

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

**DESEMPEÑO DE CLONES DE *GMELINA ARBOREA* ROXB. EN TRES SITIOS DE LA
REGIÓN HUETAR NORTE, COSTA RICA**

Modalidad Artículo Científico

**Trabajo de graduación sometido a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de
Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional para optar al grado de Licenciatura en
Ingeniería en Ciencias Forestales**

Rodrigo Alberto Benavides Fallas

Heredia, Costa Rica

Noviembre, 2022

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

Ph. D. Ana Hine Gómez
Representante Facultad Tierra y Mar

Ph. D. William Hernández Castro
Representante Edeca

M. Sc. Carlos Ávila Arias
Tutor del trabajo

Lic. Alexis Salas Rodríguez
Lector del trabajo

M. Sc. Rafael Murillo Cruz
Lector del trabajo

Bach. Rodrigo Benavides Fallas
Postulante del trabajo

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo primero a mi abuelo, Enrique Fallas López, que en paz descansa y a mi abuelita, María Elena Cascante Retana, por todos los actos de amor que realizaron para que yo pudiera estar donde estoy. De igual forma, a mi madre, Karolina Fallas Cascante, y a mi padre, Rodrigo Benavides Araya, quienes son mi soporte y mi apoyo en cada paso que doy, me han enseñado sobre la vida. A cada miembro de mi familia que a lo largo de este proceso hizo cosas por mí como levantarme temprano, cocinarme, ayudarme a pasar datos, escucharme, aconsejarme, abrazarme o lo que necesitara, siempre me brindaron su mano y apoyo. Hoy estoy seguro de que toda mi familia está orgullosa de este logro personal y que, si mi abuelo estuviera con nosotros, no dejaría de festejar porque su nieto (el único hombre) llegó un paso más arriba en su carrera profesional. Sé que cada uno de nosotros lo recordará así, porque le debemos mucho y, aunque no está presente, está aquí conmigo para celebrar el fruto de tanto esfuerzo. Se me salen las lágrimas al escribir esto, él estaría muy feliz, incluso casi más que yo y es que sin tito Enrique yo no lo hubiera logrado. Siempre creyó en mí, hasta en sus últimos momentos lo confirmó y esta es mi forma de darle las gracias y que mi abuelita pueda ver adonde llegué.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a todas las personas que han formado parte de este proceso, a quienes me han apoyado e impulsado para cumplir con esta meta en mi vida. Sin ninguna duda a mi familia por siempre estar, por brindarme apoyo siempre que lo necesitaba, por su amor incondicional y por siempre confiar en mí. Además, quiero agradecer a mi tutor, Carlos Ávila Arias, y a mi lector, Rafael Murillo Cruz, que se convirtieron en verdaderos maestros en mi vida universitaria e incluso amigos en mi vida personal, siempre han confiado en mi capacidad para llevar a cabo cualquier trabajo y han extendido la mano cuando la necesito. Hay personas a las que debo agradecer, pero que por circunstancias de la vida ya no están conmigo, sin embargo, por ellos aprendí no solo en el ámbito profesional, sino personal, me ayudaron a enfocarme y a observar y valorar todo lo que me rodea. Un profundo gracias por las enseñanzas y consejos de vida a quienes de una u otra forma me han ayudado a estar un paso más cerca de este logro personal.

Tabla de contenidos

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	i
RESUMEN GENERAL	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN GENERAL	3
REFERENCIAS	6
ARTÍCULOS COMPLETOS DE REVISTA.....	8
Desempeño de clones de <i>Gmelina arborea</i> Roxb en crecimiento, calidad y susceptibilidad a la pudrición del tronco, región Huetar Norte, Costa Rica	8
Resumen.....	8
Abstract	9
Introducción	10
Materiales y métodos.....	11
Resultados y discusión.....	16
Conclusiones.....	26
Agradecimientos.....	27
Referencias	28
Efecto de la calidad del sitio en el crecimiento, calidad y tolerancia a la pudrición en el tronco de clones de <i>Gmelina arborea</i> Roxb.....	40
Resumen	40
Abstract	40
1. Introducción.....	41
2. Metodología.....	42
3. Descripción resultados	46
4. Discusión	54
5. Conclusiones	58
6. Agradecimientos.....	58
7. Ética y conflicto de intereses.....	58
8. Referencias	59
CONCLUSIONES GENERALES.....	62

Índice de cuadros

Artículo 1. Desempeño de clones de *Gmelina arborea* Roxb en crecimiento, calidad y susceptibilidad a la pudrición del tronco, región Huetar Norte, Costa Rica.

Contenido	Página
Cuadro 1. Posición de genotipos de <i>Gmelina arborea</i> respecto a su superioridad fenotípica registrada sobre la media poblacional en variables de crecimiento y calidad, a los 2,8 años en Sitio Upala, Alajuela, Costa Rica	30
Cuadro 2. Jerarquía clonal respecto a su nivel de susceptibilidad a la pudrición en el tronco para <i>Gmelina arborea</i> en Sitio Upala, Alajuela, Costa Rica	32
Cuadro 3. Posición de genotipos de <i>Gmelina arborea</i> respecto a su superioridad fenotípica registrada sobre la media poblacional en variables de crecimiento y calidad, a los 5,9 años en Sitio Cutris, Alajuela, Costa Rica	33
Cuadro 4. Crecimiento, calidad y susceptibilidad a la enfermedad pudrición en el tronco de clones de <i>Gmelina arborea</i> en dos momentos de medición en el sitio Cutris, Alajuela, Costa Rica	35
Cuadro 5. Posición de genotipos de <i>Gmelina arborea</i> respecto a su superioridad fenotípica registrada sobre la media poblacional en variables de crecimiento y calidad, a los 4,3 años en Sitio Guatuso, Alajuela, Costa Rica	36
Cuadro 6. Crecimiento, calidad y susceptibilidad a la enfermedad pudrición en el tronco de clones de <i>Gmelina arborea</i> en dos momentos de medición en el sitio Guatuso, Alajuela, Costa Rica	37
Cuadro 7. Parámetros genéticos del volumen comercial y el volumen comercial de calidad que se evaluaron a los 3 años en clones de <i>Gmelina arborea</i> en la región Huetar Norte, Costa Rica	38

Índice de figuras

Artículo 1. Desempeño de clones de *Gmelina arborea* Roxb en crecimiento, calidad y susceptibilidad a la pudrición del tronco, región Huetar Norte, Costa Rica.

Contenido	Página
Figura 1. Diseño experimental bloques completos al azar, instalado en tres ensayos en la región Huetar Norte de Costa Rica.....	30
Figura 2. Población potencial comercial y de mejoramiento que se identificó para un conjunto genético de <i>Gmelina arborea</i> a los 2,8 años en Sitio Upala, Alajuela, Costa Rica	32
Figura 3. Posición de genotipos de <i>Gmelina arborea</i> respecto a su superioridad fenotípica registrada sobre la media poblacional en variables de crecimiento y calidad, a los 5,9 años en Sitio Cutris, Alajuela, Costa Rica	35
Figura 4. Población potencial comercial y de mejoramiento que se identificó para un conjunto genético de <i>Gmelina arborea</i> a los 4,3 años en Sitio Guatuso, Alajuela, Costa Rica	37

Índice de Cuadros

Artículo 2. Interacción genotipo-ambiente en crecimiento, calidad y tolerancia a la pudrición en el tronco de clones de *Gmelina arborea* Roxb.

Contenido	Página
Cuadro 1. Comparación del conjunto genético clonal superior de <i>Gmelina arborea</i> respecto a la respuesta en parámetros de crecimiento y calidad, en tres sitios de la región Huetar Norte, Costa Rica	47
Cuadro 2. Comparación del conjunto clonal superior de <i>Gmelina arborea</i> en términos volumétricos y de calidad, evaluado en tres ensayos en la región Huetar Norte, Costa Rica	50
Cuadro 3. Tendencia en comportamiento de clones de <i>Gmelina arborea</i> en términos de susceptibilidad a la enfermedad pudrición en el tronco en la región Huetar Norte, Costa Rica	52

Índice de figuras

Artículo 2. Interacción genotipo-ambiente en crecimiento, calidad y tolerancia a la pudrición en el tronco de clones de *Gmelina arborea* Roxb.

Contenido	Página
Figura 1. Diseño experimental bloques completos al azar instalado en tres ensayos en la región Huetar Norte de Costa Rica.....	44
Figura 2. Comportamiento del conjunto genético de clones de <i>Gmelina arborea</i> en severidad e incidencia a la enfermedad de pudrición en el tronco registrado en tres sitios de la región Huetar Norte, Costa Rica.....	48
Figura 3. Población superior, potencial y no deseable en variables de volumen comercial de calidad y susceptibilidad a la pudrición en el tronco de clones de <i>Gmelina arborea</i> en la región Huetar Norte, Costa Rica.....	49
Figura 4. Comparación del conjunto genético superior de <i>Gmelina arborea</i> clonal en susceptibilidad a la enfermedad de la pudrición en el tronco en tres ensayos en la región Huetar Norte, Costa Rica.....	52

Desempeño de clones de *Gmelina arborea* Roxb. en tres sitios de la región huetar norte, costa rica

RESUMEN GENERAL

Los productores en Costa Rica enfrentan una disminución en la productividad en sus fincas, lo que les obliga a asumir costos de producción que afectan la rentabilidad de sus sistemas de producción forestal. La melina (*Gmelina arborea* Roxb.) es una especie con potencial para el abastecimiento sostenible de madera para el mercado nacional, además, actualmente es una de las especies de mayor desarrollo en programas de mejoramiento genético (PMG). Esto se debe a que a través de la silvicultura clonal es posible aumentar la productividad. La finalidad de esta investigación fue identificar genotipos superiores de la especie en estudio, los cuales, en cuanto al sitio específico, presenten el mejor desempeño en cuanto a (i) crecimiento, (ii) calidad y (iii) capacidad de respuesta ante problemas fitosanitarios. En este trabajo, primero se caracterizó el desempeño de 15 genotipos de melina que se evaluaron en dos de tres sitios y 14 genotipos en uno de los sitios, todos clase II en la región Huetar Norte (RHN), para estimar las diferencias estadísticas y la superioridad fenotípica (SF) de cada clon de acuerdo con su desempeño en volumen comercial (VC), calidad (C %) y volumen comercial de calidad (VCC) y se clasificaron respecto a su susceptibilidad a la enfermedad *podrición en el tronco*. A nivel fenotípico se identificó la población potencial comercial como los clones superiores al promedio poblacional en VCC, mientras que a nivel genotípico se estimaron parámetros genéticos para determinar la capacidad del conjunto en cada sitio. Posteriormente, con el objeto de determinar la existencia de una interacción *genotipo-ambiente*, se dividió el conjunto en genotipos deseables y no deseables con base en la SF por su desempeño en VCC, también se establecieron categorías de susceptibilidad a la enfermedad y se clasificaron los clones de acuerdo con su estabilidad en el comportamiento entre sitios, al identificar los clones especialistas por ambiente. La población potencial comercial identificada con respecto a la totalidad de conjunto genético evaluado en sitio Upala, a los 2,8 años, corresponde al 53 % de los clones, los cuales, aumentarían la productividad en el VCC en $2,21 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ al realizar una nueva plantación con estos; en sitio Cutris (5,9 años) 55 % de los clones representa una superioridad fenotípica de $1,73 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en el VCC y en sitio Guatuso (4,3 años) 61.5 % de los genotipos impactaría en $3,24 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ el VCC. Para los parámetros genéticos, los mejores resultados en heredabilidad individual (h^2g), heredabilidad media del clon (h^2mc) y el coeficiente de variación genético (CVg %) se reportan para la variable VCC en todas las localidades, en el sitio Guatuso se

obtuvieron los parámetros más deseables (0,14, 0,84 y 19.87 % respectivamente. Por otra parte, la población de clones especialistas identificada fue 4, 6, 7 para Guatuso y Cutris, 8, 9 y 11 para Guatuso y Upala, el clon 10 para Cutris, el genotipo 3 para Upala y los clones 12 y 13 para Guatuso, asimismo, el clon 5 resultó generalista para los sitios clase II en la RHN. Se concluye que en la región existe potencial fenotípico para impactar positivamente la rentabilidad de las unidades de producción y los parámetros genéticos evidencian la capacidad genética de conjunto clonal estudiado. Además, se determinó la existencia de interacción *genotipo-ambiente* dadas las diferencias en el comportamiento de los genotipos a nivel fenotípico en los tres sitios de estudio.

Palabras clave: superioridad fenotípica; parámetros genéticos; genotipo-ambiente; silvicultura clonal; aumento productividad.

ABSTRACT

Farmers in Costa Rica face a decrease in productivity on their farms, which forces them to assume production costs that affect the profitability of their forestry production systems. Melina (*Gmelina arborea* Roxb.) is a specie with potential for the sustainable supply of wood for the national market, in addition, it is currently one of the most developed species in genetic improvement programs (PMG). Because through clonal forestry it is possible to increase productivity, the purpose of this research was to identify superior genotypes of the specie under study, which, at the specific site level, present the best *performance* in terms of (i) growth, (ii) quality and (iii) responsiveness to phytosanitary problems. In this work, first, the *performance* of 15 superior melina genotypes was characterized, evaluated in two of three sites and 14 genotypes in one of the sites, all of them class II in the North Huetar region (RHN), in order to estimate the statistical differences and the phenotypic superiority (PS) of each clone according to its *performance* in commercial volume (CV), quality (Q%) and quality commercial volume (QCV); and they were classified according to their susceptibility to the disease trunk rot. At the phenotypic level, the potential commercial population was identified as clones above the population average in QCV, while at the genotypic level, genetic parameters were estimated to determine the capacity of the *set* at each site. Subsequently, in order to determine the existence of a *genotype-environment* interaction, the set was divided into desirable and undesirable genotypes based on the PS for their performance in QCV, disease susceptibility categories were also established and the clones were classified according to their stability in behavior between sites, thus identifying specialist clones by

environment. The potential commercial population identified with respect to the entire genetic pool evaluated at the Upala site, at 2.8 years, corresponds to 53 % of the clones, which would increase productivity in the QCV by $2.21 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ when making a new plantation with them; at the Cutris site (5.9 years) 55 % of the clones represent a phenotypic superiority of $1.73 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in the QCV and at the Guatuso site (4.3 years) 61.5 % of the genotypes would impact $3.24 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ the QCV. For the genetic parameters, the best results in individual heritability (h^2g), average heritability of the clone (h^2mc) and the genetic coefficient of variation (CVg %) are reported for the QCV variable in all localities, in the Guatuso site the results were obtained the most desirable parameters (0.14, 0.84 and 19.87 % respectively). On the other hand, the population of specialist clones identified was 4, 6, 7 for Guatuso and Cutris, 8, 9 and 11 for Guatuso and Upala, clone 10 for Cutris, genotype 3 for Upala and clones 12 and 13 for Guatuso. In addition, clone 5 was a generalist for class II sites in the RHN. It is concluded that there is phenotypic potential in the region to positively impact the profitability of the production units and the genetic parameters show the genetic capacity of the clonal group studied. In addition, the existence of a *genotype-environment* interaction was determined given the differences in the behavior of the genotypes at the phenotypic level in the three study sites.

Keywords: phenotypic superiority; genetic parameters; genotype by environment; clonal forestry; productivity increase.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Gmelina arborea Roxb. pertenece a la familia Lamiaceae (De Kok, 2012), es una especie de rápido crecimiento, completamente intolerante a la sombra, oportunista en los bosques húmedos y es nativa del sureste asiático, se ha introducido como una especie para producción comercial en algunos países tropicales (Rojas *et al.*, 2004). En Costa Rica es la especie forestal de mayor área cosechada (2763,4 ha) y la segunda de mayor producción ($47\,174,2 \text{ m}^3$) (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2018).

Desde 1979, con la creación del programa de incentivos estatales en Costa Rica, la melina se consolidó como una de las principales especies empleadas en los programas de reforestación, debido a su buen desarrollo silvicultural y la existencia de condiciones edafo-climáticas favorables para su crecimiento (Rojas *et al.*, 2004). Por la versatilidad de su madera. es fácil de trabajar y de

buen acabado y se utiliza principalmente para mueblería, construcción y embalaje (Murillo y Alvarado, 2012). Sin embargo, debido a la actualidad del sector forestal del país caracterizada por la alta competencia de la madera importada y el bajo aumento en el precio de la materia prima, el silvicultor asume costos de producción, con el fin de vender sus productos (Oficina Nacional forestal [ONF], 2021), lo que afecta directamente la rentabilidad de sus sistemas de producción.

La melina ha sido priorizada para la investigación y desarrollo del paquete silvicultural por sus características, tanto de crecimiento como de mercado y, actualmente es la especie de mayor desarrollo en programas de mejoramiento genético (PMG) en Costa Rica (Ávila-Arias *et al.*, 2015a, 2015b, 2015c, 2016; Hernández-Castro *et al.*, 2021; Murillo-Gamboa *et al.*, 2016; Salas-Rodríguez *et al.*, 2016a, 2016b). La especie puede aportar al abastecimiento sostenible de madera para el mercado nacional y, con un modelo de manejo intensivo, aportar también al empleo local y al mantenimiento del servicio ecosistémico de fijación de carbono, todo esto para contribuir con el mejoramiento de la calidad de vida de los pobladores de zonas rurales. Por ejemplo, ONF (2021) reporta que las plantaciones forestales aportan el 77.1 % de la madera producida en el ámbito nacional y en el sector primario genera la mayor cantidad de fuentes de empleo directo (4750) y valor agregado (\$70,528,879).

La Región Huetar Norte (RHN) es una de las más pobres y de bajo desarrollo humano del país (Zevallos, 2013), sin embargo, cuenta con potencial asociado con sus actividades productivas. Con estas condiciones y la experiencia que ha desarrollado desde los años 80 en el manejo de los recursos forestales, la RHN se seleccionó para el desarrollo de un clúster forestal, encadenamiento que pretende ser una fuente permanente de desarrollo y generadora de empleo (Madrigal, 2017). Adicionalmente, entre las ventajas de la región se encuentran empresas importantes dedicadas a la reforestación y organizaciones con gran experiencia en el sector.

Ante esta realidad, el Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional (Inisefor-UNA) ha producido iniciativas de investigación que promuevan el manejo intensivo de las plantaciones forestales, siempre con la finalidad de aportar información científica indispensable para la toma de decisiones. Uno de los principales resultados de los esfuerzos de estas investigaciones es una base genética de 15 clones de melina que se identifican como superiores en relación con otros materiales genéticos de la especie por el desempeño obtenido en campo.

Esta investigación aporta al paquete tecnológico de producción de madera de melina en busca de proponer opciones para aumentar la productividad por área mediante la selección de los mejores genotipos para las condiciones específicas de la región, los cuales, según Ávila-Arias *et al.* (2015a) pueden producir desde un 20 % y hasta un 38 % más de volumen comercial de calidad en referencia con su promedio. No tomar en cuenta la selección implica una disminución productiva de hasta un 40 %. No obstante, el avance en el paquete tecnológico de la especie persiste la necesidad de incorporar variables que apunten a mejorar sus características. Por ejemplo, el estado fitosanitario es una de las principales causas de la disminución en la reforestación comercial (Programa Estado de la Nación [PEN], 2017).

En la última década, se han generado algunas investigaciones afines, entre las cuales se destacan las de Ávila-Arias *et al.* (2015a), Ávila-Arias *et al.* (2015b), Ávila-Arias *et al.* (2015c), Salas-Rodríguez *et al.* (2016a), Salas-Rodríguez *et al.* (2016b), Ávila-Arias *et al.* (2016), Murillo-Gamboa *et al.* (2016). Estos autores apuntan la necesidad de determinar los genotipos superiores para cada sitio específico, identificar sus características dasométricas y de calidad para clones superiores, identificar adicionalmente genotipos por calidad de sitio y objetivo final de la madera por producir. Además, resaltan la necesidad de identificar interacciones genotipo-sitio (GxA) debido al comportamiento sitio específico identificado para la especie. De la misma manera, apuntan a la identificación de genotipos con mayor tolerancia (aparente) a la enfermedad de pudrición en el tronco, determinar relaciones de heredabilidad del individuo y del genotipo en relación con esta enfermedad, así como seleccionar los clones menos susceptibles a esta. Por lo tanto, esta investigación se complementa con las anteriores para aportar a la base de información sobre los genotipos más eficientes, que oportunamente brinde herramientas que aporten a la planificación del sector forestal en la región.

El problema es que los productores están sufriendo una disminución en el rendimiento en sus fincas y obtienen una rentabilidad cada vez menor. Por este motivo, se deben identificar genotipos superiores que maximicen la productividad por área, los cuales, en cuanto al sitio específico, presenten el mayor desempeño, de calidad y capacidad de respuesta ante problemas fitosanitarios en la región Huetar Norte, con el fin de ayudar a mejorar sustancialmente el rendimiento y productividad de los proyectos forestales que, a la vez, impulsen el rol del sector forestal como

sistema productivo rentable en zonas rurales y que, además, impulse su credibilidad como actividad económica.

Para lograr este objetivo se desarrollaron dos capítulos, en el primero se identificaron diferencias en el comportamiento de los clones para cada condición de sitio y se compararon a través de su respuesta fenotípica, adicionalmente, se estimaron los parámetros genéticos para determinar el efecto sobre los resultados. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis para determinar interacciones genotipo-ambiente en el conjunto genético e identificar y seleccionar los clones especialistas para cada condición de sitio y generalistas para los sitios clase II en la región Huetar Norte de Costa Rica.

REFERENCIAS

Ávila-Arias, C.; Murillo-Cruz, R. y Murillo-Gamboa, O. (2015a). Selección de clones superiores de dos conjuntos clonales de *Gmelina arborea* en el Pacífico sur de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 49(1), 17-35. DOI. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.49-1.2>

Ávila-Arias, C.; Murillo-Cruz, R.; Murillo-Gamboa, O. y Sandoval-Sandoval, C. (2015b). Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb., en sitios planos del Pacífico sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 12(28), 23-35.

Ávila-Arias, C.; Murillo-Cruz, R.; Murillo-Gamboa, O. y Sandoval-Sandoval, C. (2015c). 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), 2-14.

Ávila-Arias, C.; Salas-Rodríguez, A. y Murillo-Cruz, R. (2016). Selección de genotipos superiores de *Gmelina arborea* Roxb. por su heredabilidad genética a la tolerancia de la enfermedad de pudrición en el tronco, Pacífico sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(32), 11-20. doi:10.18845/rfmk.v0i0.2548

De Kok, R. (2012). A revision of the genus *Gmelina* (Lamiaceae). *Kew Bulletin*, (67), 293-329.

Hernández-Castro, W.; Badilla, Y. y Murillo-Gamboa, O. (2021). Estimación de parámetros genéticos de *Gmelina arborea* Roxb (melina) en el Caribe de Costa Rica. *Uniciencia*, 35(1), 352-366. DOI. <http://dx.doi.org/10.15359/ru.35-1.22>

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2018). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2018 (Nuestra actividad agrícola y forestal)*. <https://www.inec.cr/multimedia/nuestra-actividad-agricola-y-forestal-2018-infografia-encuesta-nacional-agropecuaria>

Madrigal, K. (2017). Ministerio de ambiente creará clúster forestal. *La República*. <https://www.larepublica.net/noticia/ministerio-de-ambiente-creara-cluster-forestal>

Murillo, R. y Alvarado, A. (2012). *Nutrición y fertilización de Gmelina arborea* (1 ed.) (J. R. Alfredo Alvarado, Ed.). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.

Murillo-Gamboa, O.; Salas-Rodríguez, A.; Murillo-Cruz, R. y Ávila-Arias, C. (2016). Tasa de avance de la pudrición en el tronco en melina Gmelina arborea Roxb. y posibilidades de manejo. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(32), 40-50. doi:10.18845/rfmk.v0i0.2551

Oficina Nacional forestal (ONF). (2021). *Usos y aportes de la madera en Costa Rica, Estadísticas 2020 y Precios 2021*. Oficina Nacional forestal.

Programa Estado de la Nación (PEN). (2017). *Armonía con la naturaleza*. Estado de la Nación (177-232).

Rojas, F.; Arias, D.; Moya, R.; Meza, A.; Murillo, O. y Arguedas, M. (2004). *Manual para productores de melina Gmelina arborea en Costa Rica*.

Salas-Rodríguez, A.; Murillo-Gamboa, O.; Murillo-Cruz, R.; Ávila-Arias, C. y Mata-Granados, X. (2016a). Evaluación de la severidad de la pudrición en el tronco en Gmelina arborea Roxb. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(32), 01-10. doi:10.18845/rfmk.v0i0.2547

Salas-Rodríguez, A.; Murillo-Gamboa, O.; Murillo-Cruz, R. y Ávila-Arias, C. (2016b). Evidencia de la tolerancia genética a la pudrición del tronco en clones de Gmelina arborea Roxb. en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(32), 30-39. doi:10.18845/rfmk.v0i0.2550

Zevallos, V. E. (2013). *Agenda de competitividad para la región Huetar Norte: Caracterización socioeconómica de la Región Huetar Norte*. Ministerio de Economía, Industria y Comercio.

ARTÍCULOS COMPLETOS DE REVISTA

Desempeño de clones de *Gmelina arborea* Roxb en crecimiento, calidad y susceptibilidad a la pudrición del tronco, región Huetar Norte, Costa Rica

Performance of *Gmelina arborea* Roxb top clones in increase, quality and the susceptibility to trunk rot, Huetar Norte region, Costa Rica

Rodrigo Benavides-Fallas¹

¹ Estudiante de Licenciatura Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional, Costa Rica, rodrigo.benavides.fallas@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4484-6692>. Autor para correspondencia.

Resumen

La silvicultura clonal intensiva con *Gmelina arborea* promete ser una opción para atender la baja productividad que enfrentan los productores nacionales. No obstante, la calidad integral y sanidad de los individuos debe estudiarse para mejorar la rentabilidad de las unidades de producción. Para caracterizar el desempeño de 15 genotipos de melina, evaluados en la región Huetar Norte, se estimaron diferencias estadísticas y la superioridad fenotípica (SF) de cada clon por su desempeño en volumen comercial (VC), calidad (C %) y volumen comercial de calidad (VCC). Además, se clasificaron respecto a su susceptibilidad a la enfermedad *pudrición en el tronco*. Se identificó la población potencial comercial como los clones superiores al promedio poblacional en VCC y la población potencial de mejoramiento como los genotipos con SF mayor a 10 % en VCC. Las poblaciones potenciales comerciales, su impacto en VCC y los genotipos menos susceptibles a la enfermedad, son: Sitio Upala (2,8 años) 53 % del conjunto, impacto 2,21 m³ ha⁻¹, el clon 1 poco susceptible. Sitio Cutris (5,9 años) 55 % de los clones, SF de 1,73 m³ ha⁻¹, excepto el clon 6, esta población es menos susceptible. Sitio Guatuso (4,3 años) 61,5 % de los genotipos aumentaría en 3,24 m³ ha⁻¹ el VCC, de esta población los clones 7, 11, 6 y 12 presentan menor susceptibilidad. En la región existe potencial fenotípico para impactar positivamente la rentabilidad de las unidades de producción, los parámetros genéticos evidencian la capacidad genética en Guatuso y Cutris en VCC y C% con datos de precisión y heredabilidad media del clon altos ($h^2_{mc} < 0,83$). A nivel de susceptibilidad en Upala y Cutris se obtuvieron valores de precisión y heredabilidad

media del clon bajos ($h^2 mc < 0,04$), por lo que no se consideran confiables para la toma de decisiones.

Palabras clave: silvicultura clonal, superioridad fenotípica, parámetros genéticos, aumento de productividad, melina.

Abstract

Intensive clonal forestry with *Gmelina arborea* promises to be an option to address the low productivity faced by national producers; however, the integral quality and health of the individuals must be studied to improve the profitability of the production units. To characterize the *performance* of 15 superior *Gmelina* genotypes, evaluated in the North Huetar Region, statistical differences and phenotypic superiority (PF) of each clone were estimated for its *performance* in commercial volume (CV), quality (C %) and quality commercial volume (QCV); in addition, each genotype was classified with respect to its susceptibility to the disease trunk rot. The potential commercial population was identified as the clones above the population average in QCV and the potential breeding population as the genotypes with PF greater than 10 % in VCC. The potential commercial populations, the impact on QCV, and the genotypes less susceptible to disease, are Upala site (2.8 years) 53 % of the group, impact 2.21 m³ ha⁻¹, clone 1 not very susceptible. Cutris site (5.9 years) 55 % of the clones, PF of 1.73 m³ ha⁻¹, with the exception of clone 6, this population is less susceptible. Guatuso Site (4.3 years) 61.5 % of the genotypes, would increase the QCV by 3.24 m³ ha⁻¹, of this population clones 7, 11, 6 and 12 present low susceptibility. In the region there is phenotypic potential to positively impact the profitability of the production units, the genetic parameters show the genetic capacity in Guatuso and Cutris in QCV and C% with high precision data and average heritability of the clone ($h^2 mc < 0.83$). At the level of susceptibility in Upala and Cutris, low values of precision and average heritability of the clone were obtained ($h^2 mc < 0.04$), so they are not considered reliable for decision making.

Keywords: clonal forestry; phenotypic superiority; genetic parameters; increase productivity; melina.

Introducción

Gmelina arborea Roxb (melina) es una de las dos especies forestales de mayor importancia en Costa Rica. El Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) [1], la reportó como la de mayor área cosechada, cerca de 2763,4 ha y la segunda de mayor producción (alrededor de 47 174,2 m³). Localmente, ha sido priorizada para la investigación y desarrollo de su paquete silvicultural, debido principalmente al sobresaliente crecimiento [2], adaptabilidad a distintas condiciones, rendimiento [3], así como por la versatilidad de la madera [2], [4]. No obstante, pese a haber demostrado potencial para la reforestación comercial, su cultivo ha disminuido. En la actualidad, el sector forestal enfrenta una crisis, uno de los problemas principales se relaciona con el aumento de los costos operativos. Los productores han asumido estos cargos y se han visto afectados por la estabilidad del precio de la madera en el mercado [4], lo que implica una disminución en la rentabilidad de la unidad de producción.

Ante este problema, el enfocarse en una estrategia hacia la silvicultura clonal intensiva de la especie se vislumbra como un aporte prometedor [2]. Por lo tanto, los programas de mejoramiento genético (PMG) se han concentrado en optimizar características de importancia económica y, mediante la clonación, se apuesta a maximizar la producción por unidad de área, gracias a la variabilidad genética que reporta la especie [5]. Lo anterior porque la técnica de propagación vegetativa (clonación) permite capturar la varianza genética (variación aditiva y no aditiva) de cada genotipo [6]. Debido a los esfuerzos realizados por organizaciones, tanto públicas como privadas, la melina es la especie forestal con fines productivos de mayor progreso en PMG en el país. Diversos estudios han logrado identificar genotipos superiores por su desempeño en campo [3], [5], así como por su susceptibilidad a enfermedades, por ejemplo, la *podrición del tronco* [7], [8].

A pesar del nivel de avance logrado a la fecha, los PMG con melina todavía enfrentan una serie de retos para alcanzar sus objetivos [2]. La calidad de los individuos vista de manera integral, es de significativa importancia, motivo que ha incentivado a incluirla como variable en los estudios de campo [5], [9], [10]. Esto sucede con la enfermedad

podrición del tronco [3], [7], [8], su aparición y agresivo avance puede provocar que el mercado encuentre más atractivas otras especies forestales [11]. Al respecto, en términos de calidad Ávila-Arias *et al.* [5] evaluaron el desempeño de dos conjuntos clonales procedentes de dos regiones, en dos condiciones de sitio del Pacífico Sur del país. Estos autores encontraron que la progenie Zona Norte mostró un valor de calidad pobre y lo acreditan a una deficiente selección. En el aspecto fitosanitario, [7] recalcan la necesidad de identificar materiales genéticos tolerantes a plagas y enfermedades y establecer los sistemas de producción forestal con ellos. Esto se debe a la elevada tasa de avance de la enfermedad en plantaciones juveniles con ciertos genotipos, incluso clonales. Ambos retos deben afrontarse por medio de una estrategia de silvicultura clonal intensiva. No obstante, adicionalmente debe ser sitio-específica.

Lo anterior al ser la melina una especie con interacciones sitio específicas debidamente documentadas para distintas variables ligadas a su desempeño en campo [2]. Ávila-Arias *et al.* [5] para clones evaluados en Costa Rica influencia del sitio tanto para la calidad como para el crecimiento. Por otra parte, Salas-Rodríguez *et al.* [8] registraron variaciones en el comportamiento de los clones de dos conjuntos genéticos, con respecto a su tolerancia a la enfermedad de podrición en el tronco; lograron identificar como tolerantes a la enfermedad a un 14 % y 26 % de los clones evaluados para los clones procedentes de Zona Norte y Sur, respectivamente. Una tendencia similar se reporta en Ávila-Arias *et al.* [3] quienes encontraron clones con patrones inconsistentes entre sitios, es decir, inestables en cuanto a la severidad e incidencia a esta enfermedad.

Por lo descrito, el objetivo de la presente investigación fue caracterizar el desempeño de una colección genética de clones de melina en distintos sitios de la región Huetar Norte, tanto en variables dasométricas como de calidad y sanidad, con lo que se pueda generar impactos significativos en la productividad y, con esto, rentabilidad de los sistemas de producción forestal. Lo anterior con el propósito de hacer todavía más atractivo el cultivo de la especie.

Materiales y métodos

Descripción de los sitios experimentales. Se trabajó en tres ensayos clonales de la especie *Gmelina arborea*. Estos fueron establecidos por el Instituto de Investigación y

Servicios Forestales de la Universidad Nacional de Costa Rica (Inisefor-UNA), en tres sitios pertenecientes a la región Huetar Norte (RHN) de Costa Rica, a saber:

Sitio Upala: ensayo establecido en agosto del año 2012. Se ubica en el cantón Upala, distrito Aguas Claras, en las coordenadas geográficas N 10,939179 W 85,253658, altitud de 85 m. s. n. m. El orden de suelo es Ultisol, suborden humults [12], catalogado como zona de vida Bosque Muy Húmedo Premontano Transición Basal (bmt-P6) [13]. Como parte de la preparación del terreno se llevó a cabo la aplicación de rastra dos veces y se aplicó 50 g de cal *Zurco Mejorador* por árbol al fondo del hueco en el momento de la siembra. Por sus características se considera como Clase II para producción de melina según la clasificación de Zeaser y Murillo [14].

Sitio Cutris: ensayo establecido en julio del año 2012, ubicado en el cantón San Carlos, distrito Cutris, en las coordenadas geográficas N 10,63279 y W 84,39598, altitud de 141 m. s. n. m. y su suelo es del orden Ultisol, suborden udults [12], catalogado en la zona de vida Bosque Muy Húmedo Premontano Transición Basal (bmt-P6) [13]. Se ha clasificado como Clase II para producción de melina [14].

Sitio Guatuso: ensayo establecido en junio de 2013, se ubica en el cantón Guatuso, distrito San Rafael, en las coordenadas geográficas N 10,69171; W 84,93362. Se encuentra a una altitud de 272 m. s. n. m. y su suelo es del orden Ultisol, suborden udults [12], catalogado en la zona de vida bosque muy húmedo tropical (bmh-T) [13]. Como parte de la preparación del terreno se realizaron los hoyos con taladro y se agregaron 150 g de abono NPK usando espeque. Se considera como Clase II para producción de melina [14].

Descripción de los diseños experimentales. Los tres ensayos de investigación se instalaron con la colección clonal de melina que el Inisefor-UNA multiplica para establecer sistemas de producción forestal. En sitio Cutris y Upala se utilizó un total de 15 clones, mientras que en Guatuso fueron 14 de ellos, al no incluir el genotipo. Para todos los casos

se utilizó un diseño de bloques completos al azar (BCA), con seis bloques, cada uno con seis árboles (rametos) de cada uno de los genotipos, los que fueron plantados en el campo en parejas y distribuidos al azar a lo interno del bloque, con un distanciamiento de siembra de 3 m entre árbol y 4 m entre filas (**Figura**), en total se evaluaron 36 árboles de cada genotipo por localidad.

Figura 1

Figura 1. Diseño experimental bloques completos al azar, instalado en tres ensayos en la región Huetar Norte de Costa Rica

Variables de la investigación. Se definieron las siguientes variables independientes:

Sitio: las localidades experimentales se trabajaron, de manera que se suplieran las necesidades específicas de la especie. Se buscó concentrar la variabilidad del sitio entre los bloques y disminuirla a lo interno de cada bloque, lo que disminuye cualquier efecto que no fuera producto de la expresión genética del material clonal.

Edad: En el sitio Upala se llevó a cabo una medición a los 2,8 años (34 meses); en Cutris dos, la primera a los 2,9 años (35 meses) y posterior al último raleo a los 5,9 años (71 meses), en este último caso se descartaron del análisis los clones 1, 2, 11 y 15 al encontrarse menos de 4 rametos en cada uno. Por último, en Guatuso se contó con dos mediciones, a los 3,3 años (40 meses) y a los 4,3 años (52 meses) después de un raleo.

Clones: como se mencionó, se trata de un conjunto de 15 genotipos de melina que manejan las personas investigadoras del Programa de Producción Forestal Intensiva del Inisefor-UNA.

Por otra parte, el análisis de resultados y posteriores conclusiones se basaron en las siguientes variables dependientes:

Volumen comercial con corteza (VC): se calcula mediante la **Ecuación 1**.

$$VC(m^3) = DAP(m)^2 * \frac{\pi}{4} * HC(m) * 0,45 \quad (E.1).$$

El factor de forma, valor 0,45 en la fórmula de VC, fue estimado con la cubicación de más de 100 árboles clonales de la especie, una vez volteados

Donde, DAP = diámetro a la altura del pecho medido a 1,3 m de la base para cada árbol, con cinta diamétrica. HC = altura comercial determinada por la cantidad de trozas de 2,5 m evaluadas en cada árbol.

Calidad (C): se estimó un valor para cada individuo utilizando la metodología de [15]. Calculada mediante la **Ecuación 2**, la cual se coloca a manera de ejemplo en caso de que el árbol tenga 4 trozas comerciales.

$$\text{Calidad del árbol} = T1 * 0,4 + T2 * 0,3 + T3 * 0,2 + T4 * 0,1 \quad (\text{E.2}).$$

Calidad porcentual (C %): El valor absoluto de calidad promedio por árbol se convirtió mediante la **Ecuación 3** a términos porcentuales.

$$C \% = 100 * \left\{ 1 - \left[\frac{\text{calidad}-1}{3} \right] \right\} \quad (\text{E.3}).$$

Volumen comercial de calidad (VCC): se ajustó el volumen comercial al multiplicarlo por su valor de C % de cada individuo [5].

Índice de severidad de la pudrición en el tronco (I.S.): se obtuvo el grado de severidad de los individuos mediante la metodología propuesta por Salas-Rodríguez *et al.* [16] (ver **Ecuación 4**). Ese valor se basa en una escala entre 1 y 5, 1 es el dato que indica un individuo sano y sin evidencia de síntomas. Una vez determinada la severidad se calcula el índice de severidad en términos porcentuales (I. S. %) (ver **Ecuación 5**).

$$I.S. \text{ del clon "i"} = \left[\frac{N1*1+N2*2+N3*3+N4*4+N5*5}{N1+N2+N3+N4+N5} \right] \quad (\text{E.4}).$$

$$I.S. \% = -1 * \left[\frac{1-I.S.}{4} \right] * 100 \quad (\text{E.5}).$$

Donde, N1 = número de rametos del clon *i* calificados con grado de severidad 1 +...+.N5 = número de rametos del clon *i* calificados con grado de severidad.

Índice de incidencia de la pudrición en el tronco (I. I.): se calcula el promedio aritmético para cada clon de los datos presencia/ausencia de la enfermedad, con base en el conjunto de sus rametos presentes en el ensayo (ver **Ecuación 6**).

$$I.I. = \sum yi/n \quad (\text{E.6}).$$

Donde, Y_{ij} = Presencia de la enfermedad en el rameto i del clon j .

Susceptibilidad: Se calcula la suma de los resultados del I. S. y el I. I. de cada clon. Los resultados se dividen en terciles y se clasifican en alta, media o baja susceptibilidad.

Evaluación del desempeño fenotípico. Cada uno de los clones se evaluó de acuerdo con su valor de superioridad fenotípica (SF) en cada una de las variables dependientes. La SF corresponde al porcentaje de diferencia de cada clon respecto a la media del conjunto genético en estudio para cada variable. De acuerdo con lo anterior, para el volumen comercial de calidad se definieron dos poblaciones por sitio con base en la SF de los genotipos:

- Población potencial comercial: es la recomendada para establecer sistemas de producción forestal. Está definida por todos aquellos clones que igualaron o superaron el valor de la media del conjunto clonal.
- Población potencial de mejoramiento: es la llamada a continuar el proceso de investigación y desarrollo mediante el PMG del Inisefor-UNA para la especie. Se define como todos aquellos clones que superaron en más del 10 % la media del conjunto en VCC.

Análisis estadístico. Una vez comprobados los enunciados de la estadística paramétrica, se les aplicó un Análisis de Varianza (Andeva) para datos no balanceados, sobre las variables dasométricas DAP, HC, VC, C %, VCC. Posteriormente, se llevó a cabo la prueba de medias de Tukey ($P = 0,05$) como comprobador múltiple, que permitió identificar las diferencias entre los clones que se evaluaron. Las pruebas se realizaron con el programa estadístico InfoStat 2017e.

Evaluación del desempeño genotípico

Se llevó a cabo un análisis para obtener los parámetros genéticos del diámetro (DAP), volumen comercial (VC), el volumen comercial de calidad (VCC), incidencia y severidad a la enfermedad. Se utilizó el IMA a los 3 años para cada sitio, donde los datos de las edades de Upala 2,8, Cutris 2,9 y Guatuso 3,3 años fueron ajustados. Se aplicó el procedimiento estadístico REML/BLUP con el software SELEGEN, específicamente empleando el segundo modelo correspondiente a los ensayos de bloques completos al azar de clones no

emparentados con varias plantas por parcela. Los cálculos se realizaron con el modelo estadístico de la **Ecuación 7**.

$$y = Xr + Zg + Wp + e \quad (E.7).$$

Donde y es el vector de datos, r es el vector del efecto de repetición y sumados a la media general, g es el vector del efecto genético total, p es el vector de los efectos de parcela y e es el vector del error o residuo. Este modelo generó los parámetros de heredabilidad individual en sentido amplio, heredabilidad media del clon, la precisión en la estimación de los parámetros, coeficiente de variación genética, coeficiente de variación ambiental y el coeficiente de variación relativa.

Resultados y discusión

Evaluación fenotípica

Se muestran los clones ordenados en forma descendente con base, tanto en la prueba de medias como en el porcentaje de superioridad fenotípica (SF), respecto a la media del conjunto para cada variable. Lo anterior con el objetivo de resaltar los genotipos sobresalientes, que pudieran impactar positivamente en posibles proyectos forestales [6], en sitios de esta región similares a los que se evaluaron.

Sitio Upala a los 2,8 años. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre clones únicamente en la variable de calidad (%) (**Cuadr**), la cual registró la menor variabilidad de todas las variables que se evaluaron, con un coeficiente de variación de 35 %. A pesar de no haberse determinado diferencias estadísticas en volumen comercial y volumen comercial de calidad (VC y VCC, respectivamente), en todos los parámetros se aprecian valores diferenciados entre tratamientos (genotipos). Cabe destacar que los clones 3, 9, 4 y 11 siempre apuntaron superioridad sobre el promedio poblacional, es decir, el peso de su efecto fue positivo para todas las variables.

Adicionalmente, el clon 3 superó en 57.8 % al último puesto de la tabla (clon 1) en VCC. Lo anterior a pesar de no haberse encontrado diferencias estadísticas entre el conjunto clonal. Ávila-Arias *et al.* [5] reportaron que el mejor clon en VCC alcanzó 55 % de SF en Finca Puntarenas, con respecto al del peor desempeño. Este dato ratifica que, al identificar genotipos con una respuesta fenotípica superior se pueden obtener ganancias porcentuales

significativas en etapas posteriores, aún si la heredabilidad es baja [5]. Esto mediante el proceso de silvicultura clonal donde es posible obtener la transferencia de caracteres aditivos y no aditivos, en consecuencia, atractivo para las variables que presentan baja heredabilidad [17]. Ávila-Arias *et al.* [5] apuntan que existe la capacidad genética para expresar mejores resultados de crecimiento en un mismo sitio, con lo que se reafirma la importancia de seleccionar los mejores clones, especialmente para sitios pequeños, debido al impacto económico en la unidad de producción.

Cuadro 1. Posición de genotipos de *Gmelina arborea* respecto a su superioridad fenotípica sobre la media poblacional en la variable crecimiento y calidad, a los 2,8 años en Sitio Upala, Alajuela, Costa Rica

Cuadro 1

La ausencia de diferencias en las restantes variables puede explicarse, primero, por la mayor variabilidad registrada a lo interno de ellas, expresada mediante la desviación estándar promedio del conjunto genético. La alta variabilidad que se encuentra en los datos es producto, en mayor medida, de la relación genética*micrositio, adicionalmente se podría mencionar un menor efecto producto del manejo silvicultural [18], ambos factores se expresan claramente en la melina. En segundo lugar, debe tomarse en cuenta que la evaluación se realizó a edad temprana, al suponer que el material no ha completado la expresión genética [5].

En una investigación similar en Costa Rica, con clones de melina a los 2,3 años, [5] identificaron diferencias en uno de los dos sitios estudiados. En otro estudio en el norte de India, se identificaron diferencias entre 70 clones de melina a los 2 años [19].

Se obtuvo un valor promedio para todo el conjunto clonal de 68.7 % para la variable de calidad, con 79.4 % como su máximo valor a los 2,8 años. El desempeño del conjunto clonal aquí evaluado, en términos de su calidad, pudo verse afectado por la relación de manejo sitio específico reportada para la melina [2], [5], [9], [10], es decir, variaciones en el manejo silvícola o parámetros climáticos o edafológicos, generarían variaciones en el comportamiento de los genotipos.

El conjunto genético establecido en el sitio Upala registró valores promedio en IMA por árbol de 6,1 cm año⁻¹, 1,28 m año⁻¹, 0,0144 m³ año⁻¹ y 0,0097 m³ año⁻¹ para DAP, HC, VC y VCC, respectivamente. Diversas investigaciones han reportado IMA en variables dasométricas a los 3 años en plantaciones de melina establecidas con semilla. Entre ellas, Balcorta-Martínez y Vargas-Hernández [20] reportaron en México para 20 árboles superiores 5,0 cm año⁻¹ en DAP, 3,74 m año⁻¹ HT y 0,0303 m³ año⁻¹ VT. En Filipinas, el IMA promedio resultante de la evaluación de tres sitios fue 4,25 cm año⁻¹ en DAP, 1,95 m año⁻¹ HC y 29,61 m³ ha⁻¹ año⁻¹ VT [21].

Figura 2

Figura 2. Población potencial comercial y de mejoramiento que se identificó para un conjunto genético de *Gmelina arborea* a los 2,8 años en Sitio Upala, Alajuela, Costa Rica

Los clones 3, 9, 4, 11, 10, 5, 8 y 13 conforman la población potencial comercial debido a su superioridad fenotípica, con respecto al promedio poblacional en VCC (ver **Figura 2**). Representan el 53 % de los genotipos que se evaluaron y tienen una SF promedio de 10,4 %, es decir, es 2,21 m³ ha⁻¹ superior al promedio de todo el conjunto genético. Por otra parte, el 27 % de los clones que se evaluaron se identificaron como la población potencial de mejoramiento (genotipos 3, 9, 4 y 11), cuya SF promedio es 15,8 %, lo que ocasiona una diferencia de 3,37 m³ ha⁻¹ respecto al conjunto evaluado. A pesar de los resultados, se deben realizar mediciones posteriores a este ensayo clonal para monitorear el crecimiento de todos los genotipos y, de esa manera, corroborar los datos presentados. Es de especial interés determinar si el subconjunto de genotipos promisorios persiste en el futuro como parte de la población potencial de mejoramiento. Kumar [19] determinó que existen variaciones en el tiempo en el desempeño de los clones, es por esto por lo que las pruebas deben mantenerse por periodos de más de 2 años para asegurar la correcta identificación de la población élite y llevar a cabo recomendaciones adecuadas [17].

En la evaluación de la resistencia a la enfermedad *podrición del tronco*, se determinaron diferencias al ordenar los clones de menor a mayor susceptibilidad a esta patología. A partir de esto, se clasificaron en categorías de baja, media y alta susceptibilidad. En las condiciones del sitio Upala, únicamente el clon 1 resultó dentro de la clase baja. Sin embargo, registra el desempeño fenotípico menos deseable en VCC. Al relacionar la

población potencial comercial con la enfermedad se identifican los clones 3 y 11 la categoría media, los demás se ubicaron en la baja.

Cuadro 2. Jerarquía clonal respecto a su nivel de susceptibilidad a la pudrición en el tronco para *Gmelina arborea* en Sitio Upala, Alajuela, Costa Rica

Cuadro 2

Los clones 5 y 8 son medianamente susceptibles, más no sobresalientes en crecimiento, por lo que se debe prestar atención a su comportamiento en el tiempo. Los clones 9 y 4 (parte de la población potencial de mejoramiento) reportaron alta susceptibilidad, de la misma manera que los genotipos 10 y 13, por lo que se deben realizar los análisis para determinar el potencial para futuros ensayos respecto a esta variable y su impacto en plantaciones comerciales. Autores como [22] ratifican lo anterior al puntualizar en la importancia de seleccionar utilizando diversidad de rasgos. Si se obtienen valores fenotípicos, genotípicos y de heredabilidad (media o alta) en variables de crecimiento y susceptibilidad, las posibilidades de identificar los mejores clones para estas específicas condiciones de sitio aumentarían considerablemente [23].

Sitio Cutris a los 5,9 años. No se registraron diferencias estadísticamente significativas entre clones para ninguna de las variables en esta medición (ver **Cuadro 3**), estos resultados se basan en la evaluación de 11 genotipos.

Una situación similar fue reportada por [5], quienes evaluaron dos conjuntos clonales procedentes de regiones distintas de Costa Rica, ambos establecidos en un sitio Clase III para producción de melina, según la clasificación de Zeaser y Murillo [14], estos tampoco registraron diferencias significativas entre clones para ninguna de ellas. Los resultados que se registraron en la presente investigación, así como los de Ávila-Arias *et al.* [5], sugieren que las condiciones presentes en un sitio Clase II o III afectan el desarrollo y la expresión del potencial genético de los materiales. Caso contrario, [24] registró diferencias estadísticas en VC a los 6 años, edad similar a la evaluación realizada en el sitio Cutris, para un conjunto de clones de melina en Filipinas.

Cuadro 3. Posición de genotipos de *Gmelina arborea* respecto a su superioridad fenotípica sobre la media poblacional en variables de crecimiento y calidad, a los 5,9 años en Sitio Cutris, Alajuela, Costa Rica

Cuadro 3

A pesar de no haberse registrado diferencias estadísticas para este sitio, cabe resaltar que el clon 16 fue superior fenotípicamente 13 (primero y último **Cuadro 3**, respectivamente) en un 32 % en VCC. Además, los 4 genotipos ubicados en las primeras posiciones en cuanto a VCC (36 % del conjunto) registran 8,75 % de SF respecto al promedio de la población total. Sin embargo, los resultados ratifican la importancia del peso del efecto del tratamiento en cada variable (porcentaje de SF para cada clon en este caso), este necesariamente debe considerarse en el momento de analizar los datos. Diferencias porcentuales en el desempeño de genotipos pueden impactar positivamente en la rentabilidad de la unidad de producción, pese a ser todos iguales estadísticamente hablando.

En la evaluación a los 2,9 años, el conjunto genético registró valores promedio del IMA por árbol: DAP = 5,7 cm año⁻¹, HC = 1,43 m año⁻¹, VC = 0,0151 m³ año⁻¹, VCC = 0,0102 m³ año⁻¹ (información no presentada). El número de árboles por hectárea a esa edad era de 787, para un IMA de 11,88 y 8,03 m³ ha⁻¹ año⁻¹ en VC y VCC, respectivamente. Además, se encontraron diferencias estadísticamente significativas en 4 de las 5 variables dasométricas evaluadas, exceptuando el VCC (información no presentada). El mismo Sitio Cutris, evaluado a los 5,9 años, registró valores promedio del IMA por árbol: DAP = 4,0 cm año⁻¹, HC = 1,91 m año⁻¹, VC = 0,0383 m³ año⁻¹, VCC = 0,0336 m³ año⁻¹. Con base en los 163 árboles promedio por hectárea los IMA registrados corresponden a 6,24 y 5,47 m³ ha⁻¹ año⁻¹ en VC y VCC, respectivamente.

El 55 % de los clones (16, 12, 6, 5, 3 y 4) se considera como la población potencial comercial al registrar superioridad fenotípica (SF) sobre la media poblacional, en volumen comercial de calidad (ver **Figura 3**). La diferencia promedio de esta subpoblación es 1,73 m³ ha⁻¹, que corresponde a un 5.3 % de SF respecto a la población total. No obstante, en este sitio solamente el clon 16 formaría parte de la población potencial de mejoramiento, su SF corresponde a 12.5 % y de solo utilizar este clon se obtendría una diferencia promedio de 4,05 m³ ha⁻¹ a los 5,9 años.

Figura 3

Figura 3. Población potencial comercial y de mejoramiento para el conjunto genético de *Gmelina arborea* a los 5,9 años en Sitio Cutris, Alajuela, Costa Rica

Incluir la variable sanidad en un análisis fenotípico es de vital importancia, no obstante, darle seguimiento en el tiempo lo es todavía más. Por esto, se presentan los resultados del Sitio Cutris (ver **Cuadro 4**).

Cuadro 4. Crecimiento, calidad y susceptibilidad a la enfermedad pudrición en el tronco de clones de *Gmelina arborea* en dos momentos de medición en el sitio Cutris, Alajuela, Costa Rica

Cuadro 4.

Los clones 6, 5, 3 y 4 permanecen en la población potencial comercial a los 2,9 y 5,9 años por medio de los resultados en VCC. La evaluación a la edad de 5,9 años supera la mitad del turno esperado para la especie cumple el periodo recomendado para la identificación adecuada de genotipos superiores [24]. Por el contrario, el 2, 7, 15 y 10 formaban parte de este subconjunto a los 2,9 años y a los 5,9 años no. Por otra parte, los clones 16 y 12 no conformaban esta población en la primera evaluación y en la segunda sí, adicionalmente ambos obtuvieron baja susceptibilidad a la enfermedad a los 5,9 años. Esto puntualiza de nuevo la importancia de monitorear el desempeño de los distintos materiales genéticos para cada sitio [17], [19]. Si se logra establecer una relación juvenil-maduro efectiva entre las variables de estudio y la productividad [24], la selección juvenil puede reflejar un impacto económico positivo.

Mediante el mejoramiento genético de la especie se puede identificar los clones con menor grado de susceptibilidad [8], con esto se abre la posibilidad para generar un siguiente conjunto genético de mejoramiento que también contemple, entre las variables de interés, la afectación por patologías. Al respecto, todos los genotipos que conforman la población potencial comercial (clones 16, 12, 6, 5, 3 y 4) resultaron poco susceptibles a la enfermedad para este sitio, exceptuando el 16 y 3 que se registraron en la categoría intermedia. A partir de lo anterior se confirma el supuesto de que existe material genético menos propenso con el cual se puede establecer una plantación clonal exitosa [7]. Identificar clones poco

afectados por enfermedades a edad temprana, con buena respuesta ante el daño, representa una ventaja para todo programa de selección o mejoramiento genético, todavía más si presentan un rendimiento adecuado en crecimiento [22].

Al respecto cabe destacar que todos los genotipos que se identifican como de baja susceptibilidad a los 2,9 años se mantuvieron dentro de ese selecto grupo en la segunda evaluación (5,9 años), a excepción del clon 6. Adicionalmente, se denota el efecto positivo del aclareo realizado sobre la masa al incrementarse el conjunto de clones catalogados como menos susceptibles de 7 a 10 genotipos entre la primera y segunda evaluación, además de no reportarse clones de alta susceptibilidad a los 5,9 años. De acuerdo con Murillo-Gamboa *et al.* [7] la enfermedad avanza a mayor velocidad en cuanto mayor es el grado de severidad, por lo que recomiendan un raleo fitosanitario antes de los 2 años que puede disminuir la velocidad del avance e incluso controlarla. Por otra parte, Salas-Rodríguez *et al.* [8] agregan que los raleos deben ser oportunos por lo bajo, es decir, principalmente los árboles que muestren síntomas de enfermedad, calidad inferior o suprimidos. Precisamente, esa fue la condición presentada por los genotipos 11, 15 y 1, al encontrarse entre los de mayor susceptibilidad a los 2,9 años.

Lo anterior no implica que estos clones deban eliminarse de la base genética del programa de mejoramiento, al igual que con todos los genotipos es recomendable calcular su heredabilidad para determinar el grado en que los genes influyen en su desempeño en relación con el ambiente en prueba [19]. De esta manera, se puede tomar una decisión más apropiada sobre el destino de todos ellos dentro del programa de mejoramiento clonal.

Sitio Guatuso a los 4,3 años. A los 4,3 años se reportaron diferencias estadísticas en C % y VCC (ver **Cuadro 5**), lo anterior es un indicio que ambiente cuenta con las condiciones para que el conjunto clonal evaluado exprese su diversidad potencial, de acuerdo con lo reportado por [5].

Cuadro 5. Posición de genotipos de *Gmelina arborea* respecto a su superioridad fenotípica sobre la media poblacional en variables de crecimiento y calidad, a los 4,3 años en Sitio Guatuso, Alajuela, Costa Rica

Cuadro 5

En la evaluación del VC no se registraron diferencias estadísticas entre genotipos a los 4,3 años. Adicionalmente, se obtuvieron valores promedio de IMA por árbol en DAP = 4,47 cm, HC = 2,94 m, VC = 0,0404 m³ y VCC = 0,0304 m³. Se identificaron los clones 10 y 13 como la población potencial de mejoramiento (ver **Figura 4**), el promedio de ambos fue 17.1 % de SF, lo que corresponde a 10,18 m³ ha⁻¹ por encima del promedio poblacional. En el **Cuadro 5** se muestra que los genotipos 10 y 13 se mantuvieron en las primeras tres posiciones para todas las variables evaluadas (VC, C % y VCC), caso contrario el 1 y 2. Adicionalmente, los clones 10 y 13, el 4, 7, 11, 6, 12 y 5 conforman la población potencial comercial, representan el 61.5 % de todo el conjunto clonal. El promedio de esta subpoblación es 3,24 m³ ha⁻¹, es decir, un 5,5 % de SF sobre toda la población evaluada.

Figura 4

Figura 4. Población potencial comercial y de mejoramiento para el conjunto genético de *Gmelina arborea* a los 4,3 años en Sitio Guatuso, Alajuela, Costa Rica

Cabe resaltar el desempeño del genotipo 4, el cual, además de formar parte de la población potencial comercial y registrar el valor más deseable de C % para todo el conjunto clonal, se ubicó en la tercera posición en VCC. Esto lo convierte en un firme candidato para futuros cruces controlados con genotipos que resultaron superiores en otra variable de interés. A los genotipos sobresalientes se les deben calcular sus parámetros genéticos, con el objetivo de contar con un parámetro adicional en la identificación de los mejores, en las condiciones específicas del sitio [5]. Utilizar, de manera ventajosa, la ganancia genética aditiva de los clones probados puede asegurar fácilmente mejoras sustanciales para el rendimiento de futuras plantaciones [6]. La variabilidad documentada en esta investigación, expresada a través del porcentaje de SF especialmente en VCC, apunta que es posible mejorar la productividad por unidad de área, al utilizar exclusivamente los genotipos con el mejor desempeño para cada condición de sitio, tanto en parámetros dasométricos como de sanidad (ver **Cuadro 6**).

Cuadro 6. Crecimiento, calidad y susceptibilidad a la enfermedad pudrición en el tronco de clones de *Gmelina arborea* en dos momentos de medición en el sitio Guatuso, Alajuela, Costa Rica

Cuadro 6

El 54 % del conjunto clonal se cataloga como de baja susceptibilidad a la enfermedad en la evaluación a los 4,3 años (ver **Cuadro 6**). En ese momento su valor promedio de incidencia fue 12.8 % y severidad de 13.3 %. Arguedas *et al.* [25] realizaron un muestreo de estas variables para la enfermedad pudrición en el tronco en 16 plantaciones de melina, distribuidas en diferentes puntos de Costa Rica. Los autores reportan rangos para ambas variables, con variaciones comprendidas entre 0 % y 58 % en incidencia y de 0 a 28 %, en severidad. Por otra parte, Ávila-Arias *et al.* [3] también reportaron valores para dos condiciones de sitio a los 3,2 años más altos que los aquí registrados. Salas-Rodríguez *et al.* [16] evaluaron dos procedencias de melina clonal, en el Pacífico Sur de Costa Rica a los 4,7 años, registraron valores promedio de 20,1 y 21.3 % en incidencia, así como 12,3 y 13.5 % en severidad para las procedencias norte y sur, respectivamente.

Al comparar los resultados del Pacífico Sur con los que se obtienen en este sitio, se observa que en sitio Guatuso hubo menor cantidad de individuos afectados. No obstante, en términos gravedad del ataque los sitios son semejantes. Autores como [3] y [16] apuntan que diferencias en el comportamiento de los conjuntos genéticos, en términos de su susceptibilidad, pueden ser producto de variables edafológicas y silviculturales. Arguedas *et al.* [25] coinciden con lo anterior al reportar correlación positiva entre la cantidad de arcilla en la capa del suelo entre 10 cm y 20 cm con ambas variables (edafológica), la misma relación entre severidad y número de árboles por hectárea (manejo). Esto sugiere que, con una silvicultura adecuada los genotipos pueden registrar un mejor comportamiento en la susceptibilidad a la enfermedad.

Los clones 13 y 10, que se identifican como la población potencial de mejoramiento (ver **Figura 4**), se catalogan como de media a alta susceptibilidad a la enfermedad. Se debe tener especial atención a estos genotipos con buen desarrollo dasométrico. No obstante, valores no deseables en susceptibilidad a la enfermedad, determinar los valores de heredabilidad media clonal y coeficientes de variación genética ayudaría en su selección definitiva [8] y, eventualmente, puede marcar la línea en el futuro del programa de mejoramiento. Es de resaltar que los genotipos 7, 11, 6, 12 y 9, además de formar parte de la población potencial comercial, también se identifican como poco susceptibles a la enfermedad (ver **Cuadro 6**). Los clones 1 y 2, aparte de haberse ubicado en las últimas

posiciones para las variables dasométricas, también lo hicieron al registrar la mayor susceptibilidad a la enfermedad.

Al respecto [7] afirman que las clases diamétricas inferiores son las más afectadas por la enfermedad, es decir, una mayor susceptibilidad puede estar relacionada con la posición sociológica de los individuos. Identificar tendencias de ciertos genotipos, en distintas variables, es importante para su selección o descarte en diferentes condiciones de sitio. El seguimiento en el tiempo a una posible tendencia permite agruparlos para distintos usos finales, todavía más al comprender las variaciones edad-edad y su correlación con la madurez [17], [19].

Evaluación genotípica

Los parámetros genéticos calculados a los 3 años difieren entre sitios y caracteres que se evaluaron. Valores de precisión superiores a 0,70 son catalogados como altos, lo que sugiere que los datos reportados son confiables. Sin embargo, en Upala los registros son inferiores y se encuentran entre las categorías de moderada (0,70 a 0,50) y baja (<0,50) [26], exceptuando la Calidad (%). Los mejores resultados en heredabilidad individual ($h^2 g$), heredabilidad media del clon ($h^2 mc$) y el coeficiente de variación genético (CVg %) se reportan para las variables VCC y C %. No obstante, fue en el sitio Guatuso donde se obtuvieron los parámetros más deseables (0,15, 0,85 y 19.87 % respectivamente). Estos valores de acuerdo a lo reportado por [27] son $h^2 g$ bajo ($\leq 0,15$), $h^2 mc$ alto ($> 0,8$) y variación genética alta [28] ($> 10\%$), datos que reflejan potencial para la selección y mejoramiento genético (ver **Cuadro 7**).

Cuadro 7. Parámetros genéticos del volumen comercial y el volumen comercial de calidad que se evaluaron a los 3 años en clones de *Gmelina arborea* en la región Huetar Norte, Costa Rica

Cuadro 7

Los valores que se obtienen en VC en sitio Cutris y Guatuso son similares a los registrados en un conjunto clonal de melina a los 34 meses en el Caribe costarricense [27] donde $h^2 g = 0,08$, $h^2 mc = 0,79$ y CVg % = 8,04, al igual que para la Calidad (%) $h^2 g = 0,15$, $h^2 mc =$

0,87 y CVg % = 7,34 y los reportados por [28] en la zona sur donde $h^2 g = 0,06$, $h^2 mc = 0,65$ y CVg % = 26,4 pero con un precisión moderada (0,65). El parámetro CVg % en el caribe, es inferior a los de la presente investigación, lo que sugiere una mayor variabilidad genética en los clones de este estudio y a diferencia del sur donde el valor es mayor pero la precisión menor. A pesar de la afirmación anterior [27] puntualiza una disminución en el coeficiente de variación genético (CVg %) al aumentar el coeficiente de variación ambiental (CVe %). Para estos dos sitios los datos del CVe % son superiores a 16 % y 19 % en VC y VCC respectivamente. No obstante, fue en Upala donde se reportan valores máximos que se obtienen en este parámetro. Además, esta localidad presentó los menores registros del CVg %. Esta última localidad parece ser afectada por las condiciones sitio-específicas que impiden al material expresar su potencial [3] y se refleja en los bajos resultados de heredabilidad y de variación genotípica.

El análisis de parámetros genéticos para la enfermedad pudrición en el tronco en términos de precisión, heredabilidad individual y media del clon resultaron de bajos en Upala y Cutris, pero moderados en Guatuso. En Upala y Cutris se obtuvo valores de precisión $< 0,20$, $h^2 g < 0,0012$, $h^2 mc < 0,04$ y CVg % $< 1,11$ y en Guatuso precisión $< 0,59$, $h^2 g < 0,03$, $h^2 mc < 0,35$ y CVg % $< 5,57$. Estos resultados son inferiores a los reportados por [3] y [8] con ámbitos de $h^2 g$ (0,03 – 0,23) $h^2 mc$ (0,45 – 0,89) y CVg % (15,10 – 83,4), por otra parte [29] reporta valores bajos de $h^2 g$ (0,04 - 0,06) para severidad e incidencia y moderados para $h^2 mc$ (0,47 – 0,59) a los 2,4 años. Es importante mencionar que Ávila-Arias *et al.* [3] llevaron a cabo el análisis de los parámetros genéticos a un conjunto clonal a los 38 meses en dos sitios utilizando una metodología similar y obtuvieron valores altos y confiables para severidad e incidencia en heredabilidad y variación genética, por lo que en este caso no se corrobora el potencial genético del conjunto en estas variables.

Conclusiones

Se identificó la población potencial de mejoramiento y la comercial para los tres sitios incluidos en la presente investigación, con base en la evaluación del desempeño de los genotipos para variables dasométricas y de calidad. Además, se clasificaron de acuerdo con su susceptibilidad a la enfermedad de pudrición en el tronco.

En el Sitio Upala a los 2,8 años, la población potencial de mejoramiento está conformada por los clones 3, 9, 4 y 11, a los que se le deben sumar el 10, 5, 8 y 13 para completar la población potencial comercial. Esta población es 10.4 % superior al conjunto total evaluado, cuyo impacto se traduce en una diferencia de 2,21 m³ ha⁻¹. El genotipo 1 se identifica como de baja susceptibilidad a la enfermedad pudrición del tronco y el 3, 5, 6, 7, 8, 11 y 16 como de susceptibilidad media.

En el Sitio Cutris a los 5,9 años, la población potencial de mejoramiento está conformada únicamente por el clon 16, adicionalmente el 12, 6, 5, 3 y 4 forman parte de la población comercial. Esta población mejoraría la productividad en 1,73 m³ ha⁻¹, superior fenotípicamente en 5.3 %. Todos esos genotipos, excepto el 6, se catalogaron como poco susceptibles a la enfermedad, a cuya lista también deben agregarse los clones 7, 9, 8, 13 y 10.

En el Sitio Guatuso en la evaluación a los 4,3 años, los clones 10 y 13 conforman la población potencial de mejoramiento, a los que se debe incluir el 4, 7, 11, 6, 12 y 5 para conformar la población potencial comercial. La SF registra 10,4 %, por lo tanto, la población aumenta el VCC del sitio en 3,24 m³ ha⁻¹. Los clones que se identifican como de poco susceptibles son 3, 6, 7, 8, 9, 11 y 12.

Los parámetros de Cutris y Guatuso sugieren que los altos valores de heredabilidad en el genotipo y la variación genética son muestra de un fuerte potencial para seleccionar clones con base en su desempeño en VCC y C%. No obstante, en Upala se debe prestar atención al efecto del ambiente sobre el desempeño en esta variable VCC dada que la heredabilidad del clon y la precisión son moderadas, lo que disminuye la precisión para la toma de decisiones. En términos de susceptibilidad a la enfermedad pudrición en el tronco los parámetros resultaron bajos y poco precisos, por lo que no es recomendable seleccionar clones con base en estos resultados.

Agradecimientos

Al Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional (Inisefor-UNA) de Costa Rica, por permitir el desarrollo y financiar esta investigación.

Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Censos, “Encuesta Nacional Agropecuaria 2018 (Nuestra actividad agrícola y forestal)”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.inec.cr/multimedia/nuestra-actividad-agricola-y-forestal-2018-infografia-encuesta-nacional-agropecuaria>
- [2] W. S. Dvorak, “World view of *Gmelina arborea*: opportunities and challenges”, *New Forest*, vol. 28, no. 2, pp. 111-126, 2004.
- [3] C. Ávila-Arias, A. Salas-Rodríguez y R. Murillo-Cruz, “Selección de genotipos superiores de *Gmelina arborea* Roxb. por su heredabilidad genética a la tolerancia de la enfermedad de pudrición en el tronco, Pacífico sur de Costa Rica”, *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 13, no. 32, pp. 11-20, 2016, doi:10.18845/rfmk.v0i0.2548
- [4] A. Barrantes y S. Ugalde, “Usos y aportes de la madera en Costa Rica (estadísticas 2018 y precios, 2019)”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://onfcr.org/wp-content/uploads/2019/11/USOS-Y-APORTES-DE-LA-MADERA-2018.pdf>
- [5] C. Ávila-Arias, R. Murillo-Cruz, O. Murillo-Gamboa y C. Sandoval-Sandoval, “Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb., en sitios planos del Pacífico sur de Costa Rica”, *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 12, no. 28, pp. 23-35, 2015.
- [6] A. Kumar, Sativa, H. S. Ginwal, S. Dobhal, S. Sharma, P. Shrivastava, A. Rana y R. Kumar, “Development and release of high yielding clones of *Eucalyptus tereticornis* SM”, *Indian Forester*, vol. 143, no. 12, pp. 1221-1225, 2017.
- [7] O. Murillo-Gamboa, A. Salas-Rodríguez, R. Murillo-Cruz y C. Ávila-Arias, “Tasa de avance de la pudrición en el tronco en melina *Gmelina arborea* Roxb. y posibilidades de manejo”, *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 13, no. 32, pp. 40-50, 2016, doi:10.18845/rfmk.v0i0.2551
- [8] A. Salas-Rodríguez, O. Murillo-Gamboa, R. Murillo-Cruz y C. Ávila-Arias, “Evidencia de la tolerancia genética a la pudrición del tronco en clones de *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica”, *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 13, no. 32, pp. 30-39, 2016. doi:10.18845/rfmk.v0i0.2550
- [9] E. P. Indira, “Provenance variations in *Gmelina arborea* with particular reference to tree form”, *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 18, no. 1, pp. 36-50, 2006.
- [10] L. F. Osorio, “Provenance results of *Gmelina arborea* in southwest Colombia at three years of age”, *New Forest*, vol. 28, pp. 179-185, 2004.
- [11] J. A. Méndez y L. F. Pérez, “La reforestación con especies nativas: análisis de la situación en la Región Huetar Norte de Costa Rica”, *Ambientico*, no. 267, pp. 23-27, 2018.
- [13] L. Holdridge, *Life Zone Ecology*. San José, CRC: Tropical Science Center, 1967.

- [14] D. Zeaser y R. Murillo, "Conceptos generales sobre la selección de sitios para plantar melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en el sur de la provincia de Puntarenas", STON Forestal S. A., Departamento de Investigación y Desarrollo, Buenos Aires, Puntarenas, CRC. Reporte. 24-95. 1995.
- [15] O. Murillo y Y. Badilla, "Calidad de la plantación forestal", Escuela de Ingeniería Forestal-ITCR, Cartago, CRC, 2010. (Información sin publicar).
- [16] A. Salas-Rodríguez, O. Murillo-Gamboa, R. Murillo-Cruz, C. Ávila-Arias y X. Mata-Granados, "Evaluación de la severidad de la pudrición en el tronco en *Gmelina arborea* Roxb", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 13, no. 32, pp. 01-10, 2016, doi:10.18845/rfmk.v0i0.2547.
- [17] A. Kumar, R. K. Luna, Parveen y V. Kumar, "Variability in growth characteristics for different genotypes of *Eucalyptus tereticornis* (SM.)", *Journal of Forestry Research*, vol. 21, no. 4, pp. 487-491, 2010, doi:10.1007/s11676-010-0103-2.
- [18] R. Murillo, "Evaluación de algunos factores ambientales que afectan la calidad de sitio, a nivel de micrositio para la melina del huerto semillero de Ston Forestal, plantada en suelos planos y fértiles de la zona sur", Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional, Heredia, 1996.
- [19] A. Kumar, "Growth performance and variability in different clones of *Gmelina arborea* (Roxb.)", *Silvae Genética*, vol. 56, no. 1, pp. 32-36, 2007, doi:10.1515/sg-2007-0005.
- [20] H. C. Balcorta-Martínez y J. J. Vargas-Hernández, "Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de melina (*Gmelina arborea* Linn., Roxb.) de tres años de edad", *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 10, no. 1, pp. 13-19, 2004.
- [21] O. Corpuz, "Growth and heritability of three year old *Gmelina* plantation", National Research and Development Conference, Philippines, 2011.
- [22] S. Sampayo-Maldonado, J. López-Upton, V. Sánchez-Monsalvo y M. Jiménez-Casas, "Genetic parameters of growth, and resistance to the shoot borer, in young clones of the tree *Cedrela odorata* (Meliaceae)", *Revista de Biología Tropical*, vol. 67, no. 3, pp. 554-561, 2019.
- [23] A. Kumar y G. P. S. Dhillon, "Clonal testing of *Eucalyptus* clones and estimation of their genetic parameters", *Indian Forester*, vol. 142, no. 2, pp. 127-132, 2016.
- [24] F. M. Padua, "Juvenile selection of *Gmelina arborea* clones in the Philippines", *New Forest*, vol. 28, pp. 195-200, 2004.
- [25] M. Arguedas, M. Rodríguez-Solis, R. Moya y A. Berrocal, "*Gmelina arborea* "death disease" in fast-growth plantations: Effects of soil and climatic conditions on severity and incidence and its implications for wood quality". *Forest systems*, vol. 27, no. 1, pp. 1-13, 2018, doi: <https://doi.org/10.5424/fs/2018271-12236>
- [26] M. D. V. Resende, "Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes". Embrapa Informação Tecnológica, Colombo: Embrapa Florestas, 2002.

- [27] W. Hernández-Castro, Y. Badilla y O. Murillo-Gamboa, “Estimación de parámetros genéticos de *Gmelina arborea* Roxb (melina) en el Caribe de Costa Rica”, *Uniciencia*, vol. 35, no. 1, pp. 352-366, 2021, DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/ru.35-1.22>
- [28] W. Hernández, Y. Badilla, E. Esquivel y O. Murillo-Gamboa, “Comportamiento de clones de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones de suelos ácidos”, *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 55, no. 2, pp. 229-249, 2021, DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.11>
- [29] D. Méndez-Álvarez, O. Murillo-Gamboa, Y. Badilla-Valverde y W. Hernández-Castro, “Genetic tolerance to *Ceratocystis* wilt in melina (*Gmelina arborea*)”, *Silvae genetica*, vol. 70, pp. 195-204, 2021, DOI: 10.2478/sg-2021-0017

Cuadros y figuras

Bloque 1	4	9	10	7	6	12	13	11	2	5	3	1	8	15	10	3	2	9	15	13	5	12	6	7	1	4	11	8	Bloque 4
	4	9	10	7	6	12	13	11	2	5	3	1	8	15	10	3	2	9	15	13	5	12	6	7	1	4	11	8	
	2	13	12	15	6	3	9	11	4	1	7	5	8	10	5	13	8	9	7	4	2	1	10	11	12	3	6	15	
	2	13	12	15	6	3	9	11	4	1	7	5	8	10	5	13	8	9	7	4	2	1	10	11	12	3	6	15	
	9	10	5	13	11	2	1	6	3	8	12	15	7	4	7	11	8	12	9	3	10	15	5	1	2	13	6	4	
Bloque 2	9	10	5	13	11	2	1	6	3	8	12	15	7	4	7	11	8	12	9	3	10	15	5	1	2	13	6	4	Bloque 5
	10	3	2	9	15	13	5	12	6	7	1	4	11	8	15	8	1	3	5	2	11	13	12	6	7	10	4	9	
	10	3	2	9	15	13	5	12	6	7	1	4	11	8	15	8	1	3	5	2	11	13	12	6	7	10	4	9	
	5	13	8	9	7	4	2	1	10	11	12	3	6	15	10	8	5	7	1	4	11	9	3	6	15	12	13	2	
	5	13	8	9	7	4	2	1	10	11	12	3	6	15	10	8	5	7	1	4	11	9	3	6	15	12	13	2	
Bloque 3	7	11	8	12	9	3	10	15	5	1	2	13	6	4	9	10	5	13	11	2	1	6	3	8	12	15	7	4	Bloque 6
	7	11	8	12	9	3	10	15	5	1	2	13	6	4	9	10	5	13	11	2	1	6	3	8	12	15	7	4	
	15	8	1	3	5	2	11	13	12	6	7	10	9	4	8	11	4	1	7	6	12	5	13	15	9	2	3	10	
	15	8	1	3	5	2	11	13	12	6	7	10	9	4	8	11	4	1	7	6	12	5	13	15	9	2	3	10	
	10	8	5	7	1	4	11	9	3	6	15	12	13	2	5	13	8	9	7	4	2	1	10	11	12	3	6	15	
Bloque 3	10	8	5	7	1	4	11	9	3	6	15	12	13	2	5	13	8	9	7	4	2	1	10	11	12	3	6	15	Bloque 6
	4	7	15	12	8	3	6	1	2	11	13	5	10	9	4	6	13	2	1	5	15	10	3	9	12	8	11	7	
Bloque 3	4	7	15	12	8	3	6	1	2	11	13	5	10	9	4	6	13	2	1	5	15	10	3	9	12	8	11	7	Bloque 6
	4	7	15	12	8	3	6	1	2	11	13	5	10	9	4	6	13	2	1	5	15	10	3	9	12	8	11	7	

Figura 1. Diseño experimental bloques completos al azar, instalado en tres ensayos en la región Huetar Norte de Costa Rica

Figure 1. Random complete blocks experimental design, installed in three trials in the Northern Huetar Region of Costa Rica

Cuadro 1. Posición de genotipos de *Gmelina arborea* respecto a su superioridad fenotípica registrada sobre la media poblacional en variables de crecimiento y calidad, a los 2,8 años en Sitio Upala, Alajuela, Costa Rica

Table 1. Position of *Gmelina arborea* genotypes regarding its phenotypic superiority registered over the population mean in growth and quality variables, at 2.8 years in Upala Site, Alajuela, Costa Rica

Volumen comercial (m ³ árbol ⁻¹)			Calidad (%)			Volumen comercial de calidad (m ³ árbol ⁻¹)		
Clon	Media	SF (%)	Clon	Media	SF (%)	Clon	Media	SF (%)
10	0,0523 A	28,7	8	79,4 A	15,6	3	0,0335 A	21,6
3	0,0453 A	11,4	4	78,1 AB	13,7	9	0,0318 A	15,4
11	0,0451 A	10,8	13	76,5 AB	11,3	4	0,0316 A	14,6
2	0,0438 A	7,7	6	76,2 AB	10,9	11	0,0308 A	11,8
9	0,0427 A	5,0	3	75,8 ABC	10,3	10	0,0297 A	7,9
7	0,0421 A	3,4	5	73,2 ABC	6,5	5	0,0294 A	6,8
4	0,0409 A	0,6	11	72,6 ABC	5,6	8	0,0287 A	4,3
5	0,0402 A	-1,1	9	71,4 ABC	4,0	13	0,0277 A	0,8
15	0,0397 A	-2,3	12	71,0 ABC	3,3	12	0,0273 A	-0,8
12	0,0384 A	-5,7	15	66,7 ABCD	-2,9	6	0,0269 A	-2,5
1	0,0373 A	-8,4	16	61,1 ABCD	-11,0	7	0,0255 A	-7,4
16	0,0371 A	-8,8	7	60,8 ABCD	-11,5	15	0,0250 A	-9,4
8	0,0366 A	-10,0	1	60,2 BCD	-12,4	2	0,0227 A	-17,8
13	0,0356 A	-12,5	10	57,0 CD	-17,0	16	0,0225 A	-18,4
6	0,0343 A	-15,7	2	51,4 D	-25,2	1	0,0212 A	-23,0
0,0407			68,7			0,0276		
(±0,0233)*			(±24,1)*			(±0,0174)*		

SF: Superioridad fenotípica; * promedio y desviación estándar. Promedios con letras distintas son estadísticamente diferentes según la prueba Tukey ($\alpha = 0,05$).

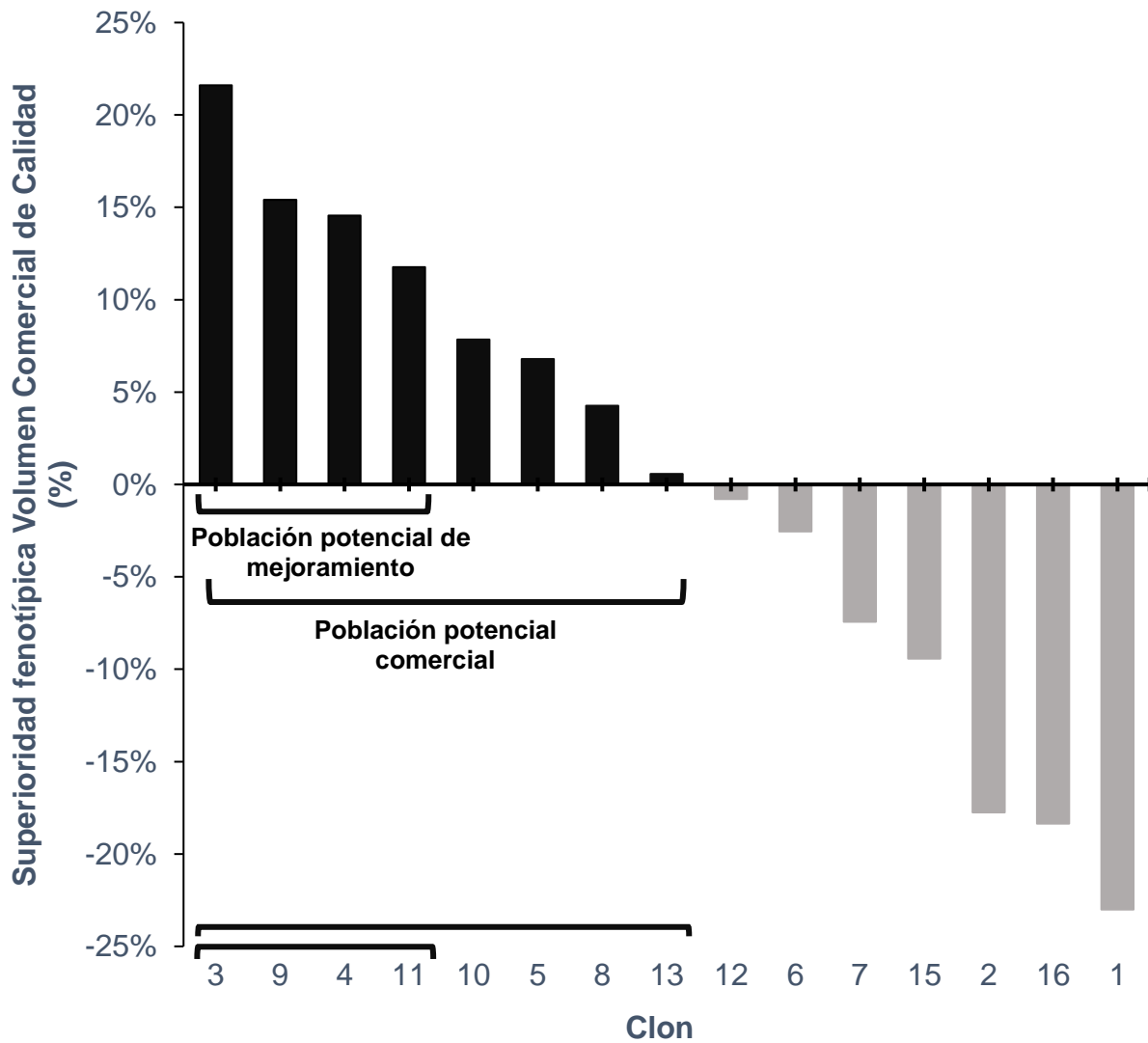


Figura 2. Población potencial comercial y de mejoramiento que se identificó para un conjunto genético de *Gmelina arborea* a los 2,8 años en Sitio Upala, Alajuela, Costa Rica

Figure 2. Commercial and breeding potential populations identified for a genetic set of *Gmelina arborea* at 2.8 years in Upala Site, Alajuela, Costa Rica

Cuadro 2. Jerarquía clonal respecto a su nivel de susceptibilidad a la pudrición en el tronco para *Gmelina arborea* en Sitio Upala, Alajuela, Costa Rica

Table 2. Clonal hierarchy regarding its level of susceptibility to trunk rot for *Gmelina arborea* in Upala Site, Alajuela, Costa Rica. Tercio superior, tercio intermedio, tercio inferior

Severidad Incidencia Susceptibilidad

1	1	1
5	5	5
6	6	6
3	8	8
8	3	3
11	16	11
9	7	16
12	11	7
16	9	9
17	12	12
4	2	4
13	4	2
2	15	13
15	10	15
10	13	10

Tercio superior □, tercio intermedio □, tercio inferior □

Cuadro 3. Posición de genotipos de *Gmelina arborea* respecto a su superioridad fenotípica registrada sobre la media poblacional en variables de crecimiento y calidad, a los 5,9 años en Sitio Cutris, Alajuela, Costa Rica

Table 3. Position of *Gmelina arborea* genotypes regarding its phenotypic superiority registered over the population mean in growth and quality variables, at 5.9 years in Cutris Site, Alajuela, Costa Rica

Volumen comercial (m ³ árbol ⁻¹)			Calidad (%)			Volumen comercial de calidad (m ³ árbol ⁻¹)		
Clon	Media	SF (%)	Clon	Media	SF (%)	Clon	Media	SF (%)
16	0,2595 A	14,2	10	93,3 A	8,3	16	0,2235 A	12,5
5	0,2492 A	9,7	6	91,7 A	6,4	12	0,2158 A	8,7
12	0,2428 A	6,9	12	89,7 A	4,2	6	0,2083 A	4,8
3	0,2386 A	5,0	8	88,9 A	3,2	5	0,2072 A	4,3

4	0,2274 A	0,1	9	88,9 A	3,2	3	0,2002 A	0,8
6	0,2259 A	-0,6	7	85,2 A	-1,1	4	0,1990 A	0,2
7	0,2107 A	-7,3	16	85,2 A	-1,1	10	0,1914 A	-3,7
13	0,2048 A	-9,9	4	84,9 A	-1,5	8	0,1891 A	-4,8
9	0,2021 A	-11,0	3	83,3 A	-3,3	9	0,1798 A	-9,5
10	0,2011 A	-11,5	5	83,3 A	-3,3	7	0,1779 A	-10,4
8	0,2009 A	-11,6	13	72,2 A	-16,2	13	0,1694 A	-14,7
0,2272				86,2			0,1987	
(±0,0840)*				(±18,6)*			(±0,0916)*	

SF: Superioridad fenotípica; * promedio y desviación estándar. Promedios con letras distintas son estadísticamente diferentes según la prueba Tukey ($\alpha = 0,05$).

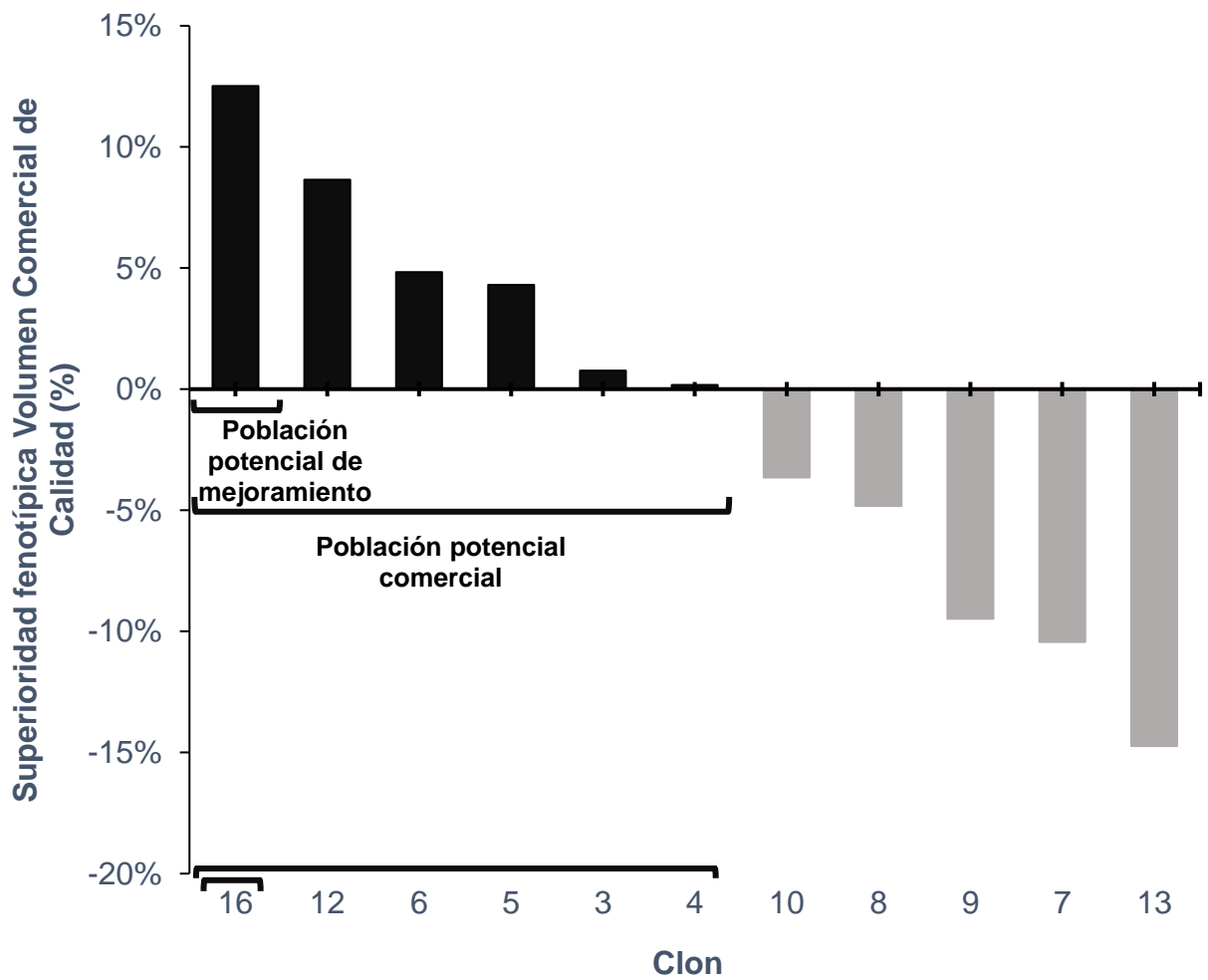


Figura 3. Posición de genotipos de *Gmelina arborea* respecto a su superioridad fenotípica registrada sobre la media poblacional en variables de crecimiento y calidad, a los 5,9 años en Sitio Cutris, Alajuela, Costa Rica

Figure 3. Commercial and breeding potential populations identified for a genetic set of *Gmelina arborea* at 5.9 years in Cutris Site, Alajuela, Costa Rica

Cuadro 4. Crecimiento, calidad y susceptibilidad a la enfermedad pudrición en el tronco de clones de *Gmelina arborea* en dos momentos de medición en el sitio Cutris, Alajuela, Costa Rica

Table 4. Growth, quality, and susceptibility to rot trunk disease of clones of *Gmelina arborea* in two measurement moments at the Cutris site, Alajuela, Costa Rica

Volumen comercial		Volumen comercial calidad		Severidad		Incidencia		Susceptibilidad	
2,9 años	5,9 años	2,9 años	5,9 años	2,9 años	5,9 años	2,9 años	5,9 años	2,9 años	5,9 años
2*	16*	2*	16*	4	12	4	12	4	12
10*	5*	6*	12*	10	4	10	4	10	4
15*	12*	5*	6*	5	5	5	5	5	5
7*	3*	7*	5*	6	7	6	7	6	7
6*	4*	15*	3*	12	9	12	9	12	9
16*	6	10*	4*	13	16	13	16	13	16
5*	7	3*	10	9	3	9	3	9	3
3*	13	4*	8	7	8	16	8	16	8
1	9	16	9	16	13	2	13	7	13
4	10	9	7	8	10	7	10	2	10
11	8	13	13	3	6	8	6	8	6
8		11		12		3		3	
9		8		11		15		11	
12		12		15		11		15	
13		1		1		1		1	

*Población potencial comercial; Tercio superior, Tercio intermedio, Tercio inferior

Cuadro 5. Posición de genotipos de *Gmelina arborea* respecto a su superioridad fenotípica registrada sobre la media poblacional en variables de crecimiento y calidad, a los 4,3 años en Sitio Guatuso, Alajuela, Costa Rica

Table 5. Position of *Gmelina arborea* genotypes regarding its phenotypic superiority registered over the population mean in growth and quality variables, at 4.3 years in Guatuso Site, Alajuela, Costa Rica

Volumen comercial (m ³ árbol ⁻¹)			Calidad (%)			Volumen comercial de calidad (m ³ árbol ⁻¹)		
Clon	Media	SF (%)	Clon	Media	SF (%)	Clon	Media	SF (%)
10	0,1969 A	12,4	4	79,2 A	9,0	10	0,1666 A	26,1
11	0,1891 A	8,0	10	78,8 A	8,4	13	0,1491 AB	13,2
13	0,1879 A	7,3	13	78,7 A	8,3	4	0,1382 AB	4,9
9	0,1800 A	2,8	5	74,7 A	2,8	7	0,1371 AB	4,1
6	0,1800 A	2,7	6	74,7 A	2,8	11	0,1355 AB	2,9
7	0,1774 A	1,3	12	74,6 A	2,7	6	0,1349 AB	2,4
8	0,1763 A	0,7	9	74,2 A	2,2	12	0,1325 AB	0,6
5	0,1750 A	-0,1	7	74,1 A	2,0	5	0,1318 AB	0,1
12	0,1680 A	-4,1	3	72,2 A	-0,6	9	0,1317 AB	0,0
4	0,1674 A	-4,5	8	69,7 A	-4,1	8	0,1272 AB	-3,5
2	0,1673 A	-4,5	11	66,7 AB	-8,3	3	0,1180 AB	-10,4
3	0,1581 A	-9,8	1	59,3 AB	-18,4	2	0,0873 AB	-33,7
1	0,1372 A	-21,7	2	46,7 B	-35,8	1	0,0849 B	-35,5
0,1752			72,7			0,1317		
(±0,0693)*			(±20,8)*			(±0,0713)*		

SF: Superioridad fenotípica; * promedio y desviación estándar. Promedios con letras distintas son estadísticamente diferentes según la prueba Tukey ($\alpha = 0,05$).

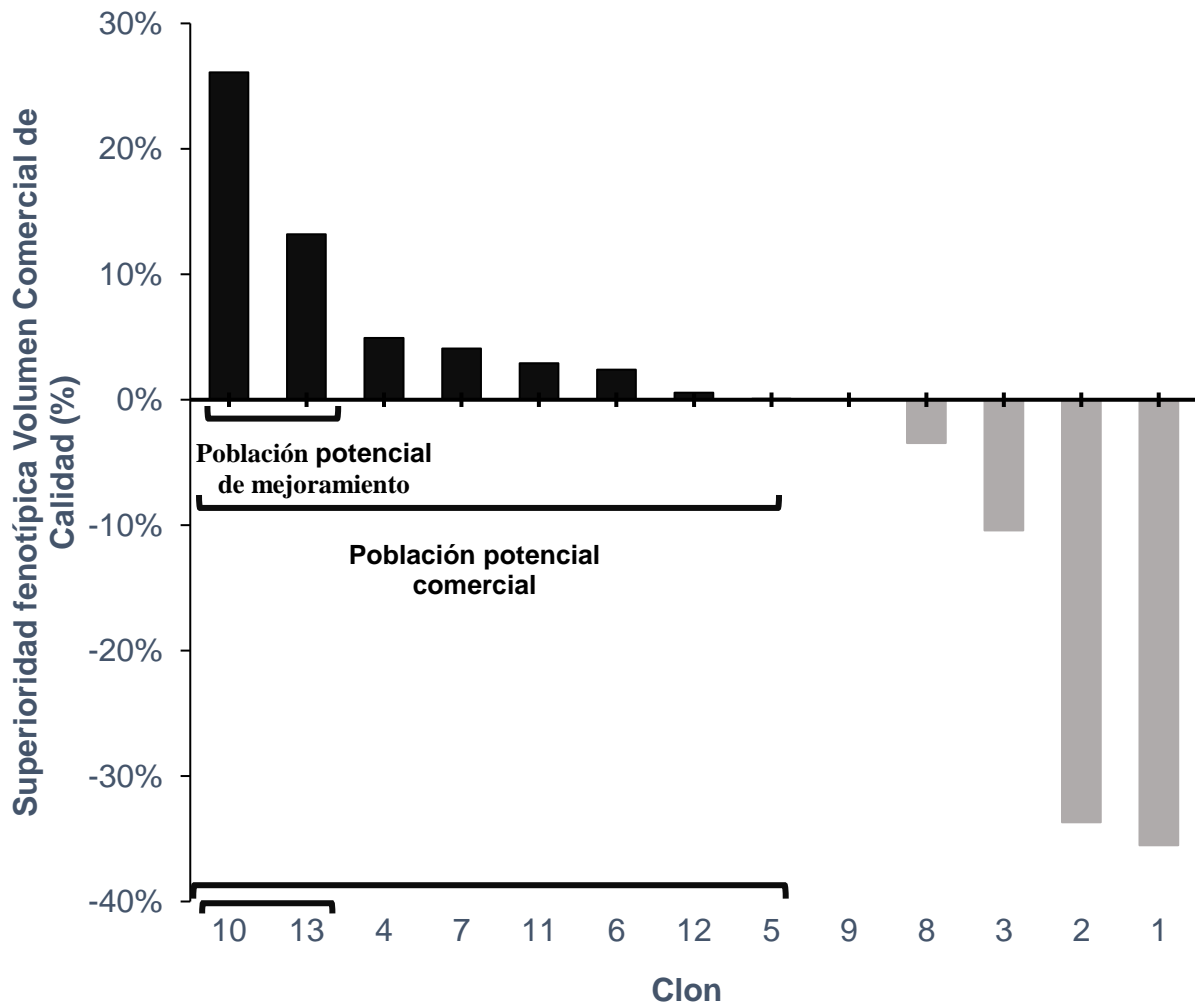


Figura 4. Población potencial comercial y de mejoramiento que se identificó para un conjunto genético de *Gmelina arborea* a los 4,3 años en Sitio Guatuso, Alajuela, Costa Rica

Figure 4. Commercial and breeding potential populations identified for a genetic set of *Gmelina arborea* at 4.3 years in Guatuso Site, Alajuela, Costa Rica

Cuadro 6. Crecimiento, calidad y susceptibilidad a la enfermedad pudrición en el tronco de clones de *Gmelina arborea* en dos momentos de medición en el sitio Guatuso, Alajuela, Costa Rica

Table 6. Growth, quality, and susceptibility to rot trunk disease of clones of *Gmelina arborea* in two moments of measurement in the Guatuso site, Alajuela, Costa Rica

Volumen comercial		Volumen comercial calidad		Severidad		Incidencia		Susceptibilidad	
3,3 a ños	4,3 a ños	3,3 años os	4,3 años os	3,3 años os	4,3 años ños	3,3 años ños	4,3 años ños	3,3 años os	4,3 años os
8*	10*	7*	10*	5	7	5	7	5	7
7*	11*	11*	13*	6	3	6	3	6	3
9*	13*	9*	4*	7	9	7	9	7	9
11*	9*	8*	7*	3	11	3	11	3	11
4*	6*	5*	11*	4	12	4	12	4	12
5*	7*	4*	6*	9	6	9	6	9	6
13*	8*	13*	12*	12	8	12	8	12	8
12*	5	12*	5*	13	13	8	13	13	13
6	12	6	9	11	4	11	4	11	4
3	4	3	8	8	5	13	5	8	5
10	2	10	3	2	10	2	10	2	10
2	3	1	2	10	2	10	2	10	2
1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
15		15		15		15		15	

*población potencial comercial; Tercio superior, Tercio intermedio, Tercio inferior

Cuadro 7. Parámetros genéticos del volumen comercial y el volumen comercial de calidad que se evaluaron a los 3 años en clones de *Gmelina arborea* en la región Huetar Norte, Costa Rica

Table 7. Genetic parameters of Commercial Volume and Quality Commercial Volume valuated at 3 years in *Gmelina arborea* clones in the North Huetar region, Costa Rica

Sitio	Cutris			Guatuso			Upala		
	volumen comercial	Volumen comercial calidad	Cal (%)	volumen comercial	Volumen comercial calidad	Cal (%)	volumen comercial	Volumen comercial calidad	Cal (%)
Precisión	0,91	0,91	0,88	0,83	0,92	0,92	0,48	0,64	0,89
H ² g	0,05	0,13	0,10	0,06	0,14	0,15	0,01	0,02	0,09
H ² mc	0,83	0,83	0,77	0,69	0,84	0,85	0,23	0,41	0,79

CVg %	15,2	17,54	10,11	9,96	19,87	11,64	4,87	7,4	9,84
CVe %	16,6	19,41	13,61	16,5	20,93	12,02	21,9	21,83	12,38
CVr	0,91	0,90	0,74	0,60	0,95	0,97	0,22	0,34	0,79

H²g: heredabilidad individual; h²mc: heredabilidad media entre clones; CVg %: coeficiente de variación genético; CVe %: coeficiente de variación ambiental; CVr: coeficiente de variación relativa.

Efecto de la calidad del sitio en el crecimiento, calidad y tolerancia a la pudrición en el tronco de clones de *Gmelina arborea* Roxb.

Effect of site quality on growth, quality and stem rot tolerance in clones of *Gmelina arborea* Roxb.

Rodrigo Benavides-Fallas¹

¹. Estudiante de Licenciatura Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional, Costa Rica, rodrigo.benavides.fallas@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4484-6692>

*Autor para correspondencia: rodrigo.benavides.fallas@gmail.com

Resumen

[Introducción]: Los programas de mejoramiento genético (PMG) deben identificar genotipos en relación con su rendimiento en distintos ambientes, con lo que se optimice su respuesta ante la diversidad de condiciones y, consecuentemente, se aumente la productividad y rentabilidad de las unidades de producción. **[Metodología]:** La evaluación del desempeño fenotípico se llevó a cabo a través de la división del conjunto en genotipos deseables y no deseables con base en la superioridad fenotípica (SF) de cada clon por su desempeño en volumen comercial de calidad (VCC), se establecieron categorías de susceptibilidad a la enfermedad de pudrición en el tronco para clasificar los clones de acuerdo con su estabilidad en el comportamiento entre ensayos y se identificaron los clones especialistas por ambiente. **[Resultados]:** Debido a la clasificación de los clones por su SF y su estabilidad a la enfermedad se definió como generalista el clon 5 para la región en sitios clase II. La población superior identificada en términos de VCC y susceptibilidad para Guatuso la conforman los genotipos 4, 5, 7 y 9 para Cutris son 5 y 6 y para Upala el genotipo 3, la población de deseables la componen 6, 8, 11, 12 y 13 en Guatuso, 4, 7 y 10 en Cutris y 5, 8, 9 y 11 en Upala. **[Conclusiones]:** se determinó la existencia de efecto del sitio en las localidades de estudio que afectó el desempeño de los genotipos, donde en sitio Guatuso los 10 mejores clones superaron fenotípicamente entre un 50 % y un 99 % al resto de los genotipos que se evaluaron.

Palabras clave: silvicultura clonal, mejoramiento genético, genotipos superiores, región Huetar Norte, volumen comercial de calidad.

Abstract

[Introduction]: Genetic Improvement Programs (PMG) must identify genotypes in relation to their *performance* in different environments, thereby optimizing their response to the diversity of conditions and, consequently, increasing the productivity and profitability of the breeding. Production units. **[Methodology]:** The evaluation of the phenotypic *performance* was carried out through the division of the *set* into desirable and undesirable genotypes based on the phenotypic superiority (PS)

of each clone for its *performance* in quality commercial volume (QCV), categories of susceptibility to rot disease in the trunk were established to classify the clones according to their stability in behavior between trials and specialist clones were identified by environment. **[Results]:** Given the classification of the clones by their PS and their stability to the disease, clone 5 was defined as a generalist for the region in class II sites. The superior population identified in terms of QCV and susceptibility to Guatuso is made up of genotypes 4, 5, 7 and 9; for Cutris they are 5 and 6 and for Upala genotype 3, the desirable population is made up of 6, 8, 11, 12 and 13 in Guatuso, 4, 7 and 10 in Cutris and 5, 8, 9 and 11 in Upala. **[Conclusions]:** the existence of site effect was determined in the study localities that affected the *performance* of the genotypes, where in the Guatuso site the 10 best clones phenotypically exceeded the rest of the evaluated genotypes between 50 and 99 %.

Keywords: clonal forestry, genetic improvement, superior genotypes, North Huetar region, quality commercial volume.

1. Introducción

Los programas de mejoramiento genético (PMG) forestal buscan optimizar la producción por unidad de área, esto mediante la silvicultura clonal intensiva. Lo anterior porque la mayor parte de los rasgos de interés para el mejoramiento se influyen por factores ambientales y genéticos. Debido a su relevancia en el proceso de domesticación, el mejorador silvicultural debe preocuparse por los efectos del ambiente sobre el rendimiento de los genotipos (Burdon *et al.*, 2017) y por comprender las complejas interacciones entre factores silviculturales, ambientales y genéticos (Ávila-Arias *et al.*, 2015; Burdon *et al.*, 2017). Ante esta premisa, los PMG deben vincular sus genotipos con la productividad o calidad, de los distintos ambientes (Gerzan *et al.*, 2017) y con esto mejorar su respuesta ante diversidad de condiciones (Chaves-Vásquez, 2017).

Cuando se comparan los rendimientos relativos de los genotipos en distintos ambientes y se localizan inconsistencias (Gerzan *et al.*, 2017), se asume que existe un efecto del sitio sobre el genotipo. La presencia de esta interacción genera afectaciones en el rendimiento de los genotipos y en la eficiencia del PMG (Nghah y Abdul-Ghani, 2014). Aunque los efectos pueden reducirse al seleccionar áreas por sus características ambientales, esta no es una opción realista para el pequeño y mediano productor, por lo que es mejor optimizar rendimiento mediante la distribución de clones estables debido a su interacción ante las distintas condiciones (Nghah y Abdul-Ghani, 2014).

Diversas investigaciones han reportado resultados del efecto del sitio sobre el genotipo en conjuntos genéticos. En el sureste de México con clones *Eucalyptus urophylla*, los autores Sánchez-Vargas *et al.* (2004) reportaron cambios en el ámbito de jerarquías entre sitios al año de edad, pero no resultaron significativos. Por otra parte, Chaves-Vásquez (2017) reportó, para clones de *Tectona grandis* que se evaluaron en Costa Rica y Nicaragua, la existencia de 2 generalistas en todo el conjunto genético, debido al alto rendimiento en todos los ambientes. Para *Gmelina arborea*, específicamente en el Pacífico Sur de Costa Rica, Ávila-Arias *et al.* (2015) determinaron efecto del sitio en los 2 conjuntos clonales que se evaluaron, al presentar diferencias de comportamiento entre ensayos. Los resultados de las investigaciones muestran la importancia de determinar la existencia de la interacción del sitio con las variables de mayor importancia económica como la calidad, el rendimiento volumétrico y la susceptibilidad fitosanitaria.

En Costa Rica, la melina es la especie forestal productiva de mayor área cosechada y la segunda de mayor producción (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2018), además, la de mayor avance en PMG. A pesar de sus estupendas cualidades comerciales y del avance silvicultural y genético, el desconocimiento de la interacción de los genotipos ante distintos ambientes impide optimizar su manejo silvicultural intensivo (Ávila-Arias *et al.*, 2015). El problema se intensifica ante la variabilidad en producción que presenta la especie respecto al sitio (Dvorak, 2004) y por las deficiencias de los materiales comerciales respecto a la calidad y el estado fitosanitario. Atender estos temas es una necesidad para los PMG, todavía más cuando de ellos depende mejorar la rentabilidad de las unidades de producción.

Según Zeaser y Murillo (1995), las características ideales para producción de melina en Costa Rica incluyen topografía plana con pendientes inferiores al 5 % y de poca pedregosidad, suelos Entisoles o Inceptisoles de textura franco-arcillosa y profundidad efectiva superior a los 80 cm, pH entre los 6.0 a 6.5, saturación de acidez que no supere el 3 % y CICE superior a 20 meq. Además, sitios con estacionalidad seca de no más de 3 meses y con precipitaciones que oscilen entre los 3800 mm* año^{-1} y los 5000 mm* año^{-1} . Entre otros requerimientos para un buen desarrollo, se enlistan las zonas de vida bosque seco tropical, bosque húmedo y muy húmedo tropical, ausencia de vientos fuertes y suelos con buen drenaje (Rojas *et al.*, 2004). En otros países como China, Wang (2004) encontró las mejores tasas de crecimiento para la especie en suelos profundos de riveras aluviales y en áreas entre los 450 m. s. n. m. y 1000 m. s. n. m. Asimismo, Urrego (2004) reportó los mejores rendimientos en plantaciones de 3 años en Colombia en suelos con buen drenaje y con textura arcillosa o franco-arcillosas para el volumen y la altura.

Por las características de la especie identificar efecto del sitio sobre el genotipo promete reducir las pérdidas en producción cuando se piensa distribuir clones en distintos ambientes (Pavlotzk y Murillo, 2014). En el ámbito regional, cuando las condiciones climáticas y edáficas son distintas, es relevante realizar evaluaciones al rendimiento de los clones en grupos de sitios representativos de la zona. Lo anterior implica evaluar los clones en diferentes condiciones dentro del área de crecimiento y evaluar las zonas de plantación para maximizar la ganancia genética (Gerzan *et al.*, 2017). El objetivo de la evaluación debe enfocar la identificación de genotipos superiores y estables a variedad de ambientes (generalistas). Además, debe seleccionar clones para ambientes específicos (especialistas), en las zonas donde el conjunto genético tenga mejor rendimiento (Ngah y Abdul-Ghani, 2014).

La región Huetar Norte (RHN) ha sido y es clave para el desarrollo forestal del país. Se caracteriza por su cultura forestal y los esfuerzos de encadenamientos productivos que se han desarrollado (Madrigal, 2017). Por este motivo, el Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional de Costa Rica (Inisefor-UNA) ha dirigido esfuerzos para disminuir la incertidumbre o apoyar la selección de genotipos para la variedad de condiciones presentes en la región. Ante este panorama, el objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de la calidad de sitio de un conjunto de genotipos de melina, para variables de crecimiento, calidad y estado fitosanitario, en tres sitios característicos de la RHN, de manera que se identifiquen los genotipos, tanto generalistas como especialistas, y así maximizar la rentabilidad de las unidades de producción.

2. Metodología

2.1 Descripción de los sitios

El estudio incluyó tres ensayos experimentales clonales de la especie *Gmelina arborea*, los que el Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional (Inisefor-UNA) instaló en tres sitios de la región Huetar Norte (RHN) de Costa Rica, a saber:

Sitio Upala: ensayo establecido en agosto del año 2012. Se ubica en el cantón Upala y distrito Aguas Claras, a 85 m. s. n. m., en las coordenadas geográficas N 10.939179 y W 85.253658. El orden de suelo en este sitio es ultisol, suborden humults (Mata *et al.*, 2016) y se encuentra en la zona de vida Bosque Muy Húmedo Premontano Transición Basal (bmt-P6) (Holdridge, 1967). Como parte de la preparación del sitio se llevó a cabo la aplicación de rastra dos veces y se aplicó 50 g de cal *Zurco Mejorador* por árbol al fondo del hueco en el momento de la siembra, sitio considerado como Clase II para producción de melina (Zeaser y Murillo, 1995).

Sitio Cutris: ensayo establecido en julio del año 2012, ubicado en el cantón San Carlos, en el distrito Cutris, en las coordenadas geográficas N 10.63279 y W 84.39598. Se encuentra a una altitud de 141 m. s. n. m. y su suelo es del orden ultisol, suborden udults (Mata *et al.*, 2016), catalogado en la zona de vida Bosque Muy Húmedo Premontano Transición Basal (bmt-P6) (Holdridge, 1967). Para la preparación del sitio se llevó a cabo rastra, encalado y se aplicó fertilizante 19-4-19, sitio Clase II para producción de melina (Zeaser y Murillo, 1995).

Sitio Guatuso: ensayo establecido en junio de 2013, ubicado en el cantón Guatuso, en el distrito San Rafael, en las coordenadas geográficas N 10.69171 y W 84.93362. Se encuentra a una altitud de 272 m. s. n. m. y su suelo es del orden ultisol, suborden udults (Mata *et al.*, 2016), catalogado en la zona de vida bosque muy húmedo tropical (bmh-T) (Holdridge, 1967). Como parte de la preparación del sitio se realizaron los hoyos con taladro y se agregaron 150 g de fertilizante 10-30-10, sitio considerado como Clase II para producción de melina (Zeaser y Murillo, 1995).

2.2 Descripción de los ensayos

Los tres ensayos de investigación se establecieron en la RHN con la colección clonal de melina del Inisefor-UNA. En Sitio Cutris y Upala se instalaron un total de 15 genotipos, mientras que el Sitio Guatuso consta de 14 de ellos, al no incluirse aquí el genotipo 16. Para el establecimiento se utilizó un diseño de bloques completos al azar (BCA). En cada sitio se establecieron seis bloques completos, cada uno contiene seis árboles (rametos) de cada uno de los genotipos, los que se plantaron en el campo en parejas y fueron distribuidos al azar a lo interno del bloque, con un distanciamiento de siembra de 3 m entre árbol y 4 m entre filas. En resumen, cada ensayo originalmente consta de seis bloques completos, Sitio Cutris y Upala con 15 clones y Sitio Guatuso con 14 clones, se evaluaron 36 árboles de cada genotipo, por lo tanto, en los primeros dos sitios se establecieron 540 árboles y en Guatuso 504 en total.

Bloque 1	4	9	10	7	6	12	13	11	2	5	3	1	8	15	10	3	2	9	15	13	5	12	6	7	1	4	11	8	Bloque 4
	4	9	10	7	6	12	13	11	2	5	3	1	8	15	10	3	2	9	15	13	5	12	6	7	1	4	11	8	
	2	13	12	15	6	3	9	11	4	1	7	5	8	10	5	13	8	9	7	4	2	1	10	11	12	3	6	15	
	9	10	5	13	11	2	1	6	3	8	12	15	7	4	7	11	8	12	9	3	10	15	5	1	2	13	6	4	
	9	10	5	13	11	2	1	6	3	8	12	15	7	4	7	11	8	12	9	3	10	15	5	1	2	13	6	4	
Bloque 2	10	3	2	9	15	13	5	12	6	7	1	4	11	8	15	8	1	3	5	2	11	13	12	6	7	10	4	9	Bloque 5
	10	3	2	9	15	13	5	12	6	7	1	4	11	8	15	8	1	3	5	2	11	13	12	6	7	10	4	9	
	5	13	8	9	7	4	2	1	10	11	12	3	6	15	10	8	5	7	1	4	11	9	3	6	15	12	13	2	
	5	13	8	9	7	4	2	1	10	11	12	3	6	15	10	8	5	7	1	4	11	9	3	6	15	12	13	2	
	7	11	8	12	9	3	10	15	5	1	2	13	6	4	9	10	5	13	11	2	1	6	3	8	12	15	7	4	
7	11	8	12	9	3	10	15	5	1	2	13	6	4	9	10	5	13	11	2	1	6	3	8	12	15	7	4		
Bloque 3	15	8	1	3	5	2	11	13	12	6	7	10	9	4	8	11	4	1	7	6	12	5	13	15	9	2	3	10	Bloque 6
	15	8	1	3	5	2	11	13	12	6	7	10	9	4	8	11	4	1	7	6	12	5	13	15	9	2	3	10	
	10	8	5	7	1	4	11	9	3	6	15	12	13	2	5	13	8	9	7	4	2	1	10	11	12	3	6	15	
	10	8	5	7	1	4	11	9	3	6	15	12	13	2	5	13	8	9	7	4	2	1	10	11	12	3	6	15	
	4	7	15	12	8	3	6	1	2	11	13	5	10	9	4	6	13	2	1	5	15	10	3	9	12	8	11	7	
4	7	15	12	8	3	6	1	2	11	13	5	10	9	4	6	13	2	1	5	15	10	3	9	12	8	11	7		

Figura 1. Diseño experimental bloques completos al azar instalado en tres ensayos en la región Huetar Norte de Costa Rica

Figure 1. Random complete blocks experimental design, installed in three trials in the Northern Huetar region of Costa Rica

2.3 Variables de la investigación

2.3.1 Variables independientes

Sitio: los sitios experimentales fueron tres, se buscó de concentrar la variabilidad del sitio entre los bloques y disminuirla dentro de ellos, para minimizar cualquier efecto que no fuera producto de la expresión genética del material clonal.

Edad: los tres sitios se compararon a los 3 años (36 meses).

Clones: una base genética de 15 genotipos de melina que manejan las personas investigadoras del Programa de Producción Forestal Intensiva del Inisefor-UNA.

2.3.2 Variables dependientes

Diámetro normal en cm (DAP): se midió el diámetro 1.3 m de la base para cada árbol, con cinta diamétrica.

Altura comercial (HC): determinada por la cantidad de trozas de 2.5 m evaluadas en cada árbol.

Volumen comercial con corteza (VC): se calcula mediante la **Ecuación 1**.

$$VC(m^3) = DAP (m)^2 * \frac{\pi}{4} * HC(m) * 0.45 \quad (E.1).$$

Calidad (C): se calculó un valor de calidad para cada individuo utilizando la metodología de Murillo y Badilla (2010). Calculada mediante la Ecuación 2, la cual se coloca a manera de ejemplo en caso de que el árbol tenga 4 trozas comerciales.

El factor de forma, valor 0,45 en la fórmula de VC, se estimó con la cubicación de más de 100 árboles clonales de la especie, una vez volteados

$$\text{Calidad del árbol} = T1 * 0.4 + T2 * 0.3 + T3 * 0.2 + T4 * 0.1 \quad (\text{E.2}).$$

Calidad porcentual (C %): El valor absoluto de calidad promedio por árbol se convirtió mediante la **Ecuación 3** a términos porcentuales.

$$C \% = 100 * \left\{ 1 - \left[\frac{\text{calidad}-1}{3} \right] \right\} \quad (\text{E.3}).$$

Volumen comercial de calidad (VCC): se ajustó el volumen comercial al multiplicarlo por su valor de C % de cada individuo (Ávila-Arias *et al.*, 2015).

Índice de severidad de la pudrición en el tronco (I. S.): se obtuvo el valor del grado de severidad de los individuos mediante la metodología propuesta por Salas-Rodríguez *et al.* (2016) (ver **Ecuación 4**). Ese valor se basa en una escala entre 1 y 5, 1 es el valor que indica un individuo sano y sin evidencia de síntomas. Una vez determinado el valor de severidad se calcula el índice de severidad en términos porcentuales (I. S. %) (ver **Ecuación 5**).

$$\text{I. S. del clon "i"} = \left[\frac{N1*1+N2*2+N3*3+N4*4+N5*5}{N1+N2+N3+N4+N5} \right] \quad (\text{E.4}).$$

$$\text{I. S. \%} = -1 * \left[\frac{1-\text{I.S.}}{4} \right] * 100 \quad (\text{E.5}).$$

Donde, N1 = número de rametos del clon *i* calificados con grado de severidad 1 +...+N5 = número de rametos del clon *i* calificados con grado de severidad.

Índice de incidencia de la pudrición en el tronco (I. I.): se calcula el promedio aritmético para cada clon, a partir de los datos *presencia/ausencia* de la enfermedad, con base en el conjunto de sus rametos presentes en el ensayo (ver **Ecuación 6**).

$$I. I. = \sum y_i / n \quad (\text{E.6}).$$

Donde, Yij = Presencia de la enfermedad en el rameto *i* del clon *j*.

Susceptibilidad: Se calcula la suma de los resultados del I. S. y el I. I. de cada clon.

2.4 Evaluación del desempeño fenotípico

La superioridad fenotípica (SF) corresponde al porcentaje de diferencia de valor promedio del sitio o del clon, respecto a la media de la población en comparación. De acuerdo con lo anterior, se definieron dos conjuntos para la comparación de jerarquías, con base en la SF de cada clon para todas las variables dependientes:

- Conjunto deseable: es el recomendado para establecer sistemas de producción forestal. Definido por todos aquellos clones que superaron la media del conjunto clonal en cada variable dependiente. Este conjunto se divide en dos poblaciones:
 1. Población potencial: constituida por los clones que superan la media poblacional.
 2. Población superior: constituida por los clones que superan la media de la población potencial.
- Conjunto no deseable: Se define como todos aquellos clones que no superaron la media del conjunto de comparación.

2.5 Definición de categorías en susceptibilidad

Con base en un listado de comparación entre los valores del conjunto genético de cada ensayo en susceptibilidad, se definieron tres categorías dadas las tendencias en el comportamiento:

- Categoría I: ausencia de la enfermedad (0 %).
- Categoría II: media susceptibilidad (valores del 3.5 al 16.5 %).
- Categoría III: alta susceptibilidad (valores mayores a 19.0 %).

Dadas las categorías de susceptibilidad se clasificaron los clones de acuerdo con su comportamiento:

- Estables: en los tres ensayos el clon-i se ubicó dentro de esta categoría.
- Variables: el valor del clon-i varía entre dos categorías consecutivas.
- Sensibles: en dos de los ensayos se encontró el clon-i en una misma categoría, pero el clon-i del tercer ensayo se encuentra distanciada por más de una categoría o se encontró el clon-i en las tres categorías.

2.6 Clasificación de los clones por su desempeño entre ambientes

Una vez establecido el conjunto de clones deseables por su desempeño fenotípico y categorizado como estables o variables, de acuerdo con su valor de susceptibilidad entre ambientes, los clones se clasificaron en dos grupos:

- Generalistas: son los clones que forman parte de la población potencial en VCC en los tres ambientes y clasificados como estables o variables entre la categoría I y II.
- Especialistas: clones dentro del conjunto de deseables en VCC y susceptibilidad para cada ambiente específico.

2.7 Análisis estadístico

Se comprobaron los enunciados de la estadística paramétrica y se les aplicó un análisis de varianza (Andeva) para datos no balanceados sobre las variables dasométricas DAP, HC, VC, C %, VCC. Este análisis se aplicó para comparar los valores por ensayo experimental y después el desempeño de los genotipos en los tres sitios a nivel volumétrico y de calidad. Posteriormente, se aplicó la prueba de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) como comprobador múltiple, que permitió identificar diferencias entre los sitios y clones que se evaluaron. Las pruebas se realizaron con el programa estadístico STATGRAPHICS Centurion XVI versión 16.1.18.

3. Descripción resultados

3.1 Diferencias entre sitios experimentales

La comparación entre sitios que se evaluaron registra diferencias estadísticamente significativas en todas las variables (ver Cuadro 1), excepto en el IMA de calidad (%), donde se registraron diferencias fenotípicas porcentuales entre ambientes cercanos a 0. Las tres localidades se diferencian en términos del IMA DAP y del IMA HC, no obstante, fue en el IMA HC donde se obtuvo la mayor superioridad fenotípica (SF) con un valor de 39.0 % del sitio Guatuso con respecto al promedio de los tres ensayos. La SF (%) del sitio Guatuso es más pronunciada en los IMA VC y VCC, variables en las cuales se diferencia estadísticamente de los ensayos restantes y los sitios Cutris y Upala son estadísticamente iguales entre ellos.

Cuadro 1. Comparación del conjunto genético clonal superior de *Gmelina arborea* respecto a la respuesta en parámetros de crecimiento y calidad, en tres sitios de la región Huetar Norte, Costa Rica

Table 1. Comparison of the superior clonal genetic set of *Gmelina arborea* regarding the response in growth and quality parameters, in three sites of the North Huetar region, Costa Rica

Sitio	IMA Diámetro normal (cm*año ⁻¹)		IMA Altura comercial (m*año ⁻¹)		IMA volumen comercial (m ³ *año ⁻¹)		IMA calidad (%*año ⁻¹)		IMA volumen comercial de calidad (m ³ *año ⁻¹)	
		SF (%)		SF (%)		SF (%)		SF (%)		SF (%)
Guatuso	5.2 C	-8.4 %	2.34 A	39.0 %	0.0261 A	41.2 %	23.4 A	-1.6 %	0.0215 A	56.1 %
Cutris	5.7 B	0.5 %	1.43 B	-15.2 %	0.0150 B	-18.8 %	23.6 A	-0.4 %	0.0101 B	-26.6 %
Upala	6.1 A	7.9 %	1.28 C	-23.8 %	0.0144 B	-22.4 %	24.2 A	2.1 %	0.0097 B	-29.4 %
Media	5.7 (±0.8)*		1.68 (±0.78)*		0.0185 (±0.0108)*		23.8 (±8.0)*		0.0137 (±0.0101)*	

SF: Superioridad fenotípica; * desviación estándar. Promedios con letras distintas son estadísticamente diferentes según la prueba Tukey ($\alpha = 0.05$).

Se aprecia en la Figura 2 la distribución del conjunto evaluado en términos de incidencia (A) y severidad (B) de la enfermedad denominada pudrición del tronco de melina, para cada sitio. El valor máximo de incidencia y severidad presentado en este conjunto se reportó en sitio Guatuso (clon 1), donde superó el 50 % en ambas variables, no obstante, 10 de los 14 clones que se evaluaron en este ensayo no superan el 3 % de severidad e incidencia y a pesar de ser el sitio con el promedio de severidad más alto (8.8 %), no fue el de mayor incidencia promedio (10.1 %), superado por el sitio Upala (10.6 %). Los clones 1, 2, 10 y 15 tienden a ser incididos principalmente y afectados severamente, en las condiciones de sitio Guatuso.

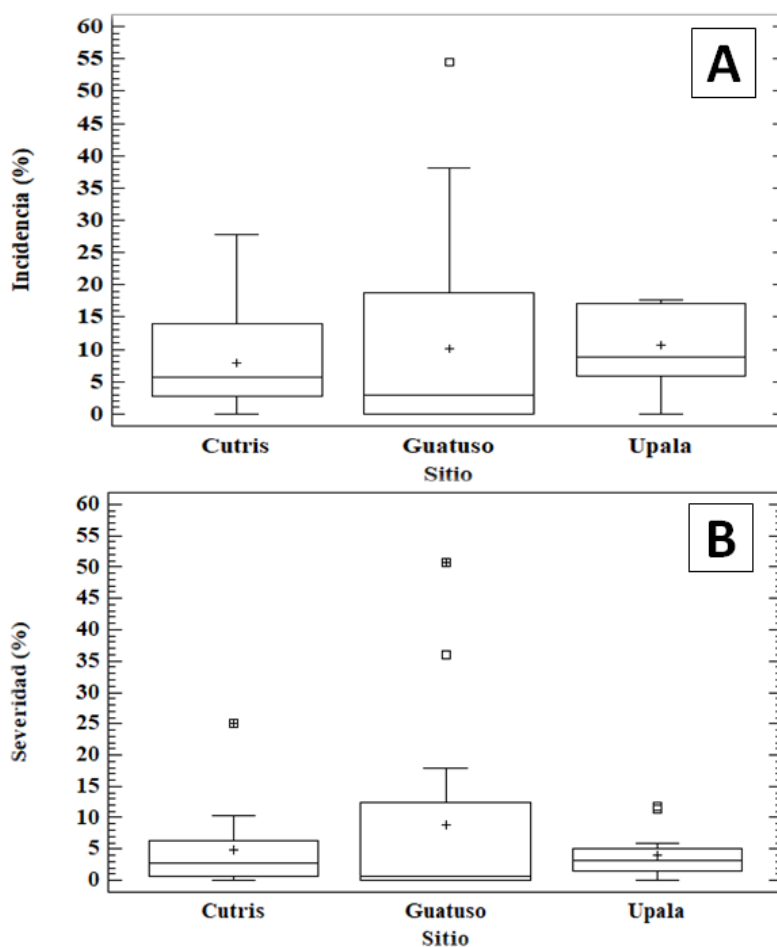


Figura 2. Comportamiento del conjunto genético de clones de *Gmelina arborea* en severidad e incidencia a la enfermedad de pudrición en el tronco registrado en tres sitios de la región Huetar Norte, Costa Rica

Figure 2. Behavior of the genetic set of *Gmelina arborea* clones in severity and incidence of trunk rot disease recorded at three sites in the North Huetar region, Costa Rica.

El sitio Upala registra la mayor incidencia promedio, solamente el genotipo 1 mostró valores inferiores al 3 %, el resto del conjunto registra incidencias superiores a 5.6 % y 7 de 15 clones que se evaluaron superan la media. Por el contrario, fue el ambiente con el menor promedio de severidad (4.1 %), la distribución de los valores del conjunto se mantuvo agrupado inferior al 12 % promedio por clon. Por otra parte, en el sitio Cutris se registró el menor promedio de incidencia, con un 47 % del conjunto con valores inferiores al 3 %. Además, la severidad media en esta localidad fue de 4.8 %. Adicionalmente, sobresale el clon 1 por su sensibilidad ante las condiciones del sitio es diferente al resto del conjunto, tanto incidencia como en severidad presentando los valores de mayor afectación para ambas variables (28 % y 25 %, respectivamente).

3.2 Comparación de jerarquía clonal

Para comparar los clones por su posición en la jerarquía en los parámetros que se evaluaron, a través de las condiciones únicas de cada sitio, se consideró la superioridad fenotípica para dividir la población en dos conjuntos: deseables y no deseables. El conjunto de los clones deseables está compuesto por la población potencial y la población superior (ver Figura 3). De esta manera, se

identificaron los clones que forman parte de un mismo conjunto en los tres sitios, considerando las variables de volumen comercial de calidad y la susceptibilidad a la enfermedad de pudrición en el tronco, de manera individual.

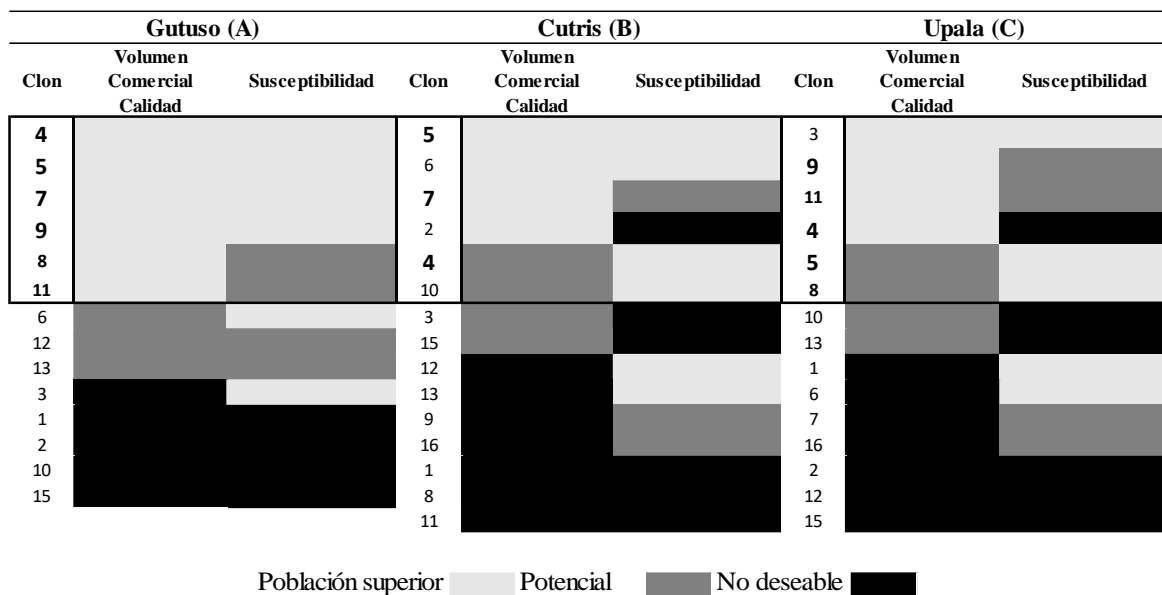


Figura 3. Población superior, potencial y no deseable en variables de volumen comercial de calidad y susceptibilidad a la pudrición en el tronco de clones de *Gmelina arborea* en la región Huetar Norte, Costa Rica

Figure 3. Higher population, potential and undesirable in commercial volume, quality variables and susceptibility to trunk rot disease of *Gmelina arborea* clones in the North Huetar region, Costa Rica

En la Figura 3 se presentan los datos ordenados por la población superior en VCC y, posteriormente, el nivel de susceptibilidad de los clones en cada sitio. Los clones 4 y 5 se encontraron entre los mejores 6 genotipos en VCC para los tres sitios con variaciones entre las poblaciones superior y potencial en Cutris y Upala y respectivamente. De ellos, el n.º 4 ocasionó la población no deseable para la susceptibilidad en Upala a diferencia del clon 5 dentro de la población superior de esta variable en los tres ambientes. Por otra parte, los clones 8, 9 y 11 fueron los que se encontraron dentro el conjunto de los deseables en ambas variables en Guatuso y Upala, sin embargo, resultaron como clones no deseables en VCC y susceptibilidad (8 y 11) en Cutris. Caso similar es el clon 7, con rendimientos deseables para ambas variables en las condiciones de Cutris y Guatuso, pero con desempeño no deseable en VCC en Upala.

3.3 Comparación del desempeño de los clones

La evaluación del conjunto genético en los tres sitios de investigación permitió encontrar cambios en su comportamiento para los parámetros volumétricos y de calidad (ver Cuadro 2). Se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre los genotipos que se evaluaron en las variables VC, C % y VCC, adicionalmente, a nivel fenotípico el conjunto establecido en Sitio Guatuso obtuvo el mejor rendimiento volumétrico, lo que es congruente con lo mostrado en el Cuadro 1. Asimismo, se confirma esta superioridad al observar que las 11 primeras posiciones en VCC son ocupadas por clones que se evaluaron en este sitio.

Cuadro 2. Comparación del conjunto clonal superior de *Gmelina arborea* en términos volumétricos y de calidad, evaluado en tres ensayos en la región Huetar Norte, Costa Rica

Table 2. Comparison of the superior clonal set of *Gmelina arborea* in volumetric and quality terms, evaluated in three trials in the North Huetar region, Costa Rica

Clon-Sitio	Volumen comercial (m ³ árbol ⁻¹)	SF (%)	Clon-Sitio	Calidad (% árbol ⁻¹)	SF (%)	Clon-Sitio	Volumen comercial calidad (m ³ árbol ⁻¹)	SF (%)
8-G	0.0890 A	63.5 %	8-U	84.1 A	18.9 %	7-G	0.0799 A	99.4 %
7-G	0.0885 A	62.6 %	9-C	83.3 A	17.8 %	11-G	0.0795 A	98.5 %
9-G	0.0883 A	62.2 %	4-U	82.7 A	17.0 %	9-G	0.0754 A	88.2 %
11-G	0.0875 A	60.6 %	13-U	81.0 AB	14.5 %	8-G	0.0749 A	87.1 %
4-G	0.0864 A	58.6 %	6-U	80.7 AB	14.1 %	5-G	0.0749 A	86.9 %
5-G	0.0863 A	58.6 %	3-U	80.2 ABC	13.5 %	4-G	0.0748 A	86.7 %
13-G	0.0862 A	58.2 %	7-G	80.0 ABC	13.2 %	13-G	0.0688 AB	71.8 %
12-G	0.0793 AB	45.6 %	11-G	79.7 ABC	12.8 %	12-G	0.0664 AB	65.7 %
6-G	0.0761 ABC	39.8 %	4-C	79.0 ABC	11.8 %	6-G	0.0636 AB	58.8 %
3-G	0.0720 ABCD	32.3 %	5-C	78.1 ABC	10.5 %	3-G	0.0607 AB	51.6 %
2-C	0.0694 ABCDE	27.4 %	4-G	78.0 ABC	10.3 %	10-G	0.0476 BC	18.8 %
10-G	0.0653 ABCDEF	19.9 %	5-U	77.5 ABC	9.6 %	2-C	0.0362 CD	-9.6 %
2-G	0.0589 BCDEFG	8.1 %	13-C	77.1 ABC	9.1 %	1-G	0.0360 CD	-10.2 %
10-U	0.0554 BCDEFG	1.8 %	11-U	76.8 ABC	8.7 %	6-C	0.0357 CD	-10.8 %
1-G	0.0549 BCDEFG	0.8 %	9-U	75.6 ABCD	7.0 %	3-U	0.0355 CD	-11.4 %
10-C	0.0541 BCDEFG	-0.7 %	6-C	75.2 ABCD	6.4 %	5-C	0.0353 CD	-12.0 %
15-G	0.0524 CDEFG	-3.7 %	7-C	75.2 ABCD	6.4 %	7-C	0.0350 CD	-12.5 %
15-C	0.0513 CDEFG	-5.7 %	12-U	75.1 ABCD	6.3 %	2-G	0.0348 CD	-13.0 %
7-C	0.0485 DEFG	-10.9 %	9-G	75.0 ABCD	6.1 %	9-U	0.0337 CD	-15.9 %
6-C	0.0480 DEFG	-11.9 %	3-G	74.6 ABCDE	5.5 %	4-U	0.0334 CD	-16.5 %
3-U	0.0480 DEFG	-11.9 %	8-C	74.3 ABCDE	5.1 %	11-U	0.0326 CD	-18.6 %
16-C	0.0479 DEFG	-12.1 %	8-G	74.1 ABCDEF	4.8 %	15-C	0.0324 CD	-19.2 %
5-C	0.0478 DEFG	-12.2 %	5-G	73.3 ABCDEF	3.7 %	15-G	0.0323 CD	-19.3 %
11-U	0.0477 DEFG	-12.4 %	6-G	73.3 ABCDEF	3.7 %	10-U	0.0315 CD	-21.4 %
2-U	0.0464 DEFG	-14.8 %	12-G	73.3 ABCDEF	3.7 %	10-C	0.0312 CD	-22.1 %
9-U	0.0452 EFG	-16.9 %	11-C	72.7 ABCDEF	2.9 %	5-U	0.0312 CD	-22.2 %
3-C	0.0451 EFG	-17.1 %	12-C	72.4 ABCDEF	2.4 %	3-C	0.0308 CD	-23.1 %
7-U	0.0445 EFG	-18.2 %	15-U	70.6 ABCDEF	-0.1 %	8-U	0.0304 CD	-24.0 %
4-U	0.0433 EFG	-20.4 %	3C	69.6 ABCDEFG	-1.6 %	4-C	0.0304 CD	-24.1 %
5-U	0.0426 FG	-21.8 %	13-G	69.4 ABCDEFG	-1.8 %	16-C	0.0302 CD	-24.6 %
1-C	0.0423 FG	-22.3 %	16-C	66.6 ABCDEFGH	-5.8 %	13-U	0.0294 CD	-26.7 %
15-U	0.0421 FG	-22.7 %	16-U	64.7 ABCDEFGH	-8.5 %	12-U	0.0290 CD	-27.7 %
12-U	0.0406 FG	-25.4 %	7-U	64.4 ABCDEFGH	-9.0 %	9-C	0.0285 CD	-28.7 %
1-U	0.0395 FG	-27.5 %	1-U	63.7 ABCDEFGH	-9.9 %	6-U	0.0284 CD	-29.0 %
16-U	0.0393 FG	-27.9 %	15-C	63.4 ABCDEFGH	-10.3 %	13-C	0.0271 CD	-32.3 %

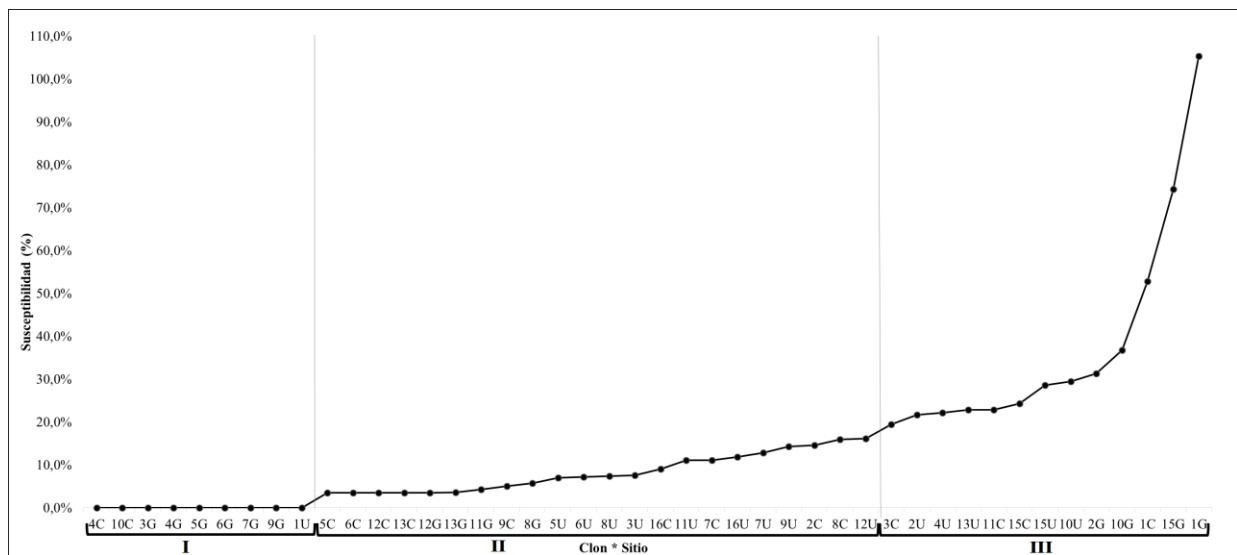
4-C	0.0391 FG	-28.1 %	10-C	61.0 BCDEFGH	-13.8 %	11-C	0.0271 CD	-32.5 %
8-U	0.0388 FG	-28.8 %	10-U	60.3 BCDEFGH	-14.6 %	7-U	0.0270 CD	-32.5 %
11-C	0.0386 G	-29.1 %	1-C	60.0 BCDEFGH	-15.1 %	15-U	0.0264 CD	-34.0 %
8-C	0.0384 G	-29.6 %	10-G	58.9 CDEFGH	-16.7 %	8-C	0.0257 CD	-35.8 %
13-U	0.0377 G	-30.8 %	2-U	54.4 DEFGH	-23.1 %	12-C	0.0243 CD	-39.4 %
6-U	0.0363 G	-33.3 %	15-G	53.2 EFGH	-24.8 %	1-C	0.0241 CD	-39.8 %
9-C	0.0362 G	-33.5 %	2-C	52.4 FGH	-25.8 %	2-U	0.0240 CD	-40.1 %
12-C	0.0357 G	-34.4 %	1-G	48.3 GH	-31.6 %	16-U	0.0238 D	-40.5 %
13-C	0.0349 G	-35.9 %	2-G	47.0 H	-33.5 %	1-U	0.0225 D	-43.9 %
Media	0.0544			70.7			0.0401	
	(±0.0325)*			(±23.9)*			(±0.0302)*	

SF: Superioridad fenotípica; * desviación estándar. Promedios con letras distintas son estadísticamente diferentes según la prueba Tukey ($\alpha = 0.05$).

Los 6 mejores clones en VC y VCC corresponden a sitio Guatuso, sin evidencia de diferencias estadísticas significativas (ver Cuadro 2). Por otra parte, en calidad (%) se encontraron leves diferencias estadísticas entre los 6 mejores genotipos, cinco de ellos que se evaluaron en sitio Upala y uno en el sitio Cutris. Por lo tanto, existe una variación en la ocupación de las primeras posiciones entre el volumen comercial y la calidad (%), diferencia que no implicó cambios drásticos en la parte superior de la jerarquía clonal del volumen comercial de calidad.

Para la población general, las diferencias estadísticas encontradas en VCC fueron leves y establecidas claramente, a diferencia de las otras variables. El efecto de la C (%) sobre el VC generó resultados estadísticos con mayor homogeneidad en VCC, resultado que permite diferenciar dos poblaciones cuyo rendimiento a nivel fenotípico coincide con el resultado estadístico (ver Cuadro 2). La primera conformada por las primeras 11 posiciones de la lista, además, únicamente con genotipos que se evaluaron en sitio Guatuso, todos con SF (%) positiva, la segunda conformada por los restantes clones que se evaluaron en los sitios Upala y Cutris, todos con SF negativa. Cabe resaltar que el efecto de la C % sobre el VCC aumentó la brecha de la SF respecto al VC, donde el ámbito de VC varió de 63.5 a -35.9 % y el de VCC de 99.4 a -43.9 %.

Por otra parte, en términos de susceptibilidad se identificaron tres categorías, las cuales fueron establecidas por variaciones en las secuencias del comportamiento entre un clon y otro (ver Figura 4) se diferencia de categoría I a II por el cambio en la secuencia de comportamiento entre el clon 1U (0 %) y, de esta manera, entre la categoría II y III por los clones 12U (16.1 %) y 3C (19.4 %).



Categoría I = enfermedad ausente, categoría II = media susceptibilidad, categoría III = alta susceptibilidad.

Figura 4. Comparación del conjunto genético superior de *Gmelina arborea* clonal en susceptibilidad a la enfermedad de la pudrición en el tronco en tres ensayos en la región Huetar Norte, Costa Rica

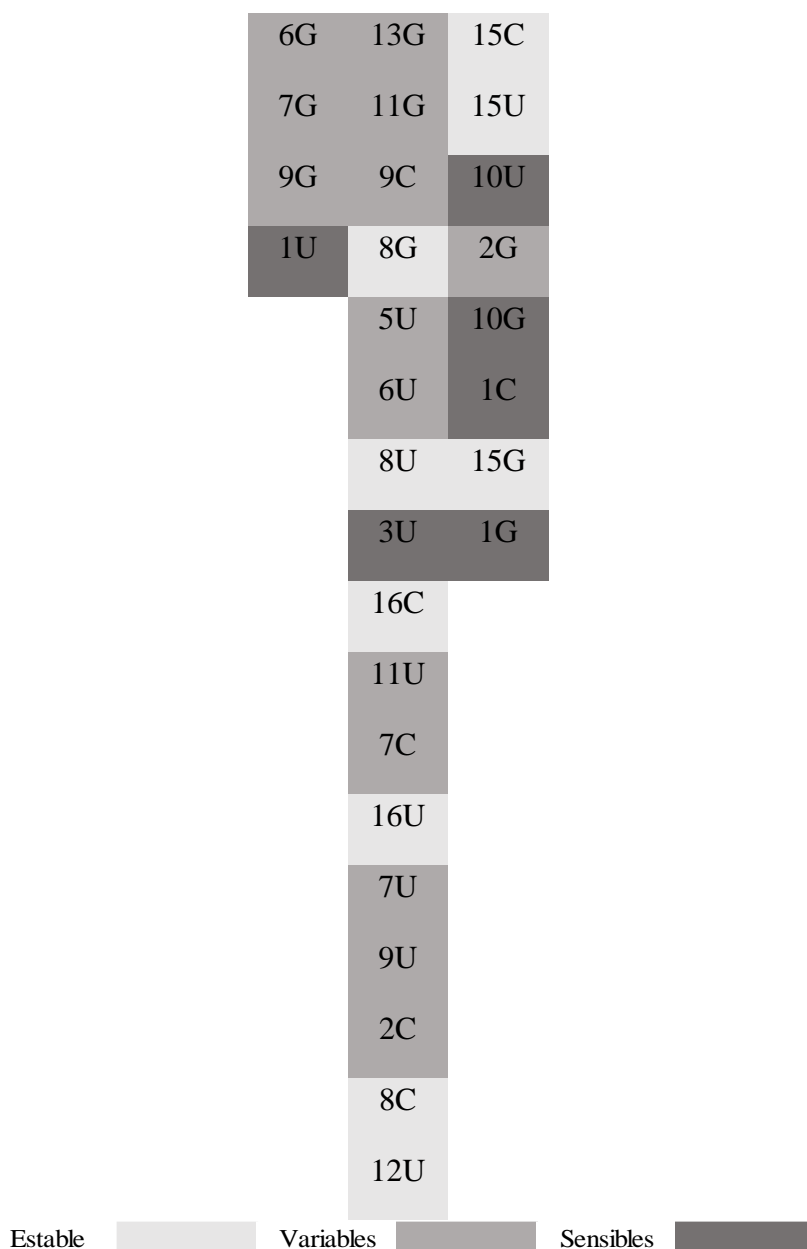
Figure 4. Comparison of the superior genetic set of clonal *Gmelina arborea* in susceptibility to trunk rot disease in three trials in the North Huetar region, Costa Rica

Las categorías permiten clasificar los clones de acuerdo con las tendencias de comportamiento entre niveles de susceptibilidad. Los clones estables son aquellos que reportan el valor de susceptibilidad de los tres sitios en la misma categoría, las variables muestran los valores de los tres ambientes en dos categorías continuas y, por último, los sensibles presentaron dos de las repeticiones en una misma categoría. No obstante, el tercer valor está distanciado por más de una categoría o presenta un valor en cada categoría (ver Cuadro 3).

Cuadro 3. Tendencia en comportamiento de clones de *Gmelina arborea* en términos de susceptibilidad a la enfermedad pudrición en el tronco en la región Huetar Norte, Costa Rica

Table 3. Trend in behavior of *Gmelina arborea* clones in terms of susceptibility to trunk rot disease in the North Huetar region, Costa Rica

I	II	III
4C	5C	3C
10C	6C	2U
3G	12C	4U
4G	13C	13U
5G	12G	11C



Los clones 8, 12, 16 se ubican en la categoría II en los tres sitios, comportamiento que tiende a ser estable como clones de susceptibilidad media, el caso del genotipo 15 es estable en la categoría III por lo que se considera altamente susceptible. Los restantes genotipos (5, 6, 7 y 9) se clasifican como variables, debido a los cambios de categoría I a II, lo que indica poca o media susceptibilidad, comportamiento similar a los genotipos 2, 11 y 13 que cambian de categoría II a III, lo que indica que pasan de registrar valores de media a alta susceptibilidad. Los clones que se identifican como sensibles son el 1, 4 y 10, los cuales muestran comportamientos distintos entre ambientes variando de la ausencia de la enfermedad a alta susceptibilidad y el clon 3 que se comporta, de manera diferente, en los tres sitios, ubicándose en cada una de las categorías.

4. Discusión

4.1. Diferencias entre sitios experimentales

Los PMG deben estudiar las interacciones edafo-climáticas, el manejo silvicultural y la genética del árbol para determinar la productividad de un sitio (Ávila-Arias *et al.*, 2015), debido a que cualquier cambio en esta dinámica genera impactos en la rentabilidad de las unidades de producción. Uno de los objetivos principales debe ser encontrar genotipos específicos para distintos ambientes, con el fin de optimizar su respuesta (Gerzan *et al.*, 2017), por esto, el éxito del programa se relaciona con la comprensión de las interacciones para cada condición específica (Ávila *et al.*, 2015), todavía más en especies como la melina que son sensibles a la interacción sitio-específica (Dvorak, 2004; Osorio, 2004). Los resultados que se registraron en la presente investigación confirman que, las condiciones particulares de cada localidad generan diferencias en el comportamiento de los clones para distintas variables.

Al respecto, en el Cuadro 1 se muestran las diferencias estadísticas para las variables dasométricas y de calidad evaluadas en la investigación. Los resultados sugieren que los tres ensayos son diferentes en términos de DAP y HC, con una mayor diferencia fenotípica entre sitios en la HC del sitio Guatuso, lo que puede explicarse ante cambios en las interacciones de los factores edafoclimáticos, técnicas silviculturales y la genética del árbol (Ávila-Arias *et al.*, 2015). Al comparar estos factores entre las localidades de estudio, se encuentran diferencias en la zona de vida, altitud y suborden de suelo, lo que parece indicar que condiciones particulares de los sitios generan un efecto diferenciado sobre el comportamiento de los fenotipos que se evaluaron en esta variable.

De acuerdo con David *et al.* (2015) factores edáficos como pH, materia orgánica y algunos elementos como nitrógeno, fósforo, sodio y potasio resultaron estadísticamente significativos para el crecimiento y desarrollo en altura de la especie, además la variación en la composición química y física del suelo, así como las condiciones topográficas y aspectos climáticos asociados pueden explicar mejor las variaciones en crecimiento del volumen fustal (Telles, 2021). Existe una diferencia de solo un clon entre el conjunto genético evaluado en sitio Guatuso (14 clones) comparado con los sitios Cutris y Upala (15 clones), no obstante, Cutris y Upala son diferentes entre sí en HC a pesar de contener los mismos genotipos bajo evaluación. Se encontraron diferencias estadísticas expresadas en la variable IMA HT (datos no presentados), donde el sitio Guatuso resultó superior 9.9 % en promedio, reforzando la hipótesis del efecto del sitio sobre las variables de crecimiento. Este ensayo se desarrolla en la zona de vida bosque muy húmedo tropical (bmh-T), el cual se caracteriza por precipitaciones superiores a los 4000 mm al año y suelos de topografía accidentada sin saturación hídrica (Holdridge, 1967).

El peso de la HC genera un impacto directo sobre el VC, sus implicaciones dan como resultado un aumento en la brecha de la SF del sitio Guatuso en 41.2 % sobre los sitios Upala y Cutris, los cuales son semejantes estadísticamente en esta variable, debido a la baja diferencia fenotípica registrada entre ellos, tanto en DAP como en HC. En un estudio desarrollado en Colombia con diversas progenies de melina se concluyó que se debe entender mejor la influencia del suelo y los factores climáticos sobre el crecimiento de los árboles debido a que la productividad resultó variable entre localidades (Osorio, 2004). En términos de calidad (%) no se encontraron diferencias significativas entre ambientes, dato que sugiere que esta variable no es afectada por las condiciones del sitio o que la sensibilidad de los genotipos en esta variable no tiene un impacto que pueda generar diferencias. Contrario a este resultado, diversas progenies de melina provenientes de semillas se probaron en la India, lo que ocasiona diferencias significativas en variables que se relacionan con la calidad del fuste, los autores

concluyen que más del 80 % de los árboles no eran árboles rectos (Indira, 2006) y que este es uno de los principales problemas de la especie (Dvorak, 2004). En este caso el promedio de calidad (%) supera el 70 % a los 3 años, lo que sugiere que para el material superior que está bajo análisis se ha mitigado el problema debido a los diversos procesos de selección.

Los resultados anteriores difieren de los registrados en el estudio de Ávila-Arias *et al.* (2015), quienes apuntan marcadas diferencias estadísticas e incluso SF de 109 % y 230 % para los dos conjuntos clonales que se evaluaron entre sitios en términos de calidad (%) a los 24 meses. En este caso, se puede afirmar que el nivel de selección del material puede tener un efecto sobre el comportamiento, debido a que el conjunto clonal evaluado en esta investigación ha sobrepasado diversos procesos de selección, la calidad es una de las variables de mayor importancia para la selección de genotipos. Al no existir diferencias entre ensayos para la C (%), no hay cambios considerables en la expresión del VCC, aunque es cierto, el sitio Guatuso reportó una inferioridad fenotípica en C % respecto a los ambientes en comparación, este efecto no impactó en cambios en la SF, por lo tanto, la brecha en VCC para el sitio Guatuso aumentó (56.1 %) y no se generaron cambios estadísticos para los otros 2 ensayos. Sin embargo, Ávila-Arias *et al.* (2015) aseguran que el VCC fue la variable que mostró las mayores diferencias fenotípicas, al evaluar el mismo conjunto genético en dos clases de sitio diferentes donde obtuvieron una superioridad del 112 % entre localidades.

Así como las condiciones sitio específicas sugieren tener un impacto sobre el rendimiento volumétrico del material, también existe un efecto sobre el comportamiento ante la incidencia y severidad de la pudrición en el tronco, que por estas características particulares o las condiciones de manejo silvicultural pueden beneficiar el ataque de patógenos oportunistas (Ávila-Arias *et al.*, 2016). En la Figura 2 se muestra la variabilidad (ancho de la caja) en los resultados para ambas variables, lo que ocasiona una respuesta distinta del material ante las condiciones en las que se evalúa. La respuesta de la melina entre 16 diferentes plantaciones en Costa Rica registraron variaciones en incidencia de 0 a 58 % y en severidad de 0 a 28 % (Arguedas *et al.*, 2018), mientras que el promedio máximo registrado en este estudio es de 10.6 y 8.8 %, respectivamente.

En la zona sur del país se evaluaron dos plantaciones con un conjunto genético similar al de esta investigación, los resultados mostraron diferencias en los índices de las variables fitosanitarias, a lo que los autores afirman que hay un efecto de las condiciones del sitio sobre la respuesta de los genotipos (Ávila-Arias *et al.*, 2016), aunado a esto, las características edafo-climáticas y de manejo pueden responder aparte del comportamiento de los conjuntos ante la severidad y la incidencia, debido a que las plantaciones establecidas con altas densidades y suelos con altos contenidos de arcilla incrementan la susceptibilidad a la enfermedad (Arguedas *et al.*, 2018). Por este motivo, es recomendable identificar los genotipos tolerantes para establecer plantaciones (Murillo-Gamboa *et al.*, 2016) de acuerdo con su respuesta a cada ambiente específico.

En el sitio Guatuso los genotipos 1, 2, 10 y 15 han mostrado alta sensibilidad ante las condiciones del sitio, caso similar se presenta en Cutris donde los clones 1, 3, 8, 11 y 15 repiten el patrón para ambas variables. En Upala todo el material registró algún grado de incidencia y severidad a excepción del clon 1, sin embargo, estos valores no superaron el 18 %, lo que sugiere que las condiciones específicas de sitio generan un efecto de mayor homogeneidad sobre el conjunto. En este caso la variabilidad es menor a diferencia de Cutris y Guatuso cuyas condiciones han generado efectos de severidad e incidencia marcados en lo que parecen ser clones sensibles, este es el caso del clon 15 en los tres ensayos y los genotipos 1 y 10 en dos de los ambientes. Este caso también se reporta por Ávila-Arias *et al.* (2016) al identificar los clones con mejor y peor respuesta en ambas variables ante las condiciones propias de cada localidad.

4.2. Comparación de jerarquía clonal

Ordenar los clones respecto a su rendimiento volumétrico de calidad y a la susceptibilidad a la pudrición en el tronco permitió identificar subconjuntos de clones con el mejor desempeño en cada sitio y los que presentan congruencia en el comportamiento entre ambientes. Es necesario conocer las características propias de cada localidad que condicionan el desarrollo de los genotipos específicos (Ávila-Arias *et al.*, 2015). De esta manera, es posible detectar *genotipos candidatos* en función de su rendimiento a los diversos entornos (Burdon *et al.*, 2017) que prometan reducir factores condicionantes como la selección de sitios y la interacción genotipo - sitio (Nghah y Abdul-Ghani, 2014).

Al respecto, uno de los objetivos principales de los PMG es empatar genotipos con ambientes específicos donde su rendimiento se vea optimizado (Gerzan *et al.*, 2017). Por lo tanto, en cada uno de los sitios se han logrado definir clones que pueden ser especialistas en las distintas condiciones u otros como el clon 5, el cual resultó superior en tolerancia y se mantuvo en la población de deseables en los tres ensayos. Estos datos sugieren que este genotipo cuenta con el potencial en crecimiento, calidad y estado fitosanitario para recomendaciones generalizadas en sitios clase II de la región, al menos a la edad de 3 años, lo que aumenta la necesidad de conocer el desempeño de los genotipos ante la diversidad de ambientes (Ávila-Arias *et al.*, 2015).

Estos resultados sumados a los cambios de posición de cada genotipo en la tabla sugieren un efecto de la calidad del sitio sobre los genotipos en las variables evaluadas, la inestabilidad en el comportamiento de cada genotipo debe considerarse para la toma de decisiones, las recomendaciones para el uso deben puntualizarse en sitios específicos, apuntando al uso de clones deseables. Lo anterior se debe a que existe una clara interacción de los genotipos con el ambiente, las variaciones en el comportamiento entre localidades son prueba de la sensibilidad ante las diferentes condiciones. Esta situación se reporta por diversos autores como Gerzan *et al.* (2017) con clones de pino en seis ambientes distintos, Binkley *et al.* (2017) al definir variaciones sustanciales entre ambientes comparando clones de Eucalipto o el caso de Avila-Arias *et al.* (2015) que identificaron solamente dos clones con un comportamiento estable entre sitios clase II y III para melina.

Considerando la relevancia económica del rendimiento volumétrico comercial de calidad y del estado fitosanitario del material, se infiere que los clones que no se encuentran en la población de deseables para cada sitio específico no deben recomendarse para sistemas de producción forestal o agroforestal en estas condiciones. Estos genotipos deben almacenarse para futuros análisis genéticos, pero no utilizarse con fines comerciales. Ávila-Arias *et al.* (2015) determinaron que la colección de clones procedente de la zona norte no debía utilizarse en condiciones de sitio clase II-III debido a que su rendimiento fue deficiente ante problemas de encharcamiento y las malas condiciones físicas del suelo.

4.3. Comparación del desempeño de los clones

Los datos del Cuadro 3 muestran la superioridad en las variables volumétricas del conjunto evaluado en sitio Guatuso, lo que refuerza la hipótesis de que las condiciones sitio-específicas están condicionando el desempeño de los genotipos. Una situación similar se determinó en la Zona Sur de Costa Rica con clones de melina, donde todos los genotipos que se evaluaron en un ambiente clase I superaron el promedio respecto a los que se evaluaron en sitio clase II-III (Ávila-Arias *et al.*, 2015). En esta investigación, los tres ensayos se categorizaron como clase II, no obstante, el sitio Guatuso se puede ubicar en la parte superior de esta categoría de acuerdo con la altura dominante (Hd) registrada (datos no presentados), debido a que un sitio clase II para melina clonal alcanza un IMA Hd a los

3 años de 5.5 m (R. Murillo-Cruz, comunicación personal, 26 de enero de 2022). Los datos registrados de Hd son 5.4 m para Cutris y Upala ambos conjuntos aportaron 15 clones al promedio de esta variable y de 5.8 m para Guatuso media en la cual participaron 12 de los clones del conjunto, lo que indica ausencia del efecto de un genotipo específico que condicione el resultado. Por el contrario, la variabilidad de clones está respondiendo ante las condiciones del sitio y creciendo de manera similar, por lo que existe una mejor respuesta del sitio Guatuso por las características edafoclimáticas propias de esta localidad.

La variable VCC presentó dos poblaciones definidas de acuerdo con las diferencias estadísticas, donde la población AB está conformada exclusivamente por clones del sitio Guatuso superando en más del 50 % al resto de la población. El VCC está condicionado por la C %, a pesar de que los otros 2 sitios tuvieron mejor desempeño en esta variable, los clones de Guatuso de la población AB se encontraron sobre la media poblacional, a excepción del clon 13, por lo tanto, esta población expresó mejor rendimiento volumétrico. La C % fue la variable de menor variabilidad y presentó un ámbito de 18 a -33 % en SF, resultado que coincide con el Cuadro 1, donde no se encontraron diferencias para esta variable entre los ensayos, lo que indica que es una variable con mejor control genético y que el efecto del sitio no genera cambios drásticos en el comportamiento. En un estudio realizado con pino radiata los autores determinaron una tendencia marcada por cambios en el ordenamiento de los clones por la interacción con el sitio, principalmente en variables de crecimiento como el diámetro (Burdon *et al.*, 2017).

Esta interacción de los genotipos específicos con el sitio genera un efecto sobre el rendimiento no solo volumétrico y de calidad, sino que también responden de manera diferenciada ante la susceptibilidad a enfermedades, por este motivo, es importante determinar si los clones con mejor respuesta ante la enfermedad repiten su comportamiento a través de distintos ambientes (Sampayo-Maldonado *et al.*, 2019). En la Figura 4 la categoría 1 está conformada mayoritariamente por genotipos que se evaluaron en Guatuso, conforme se avanza y se alcanzan valores de susceptibilidad mayores al 10 % tienen mayor representatividad los clones que se evaluaron en Upala. En la tercera categoría se ubican genotipos de dos o los tres ensayos como el 1, 2, 10 y 15, lo que sugiere que en condiciones de sitio clase II su respuesta ante enfermedades es de alta susceptibilidad y no deben utilizarse en el ámbito comercial. El caso del clon 1 es atípico en Upala, está influenciado por una alta mortalidad, por lo que los datos no muestran su comportamiento, este clon no debe considerarse como poco susceptible. En la Zona Sur del Costa Rica, evaluando dos conjuntos genéticos Salas-Rodríguez *et al.* (2016) realizaron una clasificación similar en términos de *tolerancia* a la enfermedad y seleccionaron como clones seguros solamente aquellos que estrictamente se ubicaron entre los grupos de menor severidad e incidencia con registros repetidos en diversos ambientes y lograron identificar 6 clones seguros como altamente tolerantes, al igual que los resultados en esta investigación identificaron clones inestables y sensibles entre sitios.

En la clasificación de susceptibilidad (ver Cuadro 3) y comparados con los datos de la Figura 3, se identifica el clon 5 como único genotipo generalista este es parte de la población superior en VCC para los tres sitios y variable entre las categorías I y II de susceptibilidad. Por otra parte, Ávila-Arias *et al.* (2016) identificaron un clon del conjunto genético en la categoría de baja incidencia y baja severidad para ambos ambientes de evaluación. Por otra parte, algunos clones especialistas que se identificaron para 2 de los tres sitios son el 4, 6, 7, 8 con características deseables para Guatuso y Cutris, el 9 y 11 para Guatuso y Upala, además algunos clones especialistas que se identifican para un solo ensayo como el 10 para Cutris, el 3 para Upala y los genotipos 12 y 13 para Guatuso. Asimismo, Salas-Rodríguez *et al.* (2016) determinaron comportamientos similares en clones de melina procedentes de dos conjuntos distintos. Debido al efecto de la calidad de sitio que se identificó en este

estudio y a los cambios que puede darse en el rendimiento de los genotipos a través de los ambientes, se debe ser cuidadoso para recomendar clones especialmente a pequeños productores (Ávila-Arias *et al.*, 2015). Los resultados permiten tener un mejor criterio para estas recomendaciones con base en los clones que resultaron con mejor crecimiento y calidad, pero también con buena respuesta ante los problemas fitosanitarios (Ávila-Arias *et al.*, 2016), para sitios de clase II para melina en la región Huetar Norte de Costa Rica.

5. Conclusiones

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en las variables volumétricas entre los sitios de investigación, el sitio Guatuso es el de mejor desempeño registrando una superioridad fenotípica en el volumen comercial de calidad del 56.1 %. La calidad (%) no fue una variable afectada por las condiciones del sitio a diferencia de las otras variables evaluadas. Los datos sugieren que el nivel de selección del material genético evaluado influyó en el comportamiento de esta variable donde las diferencias % en términos de SF entre ensayos no supera el 2.1 %.

La población superior identificada en términos de VCC y susceptibilidad para Guatuso la conforman los genotipos 4, 5, 7 y 9 para Cutris son 5 y 6 y para Upala solamente el genotipo 3. La población de deseables para cada sitio la componen 8, 11, 6, 12 y 13 en Guatuso, 7, 4 y 10 en Cutris y 9, 11, 5 y 8 en Upala.

Se determinó la existencia de un efecto de la calidad del sitio sobre los genotipos dadas las diferencias en el comportamiento a nivel fenotípico en los tres sitios de estudio. La comparación de los resultados de los 3 conjuntos en un listado y ordenados por su SF en VCC marcó la existencia de la población AB compuesta por 10 clones que se evaluaron en sitio Guatuso y que superan fenotípicamente en al menos 50 % al resto de los genotipos, alcanzando un máximo de hasta 99 %.

Los clones estables son el 8, 12 y 16 como susceptibilidad media y el 15 como susceptibilidad alta, los genotipos variables son 5, 6, 7 y 9 se clasifican como susceptibilidad media y 2, 11 y 13 como susceptibilidad alta, los clones sensibles 1, 3, 4 y 10 se clasifican como susceptibilidad alta debido a su baja confiabilidad por el comportamiento inestable.

En sitios de Clase II en la región Huetar Norte el clon 5 resultó el único genotipo generalista del conjunto al formar parte de la población de deseables y ser un clon variable de poca a media susceptibilidad en los tres ambientes. Los clones 4, 6, 7 son especialistas para Guatuso y Cutris, el 8, 9 y 11 para Guatuso y Upala, el clon 10 para Cutris, el genotipo 3 para Upala y los clones 12 y 13 para Guatuso.

6. Agradecimientos

Al programa de investigación del Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional (Inisefor-UNA) de Costa Rica, por permitir el desarrollo y financiar esta investigación.

7. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito, que no hay conflictos de intereses de ningún tipo, que todas las fuentes financieras se mencionan completa y, claramente, en la sección de agradecimientos y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

8. Referencias

- Arguedas, M.; Rodríguez-Solís, M.; Moya, R. y Berrocal, A. (2018). Gmelina arborea death disease in fast-growth plantations: Effects of soil and climatic conditions on severity and incidence and its implications for wood quality. *Forest Systems*, 27(1), 1-13. <https://doi.org/10.5424/fs/2018271-12236>
- Ávila-Arias, C.; Murillo-Cruz, R.; Murillo-Gamboa, O. y Sandoval-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), 2-14.
- Ávila-Arias, C.; Salas-Rodríguez, A. y Murillo-Cruz, R. (2016). Selección de genotipos superiores de *Gmelina arborea* Roxb. por su heredabilidad genética a la tolerancia de la enfermedad de pudrición en el tronco, Pacífico sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(32), 11-20. doi:10.18845/rfmk.v0i0.2548
- Binkley, B.; Campoe, O. C.; Alvares, C.; Carneiro, R. L.; Cegatta, Í. y Stape, J. L. (2017). The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 405, 271-283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>
- Burdon, R. D.; Li, Y.; Suontama, M. y Dungey, S. (2017). Genotype x site x silviculture interactions in radiata pine: knowledge, working hypotheses and pointers for research. *New Zealand Journal of Forestry Science*, (47) <https://DOI.org/10.1186/s40490-017-0087-1>
- Chaves-Vásquez, M. A. (2017). *Comportamiento de clones de teca (Tectona grandis Linn. F.) en Costa Rica y Nicaragua* (Tesis de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- David, D. L.; Yani, J. P. y Wahedi, J. A. (2015). Soil properties and site index in an age sequence of Gmelina arborea in Jalingo Taraba Satate, Nigeria. *Annual Research & Review in Biology*, 7(5), 336-342. DOI: 10.9734/ARRB/2015/16587
- Dvorak., W. S. (2004). World view of Gmelina arborea: opportunities and challenges. *New Forest*, (28), 111-126.

Gerzan, S. A.; Pisaroglo de Carvalho, M. y Sherrill, J. (2017). Statistical methods to explore genotype-by-environment interaction for loblolly pine clonal trials. *Tree Genetics & Genomes*, (13). DOI 10.1007/s11295-016-1081-0

Holdridge, L. (1967). *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center.

Indira, E. (2006). Provenance variations in *Gmelina arborea* with particular reference to tree form. *Journal of Tropical Forest Science*, 18(1), 36-50.

Madrigal, K. (2017). Ministerio de ambiente creará clúster forestal. *La República*.
<https://www.larepublica.net/noticia/ministerio-de-ambiente-creara-cluster-forestal>

Mata, R.; Ibarra, R. y Sandoval, D. (2016). *Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica*. ACCS. Escala 1:200 000. http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139

Murillo, O. y Badilla, Y. (2010). *Calidad de la plantación forestal*. Escuela de Ingeniería Forestal-ITCR, Cartago y CRC (Información sin publicar).

Murillo-Gamboa, O.; Salas-Rodríguez, A.; Murillo-Cruz, R.; Ávila-Arias, C. (2016). Tasa de avance de la pudrición en el tronco en melina *Gmelina arborea* Roxb. y posibilidades de manejo. *Revista forestal Mesoamericana Kurú*, 13(32), 40-50. doi:10.18845/rfmk.v0i0.2551

Ngah, L.; Abdul-Ghani, M. N. (2014). Genotype and environment interactions in Moe and Mor of *Acacia mangium*. *Journal of Agricultural Research and Development*, 5(5), 79-84.

Osorio, L. F. (2004). Provenance results of *Gmelina arborea* in southwest Colombia at three years of age. *New Forest*, 28, 179-185.

Pavlotzky, B. y Murillo, O. (2014). Ganancia genética esperada e interacción genotipo-ambiente en *Acacia mangium* en la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 38(2), 7-17.

Rojas, F.; Arias, D.; Moya, R.; Meza, A.; Murillo, O. y Arguedas, M. (2004). *Manual para productores de melina Gmelina arborea en Costa Rica*.

Salas-Rodríguez, A.; Murillo-Gamboa, O.; Murillo-Cruz, R. y Ávila-Arias, C. (2016). Evidencia de la tolerancia genética a la pudrición del tronco en clones de *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(32), 30-39. doi:10.18845/rfmk.v0i0.2550

Sampayo-Maldonado, S.; López-Upton, J.; Sánchez-Monsalvo, V. y Jiménez-Casas, M. (2019). Genetic parameters of growth, and resistance to the shoot borer, in young clones of the tree *Cedrela odorata* (Meliaceae). *Revista de Biología Tropical*, 67(3), 554-561.

Sánchez-Vargas, M.; Vargas-Hernández, J.; Ruiz-Posadas, M. y López-Upton, J. (2004). Repetibilidad de parámetros genéticos en un ensayo clonal de *Eucalyptus urophylla*, S. T. Blake en el sureste de México. *Agrociencia*, 38(4), 465-475.

Telles Antonio, R.; Alanís Rodríguez, E.; Jiménez Pérez, J.; Aguirre Calderón, O. A.; Treviño Garza, E. J. y de los Santos Posadas, H. M. (2021). Características edáficas y topográficas asociadas con el crecimiento en volumen de *Gmelina arborea* Roxb, en Tlatlaya, Estado de México. *Madera y Bosques*, 27(1), e2711987. doi:10.21829/myb.2021.2711987

Urrego, J. B. (2004). Growth potential of *Gmelina arborea* at 3 years of age in Colombia. *New Forest*, 28, 269-276.

Wang, Z. (2004). Cultivation and utilization of *Gmelina arborea* in South Yunnan, China. *New Forest*, 28, 201-205.

Zeaser, D. y Murillo, R. (1995). *Conceptos generales sobre la selección de sitios para plantar melina (Gmelina arborea Roxb.) en el sur de la provincia de Puntarenas*. STON Forestal, S. A. Departamento de Investigación y Desarrollo. Reporte. 24-95.

CONCLUSIONES GENERALES

Se determinó la existencia de diferencias fenotípicas en el conjunto genético para los tres sitios y a diferentes edades. Para cada localidad se identificó la población potencial de mejoramiento y la comercial, con base en la evaluación del desempeño de los genotipos para variables dasométricas y de calidad. Además, se clasificaron de acuerdo con su susceptibilidad a la enfermedad de pudrición en el tronco.

Los parámetros genéticos sugieren que los altos valores de heredabilidad en el genotipo y la variación genética son muestra de un fuerte potencial para seleccionar clones con base en su desempeño en VCC para Cutris y Guatuso. Sin embargo, en Upala se debe prestar atención al efecto del ambiente sobre el desempeño, debido a que la heredabilidad del clon y la precisión son moderadas.

Se determinó la existencia de un efecto de la calidad del sitio sobre el conjunto dadas las diferencias en el comportamiento de los genotipos a nivel fenotípico en los tres sitios de estudio. Se identificó que la calidad (%) no fue afectada por las condiciones del sitio a diferencia de las otras variables evaluadas. Las condiciones del sitio Guatuso permitieron al conjunto genético expresar hasta un 56.1 % de superioridad fenotípica en el volumen comercial de calidad.

Existe potencial fenotípico para impactar positivamente la rentabilidad de las unidades de producción. Por esto, se seleccionaron los clones que se clasificaron en la población potencial comercial y se consideran clones especialistas por su respuesta sitio específica: sitio Guatuso 4, 6, 7, 11, 12 y 13; sitio Cutris 4 y 6; sitio Upala 3, 8, 9 y 11, además del clon 5 identificado como generalista en sitios clase II para melina en la región Huetar Norte.