

Efecto de la fertilización sobre el crecimiento temprano de clones de *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. en el Pacífico Norte y Sur de Costa Rica

Effect of fertilization on the early growth of clones of *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. in the North and South Pacific of Costa Rica

David Antonio Carvajal Arroyo¹, Rafael Murillo Cruz², Alfredo Alvarado Hernández³, Carlos Ávila Arias⁴, Mariela González Rojas⁵, William Hernández Castro⁶, Sergio Molina-Murillo⁷

[Recibido: 4 de marzo 2023, Aceptado: 29 de mayo 2023, Corregido: 30 de junio 2023, Publicado: 8 de septiembre 2023]

Resumen

[**Introducción**]: La capacidad productiva de una plantación forestal depende principalmente de las características fisicoquímicas del suelo, así como del manejo silvicultural necesario para un óptimo desarrollo de los árboles. [**Objetivo**]: El objetivo de esta investigación fue la evaluación del efecto de la fertilización sobre plantaciones forestales clonales de *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm., de tres años, en el Pacífico Norte y Sur de Costa Rica. [**Metodología**]: El estudio se realizó en 2 ensayos experimentales del Instituto de Investigación y Servicios Forestales ubicados en La Esperanza, Cóbano (ensayo 1) y en Rancho Quemado, Bahía Drake (ensayo 2). Se establecieron 5 bloques completos, al azar, con 4 tratamientos de fertilización con el abono 19-4-19-2-0,1(B)-1,8(S)-,1(Zn). Se realizó un análisis de varianza y comparación de medias de los incrementos medios anuales del DAP, la altura y el volumen total de los árboles utilizando la prueba de Tukey. [**Resultados**]: Los resultados muestran que el sitio con mayor fertilidad natural presenta aumento en el crecimiento de los árboles; sin embargo, no existen diferencias estadísticamente significativas entre todos los tratamientos aplicados. El sitio de menor fertilidad natural se ubica en Bahía Drake y presentó diferencias estadísticamente significativas en algunos tratamientos en términos de volumen total. [**Conclusiones**]: La fertilización continua tienen un impacto positivo en el crecimiento dasométrico en plantaciones de *G. arborea* que presenten bajos contenidos de calcio ($< 4.5 \text{ cmol L}^{-1}$), valores bajos en capacidad de intercambio catiónico efectiva ($< 7.8 \text{ cmol L}^{-1}$) y alta saturación de acidez ($> 19.4 \%$).

Palabras clave: Costa Rica; edafología; fertilidad; prueba de Tukey; silvicultura

- 1 Ingeniero forestal, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. davidcarpio.daca@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4090-2485>
- 2 Académico, Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. rafael.murillo.cruz@una.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0002-5326-3563>
- 3 Ingeniero Agrónomo, Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. dr.alfredo.alvarado@gmail.com
- 4 Académico, Universidad Técnica Nacional, Alajuela, Costa Rica. cavila@utn.ac.cr; <http://orcid.org/0000-0002-4592-2637>
- 5 Ingeniera Forestal, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. marielagr91@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6449-276X>
- 6 Académico, Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. william.hernandez.castro@una.cr; <http://orcid.org/0000-0003-2416-8329>
- 7 Académico, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. sergio.molina.murillo@una.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0002-3276-000X>



Abstract

[Introduction]: The productive capacity of a forest plantation depends mainly on the physicochemical characteristics of the soil, as well as the necessary silvicultural management for optimal tree development. **[Objective]:** The objective of this research was the evaluation of the effect of fertilization on clonal forest plantations of *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. 3 years old, in the North and South Pacific of Costa Rica. **[Methodology]:** The study was carried out in 2 experimental trials of the Forestry Research and Services Institute located in La Esperanza, Cóbano (trial 1) and in Rancho Quemado, Drake Bay (trial 2). Five complete blocks were established at random with four fertilization treatments with the fertilizer 19-4-19-2-0.1(B)-1.8(S)-.1(Zn). An analysis of variance and comparison of means of the mean annual increments of DBH, height and total volume of the trees was carried out, using the Tukey test. **[Results]:** The results show that the site with the highest natural fertility presents a greater growth of the trees, however, there are no statistically significant differences between all the treatments applied. The site with the lowest natural fertility is located in Bahía Drake and it did present statistically significant differences in some treatments in terms of total volume. **[Conclusions]:** Continuous fertilization have a positive impact on the dasometric growth in *G. arborea* plantations that present low calcium contents ($< 4.5 \text{ cmol L}^{-1}$), low values of effective cation exchange capacity ($< 7.8 \text{ cmol L}^{-1}$) and high acidity saturation ($> 19.4 \%$).

Keywords: Costa Rica; edaphology; fertility; forestry; Tukey's test.

1. Introducción

La fertilización durante el establecimiento y mantenimiento de plantaciones forestales es una actividad silvicultural indispensable, capaz de aumentar el crecimiento e incidir en el óptimo desarrollo de los árboles (Alvarado, 2012; González *et al.*, 2016). Según el INEC (2022), en Costa Rica *Gmelina arborea* fue la segunda especie más plantada en proyectos de reforestación comercial durante el 2021 con 14 966 ha y cuenta con avances en la selección de genotipos superiores, los cuales requieren de mayor precisión en las actividades de enmiendas y fertilización (Ávila *et al.*, 2015; Benavides, 2022; Hernández *et al.*, 2021). Al respecto, la silvicultura de precisión, es decir, el manejo sitio-específico, se convierte en una opción para mantener, e inclusive mejorar esa fertilidad del suelo por medio del monitoreo y manejo de los nutrientes. Para ello, es necesaria la determinación de la dosis de fertilizante ideal y de la frecuencia de aplicación para lograr el efecto deseado en el crecimiento de los árboles.

El efecto diferenciado de la aplicación de abonos en el crecimiento dasométrico de plantaciones de *G. arborea* ha sido registrado, en diferentes estudios, considerando distintas fórmulas fertilizantes químicas y orgánicas (Alarape *et al.*, 2019). En este sentido, Paillacho (2010) registró un efecto positivo en el crecimiento en altura (8.12 m) y diámetro basal (14.08 cm) de los árboles, a los 14 meses de edad, en plantaciones en Ecuador, al utilizar 90 g de abono 18-46-0. Otros estudios en Ecuador (Mora y Varalezo, 2018) han evidenciado un aumento de crecimiento al aplicar fertilización mineral con carbón, mientras que, en Colombia, se aplicó 60 g arb^{-1} de Nitrógeno y 30 g arb^{-1} de P_2O_5 en adición a 120 g arb^{-1} de K_2O y 68 g arb^{-1} de Mg, lo cual generó un incremento periódico anual de 6 cm año^{-1} en diámetro y 5.2 m año^{-1} en altura total (Barrios *et al.*, 2011).



En plantaciones en México se han realizado aplicaciones de cal agrícola a la siembra y una fertilización de 50 g árb^{-1} de N-P-K con la fórmula 17-34-30 a los 30 días de plantado y se obtuvo incrementos medios anuales de 6.7 cm año^{-1} en diámetro y de 4.08 m año^{-1} en altura (Pérez, 2009). En plantaciones en la Amazonia se ha registrado que el tiempo de respuesta para la *G. arborea* es de 254 días al aplicar fertilización mineral hasta los 24 meses (Mora y Valarezo, 2018; Valarezo *et al.*, 2017). Estos y otros estudios en *G. arborea* se han enfocado en la determinación de la dosis adecuada y de la mejor combinación de enmiendas; sin embargo, no consideran la continuidad de la fertilización a largo plazo y su posible efecto en el rendimiento.

En Costa Rica, González *et al.* (2016) lograron identificar que la fórmula química con mejor rendimiento en plantaciones clonales de *G. arborea* es 19-4-19-2-0,1(B)-1,8(S)-,1(Zn); la cual resultó ser óptima para la especie con la cantidad de 64 g por árbol, generando una diferencia significativa en altura, con respecto a otras fórmulas utilizadas. No obstante, la temporalidad óptima de dichas fertilizaciones no fue determinada por los autores para sitios con diferentes condiciones fisicoquímicas de suelo. El presente estudio pretende utilizar la misma fórmula de abono para el establecimiento de dos ensayos cuyo objetivo principal es la determinación del efecto de la aplicación continua de fertilizante hasta los 24 meses, en el rendimiento dasométrico al tercer año de árboles clonales de *G. arborea*, en 2 localidades, una en el Pacífico Sur y otra en el Norte de Costa Rica.

2. Metodología

2.1. Descripción del sitio

El estudio se realizó en 2 ensayos establecidos por el Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional (INISEFOR-UNA), en la provincia de Puntarenas en Costa Rica (Figura 1). El primer ensayo se instaló en junio de 2014 en el Pacífico Norte, en el cantón de Puntarenas, distrito de Cóbano, localidad La Esperanza, entre las coordenadas geográficas 9°46'4.1" N y 85°07'11.4" O. El sitio pertenece a la empresa Cerital Corporation S. A. y, anteriormente estaba destinado a la ganadería extensiva. Este ensayo se ubica en un área levemente ondulada (≤ 10 % de pendiente) y los suelos son de orden alfisol, caracterizados por su buena fertilidad (INTA, 2015a). El sitio se encuentra a 134 m s. n. m., la precipitación en la zona es de 2 000 a 3 000 mm anuales y la temperatura media anual varía entre 26 y 28 °C (Da Cruz y Mahlich, 2018).

El segundo ensayo se instaló en agosto de 2014 en el Pacífico Sur, en el cantón Osa, distrito Bahía Drake, localidad Rancho Quemado, entre las coordenadas geográficas 8°40'29.9" N y 83°33'38.42" O. La propiedad pertenece a la empresa Agropecuaria La Melina S. A. El uso anterior del sitio fue plantación de melina, y no presenta problemas de drenaje. El sitio se encuentra a 196 m s. n. m., la precipitación media anual varía entre 4 000 y 5 000 mm, presenta una temperatura media entre 26-28 °C (Soto-Barber, 2017). La topografía es plana (≤ 5 % de



pendiente) y los suelos son de orden ultisol, con contenidos altos de saturación de acidez (> 10 %). Predominan los suelos con una textura franco arcilloso y pH ácido (5-5.3) (INTA, 2015b).

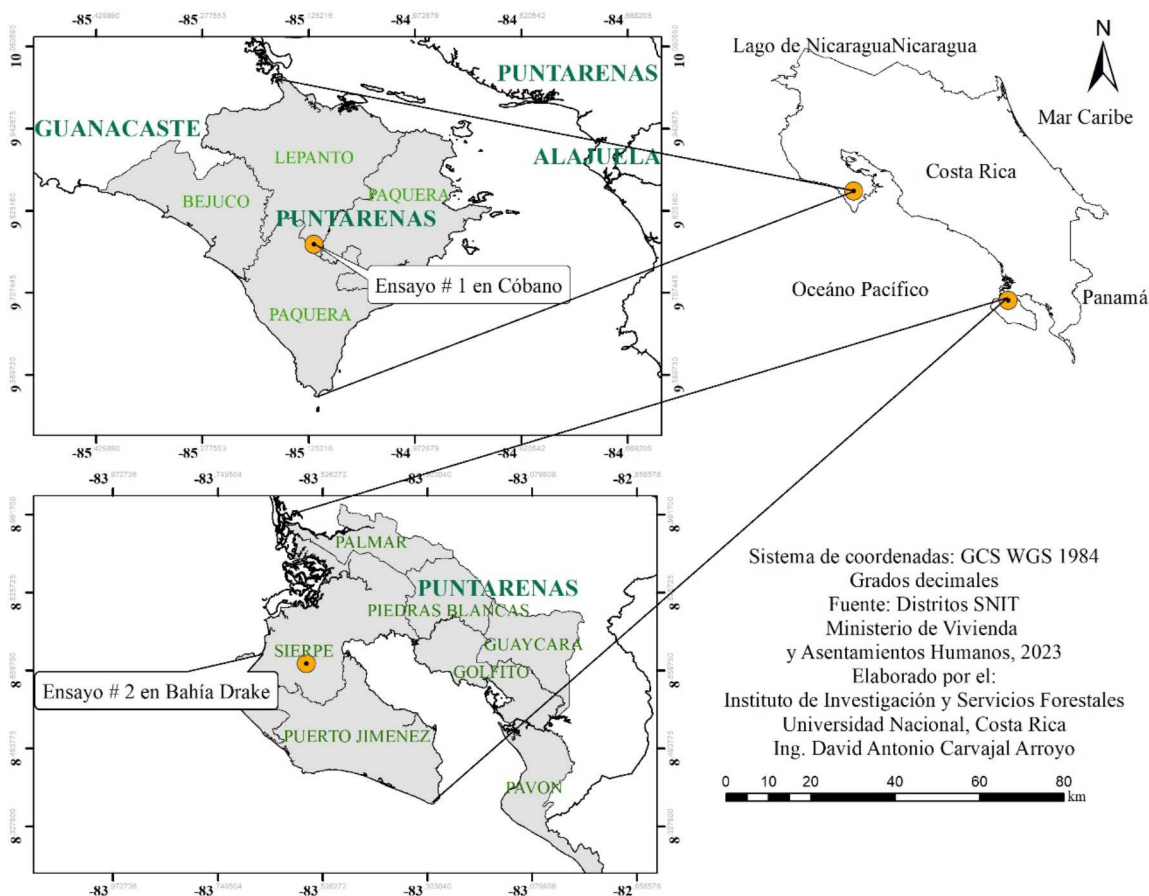


Figura 1. Ubicación de los ensayos en el Pacífico Norte y Sur de Costa Rica.
Figure 1. Location of trials in the North and South Pacific of Costa Rica.

2.2 Diseño experimental y muestreo

El diseño experimental consistió en el establecimiento de cinco bloques completos al azar con cuatro tratamientos de fertilización en cada uno de los ensayos (**Cuadro 1, Figura 2**). La densidad de árboles por hectárea fue de 625 individuos, mientras que la cantidad de árboles medidos por tratamiento fue de 25, en ambos casos se utilizaron los mismos clones superiores de melina.

La fórmula para el modelo del diseño experimental fue:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + T_j + e_{ijk}$$





Donde:

Y_{ijk} representa la observación en el k -ésimo tratamiento (T_j) en el i -ésimo bloque (B_i).

μ es la media general o promedio de todas las observaciones.

B_i es el efecto del i -ésimo bloque.

T_j es el efecto del j -ésimo tratamiento.

e_{ijk} es el error aleatorio asociado con la observación en el k -ésimo tratamiento en el i -ésimo bloque.

Ensayo de Bahía Drake									
B1T4	B2T4	B2T3	B3T1	B4T2	B4T4	B5T1	B5T3	B5T2	B5T4
B1T1	B2T1	B3T3	B3T4	B4T1	B4T3				
B1T2	B2T2	B3T2							
B1T3									

Ensayo de Cóbano			
B1T4	B1T2	B1T1	B1T3
B2T2	B2T4	B2T1	B2T3
B3T1	B3T3	B3T4	B3T2
B4T1	B4T3		
B4T2	B4T4	B5T4	
B5T3	B5T1	B5T2	

Figura 2. Distribución espacial de los bloques completos al azar de los ensayos en Cóbano y Bahía Drake.
Figure 2. Spatial distribution of the randomized complete blocks of the trials in Cóbano and Drake Bay.

La preparación del sitio en La Esperanza de Cóbano (ensayo 1) consistió en la aplicación de 2 rastreas para eliminar arvenses y la compactación; posteriormente, se aplicó una rodaja química antes de la siembra. El sitio ubicado en Bahía Drake (ensayo 2) se preparó mediante



chapeas manuales y se mantuvieron limpias las líneas de árboles, mediante herbicidas químicos aplicados en fajas de 1.5 m. Previo al manejo de la plantación, en ambos ensayos, se realizó un muestreo compuesto de suelos en zigzag, con 6 submuestras, abarcando la variabilidad de la topografía del terreno. Esas 6 submuestras se combinaron para formar una única muestra, la cual se redujo a 1 kilogramo, luego de la aplicación de la metodología del cuarteo.

Cuadro 1. Descripción del diseño experimental según tratamiento y tiempo de aplicación de los ensayos establecidos.
Table 1. Description of the experimental design according to treatment and application time of the established tests.

Aplicación de fertilizante 19-4-19-2-0,1(B)-1,8(S)-,1(Zn) por árbol					
Tratamiento	Siembra	3 meses	12 meses	24 meses	Total
T1	50 g				50 g
T2	50 g	80 g			130 g
T3	50 g	80 g	150 g		280 g
T4	50 g	80 g	150 g	250 g	530 g

2.3 Análisis de datos

Con el fin de determinar el efecto de los tratamientos, se realizó un análisis de varianza y prueba de medias de Tukey con una significancia de 0.95. Esta comparación se realizó sobre los cálculos del incremento medio anual de las variables de DAP, altura y volumen total por árbol. En el caso del ensayo 1 en Cóbano, el cálculo se realizó sobre los 3.03 años mientras que, para el ensayo 2 en Bahía Drake, fue a los 2.84 años. El volumen total se calculó con un factor de forma de 0.403 obtenido del mismo material genético en plantaciones de melina en el Pacífico Sur de Costa Rica (Garro-Fuentes, 2021) (E.1). Adicionalmente, se calculó el volumen total por hectárea según la cantidad de individuos presentes en cada tratamiento y un incremento medio anual de esta variable, así como la altura dominante considerando el 10 % de los individuos más altos y gruesos de cada tratamiento.

$$Vt = \left(\frac{Dap}{100} \right)^2 * 0.7854 * Ht * 0.403 \quad (E.1)$$

Donde:

Vt= volumen total

DAP= diámetro a la altura de pecho

Ht= altura total



3. Resultados y discusión

3.1 Fertilidad natural de los sitios

Entre ambos sitios existen diferencias en términos de fertilidad natural, principalmente en los contenidos de calcio, magnesio, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), la saturación de acidez y otras propiedades fisicoquímicas que son fundamentales para el desarrollo óptimo de plantaciones de melina. De acuerdo con los resultados obtenidos, el suelo en Bahía Drake presenta menor fertilidad, en comparación con el suelo de Cóbano. En efecto, Bahía Drake presenta un 61 % menos de CICE, un 16 % más de saturación de acidez y una diferencia en el contenido de calcio de $11.8 \text{ cmol (+) L}^{-1}$ (**Cuadro 2**).

Según Jiménez-Pozo (2016), el contenido de calcio (Ca) debe ser superior a 10 cmol L^{-1} para que el crecimiento de la especie sea apropiado. Sin embargo, Vallejos (1996) indica que, para obtener resultados excelentes en crecimiento, este valor debe ser superior a $18 \text{ cmol (+) L}^{-1}$. Por su parte, Escobar (2013) señala que suelos con alto contenido de Ca, bajos en sodio (Na) y textura de franco a franco-arcillosa representan un índice de sitio alto, con buena capacidad productiva para melina. Otros autores han reportado que el crecimiento de melina es normal cuando los contenidos de Ca oscilan entre 6.0 y $22.3 \text{ cmol (+) L}^{-1}$, de Mg entre 1.6 y $6.7 \text{ cmol (+) L}^{-1}$, y de potasio (K) entre 0.5 y $0.7 \text{ cmol (+) L}^{-1}$ (Obando, 1989; Vallejos, 1996; Vásquez y Ugalde, 1995), condiciones que califican a Cóbano como altamente productivo para plantaciones de melina, mientras que Bahía Drake podría tener limitaciones, principalmente por factores como la alta saturación de acidez y sus bajos contenidos de Ca y CICE.

Cuadro 2. Propiedades químicas de los suelos previo al establecimiento de las plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Cóbano (ensayo 1) y Bahía Drake (ensayo 2), 2014.

Table 2. Chemical properties of soils prior to the establishment of the forest plantations of *Gmelina arborea* forest plantations in Cóbano (trial 1) and Drake Bay (trial 2), 2014.

Propiedad	Acidez	Ca	Mg	K	CICE	P	Cu	Zn	Mn	Fe	Sat. acidez
Sitio		cmol L ⁻¹					mg L ⁻¹				
Cóbano	0.7	16.3	3.9	0.4	21.4	3.6	7.5	2.3	9.6	100.7	3.1 %
Bahía Drake	1.5	4.5	1.5	0.4	7.8	1.7	5.4	1.2	22.5	86.8	19.4 %

CICE: Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva, Sat. Acidez: Saturación de acidez.

En cuanto al pH se obtuvieron valores promedios de 5.5 y 5.2 para Cóbano y Bahía Drake respectivamente. Con respecto a la textura Bahía Drake se clasifica como un sitio franco arcilloso, mientras que Cóbano como un sitio franco, siendo ambos adecuados para el desarrollo de melina según Escobar (2013). De acuerdo con las calidades de sitio definidas para melina por Zeaser (1996), Cóbano y Bahía Drake se clasifican en calidad 1 y 3 respectivamente, lo cual concuerda con lo observado en el crecimiento dasométrico de los árboles.



3.2 Crecimiento dasométrico de las plantaciones

El crecimiento de la plantación establecida en el ensayo 1 (Cóbano) fue superior en todas las variables medidas, con respecto al sitio del ensayo 2 (Bahía Drake). El DAP y la altura total resultaron mayores en un 20 % y un 25 % comparativamente, mientras que el volumen total fue un 50 % superior. Esta diferencia en crecimiento se debe, en esencia, a la fertilidad natural de los suelos, lo cual refleja la calidad de sitio.

Al utilizar las curvas de índice de sitio elaboradas por Jiménez (1985) para el Pacífico seco de Costa Rica, con material de semilla, a una edad base de 7 años, ambos sitios superan la mejor calidad registrada (IS= 20), al poseer una altura dominante superior a 17 metros (**Cuadro 3**). No obstante, al utilizar curvas preliminares de índice de sitio para melina clonal a una edad base de 5 años (Murillo-Cruz, s.f.), Cóbano se ubica en un IS=32 (calidad 1), mientras que Bahía Drake se ubica en IS=26 (calidad 3), coincidiendo con lo reportado por Zeaser (1996).

Cuadro 3. Crecimiento en diámetro, altura total y volumen total por árbol en plantaciones de *Gmelina arborea* de 3.0 años en Cóbano, Puntarenas.

Table 3. Growth in diameter, height, and total volume per tree in *Gmelina arborea* plantations of 3.0 years in Cóbano, Puntarenas.

Tratamiento	n	h_{dom} (m)	DAP (cm)	D.E. (cm)	Ht (m)	D.E. (m)	Vt (m ³)	D.E. (m ³)
T1	82	21.2	19.3	1.4	19.6	1.0	0.2343	0.0390
T2	83	21.6	19.7	1.6	19.6	1.3	0.2424	0.0444
T3	81	20.7	19.6	2.1	19.2	1.1	0.2359	0.0566
T4	81	21.8	20.0	1.6	19.9	1.4	0.2538	0.0478
Promedio	82	21.3	19.6	1.7	19.6	1.2	0.2416	0.0479

h_{dom} : altura dominante, DAP: diámetro a la altura del pecho, Ht: altura total, D.E.: desviación estándar, Vt.: volumen total.

Los valores promedios obtenidos en Cóbano (DAP= 19.6 cm; Ht= 19.6 m) (**Cuadro 3**) y en Bahía Drake (DAP= 15.7 cm; Ht= 14.7 m) (**Cuadro 4**) son superiores a los registrados por Escobar (2013) en plantaciones de melina en Colombia, en suelos con altos contenidos de calcio, donde se obtuvo un DAP de 14.6 cm y altura total de 12.8 m a los 3 años. Las diferencias con respecto a lo obtenido en Colombia podrían estar relacionadas, entre otras cosas, con la fertilización y el material genético (clones) utilizado en la presente investigación, así como la diferencia de precipitación (650 mm año⁻¹ en el estudio de Colombia y 3 000 mm año⁻¹ en este estudio en Costa Rica). En Limón, Costa Rica, Hernández-Castro *et al.* (2021) registraron valores de DAP (21 cm) para clones a los 2.8 años que coinciden con lo obtenido en Cóbano en el tratamiento 4 (T4).



Cuadro 4. Crecimiento en diámetro, altura total y volumen total por árbol en plantaciones de *Gmelina arborea* de 2.8 años Bahía Drake, Osa.

Table 4. Growth in diameter, height and total volume per tree in *Gmelina arborea* plantations of 2.8 years Drake Bay, Osa.

Tratamiento	n	h _{dom} (m)	DAP (cm)	D.E. (cm)	Ht (m)	D.E. (m)	Vt (m ³)	D.E. (m ³)
T1	100	16.0	15.4	2.2	14.6	1.2	0.1130	0.0321
T2	102	16.1	15.1	2.0	14.0	1.3	0.1043	0.0324
T3	85	16.8	16.0	2.2	14.8	1.5	0.1221	0.0401
T4	109	18.3	16.2	2.4	15.6	1.7	0.1358	0.0474
Promedio	99	16.9	15.7	2.2	14.7	1.4	0.1190	0.0405

h_{dom}: altura dominante, DAP: diámetro a la altura del pecho, Ht: altura total, D.E.: desviación estándar, Vt.: volumen total.

El promedio del volumen total por hectárea fue de 98.8 y 59.1 m³ ha⁻¹ en los sitios de Cóbano y Bahía Drake respectivamente, siendo Cóbano el sitio con mayor productividad por área. En ambos sitios el mayor volumen promedio se registró en el tratamiento de fertilización continua hasta los 24 meses (T4). Este tratamiento alcanzó un IMA máximo de 37.7 m³ ha⁻¹ año⁻¹ en el caso de Cóbano (**Cuadro 5**) y 33.15 m³ ha⁻¹ año⁻¹ para Bahía Drake (**Cuadro 6**).

Cuadro 5. Incremento medio anual y volumen total por hectárea según tratamiento en el ensayo 1 en Cóbano, Puntarenas

Table 5. Average annual increase and total volume per hectare according to treatment in the trial 1 in Cóbano, Puntarenas.

Tratamiento	Volumen total (m ³ ha ⁻¹)				IMA de Volumen total (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)			
	Min.	Promedio	Máx.	D.E.	Min.	Promedio	Máx.	D.E.
T1	86.5	96.0	108.7	7.5	28.5	31.7	35.9	2.5
T2	85.8	100.6	114.4	11.8	28.3	33.2	37.8	3.9
T3	86.0	95.5	115.6	10.8	28.4	31.5	38.2	3.6
T4	91.9	102.8	114.1	7.8	30.3	33.9	37.7	2.6
Promedio	87.5	98.8	113.2	9.5	28.9	32.6	37.4	3.1

Los resultados en Cóbano, en relación con el IMA en volumen total son similares a los registrados por Vallejos (1996) en sitios de clase II de Hojancha, Guanacaste, en el Pacífico Norte de Costa Rica (precipitación promedio 2 102 mm año⁻¹, suelo alfisol), donde la especie presentó un IMA de crecimiento de 33.68 m³ ha⁻¹ año⁻¹. Murillo-Cruz (1996), en sitios de clase II en Puerto Jiménez, Puntarenas, en el Pacífico Sur de Costa Rica a la edad de 2 años (precipitación promedio 5 496 mm año⁻¹, suelo entisol) encontró un IMA de 46.06 m³ ha⁻¹ año⁻¹. Este último registro de crecimiento es 2.2 veces mayor que el valor promedio obtenido en Bahía Drake (20.83 m³ ha⁻¹ año⁻¹) en el mismo cantón de Osa y un 29 % más alto que el de Cóbano (32.6 m³ ha⁻¹ año⁻¹).



Cuadro 6. Incremento medio anual y volumen total por hectárea según tratamiento en el ensayo 2 en Bahía Drake, Osa.

Table 6. Average annual increase and total volume per hectare according to treatment in the trial 2 in Drake, Osa.

Tratamiento	Volumen total (m ³ ha ⁻¹)				IMA de Volumen total (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)			
	Min.	Promedio	Máx.	D.E	Mín.	Promedio	Máx.	D.E
T1	41.15	56.52	67.94	9.92	14.51	19.93	23.96	3.50
T2	43.17	53.19	62.38	6.56	15.22	18.76	22.00	2.31
T3	37.29	52.51	71.57	12.07	13.15	18.52	25.24	4.25
T4	56.48	74.02	94.00	13.46	19.92	26.11	33.15	4.75
Promedio general	44.52	59.06	73.97	10.50	15.70	20.83	26.09	3.70

3.3 Efecto de la fertilización

El IMA del DAP para los sitios de Cóbano y Bahía Drake fue de 6.5 y 5.5 cm año⁻¹ respectivamente, la diferencia en promedio fue de un 15 %. En Cóbano no existieron diferencias estadísticamente significativas para el DAP, mientras que para Bahía Drake sí existieron diferencias entre el T1 y T2 con respecto al T3 y T4 (**Figura 3**). El mayor IMA se registró en el T4; es decir, que la fertilización continua y acumulativa hasta los 24 meses tiene un efecto positivo en el crecimiento diamétrico de los árboles.

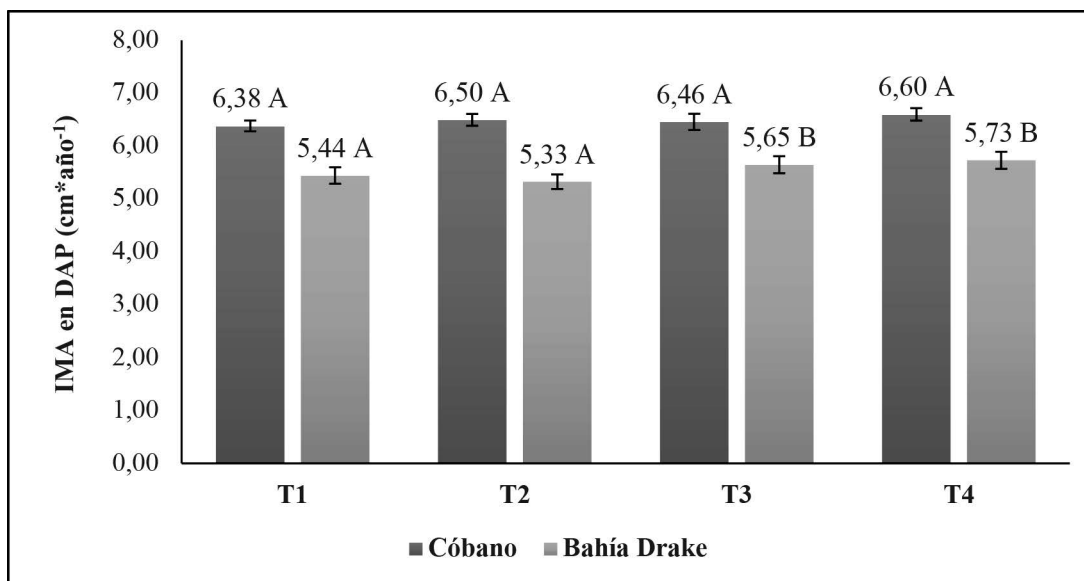


Figura 3. Incremento medio anual en DAP de *Gmelina arborea* Roxb., según tratamiento en Cóbano y Bahía Drake.

Figure 3. Mean annual increase in DAP of *Gmelina arborea* Roxb., according to treatment in Cóbano and Bay Drake.



Con respecto a la altura total el IMA promedio fue de 6.5 m año⁻¹ en Cóbano y 5.2 m año⁻¹ en Bahía Drake. Al igual que el DAP, los mayores valores de IMA se obtuvieron en el T4, sin embargo, a diferencia del DAP, la altura total presentó diferencias estadísticamente significativas en ambos sitios (**Figura 4**). No obstante, en Cóbano las diferencias se dieron únicamente entre el tratamiento 3 y 4, por lo tanto, el efecto de la fertilización inicial (3 meses y 6 meses) no es significativo en un sitio que posee una alta fertilidad natural.

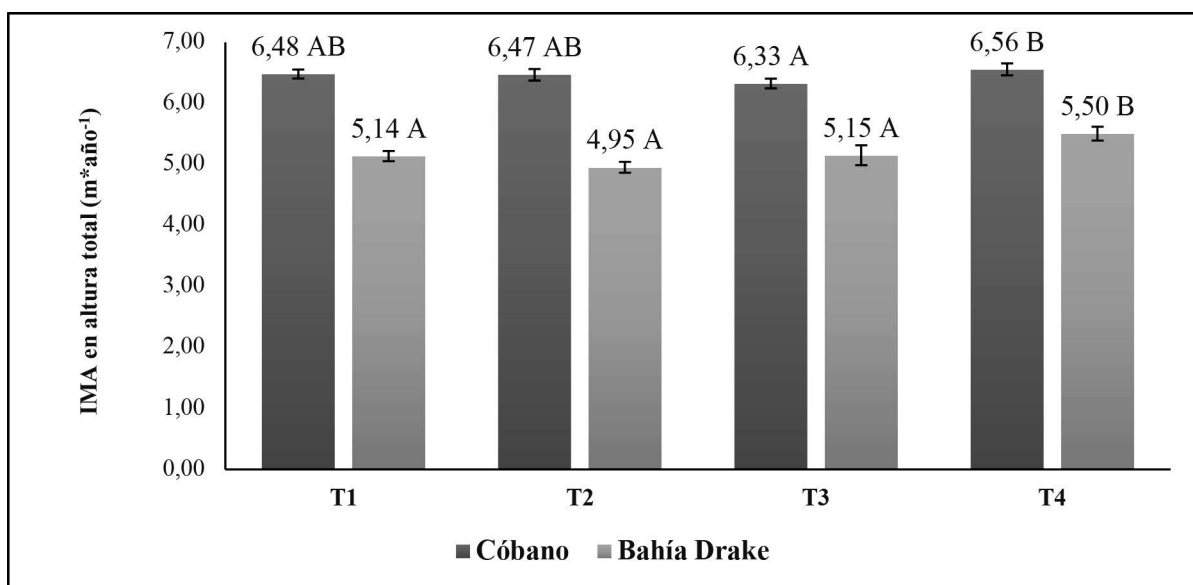


Figura 4. Incremento medio anual en altura total para *Gmelina arborea* Roxb., según tratamiento en Cóbano y Bahía Drake.

Figure 4. Mean annual increase in total height in Cóbano and Drake Bay.

Para el volumen total por árbol se registraron diferencias estadísticamente significativas en ambos sitios. En el sitio de Bahía Drake se observaron entre el tratamiento T4, con respecto al tratamiento T1 y T3, además entre el tratamiento T2, con respecto al T3 (**Figura 5**). Estas diferencias permiten inferir que la incorporación de fertilizante a los 12 y 24 meses tiene efectos significativos en el crecimiento de *G. arborea*, en sitios con baja fertilidad natural. En el sitio de Cóbano, las diferencias estadísticamente significativas se registraron únicamente entre el tratamiento el T1 y el T4, presentando este último una superioridad de 0.006 m³ año⁻¹, equivalentes a un 8 % más de IMA para el volumen total por árbol en comparación con el primer tratamiento.

Las diferencias de crecimiento tanto en DAP, altura y volumen total entre los diferentes tipos de tratamiento de fertilización coincide con lo registrado por [González et al. \(2016\)](#), quienes señalaron que es más efectiva la aplicación de fertilizantes en diferentes momentos del crecimiento de la especie.



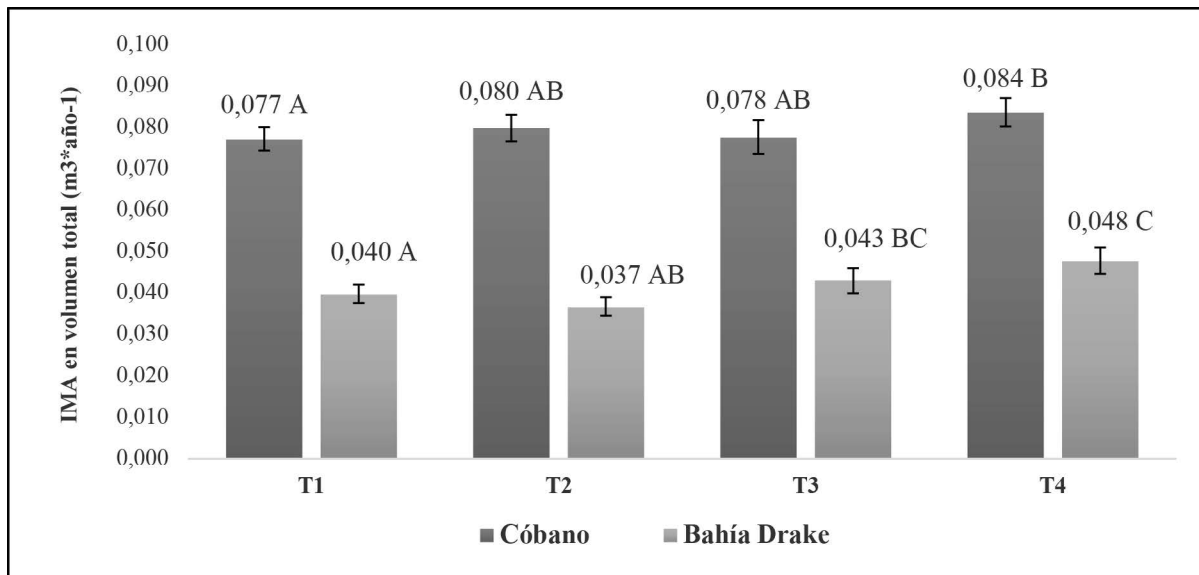


Figura 5. Incremento medio anual en volumen total de *G. arborea* Roxb. en Cóbano y Bahía Drake, 2021.

Figure 5. Mean annual increase in total volume of *G. arborea* Roxb. in Cóbano and Drake Bay, 2021.

A pesar de que el sitio de Cóbano presentó mayores valores en incremento medio anual en volumen, al comparar la diferencia de crecimiento porcentual entre los tratamientos en cada sitio se observó que los mayores efectos se obtuvieron en el sitio de Bahía Drake, donde la diferencia entre una sola fertilización inicial (T1), en comparación con la continuidad de esta práctica hasta los 3 años (T4) fue de un 16.7 % más en el volumen total, mientras que para el sitio de Cóbano bajo el mismo escenario la diferencia fue de un 8.3 % para la misma variable.

4. Conclusiones y recomendaciones

En sitios con contenido de Ca menores a 4.5 cmol L^{-1} , saturación de acidez mayores o iguales a 19.4 % y Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva (CICE) menores a 7.8 cmol L^{-1} los efectos de la fertilización continua con la fórmula 19-4-19-2-0,1(B)-1,8(S)-0,1(Zn) son significativos y mejoran el crecimiento dasométrico de los individuos. Al utilizar la silvicultura clonal en sitios con estas características se recomienda continuar con la aplicación de abono hasta los 24 meses para compensar valores bajos de fertilidad en los suelos.

Las plantaciones clonales de *G. arborea* establecidas en sitios con contenidos de Ca superiores a 19.3 cmol L^{-1} , CICE mayor o igual a 21.4 cmol L^{-1} y una saturación de acidez inferior o igual a 3.1 %, tienen un rendimiento idóneo y no requiere de fertilización continua. La recomendación para suelos con estas características es una aplicación de abono al momento de la siembra y 3 meses después de plantado.



Se recomienda continuar con estudios relacionados con la construcción de curvas de absorción y concentración de nutrientes en la silvicultura clonal para melina, que incorpore la identificación de diferencias entre requerimientos del material convencional (semilla) con respecto al clonal seleccionado para mejorar la recomendación de fertilización y selección de sitios a plantar; continuar con el establecimiento de ensayos de fertilidad continua en sitios que abarquen valores intermedios de fertilidad que no fueron evaluados en el presente estudio. Así como la incorporación de las normas DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System) con el propósito de dar un enfoque en la nutrición de cultivos para evaluar y corregir los desequilibrios nutricionales.

5. 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.

6. Agradecimientos

Se agradece al Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (Dr. Raúl Jaramillo V.) por el aporte económico realizado al proyecto “Mejoramiento de la productividad de Instituto Internacional de Nutrición de Plantas; a la Ing. Forestal Grethel Salazar Chaves de la empresa Cerital Corporation S.A. por el apoyo en el uso de la finca y a las personas dictaminadoras externas por las observaciones realizadas a la versión final del escrito.

7. Referencias

- Alarape, A. B., Adedokun, S. A., Sulaiman, O. N., Olunloyo, A. A. & Odewale, M. O. (2019). Growth Response of *Gmelina arborea* (ROB) Seedlings to Cassava Peels as Organic Fertilizer. *Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry*, 4(3), 1-7. <https://doi.org/10.9734/ajraf/2019/v4i330064>
- Alvarado, A. (2012). Nutrición y fertilización de *Cedrela odorata*. Capítulo 11. En Alvarado, A. y Raigosa, J (eds.). *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales* (pp. 209-215). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica.
- Ávila-Arias, C., Murillo-Cruz, R., Murillo-Gamboa, O. y Sandoval-Sandoval, C. (2015). Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb. de dos procedencias, en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 12(28), 23-35. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v12i28.2097>



- Barrios, A., López, A., Nieto, V., Burgos, N., Yaya, M. y González, I. (2011). Efecto del control de malezas y fertilización sobre el crecimiento inicial de *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. en el Departamento del Tolima, Colombia. *Colombia forestal*, 14(1), 31-40. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2011.1.a03>
- Benavides-Fallas, R. A. (2022). *Desempeño de clones superiores de Gmelina arborea Roxb. ex Sm. en tres condiciones de sitio de la Región Huetar Norte, Costa Rica*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional]. Repositorio Académico Institucional (RAI) de la Universidad Nacional, Costa Rica. https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/25344/TESIS%20RODRIGO_Firmado.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Da Cruz-Albertazzi, A. y Mahlich Barreto, L. (2018). *Propuesta de plan de gestión integral de los residuos sólidos generados en la comunidad de Cóbano, Puntarenas, Costa Rica*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional]. Repositorio Académico Institucional (RAI) de la Universidad Nacional, Costa Rica. <https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/18155>
- Escobar Quemba, L. (2013). *Relación de parámetros de fertilidad del suelo con el índice de sitio determinado para plantaciones forestales de melina (Gmelina arborea) y ceiba (Pachira quinata) en Zambrano-Bolívar (Colombia)*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional, Biblioteca digital, Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/50385>
- Garro-Fuentes, J. (2021). *Crecimiento de clones de melina (Gmelina arborea roxb. ex Sm.) en Cañaza, Pacífico Sur de Costa Rica*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional, Costa Rica.
- González-Rojas, M., Murillo-Cruz, R. y Ávila-Arias, C. (2016). Crecimiento inicial de *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. aplicando diferentes tratamientos de fertilización en el Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(33), 29-35. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v13i33.2575>
- Hernández-Castro, W., Valverde-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. <https://dx.doi.org/10.15359/ru.35-1.22>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INEC]. (2022). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2021 Resultados generales de la actividad agrícola y forestal*. San José, Costa Rica. <https://admin.inec.cr/sites/default/files/2022-09/reagropecENAAGR%C3%8DCOLA2021-01.pdf>
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria [INTA-Costa Rica]. (2015a). Suelos de Costa Rica, Orden Alfisol. *Boletín Técnico #7*. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1827.PDF>





- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria [INTA-Costa Rica]. (2015b). Suelos de Costa Rica, Orden Ultisol. *Boletín Técnico #1*. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1604.PDF>
- Jiménez Arias, S.A. (1985). Tablas preliminares de crecimiento para *Gmelina arborea* Roxb. aplicables al pacífico seco de Costa Rica. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional, Costa Rica].
- Jiménez-Pozo, J. L. (2016). *El cultivo de la melina (Gmelina arborea L.) en el trópico*. Universidad de las Fuerzas Armadas. Sangolquí, Ecuador. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/11687>
- Mora-Erreaez, R. y Valarezo-Manosalva, C. (2018). Impacto de la fertilización mineral y enmiendas sobre *Gmelina arborea* y *Schizolobium parahyba* en suelos andesíticos de la Amazonía Ecuatoriana. *Revista Centro Agrícola*, 45(4), 49-58. <http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v45n4/0253-5785-cag-45-04-49.pdf>
- Murillo-Cruz, R. (1996). *Evaluación de algunos factores ambientales que afectan la calidad de sitio a nivel de micrositio para melina (Gmelina arborea Roxb.) plantada en suelos planos en la zona Sur de Costa Rica*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional, Costa Rica.
- Murillo-Cruz, R. (s. f.). *Índice de sitio para Gmelina arborea en plantaciones clonales*. [Manuscrito no publicado]. Instituto de Investigación y Servicios Forestales. Universidad Nacional, Costa Rica.
- Obando, G. (1989). *Construcción de modelos matemáticos de clasificación de sitios para la especie Gmelina arborea Roxb., aplicables a la zona Pacífico Sur de Costa Rica*. Práctica de especialidad. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Paillacho, D. (2010). *Evaluación del crecimiento inicial de Eucalyptus urograndis, Gmelina arborea Roxb y Ochroma pyramidale Cav bajo la aplicación de cuatro dosis de potasio en la hacienda Zoila Luz del cantón Santo Domingo*. [Tesis de licenciatura, Escuela Politécnica del Ejército]. Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/2966/T-%20ESPE-IASA%20II-002329.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pérez, P. (2009). *Fertilización NPK y demanda nutrimental de cuatro especies forestales en fases tempranas de crecimiento*. [Tesis de maestría, Colegio de Posgraduados]. Repositorio Institucional Colegio de Posgraduados. http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/1287/Perez_Camacho_P_MC_Produccion_Agroalimentaria_Tropico_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y



- Soto-Barber, I. (2017). *Red y planta de tratamiento de aguas residuales en Agujitas, Bahía Drake (Costa Rica) y procedimientos técnicos-administrativos para la gestión del agua*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. https://oa.upm.es/55271/1/TFM_IVAN_SOTO_BARBER_1.pdf
- Valarezo, A. C, Villamagua, M. A., Maza H. Wilcke, W. y Nieto, C. (2017). *Respuesta del pachaco (Schizolobium parahybum vell. conc) y la melina (Gmelina arborea roxb.) a la aplicación de biocarbón y fertilización en el sur de la Amazonía Ecuatoriana*. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/183>
- Vallejos, O. (1996). *Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas edafo climáticas y foliares para Tectona grandis L.F, Bombacopsis quinatum (Jacq) Dougl and Gmelina arborea Roxb. en Costa Rica*. [Tesis de maestría, CATIE]. Repositorio de conocimiento institucional, CATIE. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3547/Productividad_y_relaciones_del_indice.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vásquez, W. y Ugalde, L. A. (1995). Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. *Serie Técnica, Informe Técnico N.º 256*. CATIE. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3820/Rendimiento_y_calidad_de_sitio.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Zeaser, D. (1996). *Determinación de las clases de sitio para melina en el Pacífico Sur de Costa Rica*. Reporte interno: Stone Forestal S. A. DONASA.

