación directa entre la cantidad de área foliar inicial de los esquejes de acuerdo con los tratamientos establecidos y el incremento en área foliar final. Esta relación inversa puede ser causada por una mayor necesidad que tienen los esquejes con menor área foliar de absorción de nutrimentos para la producción de hojas nuevas. En un estudio realizado con *Triplochiton scleroxylon*, los esquejes con más área foliar sufrieron mayor estrés hídrico, provocando el cierre de sus estomas, disminuyendo la capacidad de fotosintetizar (Leakey y Mesén, 1994), este resultado refuerza lo mostrado en la figura 11, ya que los tratamientos de menor área foliar reportaron mayor incremento.

La mayor área foliar final en el tratamiento 4 tiene una importancia práctica muy relevante; es indispensable enviar al campo plantas vigorosas y preparadas para producir la mayor cantidad de alimento que propicie un rápido desarrollo inicial, tanto del sistema radicular como de tallo y hojas.

Por otra parte, se presentaron diferencias significativas entre los clones evaluados en cuanto a la biomasa foliar final de los mismos (cuadro 8). El clon 5 fue diferente al 6 y 9 y superó en 20,12% al de menor área foliar, lo que significa que el material genético tuvo una reacción distinta a las reducciones del área foliar. El mismo comportamiento se produjo en clones de eucalipto, donde los 8 clones utilizados se comportaron diferente según las reducciones foliares aplicadas (0, 25, 50 y 75%), según lo concluido por Campos *et al.* (2010).

Cuadro 8. Prueba de medias sobre el área foliar final por clon para los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*.

Clon	Media (cm ²)	n
5	37,23 A	126
9	33,06 B	118
6	29,74 B	120

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

En la figura 12 se muestran los resultados de la biomasa promedio final de las plantas que lograron enraizar en cada tratamiento evaluado.

Como era de esperarse, se presentó una relación directa entre la cantidad de área foliar de entrada de los esquejes a los enraizadores, según tratamientos y la biomasa final total. El tratamiento de 20 cm² registró el mayor promedio en biomasa total con 0,4765 g, lo que representa un 12% más con respecto a los dos tratamientos que le anteceden (16 cm² y 12 cm²). De esta manera, el tratamiento al esqueje, al cual se le dejaron 20 cm² de área foliar, fue el que produjo plantas que podrían considerarse de mejor calidad, al ser la biomasa uno de los aspectos fundamentales que ayudan a describir y clasificar la calidad de las plantas (Landis *et al.*, 2010).

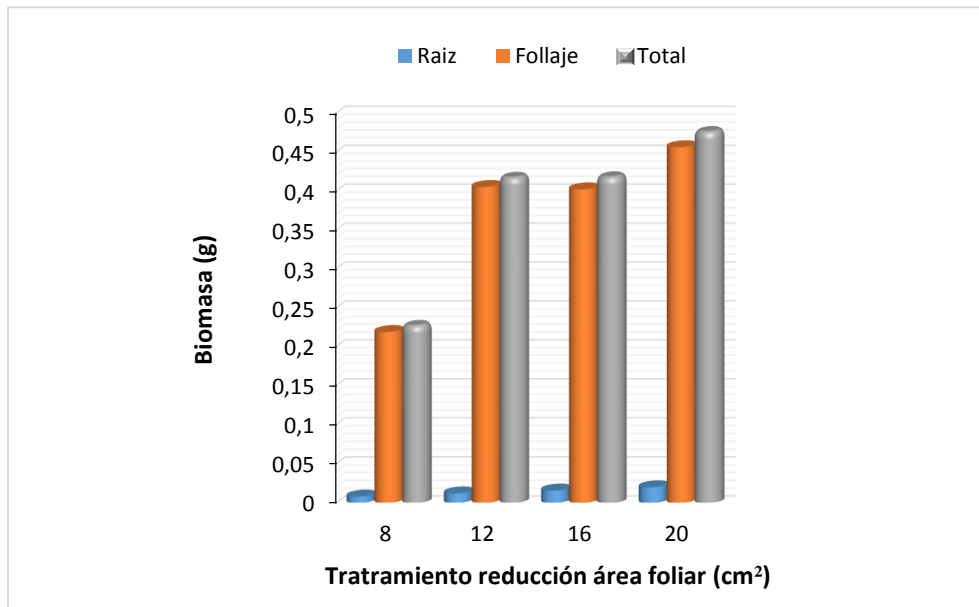


Figura 12. Efecto de los tratamientos de reducción foliar sobre la biomasa final promedio de los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*.

El tratamiento de 8 cm² fue el que presentó la menor biomasa con 0,2273 g, y fue superado por el tratamiento de 20 cm² en más de 52% en biomasa final. Este resultado tiene implicaciones prácticas, ya que en la multiplicación vegetativa, uno de los principales objetivos es enviar al campo plantas con la mayor cantidad de biomasa posible para que soporten la etapa de establecimiento inicial, desde luego tomando en cuenta el sitio y el efecto que pudieran tener sobre plantas con más biomasa, principalmente en el tema de estrés hídrico.

El análisis de varianza y la prueba de medias evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en la biomasa total y sus componentes entre las distintas áreas foliares. El tratamiento de 20 cm² presentó los valores más altos para todas las variables, y el de 8 cm² es el que registró los más bajos. Los tratamientos de 12 cm² y 16 cm² indicaron diferencias significativas entre ambos sólo para la biomasa de raíz, es decir, no se esperarían diferencias significativas entre esquejes que ingresen a los túneles con área foliar de 12 cm² o 16 cm², en cuanto a la biomasa aérea y total (Cuadro 9).

Cuadro 9. Prueba de medias sobre la biomasa final y sus componentes para cada tratamiento de reducción de área foliar en *Gmelina arborea*.

Área foliar	Biomasa raíz (g)	Biomasa aérea o follaje (g)	Biomasa total (g)
8 cm ²	0,0083 A	0,2189 A	0,2273 A
12 cm ²	0,0123 B	0,4053 B	0,4177 B
16 cm ²	0,0160 C	0,4023 B	0,4183 B
20 cm ²	0,0201 D	0,4564 C	0,4765 C

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

De manera práctica, es importante resaltar que se evidenció una relación directa entre la producción de biomasa radicular y los tratamientos de reducción de área foliar; al respecto, el tratamiento de 20 cm² superó en 25,6% al segundo mejor tratamiento que fue el de 16 cm². La reducción del área foliar de los esquejes influyó directamente sobre la producción de raíces, explicado por la relación de más hojas, más fotosíntesis y en segunda instancia porque las hojas ejercen influencia sobre el inicio en la formación de las raíces (Hartmann *et al.*, 2011). De ahí la importancia del área foliar mínima para que la fotosíntesis logre el desarrollo del sistema radicular y la sobrevivencia de las plantas (Gárate, 2010).

Los resultados obtenidos en la presente investigación indican que, si bien es cierto es necesario obtener un valor mínimo de reducción de área foliar, en el cual no se vea afectado el proceso de enraizamiento, la reducción a 20 cm² provocó un efecto positivo sobre el crecimiento de las plantas, mayor que los otros tratamientos, principalmente por expresar mejor equilibrio entre los procesos fotosintéticos y de enraizamiento (Díaz, 1991). Resultado similar se reportó en un estudio realizado por Murrieta (2010), donde se obtuvo más de 90% de enraizamiento en esquejes de *Cedrela odorata* al utilizar 20 cm² de área foliar.

Cuadro 10. Prueba de medias sobre la biomasa total por clon para los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*.

Clon	Media (gr)	n
5	0,4114 A	126
9	0,3729 B	118
6	0,3706 B	120

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

En la evaluación de la biomasa total y el material genético, se registraron diferencias significativas entre los diferentes clones (cuadro 10). Las diferencias fueron entre los clones 6 y 9 y el clon 5, siendo este último clon el de mayor media en biomasa, superando en 10,3% y 11% a los clones 9 y 6 respectivamente. En este caso, el efecto clon influyó en los resultados, es decir, la biomasa se vio afectada por la variabilidad genética de los distintos clones.

Resulta determinante establecer las relaciones que se presentan entre distintos parámetros involucrados en el enraizamiento de esquejes. Es por ello que se presentan las correlaciones entre variables: previo y posterior al enraizamiento (Cuadro 11).

Cuadro 11. Matriz de correlación de Pearson para variables registradas en los esquejes de *Gmelina arborea* evaluados.

TR	TR																			
C	-0,02	C																		
D	0,14	-0,11	D																	
HF	0,18	-0,02	-0,05	HF																
BVTE	0,47	-0,13	0,78	0,03	BVTE															
BVA	0,44	-0,03	0,06	0,52	0,18	BVA														
BVR	0,48	-0,14	0,70	0,35	0,82	0,50	BVR													
BSR	0,45	-4,8E-03	0,03	0,43	0,12	0,89	0,43	BSR												
BSA	0,62	-0,09	0,66	0,27	0,83	0,48	0,91	0,44	BSA											
BT	0,63	-0,08	0,64	0,30	0,81	0,53	0,91	0,49	1,00	BT										
AFF	0,46	-0,08	0,08	0,56	0,21	0,72	0,55	0,72	0,58	0,61	AFF									

Dónde: TR: tratamiento, C: clon, D: diámetro, HF: altura final, BVTE: Biomasa verde total de entrada, BVA: biomasa verde aérea, BVR: biomasa verde raíz, BSR: biomasa seca raíz, BSA: biomasa seca aérea, BT: biomasa total, AFF: área foliar final.

La altura final de las plantas enraizadas registró una correlación positiva, pero muy baja (0,18) con los tratamientos de reducción de área foliar, lo que sugiere que, la altura final de las plantas enraizadas no tiene relación importante con la cantidad de área foliar remanente en el esqueje, antes de ingresar a los túneles de enraizamiento. Adicionalmente, entre la altura final posterior al enraizamiento y el diámetro de los esquejes antes de ingresar a los túneles, se registró una correlación negativa y, de igual manera a la anterior, muy baja, lo que indica que, los esquejes que entran al proceso de enraizamiento con mayor diámetro no necesariamente son los que obtendrán mayor altura cuando salgan de los túneles; una relación similar se registró entre el diámetro y el porcentaje de enraizamiento; la misma fue descrita y analizada en párrafos anteriores.

Por otra parte, como era de esperarse, el diámetro presentó una relación positiva y fuerte con la

biomasa verde de entrada de los esquejes, con la biomasa seca aérea y la biomasa total, lo que refleja la colinealidad, o relación directa, entre dichas variables.

Se obtuvo una correlación positiva y medianamente alta (0,52) entre la altura final y la biomasa verde de las raíces y el área foliar final (0,52 y 0,56, respectivamente). Lo anotado anteriormente refuerza la importancia de lograr plantas con un adecuado desarrollo del sistema radicular y área foliar para que logren una altura adecuada y estén más preparadas para ir al campo. Lo anterior se explica porque las hojas son las encargadas de realizar el proceso de fotosíntesis, es decir producir el alimento para la nueva planta y las de mayor desarrollo de la raíz tienen la capacidad de absorber más agua y nutrientes que potencian el crecimiento; en este caso, para la altura, en comparación con plantas de menor biomasa en raíz.

Lo anterior queda de manifiesto con la correlación registrada entre la biomasa de la raíz (verde y seco) con el área foliar final (0,72 para ambos casos), lo cual indica que el desarrollo aéreo estuvo influenciado directamente por el sistema radicular de las plantas y viceversa. Soudre, Mueras, Limache, Guerra, Mesén y Pérez (2011), probaron dos tipos de área foliar (15 y 30 cm²) obteniendo mayor producción de raíces para la especie *Cedrelinga cateniformis* con el tratamiento de mayor área foliar, resultado que coincide con el obtenido en la presente investigación.

Un comportamiento similar se presentó en el enraizamiento de *Cedrelinga odorata*, donde a mayor área foliar (25, 50 y 100 cm²) mayor número de raíces (Díaz, 1991). Gárate (2010) concluye, como aporte de la explicación anterior, que las hojas son las encargadas de transportar auxinas y carbohidratos hasta la base de los esquejes para iniciar con el proceso de enraizamiento; es por ello que el aumento en el área foliar podría incrementar también el desarrollo de las raíces y por ende el crecimiento de las plantas. Sin embargo, se debe tener cuidado de no excederse, en vista de que los efectos podrían ser negativos, como por ejemplo, producir la deshidratación del material.

Se identificó un coeficiente de correlación alto (0,61), o bien una relación lineal positiva, entre el área foliar final y la biomasa total de las plantas como era de esperar. Lo anterior permite suponer que plantas con esas características pueden tener mayor capacidad de soportar las condiciones ambientales una vez trasladadas al campo, por el vigor que presentan a nivel de follaje y sistema radicular.

Asimismo, se encontró una correlación positiva (0,63) entre el tratamiento y la biomasa total. Esto significa que el área foliar de los esquejes a la hora de entrar en los enraizadores influyó en un 40% sobre la cantidad de biomasa total. Además, se presentó un coeficiente de correlación alto (0,91) entre la biomasa verde aérea y la biomasa total, lo cual reflejó la colinealidad entre ambas variables, donde el 82,8% de la biomasa total fue debido a la biomasa verde aérea de las plantas. Por otro lado, se dio una correlación positiva entre la biomasa verde aérea y de raíz, de 0,50, lo cual expresó un crecimiento positivo entre la cantidad de follaje que produce y el desarrollo del sistema radicular.

Conclusiones

El porcentaje de enraizamiento promedio fue 75,7%; no se registraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, ni entre los clones evaluados. Según el Criterio de Información de Akaike, el modelo de enraizamiento basado en el tratamiento + biomasa verde explicó mejor el porcentaje de enraizamiento.

Se registraron diferencias significativas con respecto a la altura final de los esquejes enraizados entre el tratamiento 3 y el 1 y 2. No se obtuvieron diferencias entre los tratamientos 3 y 4; es decir, el tratamiento de mayor área foliar en el esqueje no registró la mayor altura final de las plantas.

En las variables: área foliar final y biomasa total de las plantas, se registraron diferencias estadísticas entre tratamientos; el tratamiento de 20 cm² fue superior para ambas variables. La variabilidad genética de los clones influyó en cuanto al área foliar final, ya que el clon 5 presentó diferencias estadísticas significativas con respecto al 6 y 9.

Los esquejes con 12 cm² de área foliar, disminuyeron el porcentaje de enraizamiento de las plantas. Por el contrario, reducir el área foliar de los esquejes a 20 cm² aumentó el porcentaje de enraizamiento, mejoró el desarrollo de raíces y follaje durante el proceso de enraizamiento.

Para asegurar altos porcentajes de enraizamiento en las plantas de melina, los esquejes deben entrar en los enraizadores con 20 cm² de área foliar, con pesos entre 1 y 2,9 gramos y diámetros entre 2 y 4 milímetros para que la producción de plantas en el vivero sea más eficiente.

Para obtener el área foliar ideal en la preparación de los esquejes de melina, es recomendable capacitar al personal a cargo de la reducción del área foliar, utilizando moldes con el tamaño requerido en las primeras reducciones de las láminas foliares. Por otra parte, para la propagación vegetativa de *G. arborea* en jardines clonales, se recomienda establecer futuros ensayos sobre el periodo óptimo de enraizamiento y endurecimiento de las plantas, con el objetivo de estandarizar los procesos de enraizamiento de los esquejes de melina.

Es recomendable que el área foliar de los esquejes de melina no entre en contacto con el sustrato que se utilice para el enraizamiento, ya que puede provocar pudrición de los mismos.

Referencias

- Alfenas, A., Zauza, E., Mafía, T. y Assis, T. (2004). Clonagem e doenças do eucalipto. Viosa, 442.
- Ávila, C. (2013). Selección temprana de clones de *Gmelina arborea* Roxb. con base en su comportamiento fisiológico en vivero versus plantación, en el Pacífico Sur de Costa Rica. (Tesis de maestría). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Bolaños, R. y Watson, V. (1993). Mapa ecológico de Costa Rica. (Según clasificación de Zonas de vida del mundo de L. R Holdridge). Escala. Colores. 1:200000. San José, Costa Rica: Instituto Geográfico Nacional.
- Caballero, F. (2011). Selección de modelos mediante criterios de información en análisis factorial. Aspectos teóricos y computacionales. (Tesis Doctoral). Universidad de Granada. Departamento de Estadística e I.O. Granada, España.
- Campos, R., Pereira, T., Saraiva, G., Graziotti, P. y De Barros, N. (2010). Influence of leaf area reduction on clonal production of Eucalyptus seedlings. *Cerne*, 16(3): 251-257.
- Cardoza, F. (2009). Determinación de la rentabilidad de la producción de madera de las especie *Gmelina arborea*. Economía e inversiones forestales y agroforestales en el trópico. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Díaz, E. (1991). Técnicas de enraizamiento de estacas juveniles de *Cedrela odorata* L. y *Gmelina arborea* Linn. (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Fallas, J. (2011). Investigación. Camino o ruta recorrido para responder a preguntas o someter a prueba hipótesis. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica.
- Gárate, M. (2010). Técnicas de propagación por estacas. Ucayali, Perú: Universidad Nacional de Ucayali.

- Hartmann, H., Kester, D., Davies, F. y Geneve, R. (2011). *Plant propagation. Principles and practices*. 8th ed. Boston, US. Prentice Hall. 915 p.
- Kappelle, M., Castro, M. (2002). *Ecosistemas del Área de Conservación Osa (ACOSA)*. Heredia, Costa Rica: INBio.
- Lahura, E. (2003). El coeficiente de correlación y correlaciones espúreas. Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Economía. PE. Consultado 22 mayo. 2014. Recuperado de: <http://departamento.pucp.edu.pe/economia/images/documentos/DDD218.pdf>
- Landis, T., Dumroese, R. y Haase, D. (2010). Seedling processing, storage, and outplanting. *The Container Tree Nursery Manual*, Washington, DC, US, Department of Agriculture Forest Service. Vol. 7: 200 p.
- Leakey, B., Mesén, F., Tchoundjeu, Z., Longman, A., Dick, J., Newton, A. y Muthoka, N. (1990). Low technology techniques for the vegetative propagation of tropical trees. *Commonwealth Forestry Review*, 69(3): 247-257.
- Leakey, R y Mesén, F. (1994). Métodos de propagación vegetativa de árboles tropicales: enraizamiento de estacas suculentas. Cornelius, J; Mesén, E y Corea, E. (Ed.), *Manual sobre Mejoramiento Genético Forestal, con referencia especial a América Central: (147-168)*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Mesén, F. (1998). Enraizamiento de estacas juveniles de especies forestales: uso de propagadores de sub-irrigación. CATIE. Proyecto de Semillas Forestales-PROSEFOR, (Serie Técnica. Manual Técnico No. 30). Turrialba, Costa Rica. 36 p.
- Mesén, F., Newton, A. y Laekey, R. (1997). The effects of propagation environment and foliar area on the rooting physiology of *Cordia alliodora* (Ruiz y Pavon) Oken cuttings. *Trees*, 11(7): 404-411.
- Meza, N. y Bautista, D. (1999). Estimación del área foliar en plantas jóvenes de níspero (*Manilkara achras* [Miller] Fosberg) sometidas a dos ambientes de luz. *Bioagro*, 11(1): 24-28.
- Moraes, C., Fonseca, R. y Rui, M. (2014). Influencia das folhas no enraizamento de miniestacas de híbridos de eucalipto. *Nucleus*, 11(1): 101-106.
- Murillo, O. y Badilla, Y. (2005). *Propagación vegetativa de la teca en Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica: Cartago, Costa Rica.
- Murillo, O y Badilla, Y. (2013). Índice de Productividad Clonal. Simposio Producción Clonal Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica: Cartago, Costa Rica.

- Murillo, O. y Guevara, V. (2013). Capítulo IV, Estado y manejo sostenible de los recursos genéticos forestales, pp 66-75. En: Estado de los recursos genéticos forestales de Costa Rica. MINAET/FAO/CONAGEBIO. San José, Costa Rica. 159 pp.
- Murrieta, C. (2010). Influencia del morfotipo, fitohormona y sustrato en la propagación de estacas juveniles de *Cedrela odorata* L. (Cedro colorado), en Pucallpa, Perú. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Ucayali, Pucallpa, Perú.
- Noberto, P., Chalfun, N., Pasqual, M., Veiga, R., Pereira, G. y Mota, J. (2001). Efeito da época de estaquia e do AIB no enraizamento de estacas de figueira (*Ficus carica* L.). *Ciencia e Agrotecnologia*, 25 (3): 533-541.
- Ofori, D., Newton, A., Leakey, R. y Grace, J. (1996). Vegetative propagation of *Milicia excelsa* by leafy stem cuttings: effects of auxin concentration, leaf area and rooting medium. *Forest Ecology and Management.*, 84: 39-48.
- ONF. (2014). Usos y aportes de la madera en Costa Rica: Estadísticas 2014. Heredia, Costa Rica: ONF.
- Rojas, F. (2005). Principales especies forestales introducidas en Costa Rica. *Kurú (Costa Rica)*, 2 (4): 1-13.
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O. y Arguedas, M. (2004). Manual para productores de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica: Botánica y Ecología. Cartago, Costa Rica: ITCR.
- Serrano, R y Moya, R. (2011). Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú (Costa Rica)*, 8 (21): 1-12.
- Shiembo, P., Newton, A. y Leakey, R. (1996). Vegetative propagation of *Irvingia gabonensis*, a West African fruit tree. *Forest Ecology and Management.*, 87: 185-192.
- Soto, P. (2004). Reproducción vegetativa por estacas en *Amomyrtus luma* (luma), *Amomyrtus meli* (meli) y *Luma apiculata* (arrayán) mediante el uso de plantas madres jóvenes y adultas (Trabajo final Ingeniero Forestal). Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia, Chile.
- Soudre, M., Mueras, L., Limache, A., Guerra, H., Mesen, F. y Perez, F. (2011). Propagación Vegetativa de Tornillo *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) mediante enraizamiento de estacas de juveniles en propagador de subirrigación. *Folia Amazónica*, 20(1-2): 95-100.
- Tchoundjeu, Z., Avana, M., Leakey, R., Simons, A., Asaah, E., Duguma, B. y Bell, J. (2002). Vegetative propagation of *Prunus africana*: effects of rooting medium, auxin concentrations and leaf area. *Agroforestry Systems*, 54: 183-192.

- Villegas, J., Murillo, R., Ávila, C. y Hernández, W. (2012). Niveles óptimos de concentración de regulador de crecimiento en el enraizamiento de esquejes y preparación foliar previa a la cosecha de clones de Melina (*Gmelina arborea* Roxb) en el vivero forestal del INISEFOR, La Palma de Puerto Jiménez, Golfito. (Trabajo final bachillerato). Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Vinuesa, P. (2008). Máxima verosimilitud, estima de parámetros y selección de modelos. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México. Consultado 16 enero 2015. Recuperado de: http://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/Cursos_PDFs/Tema7_ML_estima_de_parametros_y_seleccion_de_modelos.pdf
- Xavier, A., Wendling, A. y Da Silva, R. (2009). Silvicultura clonal: principios e técnicas. Vicosa, Brasil: Universidade Federal de Vicosa.

5.2 Período óptimo de enraizamiento en esquejes de genotipos superiores de *Gmelina arborea* Roxb., en vivero.

Juan Pablo Villegas Espinoza¹
Rafael Murillo Cruz²
Carlos Ávila Arias³
William Hernández Castro⁴

Resumen

Se estableció el periodo óptimo de enraizamiento de esquejes de clones superiores de *Gmelina arborea* dentro de túneles de enraizamiento. Esta especie forestal se caracteriza por ser una de las más utilizadas en plantaciones en Costa Rica, debido a su capacidad para reproducirse vegetativamente, rápido crecimiento y facilidad de adaptarse a condiciones de sitios diversos. Se evaluaron cuatro periodos de enraizamiento (9, 12, 15 y 18 días) utilizando los clones 5, 6 y 9. Después del proceso de enraizamiento se evaluaron las variables porcentaje de enraizamiento, altura final y biomasa seca total de las plantas. Se realizaron análisis de varianza, pruebas de medias Tukey ($\alpha= 0,05$) y coeficiente de correlación de Pearson, con el software estadístico InfoStat; además, se aplicaron modelos lineales generales y de regresión logística mediante el software estadístico "R". Se obtuvo en promedio 98% de enraizamiento en el ensayo; el tratamiento a los 15 días obtuvo 100 % de enraizamiento, sin embargo, no se presentaron diferencias significativas. La altura media de las plantas mostró diferencias significativas; a los 15 días reportó mayor crecimiento (9,71 cm), y, después de este período disminuyó en un 7%. El tratamiento de 15 días registró mayor biomasa seca total, sin embargo, únicamente mostró diferencias estadísticas con el tratamiento de 18 días. Entre el período de 12 a 15 días de enraizamiento, el peso seco de las raíces aumentó en 55,3%. No se generó ninguna diferencia significativa en los clones para el porcentaje de enraizamiento y altura de las plantas, aunque la biomasa seca total sí mostró divergencias, siendo el clon 9 el de mayor promedio (0,27 g). El periodo de enraizamiento durante 15 días influyó positivamente en la propagación vegetativa de clones de melina.

Palabras claves: *Gmelina arborea*, Tiempo de enraizamiento, Clon, Esqueje, Costa Rica.

Abstract

The optimal period of rooting cuttings of superior clones of *Gmelina arborea* in rooting tunnels was established during this investigation. These species are characterized as one of the most used in plantations within Costa Rica, due to its ability to reproduce, rapid growth and ability to adapt to

¹ Universidad Nacional, Escuela de Ciencias Ambientales; Heredia, Costa Rica; juan.villegas.espinoza@una.cr

² Universidad Nacional, Instituto de Investigación y Servicios Forestales; Heredia, Costa Rica; murillorafael5454@yahoo.com

³ Universidad Nacional, Instituto de Investigación y Servicios Forestales; Heredia, Costa Rica; carlosenriquea79@gmail.com

⁴ Universidad Nacional, Instituto de Investigación y Servicios Forestales; Heredia, Costa Rica; william.hernandez.castro@una.cr

conditions of various sites. We worked with four rooting periods which were 9, 12, 15 and 18 days, and these were evaluated using clones 5, 6 and 9. After the rooting process some variables such as rooting percentage, final and total dry biomass of tall plants were evaluated. There were different types of tests applied such as Analysis of variance, Tukey means tests ($\alpha = 0.05$) and Pearson correlation coefficient with statistical software InfoStat. Such tests were based on logistic regression models that were applied according to the Akaike Information Criterion, and using the statistical software were made "R". 98% of rootedness in the trial. The results obtained on average were: 15 days treatment obtained 100% rooting, however, no significant differences were presented; the average height in plants showed significant differences at 15 days highest growth (9.71 cm) was reported after this period decreased by 7%. The 15 days treatment reported a total increased of dry biomass, however, only this one showed statistical difference with the 18 days treatment. The one between 12 to 15 days of rooting presented dry root weight increased by 55.3%. No significant differences in the percentage of clones for rooting and plant height were generated, also biomass showed differences, with the clone 9 the highest average (0.27 g). The rooting period for 15 days positively influenced the vegetative propagation of clones of melina.

Keywords: *Gmelina arborea*, Time rooting, Clone, Cutting, Costa Rica.

Introducción

Gmelina arborea Roxb es una de las especies de rápido crecimiento que mayormente ha sido establecida en sistemas de producción forestal, ya sea en plantaciones puras o en distintos arreglos de sistemas agroforestales, en las regiones tropicales y sub-tropicales; lo anterior, debido principalmente a su acelerada tasa de crecimiento y productividad, retorno de la inversión y posibilidades de transformación de su madera (Ávila, Murillo, Murillo y Sandoval, 2015; Dvorak, 2004; Rojas y Murillo, 2004; Rojas, Arias, Moya, Meza, Murillo y Arguedas, 2004; Araya, Murillo, Aguilar y Rocha, 2005; Indira, 2006). En el país, es la principal especie maderable comercializada internamente, utilizada en la fabricación de productos de embalaje, la construcción y fabricación de muebles (ONF, 2013).

La investigación de la especie en los últimos años en Costa Rica se basó en impulsar programas de mejoramiento genético, mediante estrategias de producción clonal (Salas, 2012). Lo anterior queda evidenciado en el hecho de ser la especie de mayor producción en los viveros forestales de Costa Rica en el 2012 (más de tres millones de plantas) y posiblemente la de mayor tasa de plantación nacional con fines comerciales (Murillo y Guevara, 2013). No obstante, es necesario revisar y

actualizar los métodos para la propagación vegetativa de la especie, con el fin de garantizar la producción de material clonal en la cantidad y calidad necesarias (Moraes, Fonseca y Rui, 2014).

Se entiende por estaca o esqueje a una porción de la planta que se colecta y la misma es capaz de adquirir autonomía fisiológica bajo condiciones ambientales favorables (Gárate, 2010). Dicho proceso reproductivo es fundamental en la propagación vegetativa de muchas especies forestales (Fett, Fett, Vieira, Pasquali, Termignoni, 2001 y Ferreira, Alfenas, Goncalves, García, Cardoso y Penchel, 2004), es decir, en la reproducción clonal de genotipos seleccionados por sus características superiores (Xavier, Wendling y Da Silva, 2009).

Sin embargo, el enraizamiento de esquejes está relacionado con una serie de factores, entre los que se destacan la constitución genética (Alfenas, Zauza, Mafía y Assis, 2004), la juventud del jardín clonal, condiciones ambientales (iluminación, temperatura, humedad relativa), el medio de enraizamiento y uso de tratamientos hormonales (Xavier et al., 2009; Muñoz, Vargas, López y Soto, 2009). Adicionalmente, existen otros factores importantes de tomar en cuenta en el proceso de enraizamiento de esquejes, como el manejo de la planta madre con el fin de obtener brotes juveniles, su estado nutricional, la época de la cosecha, el diámetro del esqueje, la longitud de los esquejes y la presencia de hojas y yemas (Gárate, 2010).

El período que los esquejes deben permanecer en los túneles de enraizamiento varía para cada especie, y está directamente relacionado con su velocidad de enraizamiento. En la mayoría de las especies forestales el enraizamiento de los esquejes se cumple entre los 30 y 50 días (Rojas, García y Alarcón, 2004; Gárate, 2010), y es en este momento en el que los esquejes deben sacarse de los túneles y colocarse en un área que presente condiciones definidas para su aclimatación y endurecimiento. A nivel del proceso productivo, es indispensable definir el número de días óptimo que los esquejes deben permanecer dentro del enraizador, ya que cada día posterior a ese lapso representa un costo que no será cubierto con mayor calidad de las plantas, al contrario los esquejes enraizados cada vez tendrán raíces más débiles, succulentas y escasas (Mesén, 1998 y Gárate, 2010).

Al respecto, la reproducción de la melina mediante dicha técnica es relativamente fácil y muy eficiente, principalmente por su gran capacidad de rebrote y enraizamiento (Rojas *et al.*, 2004). No

obstante, para completar un protocolo basado en criterios científicos de producción clonal para la especie, es necesario determinar el tiempo o periodo óptimo de enraizamiento de genotipos superiores. De tal manera que, el presente estudio tuvo como objetivo determinar el período óptimo de días que los esquejes de melina deben permanecer dentro de los túneles de enraizamiento para aumentar la producción en cantidad y calidad de las plantas.

Materiales y métodos

Ubicación y descripción general del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el vivero de reproducción vegetativa de especies forestales del Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional de Costa Rica (INISEFOR-UNA), ubicado en el cantón de Golfito, distrito Puerto Jiménez, localidad La Palma (entre las coordenadas geográficas N 8°36'49" y W 83°26'10"). El vivero cuenta con un jardín clonal, invernadero y túneles de enraizamiento con las condiciones adecuadas para la reproducción vegetativa de genotipos de melina.

Descripción de la investigación

Se basó en colocar esquejes de melina dentro de túneles de enraizamiento en diferentes periodos de tiempo. Las plantas madres productoras de los esquejes fueron podadas el mismo día, para producir esquejes fisiológicamente de la misma edad, es decir de 12 días. Se utilizaron únicamente esquejes que contuvieran yemas apicales (Murillo y Badilla, 2005; Rodríguez Xavier, Silva, Amaral y Rosado, 2011) y que mostraran características como buen vigor, sin enfermedades, ni anomalías en su desarrollo (Gárate, 2010); las mismas fueron seleccionadas aleatoriamente en el jardín clonal, de los clones 5, 6 y 9 provenientes del Programa de Investigación y Extensión de la Zona Sur del INISEFOR-UNA.

Para lograr un adecuado enraizamiento de los esquejes es indispensable mantener un buen control de temperatura (21 a 27° C para permitir la apropiada actividad metabólica en los esquejes), alta humedad relativa (95 a 100%) y manejo de la iluminación (irradiación máxima en la mayoría de las especies 400 a 600 mol m⁻². s⁻¹), para evitar estrés hídrico durante la manipulación de los esquejes (Soto, 2004; Murillo y Badilla, 2005; Gárate, 2010).

Los esquejes se trabajaron con 20 cm² de área foliar remanente, para lo cual se utilizó un molde de hoja cuadrículada transparente. La reducción del área foliar de los esquejes se realizó dos días previo a su cosecha del jardín de multiplicación clonal.

Luego de cosechados los esquejes, se pesaron para obtener la biomasa verde de entrada; luego se les aplicó ácido Indol-Butírico con una concentración de 3000 ppm e inmediatamente se colocaron en jiffys recién hidratados y se introdujeron en los túneles de enraizamiento. En el proceso cada esqueje, desde la cosecha hasta la colocación en jiffy, se mantuvo seco para evitar cualquier tipo de contaminación con los demás esquejes por medio de la savia; dicho procedimiento fue rápido para evitar su deshidratación.

Diseño experimental

En el ensayo se establecieron cuatro bloques completos al azar, para un total de 480 plantas. Cada bloque correspondió a un túnel específico de enraizamiento con 120 plantas. En cada bloque se evaluaron 4 tratamientos (T9, T12, T15 y T18 días de enraizamiento). En cada tratamiento se utilizaron 3 clones (clon número 5, 6 y 9) y 10 plantas por clon para un total de 30 plantas por tratamiento.

Variables independientes

Las variables independientes o de clasificación, que se evaluaron, fueron los tratamientos del número de días en los cuales los esquejes de melina deben permanecer dentro de los túneles de enraizamiento, los que se exponen a continuación:

- T1: tratamiento 1 con 9 días dentro del túnel de enraizamiento
- T2: tratamiento 2 con 12 días dentro del túnel de enraizamiento
- T3: tratamiento 3 con 15 días dentro del túnel de enraizamiento
- T4: tratamiento 4 con 18 días dentro del túnel de enraizamiento

Variables dependientes

Se clasificaron en dos grupos: variables de entrada (longitud, diámetro y biomasa verde del esqueje) y variables de salida (porcentaje de enraizamiento, altura final de las plantas y biomasa total de las plantas).

VARIABLES DE ENTRADA: Proceso realizado previo al enraizamiento de los esquejes

- **Longitud:** Los esquejes se trabajaron con una longitud promedio de 7,81 cm.
- **Diámetro:** Se midió el diámetro en la base de cada uno de los esquejes con un vernier digital (precisión de 0,00 mm), utilizando diámetros entre 1,53 y 5,08 mm.
- **Biomasa verde:** Se determinó el peso verde de cada esqueje con una balanza digital, con precisión de 0,0 g.

VARIABLES DE SALIDA: Posterior al enraizamiento de los esquejes (9, 12, 15, 18 días).

5. Porcentaje de enraizamiento o sobrevivencia: Se determinó dividiendo la cantidad de plantas de las que se apreciaban sus raíces saliendo del jiffy, entre la totalidad del tratamiento y multiplicando ese dato por 100.

$$\% \text{ enraizamiento} = \frac{\text{Plantas enraizadas por tratamiento}}{\text{Total de plantas por tratamiento}} \times 100$$

6. Altura final de las plantas: Se midió la distancia desde el cuello de la raíz hasta la yema terminal o apical (figura 1).

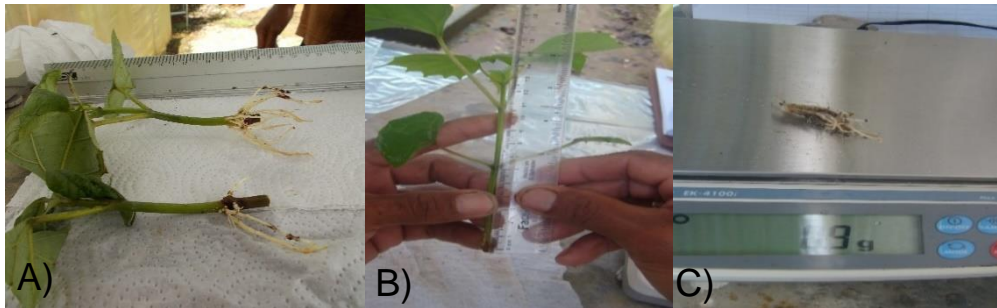


Figura 1. (A) Separación de la planta en follaje y raíz, (B) Medición de la altura de las plantas, (C) Medición de la biomasa verde de la raíz.

7. Biomasa verde y seca total de las plantas: Se midió la biomasa verde final de cada tejido por separado (aérea y raíz) y luego las plantas se introdujeron en un horno de secado a una temperatura de 70° C hasta lograr peso constante. Luego con una balanza de precisión se procedió a cuantificar el peso seco de la biomasa seca aérea, radicular y total.

Análisis de datos

Se realizó mediante el software estadístico InfoStat, versión 2013. Para cada una de las variables de entrada se realizaron medidas estadísticas resumen y para las variables de salida un Análisis de

varianza (ANOVA) y una Prueba de Tukey ($\alpha= 0,05$) para comparar las medias de los tratamientos y poder determinar dónde se encontraban las diferencias significativas entre ellos. Mediante la significancia estadística ($\alpha= 0,05$) se tuvo certeza que la diferencia observada entre dos o más tratamientos es el resultado del efecto del tratamiento y no del azar (Fallas, 2011).

La variable porcentaje de enraizamiento se analizó mediante el software estadístico “R” versión 3.1.0, 2014. Se utilizó la regresión logística basada en modelos mediante el Criterio de Información de Akaike (AIC, Akaike Information Criterion), el cual trata de obtener el modelo que proporcione mejores predicciones entre los modelos existentes (Caballero, 2011), generando ecuaciones en cada modelo. La selección del modelo que se ajustó mejor a los datos, se realizó a partir del valor mínimo del AIC, el cual se trabajó a un 85% para lograr una mejor apreciación de los resultados (Vinuesa, 2008). Igualmente, con este software se utilizó un análisis de covarianza mediante modelos lineales generales, combinando variables de entrada (covariables) con variables de salida, y con la función gg plot se evaluó el grado de ajuste de los datos (distribución) de altura y biomasa final de las plantas.

Además, se ejecutó un análisis de correlación de datos utilizando el coeficiente de Pearson, en el cual se midió el grado de asociación entre todas las variables dependientes e independientes del ensayo. Este análisis, proporciona información (dirección o sentido y cercanía o fuerza de la correlación) sobre la relación lineal entre dos variables (Lahura, 2003).

Resultados y discusión

Se presentan los estadísticos descriptivos de las variables evaluadas al ingresar los esquejes a los túneles de enraizamiento, obtenidos, tanto para la población en general como para cada clon (Cuadro 1 y 2, respectivamente).

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos para las variables de entrada, evaluadas a los esquejes de *Gmelina arborea* previo al enraizamiento.

Variables de entrada	N	Media	C.V (%)
Diámetro en la base (mm)	480	3,11	23,4
Biomasa verde de entrada (g)		1,59	36,7
Longitud (cm)		7,81	7,0

CV: Coeficiente de variación

La longitud inicial de los esquejes, determinada previo al proceso de enraizamiento, registró un coeficiente de variación bajo, al ser una variable estandarizada y controlada en el proceso (cuadro 1). Para la presente investigación, la longitud media obtenida para los esquejes fue de 7,81 cm, la cual se encuentra dentro del rango para el óptimo desarrollo y formación de raíces, de entre 6 y 10 cm y de 4 a 8 cm, recomendados por Xavier *et al.* (2009) y Alfenas *et al.* (2009), respectivamente.

Murrieta (2010) reportó que la longitud de los esquejes afecta en la formación de raíces por el contenido de sustancias de reserva que se almacenan en las mismas y por ende en el porcentaje de enraizamiento. Además, controlar este tipo de variables es justificado por Gárate (2010), quien determinó que el porcentaje de enraizamiento se encuentra estrechamente relacionado con el tamaño y el diámetro de los esquejes, y, además aconseja trabajar con longitudes entre 4 y 8 cm (menos de 4 cm no es recomendado, para evitar que la hoja entre en contacto con el sustrato y favorecer la producción de la hoja) y diámetros entre 3 y 8 mm.

Por su parte, el diámetro y la biomasa verde de entrada registraron coeficientes de variación altos, al no existir control sobre dichas variables de entrada.

Cuadro 2. Estadísticos descriptivos y prueba de medias para las variables de entrada, determinados a los esquejes de *Gmelina arborea* en cada clon previo al enraizamiento.

Clones	Variable	n	Media	C.V (%)
5	Diámetro (mm)	160	2,99 A	21,06
	Biomasa verde de los esquejes (g)		1,54 A	36,91
	Longitud (cm)		7,79 A	7,62
6	Diámetro (mm)	160	2,86 A	22,49
	Biomasa verde de los esquejes (g)		1,43 A	34,21
	Longitud (cm)		7,81 A	6,60
9	Diámetro (mm)	160	3,47 B	21,73
	Biomasa verde de los esquejes (g)		1,79 B	34,75
	Longitud (cm)		7,83 A	6,55

DE: Desviación estándar, **CV:** Coeficiente de variación. *Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).*

El clon 9 registró valores promedio mayores para las tres variables evaluadas en comparación con los clones 5 y 6 (cuadro 2), mostrando diferencias estadísticas significativas en las variables diámetro y biomasa verde de los esquejes. No obstante, los coeficientes de variación entre clones para todas

las variables evaluadas fue similar, lo que eventualmente facilitaría tomar decisiones basadas en los resultados de la presente investigación.

La longitud y diámetro de los esquejes son parámetros determinantes en el desarrollo del sistema radicular de las plantas (Gárate, 2010); de ahí la importancia de establecer valores óptimos sobre ambas variables y aplicar dicha información en la escogencia de los esquejes, que se llevarán posteriormente a los túneles de enraizamiento.

En la evaluación del diámetro, antes de enraizar, se registraron diferencias estadísticamente significativas entre los T1 y T4, y de ambos con el T2 y T3, los cuales a su vez no observaron diferencias entre ellos (cuadro 3); el T1 tenía diámetros 46,9 % mayores que el T4. En las tres variables de entrada se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, por lo que se utilizaron como covariables para realizar un análisis de varianza para la altura (figura 8, 9 y 10) y biomasa seca final de las plantas (figura 13, 14 y 15).

Cuadro 3. Estadísticos descriptivos y prueba de medias para las variables de entrada, determinados a los esquejes de *Gmelina arborea* para cada tratamiento previo al enraizamiento.

Tratamiento	Variable	Media	C.V (%)
1 (9 días)	Diámetro (mm)	3,57 A	20,45
	Biomasa verde de los esquejes (g)	2,01 A	25,53
	Longitud (cm)	8 A	0
2 (12 días)	Diámetro (mm)	3,20 B	16,82
	Biomasa verde de los esquejes (g)	1,77 B	23,93
	Longitud (cm)	8 A	0
3 (15 días)	Diámetro (mm)	3,25 B	20,37
	Biomasa verde de los esquejes (g)	1,67 B	22,28
	Longitud (cm)	8 A	0
4 (18 días)	Diámetro (mm)	2,43 C	16,36
	Biomasa verde de los esquejes (g)	0,88 C	26,06
	Longitud (cm)	7,24 B	11,86

CV: Coeficiente de variación. *Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)*

Se determinó que la biomasa verde aumenta al incrementar el número de días que permanecían los esquejes en los túneles de enraizamiento, hasta los 15 días (T3), y después de 15 días hasta 18, la

biomasa verde disminuye un 29%, reportando diferencias significativas entre el tratamiento T3 y los demás (figura 2). Esta diferencia pudo ser causada por la competencia entre plantas, provocando estrés y pérdida de hojas a los 18 días de enraizamiento.

Las anteriores diferencias son de suma importancia, para seleccionar plantas con mayor cantidad de biomasa que eventualmente estén mejor preparadas para soportar las condiciones del establecimiento en campo, es decir plantas de buena calidad, vigorosas, con tallos resistentes y raíces abundantes (Vial, Baldini, Duchens, 2013).

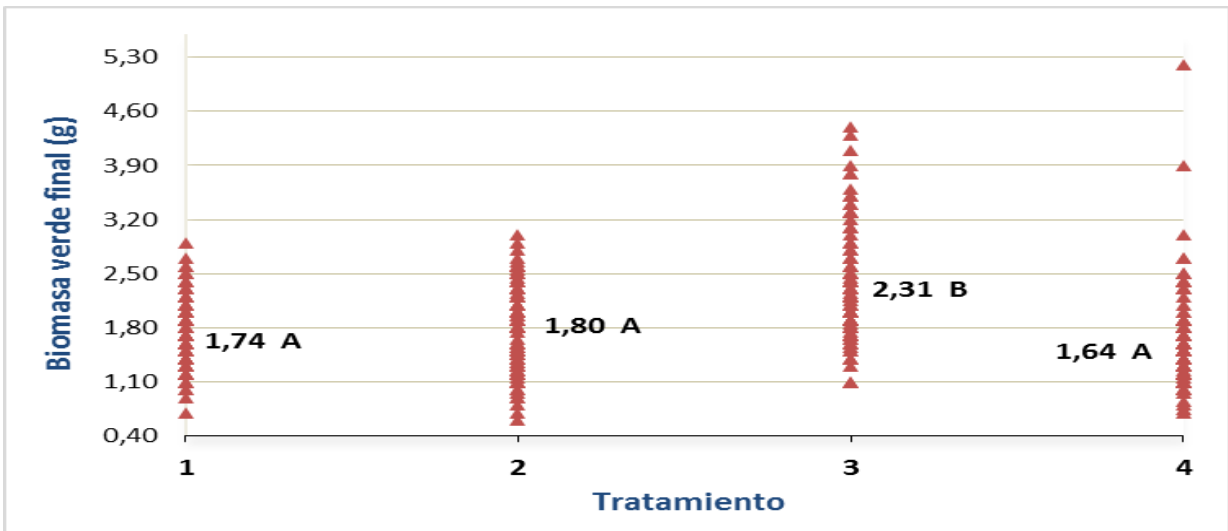


Figura 2. Efecto de los tratamientos sobre la biomasa verde al finalizar el periodo de enraizamiento de los esquejes de *Gmelina arborea*. T1 (9 días), T2 (12 días), T3 (15 días), T4 (18 días).

Con base en las variables evaluadas al finalizar el período de enraizamiento, se generó una matriz de correlación para analizar su comportamiento (Cuadro 4). En la misma se presenta el efecto de los tratamientos sobre los parámetros porcentaje de enraizamiento, altura final, y biomasa final de las plantas.

El porcentaje de enraizamiento registró una correlación directa y fuerte con la biomasa total y altura final de las plantas (0,54 y 0,80, respectivamente); es decir que, en gran medida, el porcentaje de enraizamiento de los esquejes estuvo ligado a su desarrollo en altura. Lo anterior apunta a que algunos esquejes fueron suprimidos por otros y por ello no lograron enraizar debido al porcentaje de sombra a la que fueron sometidos por la competencia entre los mismos. El rápido crecimiento de las plantas dentro del túnel de enraizamiento hace que se considere necesario establecer una distancia

mayor entre las mismas, siempre y cuando se tome en cuenta la capacidad de producción de cada túnel.

Por otra parte, no se registró una correlación significativa de los clones (genética) para con ninguna de las variables evaluadas. Lo anterior sugiere una homogeneidad en el desempeño del material genético, lo cual es de suma importancia en la logística de producción en el vivero. Caso contrario a lo reportado por Andrade, Santos, García, Rodríguez, Franciskievicz y Dos Santos (2013), quienes concluyeron que el material genético influyó en el periodo de enraizamiento de los esquejes.

Se registró una correlación positiva y fuerte entre los tratamientos y la biomasa verde y seca de la raíz (0,63 y 0,62, respectivamente), cuyos resultados eran de esperarse, al expresar que a mayor número de días que las plantas permanecieron en los túneles de enraizamiento (9, 12, 15 y 18 días) el desarrollo del sistema radicular de las plantas debía ser mayor. Caso contrario se observó entre los tratamientos y el diámetro y la biomasa verde del esqueje al registrar una correlación negativa entre ellas (-0,52 y -0,67, respectivamente). Lo antepuesto confirma que, el período en el cual los esquejes permanecen en los túneles de enraizamiento es precisamente para formar la mayor cantidad de sistema radicular posible, lo que es indispensable, ya que, según Bañón, Martínez, Fernández, Balanzategui y Melgares (2002), las plantas con un sistema radicular de mayor peso son las que obtienen finalmente mayor desarrollo.

Lo anterior apunta que, la formación de la biomasa foliar que la planta necesita para soportar las condiciones de campo debe propiciarse en el período de aclimatación y endurecimiento, ya que en este punto las plantas se adaptan progresivamente a la luz y a las condiciones ambientales en general (Gárate, 2010).

Cuadro 4. Matriz de correlación de Pearson para las variables de salida registradas en los esquejes de *Gmelina arborea* evaluados.

ENTO	ENTO										
TR	0,10	TR									
C	-0,04	0,00	C								
D	-0,11	-0,52	0,33	D							
Hf	0,80	0,20	-0,03	-0,08	Hf						
BVTE	-0,09	-0,67	0,23	0,86	-0,05	BVTE					
BVR	0,13	0,63	-0,03	-0,29	0,43	-0,34	BVR				
BVA	0,37	-0,10	0,16	0,42	0,55	0,47	0,34	BVA			
BSR	0,13	0,62	-0,04	-0,31	0,41	-0,34	0,93	0,33	BSR		
BSA	0,44	-0,30	0,17	0,50	0,51	0,58	0,09	0,89	0,10	BSA	
BT	0,45	-0,24	0,16	0,46	0,54	0,54	0,19	0,91	0,20	0,99	BT

Dónde: ENTO: porcentaje de enraizamiento, TR: tratamiento, C: clon, D: diámetro, HF: altura final, BVTE: biomasa verde total de entrada, BVR: biomasa verde raíz, BVA: biomasa verde aérea, BSR: biomasa seca de raíz, BSA: Biomasa seca aérea, BT: biomasa total

Se presentó una correlación positiva y fuerte (0,62) entre el número de días en que las plantas permanecieron en los enraizadores y el desarrollo del sistema radicular.

En la figura 3 se muestra la evaluación del porcentaje de enraizamiento de las plantas durante el periodo de enraizamiento, según los tratamientos y el análisis de medias respectivo.

Se registró un promedio general de 98% de enraizamiento en los esquejes para la presente investigación. A pesar de que todos los tratamientos evaluados mostraron un porcentaje de enraizamiento superior al 95% (figura 3), los esquejes que estuvieron en los túneles, por 15 días, registraron un enraizamiento del 100%.

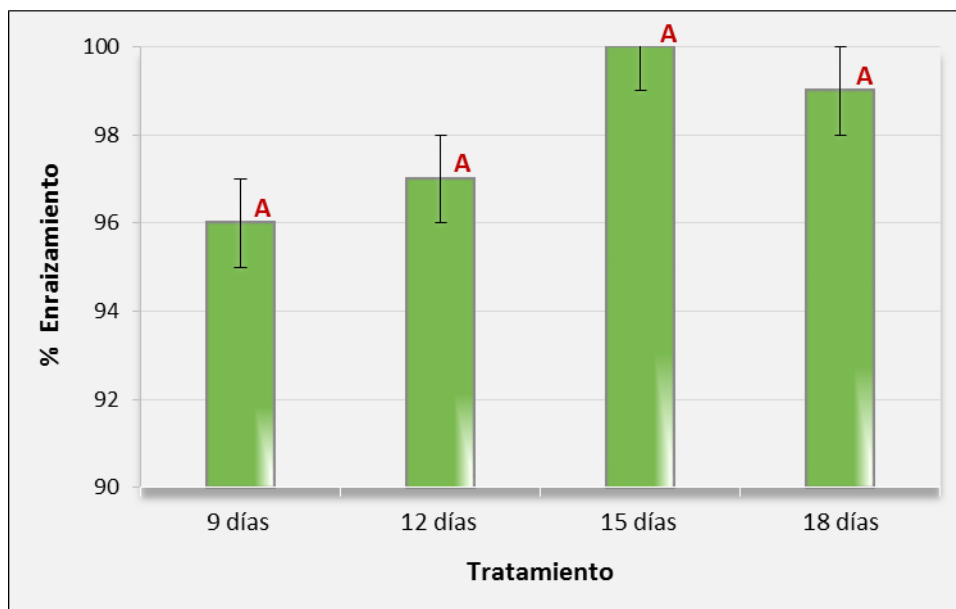


Figura 3. Efecto de los tratamientos sobre el porcentaje de enraizamiento de esquejes de *Gmelina arborea*. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

No obstante, en el análisis de prueba de medias, no se determinaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, ni entre clones (cuadro 5), reflejando que no existe grandes diferencias en la genética de los clones evaluados cuando se habla de enraizamiento. Caso contrario reportó Ferreira *et al.* (2004) y Rodríguez (2011), mostrando diferencias significativas en el enraizamiento de clones de *Eucalytus* a través del tiempo.

Los períodos evaluados para el enraizamiento de los esquejes de melina en el ensayo coinciden con lo reportado por Rojas *et al.* (2004) para la misma especie, variando de 2 a 3 semanas; sin embargo, la tasa de enraizamiento para ese estudio oscila entre 70 y 90%, según el clon, el manejo del jardín clonal y las condiciones de enraizamiento en el invernadero.

Cuadro 5. Prueba de medias por clon para los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*.

Clon	Enraizamiento (%)
9	97 A
5	98 A
6	99 A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

En el cuadro 6 se muestran combinaciones de modelos que se analizaron para determinar el mejor o los posibles mejores modelos que se ajustaran mejor a los datos en la realidad, según el Criterio de Información de Akaike.

Cuadro 6. Modelos estadísticos explicativos basados en el enraizamiento de esquejes de *Gmelina arborea* según AIC.

Modelo	AIC	D. AIC	K	Peso de Akaike
Tratamiento + Diámetro	95,1	0	5	0,238
Diámetro	95,9	0,8	2	0,158
Tratamiento	96,2	1,1	4	0,135
Tratamiento+ Biomasa verde de entrada + Diámetro	96,8	1,7	6	0,100
Tratamiento +Clon	97	1,9	6	0,091
Tratamiento + Biomasa verde de entrada	97,2	2,1	5	0,083
Biomasa verde de entrada	97,4	2,3	2	0,076
Diámetro +Biomasa verde de entrada	97,4	2,8	3	0,058
Clon+ Diámetro +Biomasa verde de entrada+ Tratamiento	98,6	3,5	8	0,041
Clon	100,1	5	3	0,020

AIC: Criterio de Información de Akaike (AIC, por sus siglas en inglés), **D. AIC:** Diferencia de AIC entre el mejor modelo y los demás; **K:** Es el número de parámetros independientes estimados dentro del modelo; **Peso de Akaike:** La probabilidad de que sea el mejor modelo.

Se probaron 10 posibles modelos en función del enraizamiento de las plantas y se encontró que el modelo donde se consideraron los tratamientos junto con el diámetro, reportaron menores AIC que en el resto de modelos, por lo tanto el diámetro es uno de los principales criterios por considerar, a la hora de seleccionar los esquejes en el ingreso al proceso de enraizamiento.

El modelo basado en el tratamiento y diámetro reflejó cómo esquejes con diámetro entre 1,5 y 3 milímetros lograron porcentajes de enraizamiento entre 95 y 100% en los túneles (figura 4 y 5). El tratamiento de 15 días fue el único que no registró mortalidad; los demás tratamientos reportaron

mortalidad de los esquejes en relación con el aumento del diámetro de los mismos.

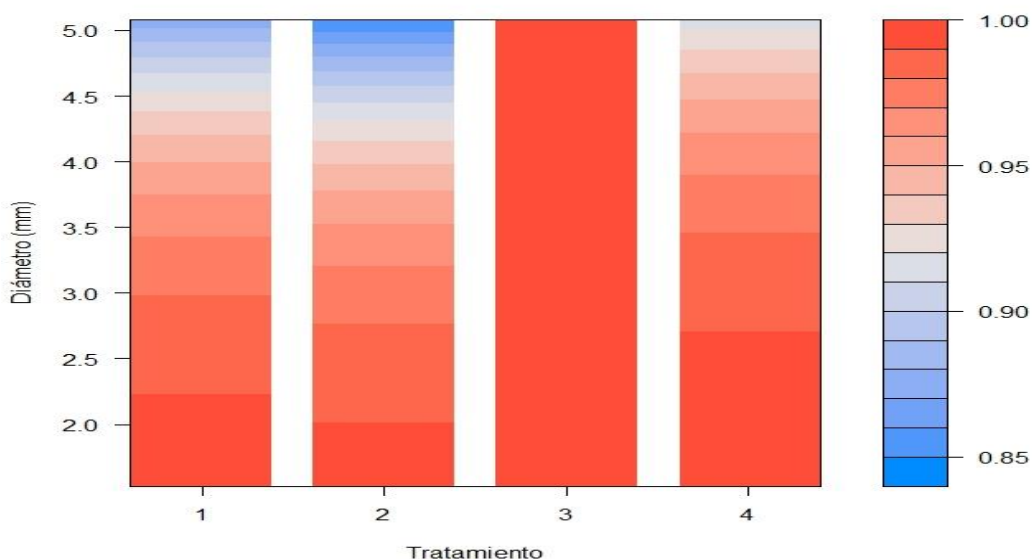


Figura 4. Modelo de regresión logística basado en el enraizamiento ~ Tratamiento + Diámetro
T1 (9 días), T2 (12 días), T3 (15 días), T4 (18 días)

El diámetro de los esquejes que enraizaron presentó un diámetro promedio de 3,10 mm; por su parte el diámetro de los esquejes que no enraizaron fue de 3,65 mm en promedio, lo que significa que los esquejes que no enraizaron tenían diámetros 17,74%, mayores que el diámetro de los esquejes que sí enraizaron. Lo anterior refuerza lo registrado en el modelo de enraizamiento basado en el diámetro (figura 5), donde se evidencia mayor enraizamiento de las plantas a menor diámetro, hasta 1,5 milímetros.

El mismo patrón se presentó en la variable biomasa verde de entrada (figura 6), en donde las plantas que enraizaron reportaron una media de 1,58 g de biomasa verde y las plantas que no enraizaron presentaron 1,95 g, es decir 23,4% más biomasa verde de entrada en las plantas que no enraizaron. Lo anterior se ratifica en la correlación negativa registrada entre el enraizamiento y el diámetro y la biomasa verde de entrada (cuadro 4); es decir, los esquejes con menor diámetro y biomasa verde, presentaron mayor probabilidad de enraizar.

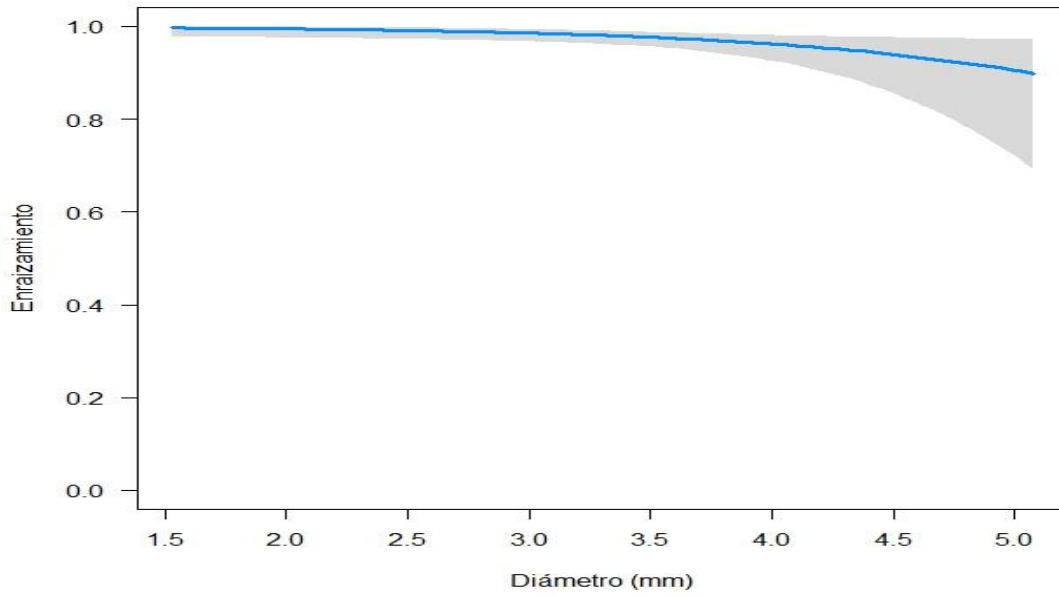


Figura 5. Modelo de regresión logística basado en la correlación entre el enraizamiento y diámetro.

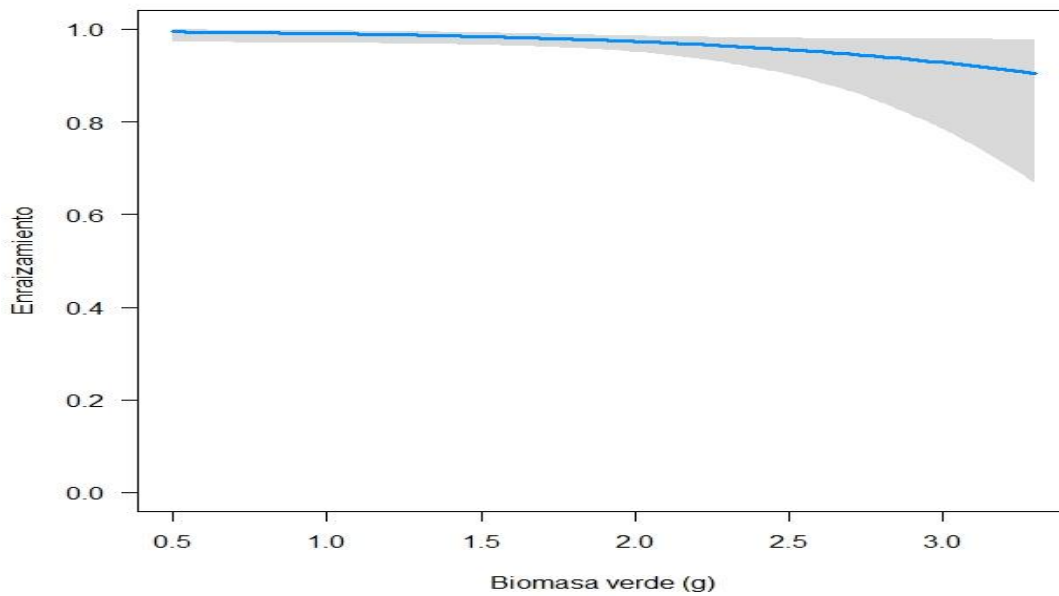


Figura 6. Modelo de regresión basado en la correlación entre el enraizamiento y biomasa verde de entrada.

En el cuadro 7 se muestran las ecuaciones utilizadas en los modelos de regresión logística de las figuras 4, 5 y 6, basadas en el enraizamiento de los esquejes de melina. Estas ecuaciones sirven para estimar las probabilidades de enraizamiento, que pueden tener los esquejes de melina al finalizar el periodo de enraizamiento, según los tratamientos y las variables de entrada. Para aplicar las ecuaciones, se requiere de un programa estadístico, ya que las ecuaciones se encuentran en escala logis.

Si usamos como ejemplo la ecuación del modelo *Tratamiento + diámetro (mm)* para estimar el porcentaje de enraizamiento de un esqueje de 3 mm de diámetro de entrada y 18 días de enraizamiento (T4), se aplicaría la ecuación de la siguiente manera:

$$y = \text{plogis}(6,67 - 0,20 * 0 + 17,07 * 0 + 0,44 * 1 - 0,93 * 3) = \mathbf{0,98}$$

Como resultado, el esqueje de melina tendría una probabilidad de un 98 % de enraizamiento. Por otra parte, si se quiere estimar el porcentaje de enraizamiento de los esquejes basados únicamente en el diámetro, se aplicaría la ecuación correspondiente al modelo *Diámetro (y = plogis (7,14 – 0,97 * diámetro (mm))*:

Ejemplo 1: $y = \text{plogis}(7,14 - 0,97 * 2) = 0,99$

Ejemplo 2: $y = \text{plogis}(7,14 - 0,97 * 5) = 0,90$

Ejemplo 3: $y = \text{plogis}(7,14 - 0,97 * 6) = 0,78$

En los ejemplos anteriores se utilizaron esquejes con diámetros de 2, 5 y 6 mm, obteniendo como resultado 99, 90 y 78 % de enraizamiento respectivamente, comprobando que a menor diámetro de entrada de los esquejes, mayor porcentaje de enraizamiento.

Cuadro 7. Ecuaciones de modelos estadísticos explicativos basados en el enraizamiento de esquejes de *Gmelina arborea*.

Modelo	Ecuación
Tratamiento + Diámetro (mm) *** (Representación gráfica figura 4)	$y = \text{plogis} (a - b_2 \cdot T_2 + b_3 \cdot T_3 + b_4 \cdot T_4 - b_5 \cdot d)$ Dónde: y =variable respuesta, plogis =función estadística para calcular probabilidades, a =intercepto, b =coeficiente, T =Tratamiento, d =diámetro (mm) $y = \text{plogis} (6,67 - 0,20 \cdot T_2 + 17,07 \cdot T_3 + 0,44 \cdot T_4 - 0,93 \cdot \text{diámetro (mm)})$
Diámetro (Representación gráfica figura 5)	$y = \text{plogis} (a - b \cdot d)$ Dónde: y =variable respuesta, plogis =función estadística para calcular probabilidades, a =intercepto, b =coeficiente d =diámetro (mm) $y = \text{plogis} (7,14 - 0,97 \cdot \text{diámetro (mm)})$
Biomasa verde de entrada (g) (Representación gráfica figura 6)	$y = \text{plogis} (a - b \cdot \text{bm})$ Dónde: y =variable respuesta, plogis =función estadística para calcular probabilidades, a =intercepto, b =coeficiente, bm =biomasa verde de entrada (g) $y = \text{plogis} (5,68 - 1,04 \cdot \text{bm (g)})$

*** **Nota:** Si se desea probar el T1, los coeficientes b_2 , b_3 y b_4 se multiplican por 0, es decir, se cancelan. Para probar el T2, T3 o T4, se multiplica el coeficiente respectivo al tratamiento que se desee, por el valor de 1, y los coeficientes de los otros tratamientos se multiplican por 0.

El análisis de medias del crecimiento en altura de las plantas de melina para cada tratamiento, se aprecia en el cuadro 8, generando un aumento proporcional entre el número de días en que las plantas estuvieron en los túneles y la variabilidad en el crecimiento en altura, presentándose mayor variabilidad en el T4.

Cuadro 8. Prueba de medias sobre la altura final de los esquejes enraizados de *Gmelina arborea* para cada tratamiento.

Tratamiento	Altura final (cm)	C.V. (%)
T3	9,73 A	9,13
T4	9,10 B	16,25
T2	9,05 BC	6,14
T1	8,73 C	4,61

CV.: Coeficiente de variación

Posterior al periodo de enraizamiento, se registraron diferencias significativas en la altura final de las plantas, entre los distintos tratamientos, Hernández y Salas (2009), también reportaron diferencias significativas en la altura promedio de plantas de *G. arborea* con micorrizas y sin ellas, a nivel de vivero. En el presente estudio, el T3 expresó mayor media en altura, con diferencias estadísticas significativas de 11,35% (0,99 cm más) con respecto al T1, el de menor altura. Es decir, las plantas a los 9 días en el proceso de enraizamiento presentaron 1 cm menos en altura, en comparación al T3 (15 días).

En este sentido, las plantas alcanzaron mayor desarrollo en altura a los 15 días dentro de los enraizadores, de manera que, conforme aumentaron los días de enraizamiento, desarrolló la altura de las plantas como era de esperar; sin embargo, este orden se presentó hasta los 15 días, luego a los 18 días (T4) el crecimiento disminuyó en un 7% con respecto al tratamiento de mayor altura media.

En la figura 7 se muestra la distribución de los datos en altura de las plantas de melina para cada tratamiento, así como los valores atípicos. Se aprecia que al aumentar el número de días de las plantas en los enraizadores, la distribución de los datos es más heterogénea o dispersa, alrededor de la media, es decir, a mayor número de días, mayor variabilidad en la altura de las plantas.

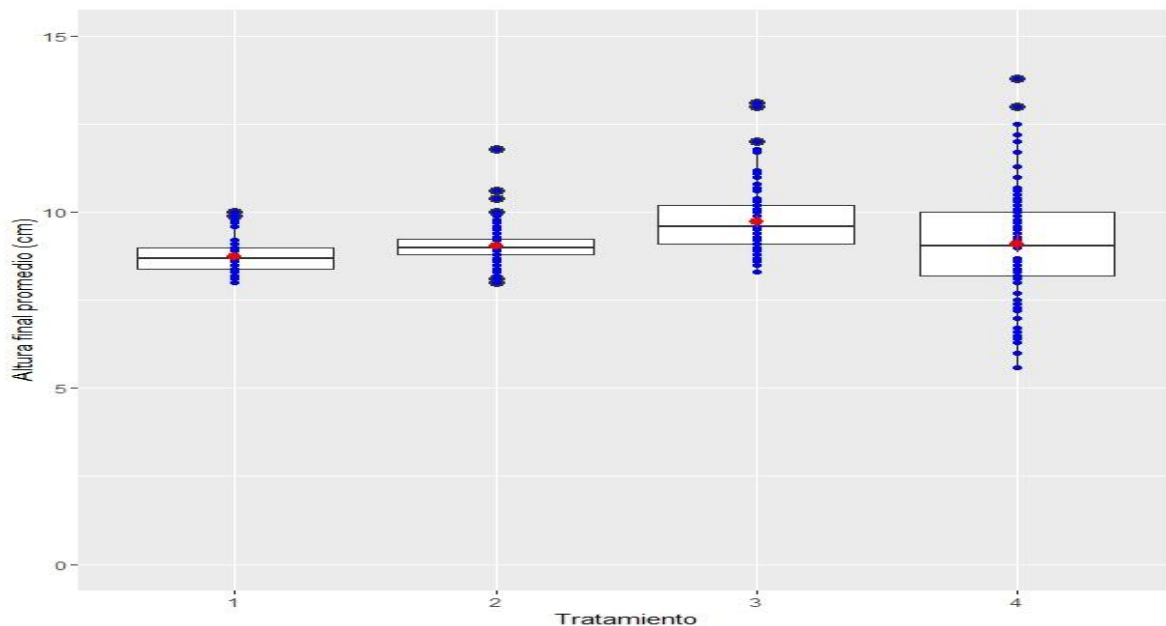


Figura 7. Distribución de la altura final de las plantas de *Gmelina arborea* según el número de días de enraizamiento: T1 (9 días), T2 (12 días), T3 (15 días), T4 (18 días)

Asimismo, refleja que la competencia entre plantas de melina fue mayor conforme aumentó el número de días en los enraizadores; este patrón se reflejó en el periodo de 18 días (T4), mostrando gran heterogeneidad en la altura de las plantas dentro de los túneles. Según Rodríguez (2010), este patrón amenaza con reprimir el crecimiento de plantas que crecen a menor ritmo; por esta razón, es importante obtener plantas más uniformes en altura al finalizar el proceso de enraizamiento y endurecimiento, antes de ser llevadas al campo.

En el cuadro 9 se muestran ecuaciones generadas a partir de modelos lineales generalizados basados en la altura final de las plantas y los tratamientos, utilizando como covariable a las variables de entrada, con el fin de separar el efecto debido a los tratamientos de aquel, debido a las variables de entrada, en función de la variable respuesta. En este sentido, las ecuaciones permiten estimar la altura probable que pueden llegar a tener las plantas de melina después del proceso de enraizamiento según cada tratamiento y valor de los esquejes en diámetro, longitud o biomasa verde de entrada.

Por ejemplo, si deseamos estimar la altura que puede llegar a medir una planta de melina a los 15 días (T3) después del proceso de enraizamiento y con un diámetro inicial del esqueje de 3 mm, se aplicaría la ecuación del cuadro 9, correspondiente a la representación gráfica de la figura 8. En este caso, la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$y = 8,48+0,34*0+1,01*1+0,42*0+0,06*3= \mathbf{9,67 \text{ cm}}$$

Se podría estimar que esquejes con 15 días de enraizamiento y diámetros iniciales de 3 mm, podrán alcanzar una altura promedio de 9,67 cm al finalizar dicho proceso.

Cuadro 9. Ecuaciones de modelos estadísticos explicativos, utilizando variables de entrada como covariables según la altura promedio de las plantas de *Gmelina arborea*.

Modelo	Ecuación
<p>Tratamiento + Diámetro (mm) ***</p> <p>(Representación gráfica figura 8)</p>	<p>$y = a + b_2 \cdot T_2 + b_3 \cdot T_3 + b_4 \cdot T_4 + b_5 \cdot d$</p> <p>Dónde: y=variable respuesta, a= intercepto, b=coeficiente, T=Tratamiento, d=diámetro (mm)</p> <p>$y = 8,48 + 0,34 \cdot T_2 + 1,01 \cdot T_3 + 0,42 \cdot T_4 + 0,06 \cdot \text{diámetro (mm)}$</p> <p>R² ajustado: 12,45 %</p>
<p>Tratamiento + Longitud (cm) ***</p> <p>(Representación gráfica figura 9)</p>	<p>$y = a + b_2 \cdot T_2 + b_3 \cdot T_3 + b_4 \cdot T_4 + b_5 \cdot L$</p> <p>Dónde: y=variable respuesta, a= intercepto, b=coeficiente, T=Tratamiento, L=Longitud (cm)</p> <p>$y = 1,49 + 0,32 \cdot T_2 + 0,99 \cdot T_3 + 1,03 \cdot T_4 + 0,90 \cdot \text{Longitud (cm)}$</p> <p>R² ajustado: 27,4 %</p>
<p>Tratamiento + Biomasa verde de entrada (g) ***</p> <p>(Representación gráfica figura 10)</p>	<p>$y = a + b_2 \cdot T_2 + b_3 \cdot T_3 + b_4 \cdot T_4 + b_5 \cdot bve \text{ (g)}$</p> <p>Dónde: y=variable respuesta, a= intercepto, b=coeficiente, T=Tratamiento, bve=biomasa verde de entrada (g)</p> <p>$y = 8,07 + 0,39 \cdot T_2 + 1,10 \cdot T_3 + 0,70 \cdot T_4 + 0,31 \cdot bve \text{ (g)}$</p> <p>R² ajustado: 13 %</p>

*** **Nota:** Si se desea probar el T1, los coeficientes b2, b3 y b4 se multiplican por 0, es decir, se cancelan. Para probar el T2, T3 o T4, se multiplica el coeficiente respectivo al tratamiento que se desee, por el valor de 1 y los coeficientes de los otros tratamientos se multiplican por 0.

En las figuras 8, 9 y 10, se representan gráficamente las ecuaciones descritas en el cuadro 9, mostrando la altura promedio de las plantas por tratamiento, utilizando como covariables el diámetro, longitud y biomasa verde de entrada respectivamente. Además, se muestra que los esquejes alcanzaron mayor altura al finalizar el proceso de enraizamiento, al entrar a los túneles con mayor diámetro, longitud y biomasa verde.

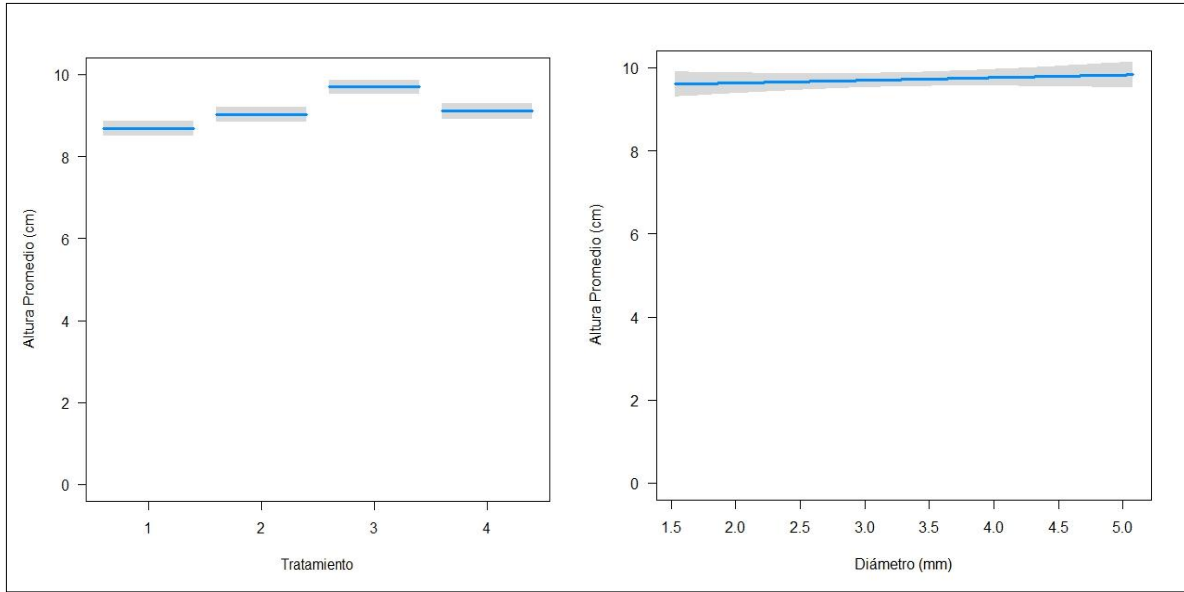


Figura 8. Modelo lineal general basado en la altura ~ Tratamiento + Diámetro (covariable): T1 (9 días), T2 (12 días), T3 (15 días), T4 (18 días)

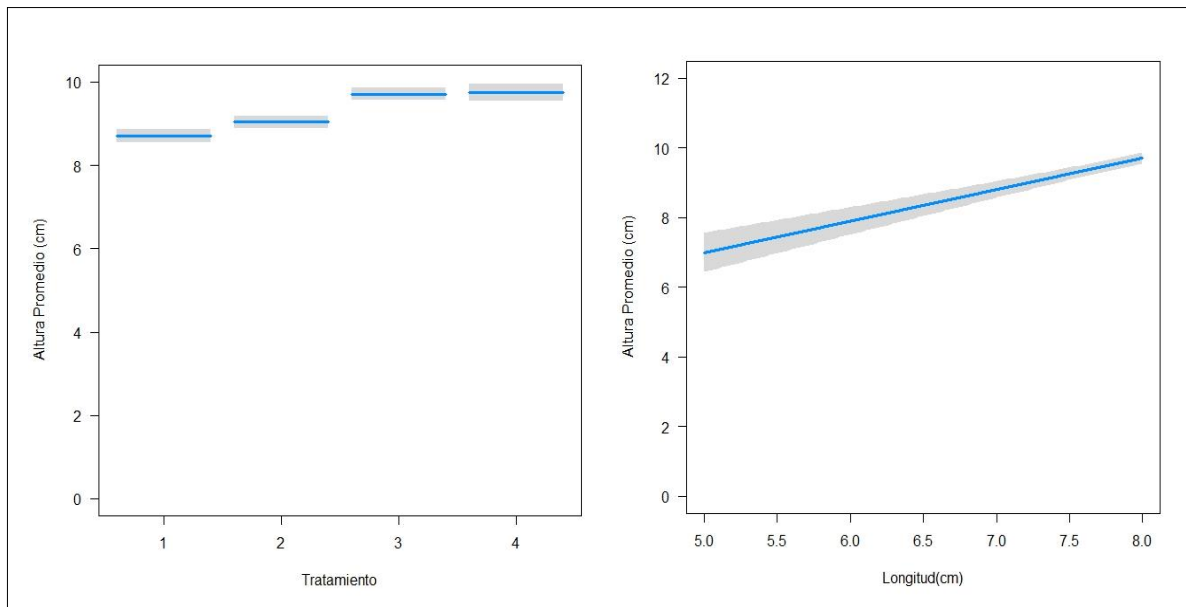


Figura 9. Modelo lineal general basado en la altura ~ Tratamiento + Longitud (covariable): T1 (9 días), T2 (12 días), T3 (15 días), T4 (18 días)

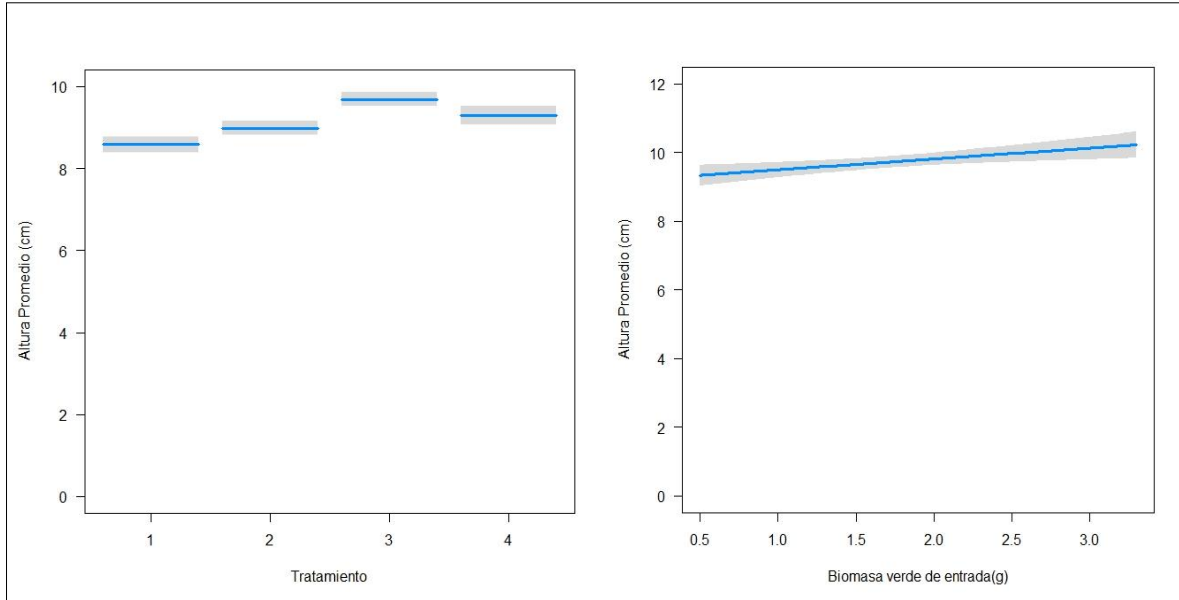


Figura 10. Modelo lineal general basado en la altura ~ Tratamiento + Biomasa verde de entrada (covariable): T1 (9 días), T2 (12 días), T3 (15 días), T4 (18 días)

Cuadro 10. Prueba de medias sobre la altura final según el material genético evaluado para los esquejes enraizadas de *Gmelina arborea*.

Clon	Media (cm)
5	9,14 A
9	9,14 A
6	9,12 A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

No se registraron diferencias estadísticamente significativas en cuanto al desarrollo de la altura final de las plantas enraizadas, entre los tres clones utilizados en la presente investigación; es decir, ningún clon sobresalió en el desarrollo de la altura a nivel de vivero (cuadro 10). El clon 6 fue el que registró el menor crecimiento en dicha variable, no obstante su diferencia con los clones 5 y 9 fue de tan sólo 0,21%. A nivel de genotipos, en edades tempranas de las plantas en vivero, la altura no se debería considerar como una variable por utilizar para selección temprana del material que será llevado al campo, ya que no presenta correlación constante con las características dasométricas (Ávila, 2015).

La distribución de la biomasa seca final de las plantas de melina se refleja en la figura 11, donde se muestra mayor dispersión de los datos en los tratamientos 1, 2 y 3. Por el contrario, el T4 reportó valores más homogéneos, por lo tanto, menor variabilidad en el peso de las plantas al finalizar el proceso de enraizamiento.

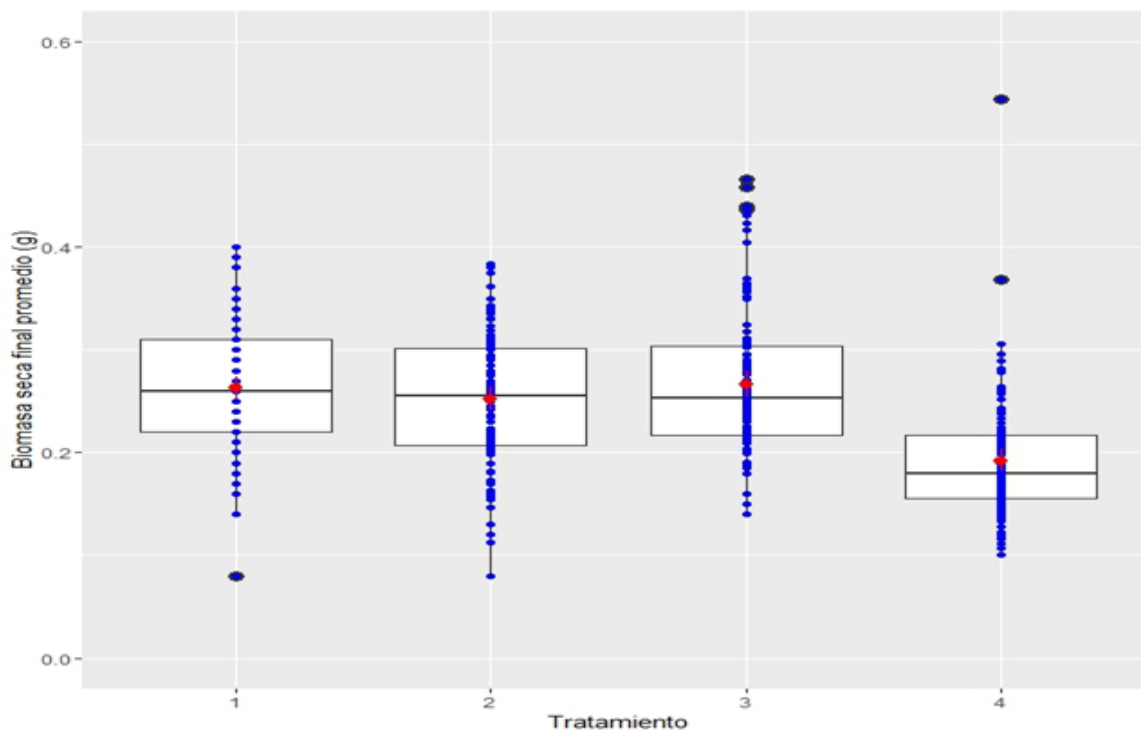


Figura 11. Distribución de la biomasa seca final de las plantas de *Gmelina arborea* según el número de días de enraizamiento: T1 (9 días), T2 (12 días), T3 (15 días), T4 (18 días).

En la figura 12 se muestra el efecto de los tratamientos, con respecto a la biomasa final, en cada una de las partes evaluadas de las plantas de melina, como el sistema radicular, la biomasa aérea (follaje) y la suma de ambas partes.

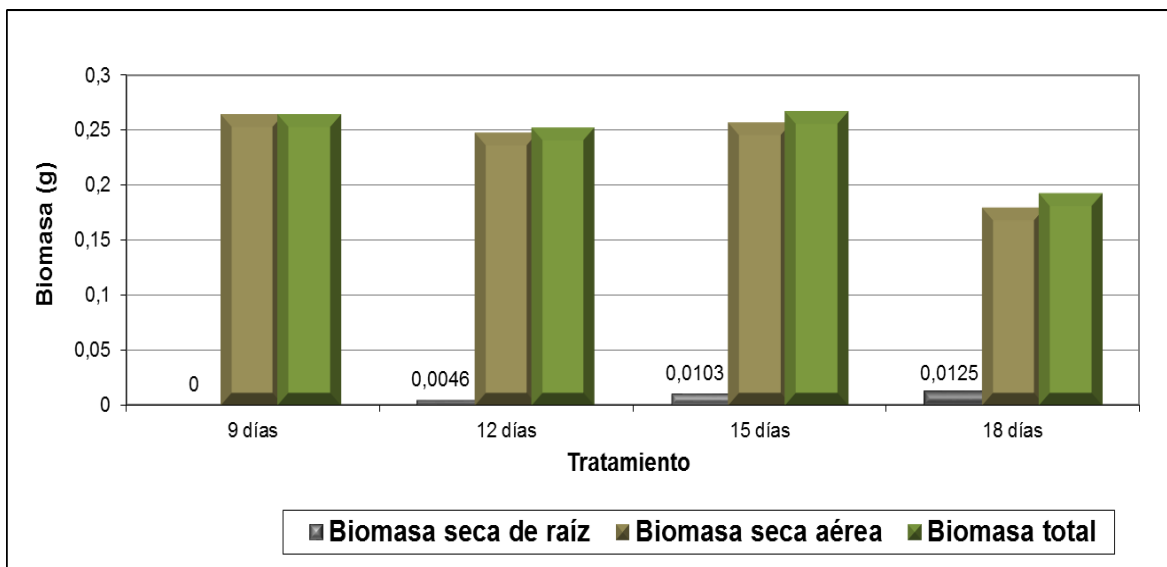


Figura 12. Efecto en el número de días de enraizamiento sobre la biomasa seca del sistema radicular, biomasa aérea y biomasa total de las plantas de *Gmelina arborea*.

Al finalizar el proceso de enraizamiento, el incremento en la biomasa total de las plantas de melina evaluadas, no fue proporcional al número de días según cada tratamiento. El tratamiento de 15 días en los túneles registró la mayor cantidad de biomasa total, sin embargo, no se registraron diferencias significativas entre dicho tratamiento y los de 9 y 12 días de permanencia en los túneles (cuadro 11). Lo anterior es influenciado por el desprendimiento de hojas en los esquejes, una vez que son colocados en los túneles; luego las hojas comienzan a crecer hasta que saturan el espacio aéreo y si inicia la competencia por luz, lo que genera un crecimiento diferencial en altura, que se agrava con el tiempo en perjuicio de las plantas más pequeñas.

El tratamiento de 18 días sí presentó diferencias significativas en cuanto a la biomasa total con respecto a los demás; el mismo reportó una disminución de 28% con respecto al de 15 días, lo que se considera como un resultado por tomar muy en cuenta en la programación y seguimiento de los períodos de enraizamiento de las plantas. Lo anterior sugiere, que los esquejes con 18 días dentro de los túneles de enraizamiento podrían llegar a sufrir estrés por la competencia entre los mismos, y llegan a verse suprimidos hasta provocar la caída de hojas, iniciando con las hojas recortadas que se le dejan al esqueje en el momento de ingresar a los túneles, hasta inclusive llegar al punto donde se provoquen su muerte.

Como era de esperarse, se registró un incremento en el crecimiento del sistema radicular de las plantas conforme aumentaba la cantidad de días de permanencia en los túneles, hasta llegar a la evaluación, a los 18 días, donde se registró la mayor cantidad de biomasa de raíz. Lo anteriormente indicado, a excepción de la evaluación realizada a los 9 días, en la cual no se registró crecimiento en raíz (cuadro 11).

El aumento en la biomasa de raíz conforme aumenta la cantidad de días en los túneles, se tradujo en diferencias significativas entre todos los cuatro tratamientos evaluados. Por su parte, tanto para la biomasa aérea como para la total, sólo se determinaron diferencias entre el tratamiento de 18 días (menor media) y todos los demás (9, 12 y 15 días) que fueron estadísticamente iguales entre ellos. Lo anterior sugiere, que si bien es cierto la planta pierde biomasa foliar desde que el esqueje entra al túnel hasta la evaluación a los 18 días, la misma no es estadísticamente significativa.

Cuadro 11. Prueba de medias sobre la biomasa de raíz, aérea y total para cada tratamiento según los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*.

Tratamiento (días)	Biomasa de raíz (g)	Biomasa aérea (g)	Biomasa total (g)
9	0,0000 A	0,2636 B	0,2636 B
12	0,0046 B	0,2473 B	0,2519 B
15	0,0103 C	0,2561 B	0,2664 B
18	0,0125 D	0,1794 A	0,1919 A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

El mayor incremento registrado en biomasa de raíz fue de 55,3% en el periodo de enraizamiento comprendido entre los 12 y 15 días, lo que coincide con el momento antes de que se presente la mayor pérdida de biomasa foliar, y por ende la mayor disminución en actividad fotosintética. Al respecto Flores (1994), indica que la raíz ejerce influencia reguladora sobre el crecimiento de las plantas, ya que son las encargadas de transportar las sustancias que ayudan en los procesos fisiológicos de las plantas como la fotosíntesis y el crecimiento. Por lo tanto, plantas con mayor sistema radicular presentan mayor tasa de supervivencia en el campo (Rodríguez, 2010).

Con estos resultados se evidencia que *G. arborea* es una especie con buena capacidad para enraizar en un periodo relativamente corto, por ejemplo, si se lo compara con el periodo de propagación por

esquejes de varios tipos de *Eucalyptus*, comprendiendo periodos de 20 a 45 días (Xavier *et al.*, 2009).

En cuanto al material genético utilizado, se registraron diferencias significativas entre los tres clones en cuanto a su biomasa total; por ejemplo, el 9 registró la mayor y el 6 la menor biomasa (cuadro 12). El mismo patrón se presentó en la biomasa aérea, no obstante, en la biomasa de raíz no se mostraron diferencias estadísticas entre los tres clones, solamente entre el clon 5 y 6. De igual forma, Hernández y Salas (2009), reportaron diferencias significativas en la biomasa aérea y radicular entre genotipos de *G. arborea* en vivero.

Cuadro 12. Prueba de medias sobre la biomasa de raíz, aérea y total según el material genético evaluado para los esquejes enraizados de *Gmelina arborea*.

Clon	Biomasa de raíz	Biomasa aérea	Biomasa total (g)
6	0,0060 A	0,2147 A	0,2206 A
5	0,0079 B	0,2346 B	0,2425 B
9	0,0068 AB	0,2605 C	0,2672 C

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Según Ferreira *et al.* (2004), para definir el periodo óptimo de enraizamiento es importante considerar dos aspectos: el costo de instalación y el riesgo de incidencia de enfermedades dentro de los túneles de enraizamiento. Con base en el análisis de las variables analizadas, según los tratamientos en el presente estudio y considerando ambos aspectos anteriormente mencionados, el proceso de enraizamiento ideal debería ser de 15 días.

En el cuadro 13 se muestran ecuaciones generadas a partir de modelos lineales generales, basados en la biomasa seca final de las plantas (variable respuesta), los tratamientos y las variables de entrada (utilizadas como covariables). En este sentido, las ecuaciones estiman el peso probable que pueden obtener las plantas al finalizar el proceso de enraizamiento, según cada tratamiento y valor de los esquejes, con respecto a las variables de entrada.

Cuadro 13. Ecuaciones de modelos estadísticos explicativos, utilizando variables de entrada como covariables, según la biomasa seca final, promedio de las plantas de *Gmelina arborea*.

Modelo	Ecuación
<p>Tratamiento + Diámetro (mm) ***</p> <p>(Representación gráfica figura 13)</p>	<p>$y = a + b_2 \cdot T_2 + b_3 \cdot T_3 - b_4 \cdot T_4 + b_5 \cdot d$</p> <p>Dónde: y=variable respuesta, a= intercepto, b=coeficiente, T=Tratamiento, d=diámetro (mm)</p> <p>$y = 0,088 + 0,006 \cdot T_2 + 0,017 \cdot T_3 - 0,016 \cdot T_4 + 0,049 \cdot \text{diámetro (mm)}$</p> <p>R² ajustado: 35,63 %</p>
<p>Tratamiento + Longitud (cm) ***</p> <p>(Representación gráfica figura 14)</p>	<p>$y = a - b_2 \cdot T_2 + b_3 \cdot T_3 - b_4 \cdot T_4 + b_5 \cdot L$</p> <p>Dónde: y=variable respuesta, a= intercepto, b=coeficiente, T=Tratamiento, L=Longitud (cm)</p> <p>$y = 0,070 - 0,011 \cdot T_2 + 0,003 \cdot T_3 - 0,053 \cdot T_4 + 0,024 \cdot \text{Longitud (cm)}$</p> <p>R² ajustado: 20,47 %</p>
<p>Tratamiento + Biomasa verde de entrada (g) ***</p> <p>(Representación gráfica figura 15)</p>	<p>$y = a + b_2 \cdot T_2 + b_3 \cdot T_3 + b_4 \cdot T_4 + b_5 \cdot \text{bve (g)}$</p> <p>Dónde: y=variable respuesta, a= intercepto, b=coeficiente, T=Tratamiento, bve=biomasa verde de entrada (g)</p> <p>$y = 0,078 + 0,011 \cdot T_2 + 0,033 \cdot T_3 + 0,031 \cdot T_4 + 0,092 \cdot \text{bve (g)}$</p> <p>R² ajustado: 45,94 %</p>

*** **Nota:** Si se desea probar el T1, los coeficientes b2, b3 y b4 se multiplican por 0, es decir, se cancelan. Para probar el T2, T3 o T4, se multiplica el coeficiente respectivo al tratamiento que se desee, por el valor de 1 y los coeficientes de los otros tratamientos se multiplican por 0.

Como ejemplo se utilizará la ecuación del modelo *Tratamiento + Biomasa verde de entrada (g)*, para estimar la biomasa seca final, que podrían tener las plantas al finalizar el proceso de enraizamiento.

Ejemplo 1: Tratamiento 1: $0,078 + 0,011 \cdot 0 + 0,033 \cdot 0 + 0,031 \cdot 0 + 0,092 \cdot 3 = \mathbf{0,354 \text{ g}}$

Ejemplo 2: Tratamiento 4: $0,078 + 0,011 \cdot 0 + 0,033 \cdot 0 + 0,031 \cdot 1 + 0,092 \cdot 3 = \mathbf{0,385 \text{ g}}$

En los ejemplos anteriores se utilizaron esquejes con la misma biomasa verde de entrada, pero con diferentes periodos de enraizamiento (T1 y T4), para estimar la biomasa seca final que puede llegar a pesar la planta.

Las figuras 13, 14 y 15 representan gráficamente las ecuaciones descritas en el cuadro 13, donde se muestra el comportamiento de los tratamientos con respecto a la biomasa seca final, utilizando como

covariables, el diámetro, longitud y biomasa verde de entrada respectivamente. Dichas covariables muestran un efecto lineal, es decir, esquejes con un valor inicial mayor en las variables de entrada, obtendrán mayor biomasa seca final.

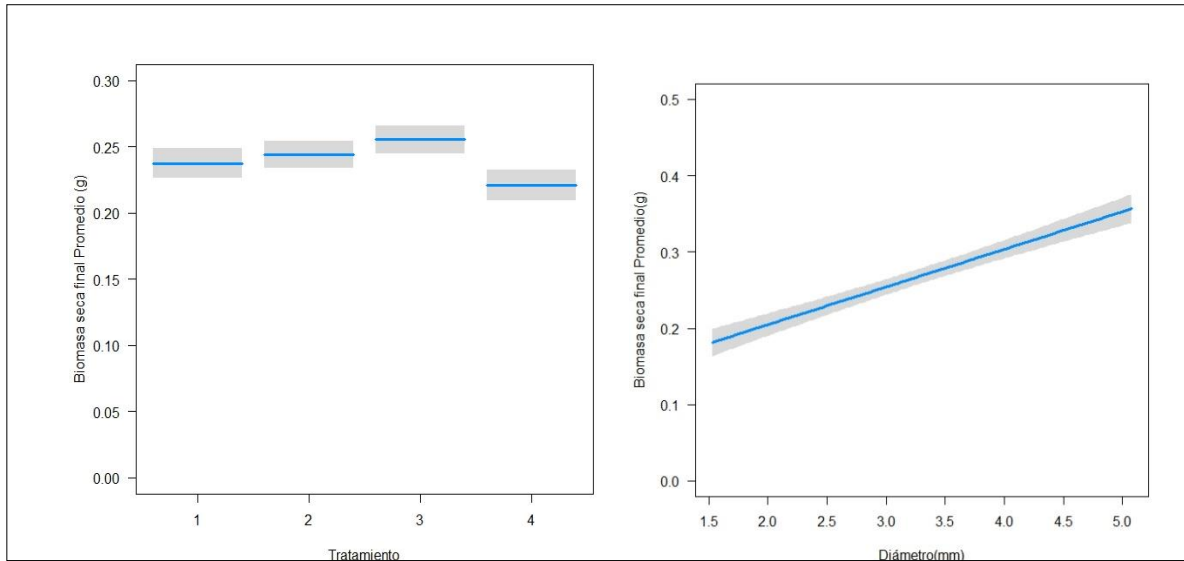


Figura 13. Modelo lineal general basado en la biomasa final ~ Tratamiento + diámetro (covariable) T1 (9 días), T2 (12 días), T3 (15 días), T4 (18 días)

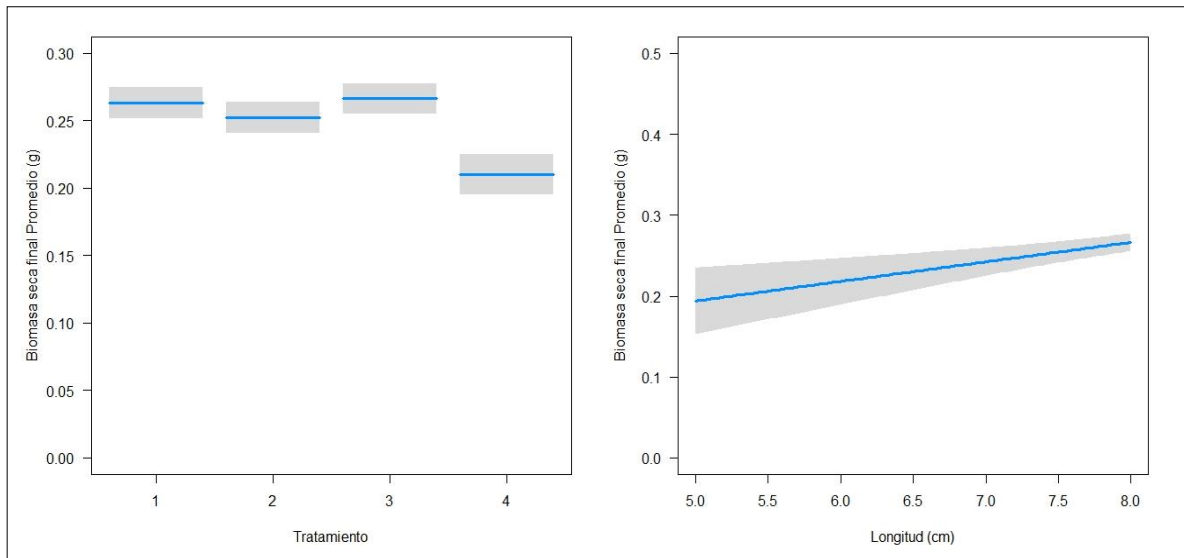


Figura 14. Modelo lineal general basado en la biomasa final ~ Tratamiento + Longitud (covariable) T1 (9 días), T2 (12 días), T3 (15 días), T4 (18 días)

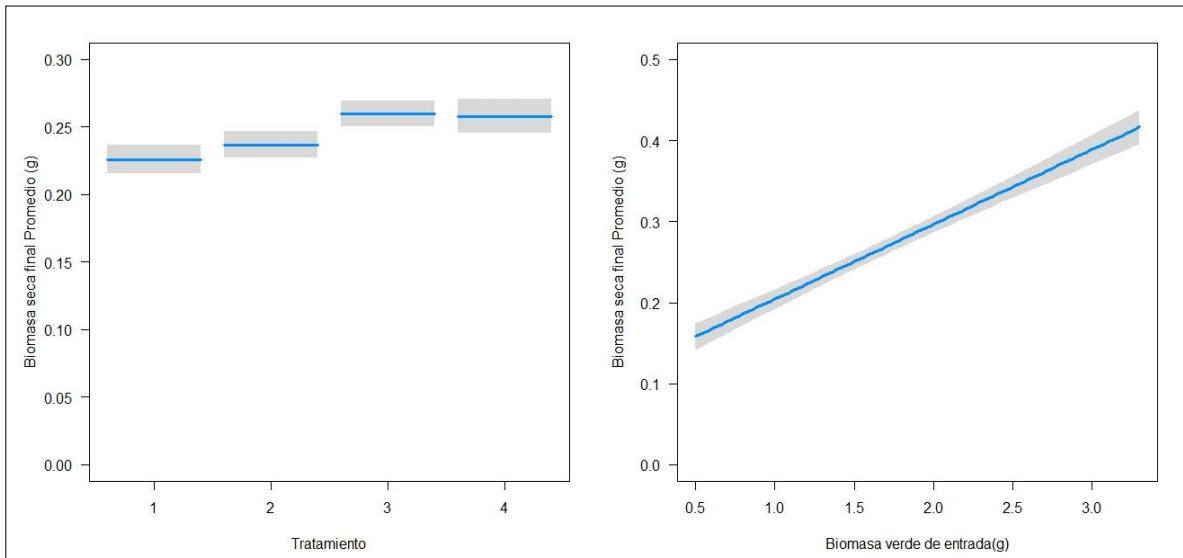


Figura 15. Modelo lineal general basado en la Biomasa final ~ Tratamiento + Biomasa verde de entrada (covariable) T1 (9 días), T2 (12 días), T3 (15 días), T4 (18 días)

Conclusiones

No se registraron diferencias significativas ni entre los tratamientos ni entre los clones en cuanto al enraizamiento de los esquejes. Se obtuvo un promedio general de 98% y el tratamiento de 15 días presentó 100%.

El modelo enraizamiento + tratamiento + diámetro explicó con mejor ajuste que los esquejes con menor diámetro, hasta 1,5 mm, tienen mayores posibilidades de enraizar. Ratificado en la correlación negativa entre el diámetro y la biomasa verde de entrada con el enraizamiento.

Las plantas registraron mayor altura final con el tratamiento de permanencia de 15 días en los túneles de enraizamiento; dicho tratamiento presentó diferencias estadísticamente significativas con los demás. De la misma manera la mayor cantidad de biomasa total se reportó en el tratamiento de 15 días en los túneles.

No se encontraron diferencias estadísticas entre los clones utilizados para la variable altura final, pero sí en cuanto a biomasa total.

El mayor incremento en cuanto al porcentaje de enraizamiento se presentó entre los 12 y 15 días con un 55,3%. A los 9 días los esquejes aún no habían enraizado. Para lograr un adecuado

enraizamiento y biomasa se determina 15 días como el período óptimo de permanencia de los esquejes en los túneles de enraizamiento.

Es recomendable, después del proceso de enraizamiento, realizar estudios sobre el periodo óptimo de las plantas en la etapa de endurecimiento, para mejorar el sistema productivo en vivero. Es importante considerar estudios más minuciosos sobre el sistema radicular de las plantas de melina.

Referencias

- Alfenas, A., Zauza, E., Mafía, T. y Assis, T. (2004). Clonagem e doenças do eucalipto. *Vicosa*, 442.
- Andrade, V., Santos, V., García, M., Rodríguez, R., Franciskievicz, D. y Dos Santos, J. (2013). Índice de área foliar em mudas clonais de *Eucalyptus* sp. *Scientific Electronic Archives*, 2, 6-9.
- Araya, E., Murillo, O., Aguilar, G. y Rocha, O. (2005). Relaciones genéticas en una colección de clones de *Gmelina arborea* (Roxb) reveladas con marcadores AFLP. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 2 (6), 1-14.
- Ávila, C. (2015). Evaluación del crecimiento y calidad en clones de *Gmelina arborea* Roxb. a los dos años, en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Costa Rica: Heredia, Costa Rica.
- Ávila, C., Murillo, R., Murillo, O. y Sandoval, C. (2015). Interacción genotipo sitio para dos conjuntos clonales de *Gmelina arborea* Roxb., en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 12 (29), 02-14.
- Bañon, S., Martínez, J., Fernández, A., Balanzategui, L. y Melgares, J. (2002). Influencia de la topofisis en el esquejado de *Coriara myrtifolia*. Sevilla, España: Primera Jornada Ibérica de Plantas Ornamentales. Recuperado de <http://www.ocamurcia.es/Floricultura/topofisis.pdf>
- Caballero, F. (2011). Selección de modelos mediante criterios de información en análisis factorial. Aspectos teóricos y computacionales. (Tesis Doctoral). Universidad de Granada. Departamento de Estadística e I.O. Granada, España.
- Dvorak, W. (2004). World view of *Gmelina arborea*: opportunities and challenges. *New Forests*, 28, 111-126.
- Fallas, J. (2011). Investigación. Camino o ruta recorrido para responder a preguntas o someter a prueba hipótesis. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica.
- Ferreira, E., Alfenas, A., Goncalves, R., García, H., Cardoso, R. y Penchel, R. (2004). Determinação do tempo óptimo do enraizamento de miniestacas de clones de *Eucalyptus* spp. *Revista Árvore*, 28 (2), 183-187.

- Fett, A., Fett, J., Vieira, L., Pasquali, G., Termignoni, R. y Ferreira, A. (2001). Distinct effects of auxin and light on adventitious root development in *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus globules*. *Tree Physiology*, 21, 457-464.
- Flores, E. (1994). *La Planta: estructura y función*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Gárate, M. (2010). *Técnicas de propagación por estacas*. Ucayali, Perú: Universidad Nacional de Ucayali.
- Hernández, W. y Salas, E. (2009). La inoculación con *Glomus fasciculatum* en el crecimiento de cuatro especies forestales en vivero y campo. *Agronomía Costarricense*, 33 (1), 17-30.
- Indira, E. (2006). Provenance variations in *Gmelina arborea* with particular reference to tree form. *Journal of Tropical Forest Science*, 18 (1), 36-50 pp.
- Lahura, E. (2003). El coeficiente de correlación y correlaciones espúreas. Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Economía. PE. Recuperado de: <http://departamento.pucp.edu.pe/economia/images/documentos/DDD218.pdf>
- Mesén, F. (1998). Enraizamiento de estacas juveniles de especies forestales: uso de propagadores de sub-irrigación. CATIE. Proyecto de Semillas Forestales-PROSEFOR, (Serie Técnica. Manual Técnico No. 30). Turrialba, Costa Rica. 36 p.
- Moraes, C., Fonseca, R. y Rui, M. (2014). Influencia das folhas no enraizamento de miniestacas de híbridos de eucalipto. *Nucleus*, 11(1), 101-106.
- Muñoz, L., Vargas, J., López, J. y Soto, M. (2009). Effect of cutting age and substrate temperature on rooting of *Taxus globosa*. *New forests*, 38, 187-196.
- Murillo, O. y Badilla, Y. (2005). *Propagación vegetativa de la teca en Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica: Cartago, Costa Rica.
- Murillo, O. y Guevara, V. (2013). Capítulo IV, Estado y manejo sostenible de los recursos genéticos forestales, pp 66-75. En: Estado de los recursos genéticos forestales de Costa Rica. MINAET/FAO/CONAGEBIO. San José, Costa Rica. 159 pp.
- Murrieta, C. (2010). Influencia del morfotipo, fitohormona y sustrato en la propagación de estacas juveniles de *Cedrela odorata* L. (Cedro colorado), en Pucallpa, Perú. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Ucayali, Pucallpa, Perú.
- ONF. (2013). *Usos y aportes de la madera en Costa Rica: Estadísticas 2013*. San José, Costa Rica: ONF.
- Rodrigues, S., Xavier, A., Silva, L., Amaral, L. y Rosado, A. (2011). Enraizamiento de miniestacas de clones híbridos de *Eucalyptus globulus*. *Revista Árvore*, 35 (3), 425-434.

- Rodríguez, R. (2010). Manual de prácticas de viveros forestales. Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, México. Recuperado de http://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icap/LI_IntGenAmb/Rodri_Laguna/2.pdf
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O. y Arguedas, M. (2004). Manual para productores de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica: Botánica y Ecología. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Rojas, F. y Murillo, O. (2004). Botánica y Ecología. En: Manual para productores de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Rojas, G., García, J. y Alarcón, M. (2004). Propagación asexual de plantas: conceptos básicos y experiencias con especies amazónicas. Bogotá, DC, Colombia. Recuperado de: <https://ecojardines.files.wordpress.com/2013/12/propagacinasexualdeplantas.pdf>
- Salas, R. (2012). Evaluación de un ensayo genético de *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón. (Tesis de licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Soto, P. (2004). Reproducción vegetativa por estacas en *Amomyrtus luma* (luma), *Amomyrtus meli* (meli) y *Luma apiculata* (arrayán) mediante el uso de plantas madres jóvenes y adultas (Trabajo final Ingeniero Forestal). Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia, Chile.
- Vial, E., Baldini, A. y Duchens, L. (2013). Guía básica de buenas prácticas para plantaciones forestales de pequeños y medianos propietarios. Santiago, Chile. Corporación Nacional Forestal. Recuperado de http://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1386687876guiabuensaspracticas_ppf.pdf
- Vinuesa, P. (2008). Máxima verosimilitud, estima de parámetros y selección de modelos. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México. Recuperado de: http://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/Cursos_PDFs/Tema7_ML_estima_de_parametros_y_seleccion_de_modelos.pdf
- Xavier, A., Wendling, A. y Da Silva, R. (2009). Silvicultura clonal: principios e técnicas. Vicosa, Brasil: Universidade Federal de Vicosa.

5. CONCLUSIONES GENERALES

Artículo 1

El porcentaje de enraizamiento promedio fue 75,7%; no se registraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, ni entre los clones evaluados. Según el Criterio de Información de Akaike, el modelo de enraizamiento basado en el tratamiento + biomasa verde explicó mejor el porcentaje de enraizamiento.

Se registraron diferencias significativas con respecto a la altura final de los esquejes enraizados entre el tratamiento 3 y el 1 y 2. No se obtuvieron diferencias entre los tratamientos 3 y 4; es decir, el tratamiento de mayor área foliar en el esqueje no mostró la mayor altura final de las plantas.

En las variables: área foliar final y biomasa total de las plantas, se registraron diferencias estadísticas entre los tratamientos; el tratamiento de 20 cm² fue superior para ambas variables. La variabilidad genética de los clones influyó en cuanto al área foliar final, donde el clon 5 presentó diferencias estadísticas significativas con respecto al 6 y 9.

Los esquejes con 12 cm² de área foliar, disminuyeron el porcentaje de enraizamiento de las plantas. Por el contrario, reducir el área foliar de los esquejes a 20 cm² aumentó el porcentaje de enraizamiento, mejoró el desarrollo de raíces y follaje, durante el proceso de enraizamiento.

Para asegurar altos porcentajes de enraizamiento en las plantas de melina, los esquejes deben entrar en los enraizadores con 20 cm² de área foliar, con pesos

entre 1 y 2,9 gramos y diámetros entre 2 y 4 milímetros para que la producción de plantas en el vivero sea más eficiente.

Artículo 2

No se registraron diferencias significativas ni entre los tratamientos ni entre los clones en cuanto al enraizamiento de los esquejes. Se logró un promedio general de 98% y el tratamiento de 15 días presentó 100%.

El modelo enraizamiento + tratamiento + diámetro explicó con mejor ajuste que los esquejes con menor diámetro tienen mayor posibilidades de enraizar, lo cual está ratificado en la correlación negativa entre el diámetro y la biomasa verde de entrada con el enraizamiento.

Las plantas registraron mayor altura final con el tratamiento de permanencia de 15 días en los túneles de enraizamiento; dicho tratamiento presentó diferencias estadísticamente significativas con los demás. De la misma manera, la mayor cantidad de biomasa total se reportó en el tratamiento de 15 días en los túneles.

No se registraron diferencias estadísticas entre los clones utilizados para la variable: altura final, pero sí en cuanto a biomasa total.

El mayor incremento en cuanto al porcentaje de enraizamiento se presentó entre los 12 y 15 días con un 55,3%. A los 9 días, los esquejes aún no habían enraizado. Para lograr un adecuado enraizamiento y biomasa, se determina 15 días como el período óptimo de permanencia de los esquejes en los túneles de enraizamiento.

En General para asegurar altos porcentajes de enraizamiento, alturas más homogéneas, mayor producción de biomasa en las plantas de melina, es decir, plantas de mejor calidad, los esquejes deben ingresar en los enraizadores con 20 cm² de área foliar, pesos entre 1 y 2,9 gramos, diámetros entre 1,5 y 4 milímetros y permanecer un periodo de 15 días en los túneles de enraizamiento para que la producción de plantas en el vivero sea más eficiente.