



El sustrato y arreglo espacial de siembra en la productividad de minijardines clonales de *Tectona grandis* Linn. F¹

Substrate and spatial planting pattern on the productivity of clonal mini gardens of *Tectona grandis* Linn. F

Arantxa Rodríguez-Solís², Yorlenny Badilla-Valverde², Olman Murillo²

- ¹ Recepción: 29 de julio, 2022. Aceptación: 16 de noviembre, 2022. Esta investigación formó parte del proyecto de investigación “Mejoramiento del paquete tecnológico de producción clonal en ambiente protegido de *Tectona grandis* y *Cordia alliodora*”, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y del Sistema de Posgrado, como parte del trabajo de tesis de la Maestría en Ciencias Forestales de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, del primer autor.
- ² Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica. arantxarodriguezs@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-2875-6435>); ybadilla@itcr.ac.cr (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-6743-9734>); olmuga@yahoo.es (<https://orcid.org/0000-0003-3213-8867>).

Resumen

Introducción. *Tectona grandis* es la especie con la mayor área plantada en Costa Rica, por los altos precios en el mercado internacional. La producción de plantas para reforestación se ha tecnificado en el país, se desarrolla basado en tecnologías de ambientes protegidos, que permiten aumentar la productividad, disminuir costos de operación y ofrecer material de siembra durante todo el año. **Objetivo.** Evaluar el efecto de dos sustratos y cinco densidades de siembra en la productividad de minijardines clonales de *Tectona grandis* dentro de un ambiente protegido. **Materiales y métodos.** Se caracterizaron mediante análisis de granulometría y retención de humedad, cuatro sustratos inertes de fácil adquisición, de ellos se seleccionó el polvo de piedra como óptimo. Se estableció un ensayo experimental con diseño factorial 2x5 en San Carlos, Costa Rica, para evaluar dos sustratos (polvo de piedra solo y con 25 % de carbón) y cinco densidades de siembra (cm) de 10x10, 10x5, 7x5, 10x10 con dos plantas por hoyo y 10x10 con una planta en el medio. Cada densidad tuvo cuatro clones como efecto repetición. El ensayo se evaluó durante cinco ciclos continuos de producción de enero a setiembre del 2021. **Resultados.** El uso del polvo de piedra sin carbón como sustrato, registró la mayor productividad a un menor costo. El arreglo espacial de siembra de 10x10 cm con una planta en el centro (n=145 plantas/m²), registró la mayor producción de brotes por planta madre (1,16). El arreglo 7x5 cm aumentó la productividad hasta en 206 brotes m²/mes. **Conclusión.** El cambio de densidad de siembra del minijardín clonal, en una primera etapa a 10x10 cm con una planta en el centro, resultó en alto impacto en productividad (74 %), mayor eficiencia en el uso del espacio y mejor gradualidad del cambio en el sistema operativo.

Palabras clave: silvicultura clonal, propagación vegetativa, mejoramiento de árboles, ambiente protegido, mini estacas.



Abstract

Introduction. *Tectona grandis* is the species with the largest planted area in Costa Rica, due to the high prices in the international market. The production of plants for reforestation has been technified in the country and is currently being developed based on protected environment technologies, which increase productivity, reduce operating costs, and offer planting material throughout the year. **Objective.** To evaluate the effect of two substrates and five planting densities on the productivity of clonal mini-gardens of *Tectona grandis* in a protected environment. **Materials and methods.** Four readily available inert substrates were characterized by granulometry and moisture retention analysis, from which stone dust was selected as the optimum substrate. An experimental trial with a 2x5 factorial design was established in San Carlos, Costa Rica to evaluate two substrates (stone dust alone and with 25 % charcoal) and five planting densities (cm) of 10x10, 10x5, 7x5, 10x10 with two plants per hole and 10x10 with one plant in the middle. Each density had four clones as a replicate effect. The trial was evaluated during five continuous production cycles from January to September 2021. **Results.** The use of stone dust as substrate, without charcoal, recorded the highest productivity at a lower cost. The spatial planting arrangement of 10x10 cm with one plant in the middle (n=145 plants/m²), recorded the highest shoot production per mother plant (1.16). The 7x5 cm arrangement increased productivity by up to 206 shoots m²/month. **Conclusion.** The change in planting density of the clonal mini-garden, in a first stage to 10x10cm with an additional plant in the center, resulted in a high impact on productivity (74 %), greater efficiency in the use of space, and a better gradual change in the operating system.

Keywords: clonal forestry, vegetative propagation, tree improvement, protected environment , mini cuttings.

Introducción

Tectona grandis es un árbol caducifolio de bosques tropicales y subtropicales, con madera de alta calidad, con notables propiedades físicas y mecánicas, durabilidad y resistencia a la descomposición (Camel et al., 2017; Monsalve-Paredes & Bello-Alarcón, 2020). En el comercio mundial anual de maderas tropicales, la madera en rollo de teca representó un 12 % del valor generado (Koller & Jan Walotek, 2015). Dentro del mercado de exportaciones de madera en Costa Rica, se registró un aumento en la comercialización de teca, por sus altos precios con más de un 30 % para el 2020 (Murillo et al., 2019; Ugalde Alfaro, 2021).

Los mercados principales de exportación tienen como destino países como Singapur, India, Vietnam, China y Emiratos Árabes Unidos (de Camino Velozo et al., 2016). Para el año 2010 la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), reportó 4,3 millones de hectáreas sembradas de *T. grandis*, lo que representó un 2 % de la superficie mundial reforestada y el 3 % en regiones tropicales de América (Tamarit-Urias et al., 2019). En Costa Rica correspondió casi a un 60 % del área total plantada (Meza Picado et al., 2019), equivalente a 33 000 ha aproximadamente.

Los programas de mejoramiento genético con teca, han permitido en el país disminuir en más de dos años el turno de cosecha, aumentar en más de un 25 % la productividad, y su valor comercial en más de un 30 % por hectárea (Badilla-Valverde & Murillo-Gamboa, 2022; Hine et al., 2019; Murillo Gamboa et al., 2012; 2013; Murillo et al., 2019). La tecnología de propagación impulsó la silvicultura clonal desde los años ochenta, con un alto impacto en la productividad forestal mundial (Monteuuis & Goh, 2018; Murillo Gamboa et al., 2012; 2013; Xavier et al., 2009). Se convirtió en una herramienta para la reproducción masiva de los árboles élite (Rojas Parajeles & Abdelnour Esquivel, 2012).

El mercado costarricense de plantas clonadas ha tenido un aumento en los últimos años (Murillo-Gamboa et al., 2018; Murillo & Guevara, 2013), gracias al aumento en productividad y disminución de años para llegar a

cosecha (Badilla-Valverde & Murillo-Gamboa, 2022). Los ambientes protegidos utilizan sistemas hidropónicos (ausencia de suelo) en su mayoría (Gruda et al., 2016; Murillo-Gamboa et al., 2018; Xavier et al., 2009). El sustrato provee sostén y buen intercambio de oxígeno en las raíces (Nelson et al., 2021). Algunos sustratos son: la fibra de coco por su estabilidad física y buena aireación, la vermiculita por su densidad baja y alta capacidad de intercambio catiónico que favorece la retención de nutrientes (Savvas & Gruda, 2018), al igual que el carbón (Sohi et al., 2010).

Las mezclas en los sustratos mejoran el crecimiento (Gruda et al., 2013), como la arcilla expandida (3-8 mm, 70 %), astillas de corteza (15 %) y compost (15 %) en invernaderos de Finlandia (Xie et al., 2020). En Brasil para *T. grandis* se reportó vermiculita, arena, cáscara de arroz carbonizada, proporción 4:1 de corteza de pino + vermiculita, cáscara de arroz carbonizada + fibra de coco en proporción 1:1 y mezclas con 25, 50, 75 y 100 % de biocarbón (Abreu Rezende et al., 2016). En Costa Rica, minijardines de *T. grandis* reportaron sustratos de polvo de piedra y 20 % de carbón (Murillo Gamboa et al., 2012; Murillo-Gamboa et al., 2018), y mezclas con 55 % de arena con limos y arcillas (Calderón-Ureña et al., 2019).

El uso de sustratos como gravas y carbón, han mostrado resultados prometedores (Murillo Gamboa et al., 2012). Para aumentar la producción de brotes, se demostró el efecto de distanciamientos de siembra, debido a la competencia por recursos y fototropismo entre las plantas (Murillo et al., 2013). Donde, distanciamientos de 10x10, 10x5 y 7,50x7,50 cm, produjeron 110, 160 y 154 brotes por metro cuadrado, respectivamente (Murillo Gamboa et al., 2012; 2013). Sin embargo, en espaciamentos de 5x5 cm, se reportó una mayor producción por metro cuadrado de hasta 266 brotes, pero se requiere de cosechas más frecuentes debido a la competencia por recursos (Badilla Valverde, 2014; Murillo Gamboa et al., 2012; 2013). Lo anterior ilustra la importancia de estudiar factores que influyen en la productividad (Arcanjo do Nascimento et al., 2020; Badilla et al., 2017; Murillo-Gamboa et al., 2018), como el uso de sustratos con buena retención de humedad a bajo costo (Savvas & Gruda, 2018). Además, diferentes arreglos espaciales de siembra para mejorar su productividad y disminuir costos de producción (Alvarado & Raigosa, 2012). Por lo que, este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de dos sustratos y cinco arreglos espaciales de siembra en la productividad de minijardines clonales de *Tectona grandis* dentro de un ambiente protegido, San Carlos, Costa Rica.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el invernadero de la Cooperativa Internacional de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES), ubicado dentro del Campus Tecnológico Local San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), Costa Rica. Cuyas coordenadas son 10° 21 '39,28" latitud norte y 84° 30' 28,72" longitud oeste, a una elevación de 167 m s. n. m. (Instituto Meteorológico Nacional, s.f. b) en la zona de vida Bosque Muy húmedo Tropical (Holdridge, 1982). Esta región presenta un promedio de precipitación de 3200 mm anuales, con mayor caída de lluvias entre mayo a enero y disminución no menor a 50 mm por mes desde febrero a abril. Presenta una temperatura promedio anual de 25 °C; con valores más altos durante marzo a junio y los más bajos entre diciembre a febrero (Instituto Meteorológico Nacional, s.f. a).

Selección de sustratos

Se estudió la idoneidad como sustrato hidropónico del polvo de piedra, el carbón, la arena gruesa y fina, por ser los más utilizados en minijardines clonales en Costa Rica. Se evaluó la composición por tamaño de partículas, porosidad y retención de humedad, con base en la metodología del Programa Nacional de Producción Agrícola bajo ambiente protegido (ProNAP) (Quesada Roldán & Marin Thiele, 2014). El criterio para elegir el mejor sustrato fue su composición granulométrica, donde posea al menos cuatro tamaños de partículas en proporciones homogéneas. El carbón se seleccionó por su aumento en la eficiencia del fertilizante y reducción de la lixiviación (Semida et al., 2019).

Para obtener la granulometría, se tomó una muestra de 2 kg de polvo de piedra, arena fina, arena gruesa y carbón. El polvo de piedra, la arena fina y gruesa, se colocaron en la estufa a 105 °C durante 24 h y el carbón a 60 °C por 24 h para su secado. Para el proceso de tamizaje, se utilizó una criba compuesta de tamices con tamaños de 180 µm, 250 µm, 425 µm, 850 µm, 2 mm y 2,36 mm, sobre un tamizador con amplitud de 60 mm durante 3 min. El porcentaje de partículas de cada tamiz se obtuvo de la relación del peso total del material en el frasco superior y el obtenido en cada tamiz.

Para el análisis de porosidad y retención de humedad, se establecieron dos repeticiones por sustrato, en envases con volumen conocido, a los cuales se le realizaron cinco perforaciones en la base, tapados con cinta adhesiva. Luego, se colocó el sustrato, se agregó agua hasta lograr un brillo en la superficie de las muestras y se dejó reposar durante 15 min. Se drenó el exceso de agua de cada recipiente durante 2 min para obtener el volumen. Luego, cada muestra de sustrato se pesó para obtener el peso húmedo y se colocó en una estufa a 65 °C durante 48 h para obtener el peso seco, sin degradar las micropartículas del sustrato.

Para determinar la porosidad total y el porcentaje de capacidad de retención de agua, se utilizaron las ecuaciones 1 y 2 que se muestran a continuación:

$$\text{Porosidad Total (\%)} = \frac{(\text{peso húmedo} - \text{peso seco}) + \text{volumen drenado}}{\text{volumen del sustrato}} * 100 \quad (1)$$

$$\text{Capacidad de retención de agua (\%)} = \frac{(\text{peso húmedo} - \text{peso seco})}{\text{volumen del sustrato}} * 100 \quad (2)$$

Se asume que la densidad del agua fue de 1 g/mL.

El volumen drenado se refirió a la cantidad de agua que el sustrato no pudo contener.

Descripción y manejo del ambiente protegido

El ambiente protegido fue construido con una cobertura en el techo y paredes de polietileno transparente con tratamiento ultravioleta, serán al 60 % ubicado a 3 m sobre el nivel del suelo para dar efecto de sombra, mantener una temperatura interna promedio de 35 °C y un rango de humedad relativa entre 80 y 90 % (Badilla Valverde, 2014; Murillo Gamboa et al., 2012). Las plantas para el ensayo se obtuvieron mediante el protocolo de propagación vegetativa que utiliza GENFORES (Badilla Valverde, 2014; Murillo Gamboa et al., 2013).

Para el manejo del ensayo se utilizó el protocolo empleado en la producción de plantas, que corresponde a un régimen de fertirriego con solución hidropónica tres veces por semana, impulsado por un sistema de riego por goteo automatizado con una máquina para impulsar agua (bomba) con 1 atm de presión. Donde se aplicó 5 min de agua para humedecer el sustrato, por 15 min la solución nutritiva y por último, 5 min de agua para el lavado de las mangueras. Durante la investigación, las plantas madre se cosecharon cada catorce días durante dos meses.

Diseño experimental

Se estableció un diseño factorial donde se evaluaron cinco arreglos espaciales de siembra y dos sustratos, con cuatro repeticiones. Los sustratos evaluados fueron (1) polvo de piedra y (2) mezcla de polvo de piedra con 25 % de carbón. Los cinco arreglos espaciales de siembra fueron 10x10 cm (n=100/m²), 10x10 cm con dos plantas por hoyo (n=200/m²), 10x5 cm (n=200/m²), 7x5 (n=285/m²) y 10x10 cm con planta en el medio (n=145/m²). En este último caso, se consideró no sembrar la planta en el medio donde estuviera ubicada la línea de riego.

Las repeticiones se constituyeron de cuatro clones compuestos de veinte unidades experimentales (plantas) por repetición, distribuidas en cinco líneas a lo largo, con cuatro plantas de ancho para los arreglos 10x10 cm, 10x5

cm y 7x5 cm, cuarenta plantas para la distribución 10x10*2 cm, correspondiente a un par de plantas por hoyo o hueco y entre veinticinco y veintiocho plantas para el 10x10*1/2 cm, correspondiente al arreglo espacial con planta en el medio, calculada con base en la distribución de las líneas de riego.

El modelo estadístico fue el de la ecuación 3:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_{ij} \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

Donde:

Y_{ijk} = respuesta de la k-ésima repetición en el i-ésimo nivel del factor A y j-ésimo nivel de factor B.

μ = representa una media general.

α_i = el efecto que produce el i-ésimo nivel del factor A

β_j = corresponde al efecto del j-ésimo nivel del factor B,

δ_{ij} = el efecto adicional (interacción) para la combinación de los niveles i del factor A y j del factor B.

ε_{ijk} = es el error aleatorio asociado a la observación ijk-ésima

Variables de respuesta

Se utilizó la tasa de producción de brotes por planta madre, producción de brotes por metro cuadrado, mortalidad dentro del minijardín y porcentaje de enraizamiento de los brotes cosechados. Con el fin de garantizar madurez en el minijardín, la recolección de los datos inició a los seis meses de establecido. Las pruebas de enraizamiento se realizaron en un ambiente controlado a 30 °C de temperatura y 90 % de humedad relativa y bajo el protocolo de propagación vegetativa que utiliza GENFORES (Badilla Valverde, 2014; Murillo Gamboa et al., 2013).

Para efectos de comparación entre los arreglos espaciales, se utilizó el Índice de Productividad de Propagación Clonal (IPPC), como lo sugirieron Murillo Gamboa et al. (2013). El IPPC determina la productividad con base en el número de estaquillas producidas por m²/mes, para lo cual se utilizaron los parámetros: a) número de plantas madre/m², b) tasa de brotes por planta madre, c) frecuencia de cosecha del minijardín, d) tasa de enraizamiento, e) tasa de mortalidad en el minijardín, f) tasa mortalidad en área de enraizamiento (considerada como fija), y g) tasa de control de calidad final (considerado como fija). Se estimó el porcentaje de aumento en productividad con respecto al arreglo de 10x10 cm, por ser el espaciamiento más utilizado a nivel operativo.

Análisis de datos

Para el procesamiento de la información se utilizó Microsoft Excel 365 e InfoStat (IS) versión 2020. Se realizó una comprobación de los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas para las variables relacionadas con la producción de brotes, la mortalidad y el enraizamiento. Una vez verificado se procedió con el ANDEVA (p<0,05). Con las diferencias significativas determinadas entre los tratamientos, se aplicó una prueba de comparación múltiple con base en la prueba de Tukey.

Resultados

De manera general, el sustrato influyó en el sistema productivo de manera significativa en una mayor mortalidad cuando se mezcló con el carbón (Cuadro 1), mientras que el arreglo espacial y las repeticiones sí registraron

Cuadro 1. Efecto del sustrato y del arreglo espacial de siembra, en la productividad de minijardines clonales de *T. grandis*. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

Table 1. Substrates and spatial planting patterns effect on the productivity of *T. grandis* clonal mini-gardens. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

Fuente de Variación	Valor de p			
	Tasa brotadura (Brote/planta)	Producción de brotes por área (m ²)	Mortalidad (%)	Porcentaje de enraizamiento (%)
Sustrato	0,2645 ^{ns}	0,1793 ^{ns}	0,0290*	0,4946 ^{ns}
Arreglo espacial de siembra	0,0024**	<0,0001**	0,0239*	0,9359 ^{ns}
Sustrato*Arreglo espacial de siembra	0,1958 ^{ns}	0,1240 ^{ns}	0,1450 ^{ns}	0,2644 ^{ns}
Repetición	0,0119*	0,0230*	0,0004**	0,4425 ^{ns}
Repetición*Sustrato	0,3346 ^{ns}	0,2574 ^{ns}	0,7875 ^{ns}	0,3429 ^{ns}
Repetición* Arreglo espacial de siembra	0,0265 ^{ns}	0,0176 ^{ns}	0,4397 ^{ns}	0,6174 ^{ns}

Modelo: $Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_{ij} \epsilon_{ijk}$, * $p > 0,95$; ** $p > 0,99$; ns=no significativo. / Model: $Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_{ij} \epsilon_{ijk}$, * $p > 0,95$; ** $p > 0,99$; ns=not significant.

diferencias significativas en todas las variables. La tasa de mortalidad registró una significancia baja ($p < 0,95$) con respecto al sustrato y al arreglo espacial, aunque muy marcada para el efecto de la repetición. Los valores en el porcentaje de enraizamiento oscilaron entre un 98 % y 99 %, por lo que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos.

Los tamaños de partícula promedio presentes en los sustratos evaluados fueron 0,40, 0,84 y 2,38 mm, respectivamente (Cuadro 2). Las dos partículas de mayor tamaño representaron más del 35 % en la arena gruesa, mientras que solo el 8 % en la fina. El polvo de piedra se asemejó más a la arena gruesa en su composición de partículas, con un 31 % compuesto de partículas de mayor tamaño; mientras que la arena fina estuvo compuesta con dos partículas de menor tamaño (17,30 vs 17,00 %), que se diferenció de la composición de la arena gruesa con un 13,40 % de estas partículas de menor tamaño.

Cuadro 2. Distribución del tamaño granulométrico de partícula (%), para cada uno de los sustratos investigados en minijardines clonales de *T. grandis* en ambiente protegido. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

Table 2. Granulometric particle size distribution (%) for each of the investigated substrates in clonal mini-gardens of *T. grandis* in greenhouse. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

Tamaño partícula (mm)	Arena gruesa	Arena fina	Polvo piedra	Carbón
2,38	28,58	6,49	23,09	99,14
2,00	6,99	1,91	8,32	0,00
0,84	29,34	20,23	34,26	0,00
0,40	20,60	53,67	15,42	0,00
0,09	13,45	17,33	16,69	0,14
0,06	0,47	0,18	0,82	0,07
Residuo	0,59	0,21	1,39	0,46

Para la arena fina, más del 50 % de sus partículas eran de 0,4 mm, por lo que el 45 % de porosidad son espacios abiertos entre las partículas, lo que favoreció que el agua llenara estos espacios porosos. El carbón utilizado mostró partículas mayores a 2,38 mm y por ende, los poros; por esta razón presentó la capacidad de retención más baja de los cuatro sustratos evaluados (Cuadro 3).

Cuadro 3. Porosidad y capacidad de retención de agua (%) en los sustratos estudiados en minijardines clonales de *T. grandis* en ambiente protegido. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

Table 3. Porosity and water holding capacity (%) in substrates studied in clonal mini-gardens of *T. grandis* in greenhouse. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

Sustrato	Porosidad (%)	Capacidad de retención de agua (%)
Carbón	63,45	16,15
Arena gruesa	49,46	36,49
Arena fina	45,41	42,03
Polvo de piedra	39,01	29,01

Se pudo observar un gradiente de incremento en la producción de brotes conforme aumentó la densidad de plantas en el minijardín (Figura 1). De manera similar, ocurrió con la tasa de brotes por planta madre (Figura 2), aunque el gradiente se interrumpió con respecto al arreglo de siembra de 10x10*1/2 cm, que superó a los demás tratamientos evaluados.

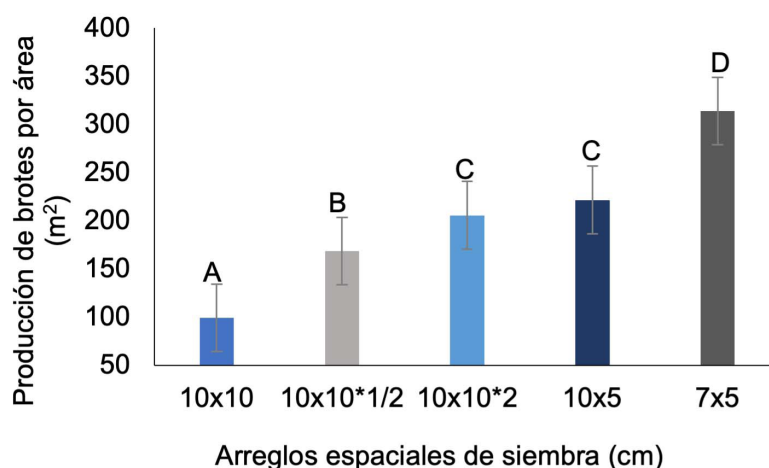


Figura 1. Producción de brotes por área (m²) en función de cinco arreglos espaciales de siembra, en minijardines clonales de *T. grandis* en ambiente protegido. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

*Las barras corresponden al error estándar.

Figure 1. Sprouting production rate per area (m²) as a function of five spatial planting patterns, in mini-clonal gardens of *T. grandis* in greenhouse. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

*The bars correspond to the standard error.

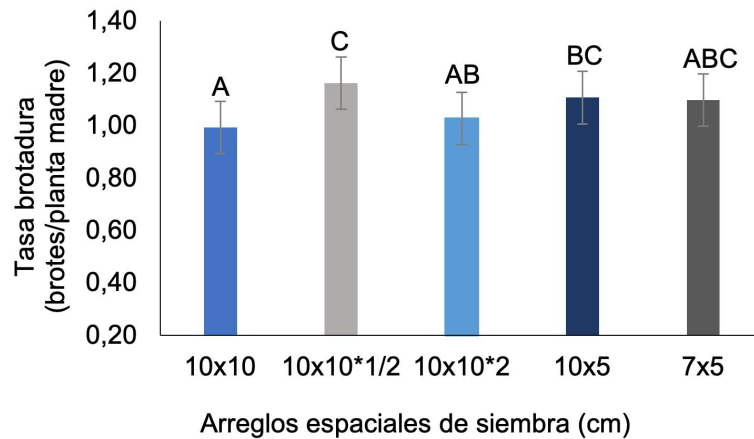


Figura 2. Tasa de brotadura por planta madre, en función de cinco arreglos espaciales de siembra, en minijardines clonales de *T. grandis* en ambiente protegido. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

*Las barras corresponden al error estándar.

Figure 2. Sprouting production rate per mother plant, as a function of five spatial planting patterns, in mini-clonal gardens of *T. grandis* in greenhouse. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

*The bars correspond to the standard error.

Para tasa de brotadura, la prueba Tukey mostró que el arreglo espacial 10x10 cm con planta en medio produjo 1,16 brotes por planta madre, seguido del arreglo 10x5 cm con una media de 1,11 brotes por planta. Ambos superiores a nivel estadístico al arreglo espacial 10x10 cm, con 0,99 brotes por planta, tasa más baja de todos los casos (Figura 2). Con respecto a la producción de brotes por metro cuadrado, la prueba mostró que el mejor arreglo espacial fue el 7x5 cm, con 314 brotes por metro cuadrado. Seguido del arreglo espacial 10x5 cm con 222 brotes y 10x10 cm con dos plantas por hoyo, con 206 brotes por metro cuadrado (Figura 1).

Dado que cada repetición estuvo conformada por un genotipo diferente, se observó diferencias significativas para las variables de producción. El clon 5x registró la mejor tasa de brotadura sembrado a 10x10 cm con planta en el medio (1,13 brotes/planta), mientras que el clon 1BA sembrado a 10x10 cm obtuvo el valor más bajo (0,86 brotes/planta y 86 brotes/m²). Para el caso en producción de brotes por área, el clon 53 sembrado a 7x5 obtuvo el valor más alto (334 brotes/m²). El efecto del genotipo en la producción podría ser de interés a futuro, para una planificación a gran escala de minijardines con lotes monoclonales.

La mortalidad demostró ser mayor en el sustrato que incluyó el carbón (Figura 3). Con respecto al arreglo espacial, la mayor mortalidad (>14 %) se registró para la densidad de 200 plantas/m² (10x10*2), mientras que la menor se observó en las densidades 10x10 y 10x5 cm, con un 4,6 y 4,4 %, respectivamente (Figura 4).

Con el índice IPPC, se pudo observar mayor productividad con el aumento en la densidad de siembra, a pesar de que algunos parámetros afectaron la producción como la tasa de brotadura por planta madre (Cuadro 4). Todos los arreglos espaciales superaron la capacidad de producción de estaquillas por unidad de área, en relación con el espaciamiento 10x10 cm.

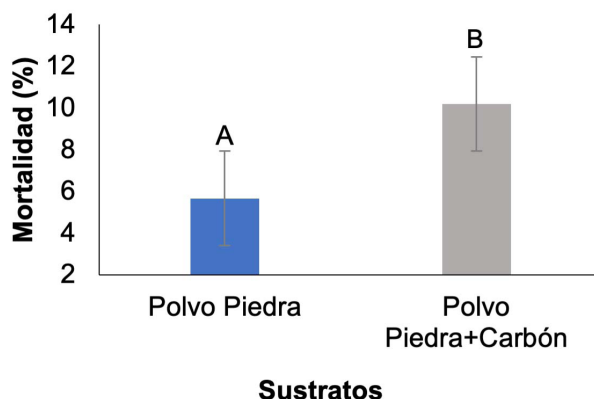


Figura 3. Mortalidad (%) por sustratos en minijardín clonal de *T. grandis* en ambiente protegido. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

*Las barras corresponden al error estándar.

Figure 3. Mortality (%) by substrates in mini-clonal gardens of *T. grandis* in greenhouse. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

*The bars correspond to the standard error.

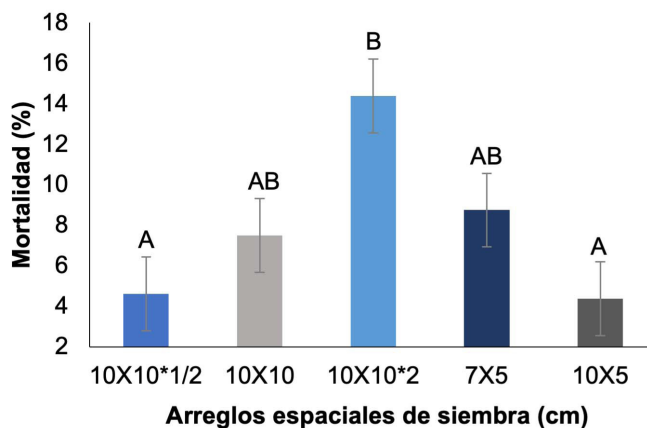


Figura 4. Mortalidad (%) por arreglo espacial de siembra, en minijardín clonal de *T. grandis* en ambiente protegido. San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

*Las barras corresponden al error estándar.

Figure 4. Mortality (%) for spatial planting patterns in mini-clonal gardens of *T. grandis* in greenhouse. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

*The bars correspond to the standard error.

Cuadro 4. Estimación del índice de productividad de propagación clonal de *T. grandis* en cinco arreglos espaciales de siembra, en ambiente protegido. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

Table 4. Estimation of the clonal propagation productivity index of *T. grandis* in five planting spatial patterns, in greenhouse. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), San Carlos, Costa Rica. 2021.

Arreglo espacial (cm)	10x10	10x10*1/2	10x10*2	10x5	7x5
Número plantas madre/m ²	100	145	200	200	285
Tasa de brotación (brotes por planta madre)	0,99	1,16	1,03	1,11	1,10
Tasa de enraizamiento (%)	98,6	98,6	98,6	98,6	98,6
Mortalidad en el minijardín clonal (%)	7,5	4,61	14,4	4,38	8,75
Mortalidad en área de aclimatación (%)	5	5	5	5	5
Control de calidad final (%)	15	15	15	15	15
Frecuencia de cosecha al mes	2	2	2	2	2
Tiempo de producción de una estaquilla para ir a campo (semanas)	8	8	8	8	8
IPPC N° plantas/m ² /mes	66	115	126	152	206
Aumento en productividad (%)	0	74	91	130	212

Discusión

Del análisis granulométrico, se determinó que la composición polvo de piedra presentó mayor diversidad en tamaño de partículas. Contuvo suficientes partículas finas que le confieren mayor capacidad de retención de agua. Investigaciones demostraron que sustratos con buena proporción en partículas favorecen el drenaje y promueven el intercambio de oxígeno, lo que mejora el crecimiento de las raíces (Gruda et al., 2013; Nelson et al., 2021). Con el polvo de piedra + carbón (25 %), es importante considerar que al combinarlas afecta las propiedades físicas del sustrato (Picken et al., 2008). Partículas mayores a 0,50 mm disminuyen la retención de humedad, la capacidad de aireación hasta un 84 %, debido al aumento del espacio poroso (Morales-Maldonado & Casanova-Lugo, 2015).

La producción de brotes por metro cuadrado aumentó la cantidad de plantas por área, comportamiento similar al reportado en estudios sobre minijardines clonales de *T. grandis* e *Hieronyma alchorneoides* en San Carlos (Murillo Gamboa et al., 2013) y en minijardines de *T. grandis* en Brasil (Badilla Valverde, 2014). Además, cultivos de chile dulce bajo invernaderos en Costa Rica, demostraron que una mayor densidad de siembra mejora los rendimientos por unidad de área (Soto-Bravo et al., 2020). Sin embargo, provoca una mayor competencia por recursos y una mayor mortalidad (Chaves Souza et al., 2014).

El arreglo espacial de siembra 10x10*1/2 cm (145 plantas/m²) rompió la tendencia con un efecto atípico y el registro más alto de brotes por planta madre. Estos resultados son contrarios a los reportados por Murillo Gamboa et al. (2013) con minijardines clonales de *T. grandis*, donde se observó un patrón inversamente proporcional entre la densidad de siembra y la tasa de producción de brotes por planta madre. Similar comportamiento fue reportado en *Capsicum baccatum*, Perú, ya que ocurrió una competencia menor entre las plantas por nutrientes y recurso hídrico (Paniagua-Hernández et al., 2020; Trujillo Sánchez, 2021). También, fue similar al reportado en eucalipto (Brasil), en un estudio sobre la producción de brotes en diferentes densidades de siembra (Chaves Souza et al., 2014).

La mortalidad de las plantas madre es una variable esencial en el manejo de los minijardines clonales. Al aumentarse la densidad de plantas hubo una tendencia al alza en la tasa de mortalidad (Figura 3). El caso más

evidente fue el del arreglo de 10x10 cm con dos plantas por hoyo. Este sistema de siembra registró una tasa mayor y significativa de mortalidad de casi el doble con respecto a los demás espaciamientos. De manera general, las diferencias observadas en mortalidad entre los tratamientos no fueron significativas (Figura 3b), con excepción del arreglo 10x10*2 plantas (N = 200).

Hubo efecto significativo de la repetición (genotipo) e interacción (repetición x arreglo espacial de siembra) en la productividad del minijardín, donde el clon IBA fue el más sensible cuando se plantó en arreglos de alta densidad. Un estudio realizado en Brasil en minijardines de *T. grandis* reportó la influencia del material genético en la propagación vegetativa (Badilla Valverde, 2014). En plantaciones energéticas de eucalipto, Brasil, se reportó el efecto del genotipo e interacción (genotipo x ambiente) en el rendimiento en la producción (Gomes da Cunha et al., 2021). El uso de cuatro genotipos, permitió un mayor control experimental, mayor representatividad de los resultados y confirió mayor robustez a la investigación (Badilla Valverde, 2014; Bonnin et al., 2020; Murillo Gamboa et al., 2013).

El sustrato y arreglo espacial no afectaron el porcentaje de enraizamiento de las estaquillas. Resultado similar fue reportado en *Saccharum officinarum* (Colombia) sobre la capacidad de enraizamiento por sistema de inmersión temporal, ya que el enraizamiento dependió de las concentraciones de citoquininas adicionadas al medio de cultivo (Sarria, 2022). La tasa de productividad siguió un patrón esperado, en un gradiente de aumento asociado a la densidad de siembra (Murillo Gamboa et al., 2013). La mortalidad siguió el mismo gradiente, pero no como para afectar los valores de productividad. Sembrar más denso en el minijardín podrá aumentar la producción de brotes por unidad de superficie.

En términos operativos, una densidad muy alta en el minijardín clonal implica un manejo más intensivo, cosechas más frecuentes, mayor riesgo de incidencia de patógenos, un manejo más cuidadoso del fertirriego. Cambiar el sistema operativo a una intensidad y volumen de trabajo más elevados, trae implicaciones en la organización del trabajo y personal. Por tanto, si se desea aumentar la productividad, es conveniente llevarlo a cabo por medio de cambios graduales en la densidad de siembra, para poder observar y adaptar todo el sistema operativo.

El cambio de un arreglo espacial de 10x10 cm a otro de 10x10*1/2 cm, no afectó de manera negativa el sistema y significó aumentar en 45 plantas/m², con un aumento de un 74 % la producción de estaquillas/m²/mes. Puede considerarse alto y de gran impacto en la eficiencia y costos de producción. Los otros dos espaciamientos más densos (10x5 y 7x5 cm) podrían ser considerados en una segunda etapa, que deberían evaluarse primero a escala experimental para su adopción paulatina.

Conclusiones

Se registró una mortalidad mayor con el uso de polvo de piedra mezclado con 25 % de carbón, comparado con el uso de polvo de piedra.

El arreglo espacial de siembra de 10x10 cm con una planta en el centro, registró la mayor producción de brotes por planta madre, la menor tasa de mortalidad y un aumento en la productividad del minijardín clonal.

Con la siembra de 285 plantas por metro cuadrado (7x5 cm) en el minijardín clonal, se alcanzó la mayor producción de mini estaquillas por metro cuadrado y la mayor tasa de productividad dentro del minijardín clonal.

El cambio de densidad de siembra del minijardín clonal, en una primera etapa a 10x10 cm con una planta adicional en el centro, resultó en un alto impacto en productividad, mayor eficiencia en el uso del espacio y en una mejor gradualidad del cambio en el sistema operativo.

Referencias

- Abreu Rezende, F., Hardt Ferreira dos Santos, V. A., Branco de Freitas Maia, C. M., & Moura Morales, M. (2016). Biochar na composição de substratos para a produção de mudas de teca. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 51(9), 1449–1456. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900043>
- Alvarado, A., & Raigosa, J. (2012). Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. *Agronomía Costarricense*, 36(1), 113–115.
- Arcanjo do Nascimento, D., Peres Filho, O., Guimarães Favare, L., Dias Souza, M., dos Santos, A., & Gomes Silva Junior, J. (2020). Inicial development of *Tectona grandis* L.f under nutritional restriction. *Revista FLORESTA*, 50(2), 1223–1230. <http://doi.org/10.5380/ufv.v50i2.62242>
- Badilla, Y., Xavier, A., & Murillo Gamboa, O. (2017). Storage time effect on mini-cuttings rooting in *Tectona grandis* Linn F. clones. *Revista Árvore*, 41(3), Article e410303. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000300003>
- Badilla Valverde, Y. (2014). *Clonagem de Tectona grandis Linn F. por estaquia e miniestaquia* [Tese de mestrado, Universidade Federal de Viçosa]. Locus Repositório Institucional da Universidade Federal de Viçosa. <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3158>
- Badilla-Valverde, Y., & Murillo-Gamboa, O. (2022). Selección clonal de *Tectona grandis* L. f. para el Pacífico seco de Costa Rica. *Uniciencia*, 36(1), 1–15. <https://doi.org/10.15359/RU.36-1.19>
- Bonnin, S. M., Faustino, L. I., Alvarez, J. A., & Graciano, C. (2020). ¿La combinación de clones posee alguna ventaja sobre los sistemas monoclonales? *Revista de La Facultad de Agronomía, La Plata*, 119(2), Artículo 051. <https://doi.org/10.24215/16699513E051>
- Calderón-Ureña, F., Esquivel-Segura, E., & Acevedo-Tapia, M. (2019). Manejo nutricional y de riego en minijardines clonales de *Tectona grandis* (Linn. F) en la zona sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 16(39), 43–52. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i39.4427>
- Camel, V., Galeano, E., & Carrer, H. (2017). Red de coexpresión de 320 genes de *Tectona grandis* relacionados con procesos de estrés abiótico y xilogénesis. *TIP*, 20(2), 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2017.04.001>
- Chaves Souza, C., Xavier, A., Palha Leite, F., Campos Santana, R., & Nogueira de Paiva, H. (2014). Densidade de minicepas em minijardim clonal na produção de mudas de eucalipto. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 34(77), 49–56. <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/512>
- de Camino Velozo, R., Villalobos, R., & Morales Aymerich, J. P. (2016). *Costa Rica case study. Prepared for FAO as part of the State of the World's Forests 2016 (SOFO)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-C0180e.pdf>
- Gomes da Cunha, T. Q., Chaveiro Santos, A., Novaes, E., Santiago Hansted, A. L., Minoru Yamaji, F., & Sette Jr, C. R. (2021). Eucalyptus expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. *Biomass and Bioenergy*, 144, Article 105900. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105900>
- Gruda, N., Gianquinto, Tüzel, Y., & Savvas, D. (2016). *Culture soil-less* (3rd ed.). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Gruda, N., Qaryouti, M. ., & Leonardi, C. (2013). Growing media. In Duffy, R (Ed.), *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops. Principles for Mediterranean climate areas* (pp. 271–302). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i3284e/i3284e.pdf>

- Hine, A., Rojas, A., Suarez, L., Murillo, O., & Espinoza, M. (2019). Optimization of pollen germination in *Tectona grandis* (Teak) for breeding programs. *Forests*, 10(10), Article 908. <https://doi.org/10.3390/f10100908>
- Holdridge, L. R. (1982). *Ecología basada en zonas de vida* (Tra. H. Jiménez Saa). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <https://bit.ly/3lhGxyd>
- Instituto Meteorológico Nacional. (s.f. a). *Clima en Costa Rica y variabilidad climática*. Recuperado el 08 de mayo del 2020, de <https://www.imn.ac.cr/web/imn/clima-en-costa-rica>
- Instituto Meteorológico Nacional. (s.f. b). Condiciones actuales del tiempo. Estación Automática del TEC, Sede Santa Clara, San Carlos, Alajuela. Recuperado el 30 de agosto del 2021, de <https://www.imn.ac.cr/especial/estacionStaClara.html>
- Koller, W., & Jan Walotek, P. (2015). *Global Teak trade in the aftermath of Myanmar's Log export Ban*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i5023e/i5023e.pdf>
- Meza Picado, V., Alfaro Jiménez, K., Bedoya Arrieta, R., Romero Mora, M., Valerio Madrigal, A., & Montenegro Salas, P. (2019). *Reforestación comercial en Costa Rica: regiones Huetar Atlántica, Huetar Norte y Chorotega* (1ª ed.). Universidad Nacional. https://www.fonafifo.go.cr/media/2976/reforestacion_comercial.pdf
- Monsalve-Paredes, M., & Bello-Alarcón, A. (2020). Evaluación antimicrobiana de extractos obtenidos de los residuos de la corteza de Teca (*Tectona grandis* L.f.). *CIENCIA UNEMI*, 13(32), 63–68. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol13iss32.2020pp63-68p>
- Monteuuis, O., & Goh, D. (2018). Teak clonal forestry. *Teaknet Bulletin*, 11(2), 2–12. [https://agritrop.cirad.fr/587824/1/OM&DGTeaknet 11-2018.pdf](https://agritrop.cirad.fr/587824/1/OM&DGTeaknet%2011-2018.pdf)
- Morales-Maldonado, E. R., & Casanova-Lugo, F. (2015). Mezclas de sustratos orgánicos e inorgánicos, tamaño de partícula y proporción. *Agronomía Mesoamericana*, 26(2), 365–372. <https://doi.org/10.15517/am.v26i2.19331>
- Murillo, O., & Guevara, V. (2013). *Estado de los recursos genéticos forestales de Costa Rica 2012*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/be886s/be886s.pdf>
- Murillo, O., de Resende, M. D. V., Badilla, Y., & Gamboa, J. P. (2019). Genotype by environment interaction and teak (*Tectona grandis* L.) selection in Costa Rica. *Silvae Genetica*, 68, 116–121. <https://doi.org/10.2478/sg-2019-0020>
- Murillo Gamboa, O., Badilla Valverde, Y., Villalobos, M., & Rojas Parajeles, F. (2013). *Optimización de la tecnología de propagación vegetativa in vivo y plantación de teca y pilón* (Informe Final de Proyectos de Investigación). Repositorio del Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://bit.ly/40FNIQM>
- Murillo Gamboa, O., Espitia Camacho, M., & Castillo Pinedo, C. (2012). *Fuentes semilleras para la producción forestal* (1ª ed.). Editorial Domar S.A.S.
- Murillo-Gamboa, O., Badilla-Valverde, Y., & Barboza-Flores, S. (2018). Costos de producción en ambiente protegido de clones para reforestación. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15(37), 15–24. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i37.3599>
- Nelson, S. D., Nelson, M. D., Nelson, D. S., Johnston, D., & Nelson, S. C. (2021, March 30th). *Plant substrate growing medium* (Patent US10959384B2). Veritas Substrates LLC. <https://patents.google.com/patent/US10959384B2/en>
- Paniagua-Hernández, L. D., Arias-Gamboa, L. M., Alpízar-Naranjo, A., Castillo-Umaña, M. Á., Camacho-Cascante, M. I., Padilla-Fallas, J. E., & Campos-Aguilar, M. (2020). Efecto de la densidad de siembra y edad de rebrote en la producción y composición bromatológica de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray. *Pastos y Forrajes*, 43(4), 275–283. <https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path%5B%5D=2202>

- Picken, P., Reinikainen, O., & Herranen, M. (2008). Horticultural peat raw material and its chemical and physico-chemical characteristics in Western Finland and Western Estonia. *Acta Horticulturae*, 779, 415–422. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2008.779.52>
- Quesada Roldán, G., & Marin Thiele, F. (2014). *Una metodología para la evaluación de sustratos para agricultura protegida*. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1599.pdf>
- Rojas Parajeles, F., & Abdelnour Esquivel, A. (2012). Brotación *in vitro* de yemas de teca (*Tectona grandis* L. f.). *Tecnología en Marcha*, 25(5), 67–72. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i5.475>
- Sarria, Y. V. (2022). *Evaluación de tres medios de cultivo en enraizamiento de caña de azúcar (Saccharum officinarum) por sistema de inmersión temporal* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/47869>
- Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry - A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), 280–293. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>
- Semida, W. M., Beheiry, H. R., Sétamou, M., Simpson, C. R., Abd El-Mageed, T. A., Rady, M. M., & Nelson, S. D. (2019). Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. *South African Journal of Botany*, 127, 333–347. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.11.015>
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105, 47–82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Soto-Bravo, F., Araya-Cubero, E. A., & Ehandi-Gurdian, C. (2020). Efecto de la densidad de siembra y volumen de sustrato sobre parámetros de riego y rendimiento de chile dulce ‘dulcítico’, en hidroponía bajo invernadero. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 43–64. <https://doi.org/10.15517/RAC.V44I1.40001>
- Tamarit-Urias, J. C., De los Santos-Posadas, H. M., Aldrete, A., Valdez-Lazalde, J. R., Ramírez-Maldonado, H., & Guerra-De la Cruz, V. (2019). Sistema de crecimiento y rendimiento maderable para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Campeche, México. *Madera y Bosques*, 25(3), Artículo e2531908. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531908>
- Trujillo Sánchez, M. (2021). *Densidad de siembra en la producción y calidad de ají escabeche (Capsicum baccatum L. var. pendulum), en cañete*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Ugalde Alfaro, S. (2021). *Balanza Comercial y Tendencias de las Exportaciones e Importaciones de madera y muebles de madera en Costa Rica. Estadísticas 2020*. Oficina Nacional Forestal. <https://bit.ly/3lh3Yrl>
- Xavier, A., Wendling, I., & da Silva, R. L. (2009). *Silvicultura clonal. Principios e técnicas* (2ª ed.). Editora Universidade Federal de Viçosa.
- Xie, L., Lehvavirta, S., & Valkonen, J. P. T. (2020). Case study: Planting methods and beneficial substrate microbes effect on the growth of vegetated roof plants in Finland. *Urban Forestry and Urban Greening*, 53, Article 126722. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126722>