

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación
**Efecto de métodos de establecimiento y fertilización en sobrevivencia y
crecimiento inicial de *Tectona grandis* en Zamorano, Honduras**

Estudiante

Marlyn Yurieth Espinosa Villarreal

Asesores

Josué Aníbal León Carvajal, Mtr.

Regina Lisbeth Castro Martínez, Ing.

Honduras, agosto 2025

Autoridades

KEITH ANDREWS

Rector i.a.

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

VICTORIA CORTÉS MATAMOROS

Directora Departamento de Ambiente y Desarrollo

JULIO NAVARRO

Secretario General

Agradecimientos

Extiendo mi más profundo agradecimiento al personal de la Unidad de Viveros y Plantaciones Forestales de la Escuela Agrícola Panamericana, quienes me brindaron un apoyo constante durante todo el trabajo de campo, demostrando siempre una actitud positiva y una disposición ejemplar para colaborar en el desarrollo de este Proyecto Especial de Graduación. Asimismo, agradezco al Banco Nacional de Panamá por haber financiado mi formación educativa durante 4 años en Zamorano, lo cual ha sido fundamental para culminar este proceso esencial en mi desarrollo profesional.

Contenido

Agradecimientos	3
Índice de Cuadros.....	6
Índice de Figuras	7
Índice de Anexos	8
Resumen	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Metodología.....	15
Localización de Estudio	15
Diseño Experimental	16
Producción de Plántulas en Vivero	18
Plántulas en Contenedor Plástico	19
Plántulas en Bolsas de Polietileno	20
Análisis de Suelo en el Sitio de Estudio.....	20
Manejo y Acondicionamiento del Sitio Experimental.....	22
Establecimiento de la Plantación	22
Determinación de Supervivencia de la Plantación	22
Elaboración de Microorganismos de Montaña.....	23
Análisis Físicoquímico del Biol de Cerdo (BC) y Microorganismos de Montaña (MM).....	24
Fertilizantes y Dosis de Aplicación	24
Aplicación de Tratamientos	25
Recolección de Datos	28
Análisis Estadístico	29
Resultados y Discusión.....	31

Sobrevivencia de la Plantación de <i>Tectona grandis</i> en Función de los Métodos de Establecimiento, Tipo y Dosis de Fertilización.....	31
Comparación del Crecimiento Inicial en Campo de <i>Tectona grandis</i> en Dos Métodos de Establecimiento de la Plantación.....	33
Validación del Modelo de Parcelas Dividas	33
Altura Total en Respuesta al Método de Establecimiento	34
Diámetro Basal en Respuesta al Método de Establecimiento.....	36
Efecto Diferencial de Dos Dosis de Fertilizantes Químicos y Orgánicos en el Crecimiento Inicial de la <i>Tectona grandis</i>	38
Altura total en Respuesta a Tratamientos de Fertilización.....	38
Diámetro Basal en Respuesta a Tratamientos de Fertilización	41
Efectos entre Dosis de Tratamientos	44
Análisis de Fertilizantes Orgánicos.....	45
Conclusiones	48
Recomendaciones.....	49
Referencias.....	50
Anexo	56

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Dosis de aplicación de fertilizantes y frecuencia por planta según cada tratamiento.....	28
Cuadro 2 Prueba de comparación de medias para la plantación de teca	33
Cuadro 3 Modelo lineal general mediante mínimos cuadrados para la variable altura total (cm).....	34
Cuadro 4 Modelo lineal general mediante mínimos cuadrados para la variable diámetro basal.....	36
Cuadro 5 Medias ajustadas (LSMEANS) para altura total según método y fertilizante	39
Cuadro 6 Resultado de Análisis de suelo en el sitio de diseño experimental.....	40
Cuadro 7 Medias ajustadas (LSMEANS) para diámetro basal según método y fertilizante.....	42
Cuadro 8 Composición fisicoquímica de los fertilizantes del biol de cerdo y los Microorganismos de montaña.....	45
Cuadro 9 Fertilizante acumulado en todas las aplicaciones desde octubre 2024 a marzo 2025.....	46

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de ubicación de plantación de teca, Zamorano.....	15
Figura 2 Representación gráfica del diseño experimental.....	17
Figura 3 Actividades de campo realizadas durante la investigación.	18
Figura 4 Dimensión del contenedor plástico para la propagación de plántulas de teca.....	19
Figura 5 Dimensión de bolsas de polietileno para plántulas de teca	20
Figura 6 Sitio y protocolo de muestreo de suelo en el área de estudio.	21
Figura 7 Proceso para elaborar Microorganismos de Montaña.	23
Figura 8 Dilución de biofertilizantes por planta.....	27
Figura 9 Porcentaje de sobrevivencia en campo de plantas de teca por tratamiento.....	31
Figura 10 Distribución de altura de la teca en campo por cada método de establecimiento.....	35
Figura 11 Distribución de diámetro por métodos de establecimiento.....	37
Figura 12 Distribución de altura por tipo de fertilizante	40
Figura 13 Distribución de diámetro basal por tipo de fertilizante.....	43
Figura 14 Distribución de altura total (A) y diámetros (B) para dosis 1 y dosis 2.....	44

Índice de Anexos

Anexo A Fotografía del establecimiento del ensayo en la plantación.....	56
Anexo B Fotografía del análisis de Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃) y Fosfatos (PO ₄) en laboratorio	57
Anexo C Visualización de dosis de fastrac® a 50 g (A) y 75 g (B)	58
Anexo D Almacenamiento y reposo de los fertilizantes orgánicos.....	59
Anexo E Sensor de medición de humedad en el suelo	60
Anexo F Registro de variables de altura y diámetro	61
Anexo G Registro de datos de sobrevivencia por tratamiento.....	62
Anexo H Datos atípicos en tratamiento de contenedor y bolsa de polietileno.....	63

Resumen

Tectona grandis es una especie maderable valiosa en Honduras, pero su producción se limita por el uso de bolsas y la ausencia de planes de fertilización, a pesar de las numerosas investigaciones sobre la calidad de su madera. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de dos métodos de establecimiento (bolsas de polietileno y contenedores plásticos) y tres tipos de fertilizantes (Fastrac®, biol de cerdo y Microorganismos de montaña) en la sobrevivencia y crecimiento inicial de teca en Zamorano, Honduras. Se utilizó un diseño de parcelas divididas con arreglo en bloques con 48 unidades experimentales. Se realizó un inventario de plantas vivas por tratamiento para determinar la sobrevivencia. Se aplicó diferentes dosis de fertilizante a plantas en bolsas de polietileno y contenedor plástico. La mayor sobrevivencia se logró con la combinación de bolsas + Microorganismos de montaña + dosis 2, que corresponde a la aplicación cada 6 semanas. Los resultados mostraron que las plántulas en bolsas de polietileno tuvieron mayor crecimiento en altura y diámetro siendo el mejor tratamiento el de bolsa + Biol de cerdo + dosis 1 (BBCD1) aplicada cada 3 semanas. Los contenedores plásticos no mostraron resultados favorables. Se concluye que el uso de bolsas de polietileno optimiza el crecimiento y sobrevivencia de la teca. Los fertilizantes favorecen el crecimiento inicial de *Tectona grandis*. Se recomienda seguir evaluando tipos y tamaños de contenedores plásticos y establecer planes de fertilización orgánica como alternativa sostenible a la fertilización química favoreciendo la interacción en la microbiota del suelo.

Palabras clave: Biol de cerdo, bolsas de polietileno, contenedor plástico, Fastrac®, microorganismos de montaña.

Abstract

Tectona grandis, a valuable timber species in Honduras, has limited production due to the use of bags and the absence of fertilization plans, despite extensive research on the quality of its wood. This study evaluated the effects of two teak establishment methods (polyethylene bags and plastic containers) and three types of fertilizers (Fastrac®, pork manure, and Mountain Microorganisms) on survival and initial growth in Zamorano, Honduras. A split-plot design with a block arrangement was used with 48 experimental units. An inventory of living plants per treatment was conducted to determine survival. Different fertilizer doses were applied to plants in polyethylene bags and plastic containers. The highest survival rate was achieved with the combination of bags + Mountain Microorganisms + dose 2, corresponding to an application schedule of every 6 weeks. The results showed that seedlings in polyethylene bags exhibited greater height and diameter growth, with the most favorable treatment being the combination of bag + pig manure + dose 1 (BBCD1) applied every 3 weeks. Plastic containers did not produce favorable results. In conclusion, using polyethylene bags optimizes the growth and survival of teak. Fertilizers promote the initial growth of *Tectona grandis*. Further evaluation of plastic container types and sizes is recommended, as well as the establishment of organic fertilization plans as a sustainable alternative to chemical fertilization, that promotes interaction in the soil microbiota.

Keywords: Fastrac®, Mountain Microorganisms, plastic container, polyethylene bags, pork
biol.

Introducción

Tectona grandis, mejor conocida como teca, es una de las especies más reconocidas a nivel mundial debido a sus propiedades excepcionales, compitiendo en valor comercial con otras especies destacadas como el cedro (*Cedrelka odorata*) y la caoba (*Swietenia macrophylla*) (Blanco-Flórez et al., 2014). En la región centroamericana, este maderable es una de las especies más plantadas (López et al., 2018). La teca destaca como una especie forestal de alto valor comercial, ya que su madera puede alcanzar precios desde USD 80 hasta USD 250 por metro cúbico en campo, y entre USD 160 y USD 410 por metro cúbico en puerto de destino, según la etapa de aprovechamiento (Camino y Pierre, 2013).

Las plantaciones forestales forman parte de las actividades productivas que generan mayor impacto ambiental, social y económico. Esta proporciona una serie de servicios ecosistémicos como la fijación de dióxido de carbono atmosférico incluso después de dar valor agregado a la madera. Debido a su tasa de fijación de carbono (5.4 Ton C/ha-año) esta plantación es importante para mitigar el cambio climático y generar productos u otros servicios que benefician a los productores y sus familias (Patiño et al., 2018). Esto ha permitido que la silvicultura modifique su enfoque productivo, dando mayor importancia a la biodiversidad, la captura de carbono y la protección de los recursos, especialmente el suelo (Kollert y Kleine, 2017).

Tectona grandis destaca por su capacidad para sintetizar sustancias bioactivas en tejidos foliares y caulinares, las cuales confieren resistencia natural contra plagas y patógenos (Chaiya et al., 2021). Esta especie presenta una elevada demanda nutricional, aunque muestra adaptabilidad a diversos tipos de suelos (Santos et al., 2022). Esto resalta la importancia de *Tectona grandis* como una especie con gran potencial agronómico, debido a su resistencia fitosanitaria y su notable capacidad de aclimatación. Según Salcedo Pérez et al. (2019), en condiciones tropicales, la productividad de plantaciones no nativas está directamente asociada a la salud del suelo y la disponibilidad de nitrógeno, pero en Honduras se registran suelos con bajo contenido de materia orgánica (Arévalo et al., 2022).

En estudios realizados en países centroamericanos como Guatemala, Costa Rica y Panamá, se ha encontrado que las plantaciones de *Tectona grandis* comparten aspectos comunes en su manejo, basándose en actividades silvícolas como la preparación del suelo, fertilización y procesos de encalado durante el establecimiento. Sin embargo, no siempre se dispone de dosis de aplicación estandarizada, y en algunos casos, estas son proporcionadas empíricamente por casas comerciales o proveedores (Fernández-Moya et al., 2015). Los fertilizantes, especialmente los nitrogenados, son fundamentales en la producción agrícola, por lo que es crucial utilizarlos de manera responsable (Quemada y Gabriel, 2023).

Ante estos desafíos que impactan la sostenibilidad de los recursos, emergen modelos agroambientales integrados que incorporan procesos naturales (ciclos biológicos) y la valorización de residuos, fortaleciendo la capacidad adaptativa de los ecosistemas, mejorando la autorregulación y resiliencia en sistemas agroforestales a mediano y largo plazo (Montagnini et al., 2015). Estos cambios implican la incorporación de biofertilizantes que contienen microorganismos beneficiosos para los procesos biológicos del suelo y los agroecosistemas (Rodríguez-Calampa y Tafur-Torres, 2014). Estos microorganismos realizan procesos metabólicos esenciales, como la degradación de la materia orgánica y la supresión de patógenos, lo que facilita la biodisponibilidad de los nutrientes en el suelo.

Los productos no fertilizantes favorecen el crecimiento y desarrollo de las plantas incluso con cantidades pequeñas de nutrientes (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2016), por ello, la utilización de bioestimulantes ha experimentado un notable incremento, impulsada por la necesidad de enfrentar las variaciones en factores ambientales como la temperatura, la luz y la humedad, que afectan los procesos de producción agrícola generando estrés en las plantas (Barraza et al., 2019). Estos insumos contribuyen a mejorar la tolerancia de los cultivos frente a condiciones adversas, favoreciendo el crecimiento y el desarrollo vegetal mediante la activación de mecanismos fisiológicos y bioquímicos.

El biol de cerdo es un efluente que se obtiene a través del proceso de fermentación anaerobia de purines y otros residuos orgánicos en biodigestores. Este producto tiene efecto en el crecimiento y rendimiento de los cultivos debido a su composición de precursores hormonales como ácido indol acético, giberelinas y vitaminas (Gil et al., 2022). Por otra parte, la combinación de Microorganismos de montaña provenientes de ecosistemas naturales pueden coexistir en un medio líquido y generar las condiciones necesarias para mantener su activación (Itzá-Kantún et al., 2024). Los microorganismos responden rápidamente a estímulos ambientales y son capaces de generar productos del metabolismo que contribuyen con la fertilidad del suelo (Ramos y Zúñiga, 2008).

De este modo, el aprovechamiento de insumos biológicos y microorganismos benéficos resulta fundamental para optimizar las condiciones de crecimiento de plántulas en el vivero, siendo esta etapa importante que define de gran manera el desempeño de la plantación luego del trasplante en campo. El uso de bolsas plásticas es un método muy común y barato en viveros de América Latina, sin embargo, cuando las raíces crecen y salen de la bolsa, pueden dañarse al sacar la planta del vivero. Además, las raíces tienden a enrollarse dentro de la bolsa, lo que puede afectar el crecimiento de la planta tras el trasplante (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2020).

Comúnmente, la Unidad de Viveros y Manejo Forestal en Zamorano ha utilizado bolsas de polietileno para la producción de plántulas de *Tectona grandis*, pero en los últimos años se ha implementado contenedores plásticos para germinar y desarrollar diversas especies, como el pino. En la plantación de plantines en contenedor se logra un mejor desempeño porque su sistema radicular se forma un cepellón firme (Luna et al., 2012).

Dado que la selección de fertilizantes apropiados es fundamental para el establecimiento exitoso de plantaciones forestales, el presente estudio busca evaluar el efecto de dos métodos de establecimiento y fertilización sobre la sobrevivencia y el crecimiento inicial de *Tectona grandis* en las plantaciones de Zamorano. Los objetivos específicos de esta investigación son: determinar la sobrevivencia de la plantación de *Tectona grandis* en función de los métodos de establecimiento, tipo

y dosis de fertilización; evaluar el crecimiento inicial de *Tectona grandis* en dos métodos de establecimiento mediante la altura total y el diámetro basal del tallo y; evaluar el efecto diferencial de dos dosis de fertilizantes químicos y orgánicos en el crecimiento inicial de la *Tectona grandis*.

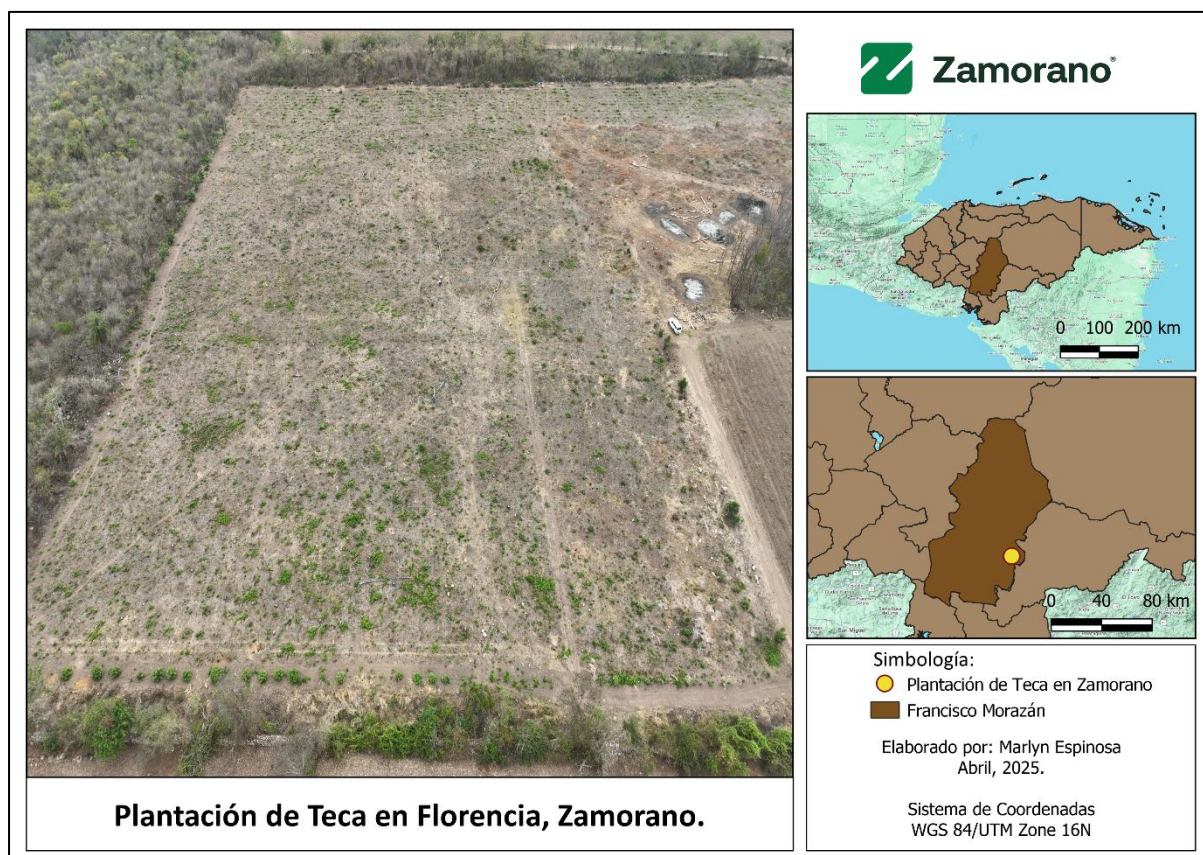
Metodología

Localización de Estudio

En este estudio se estableció una plantación de *Tectona grandis* ubicada en el lote denominado Florencia de la Escuela Agrícola Panamericana ($14^{\circ}01'13.8''\text{N}$ $87^{\circ}00'29.7''\text{O}$) (Figura 1), a 32 km de Tegucigalpa, Honduras. La plantación se encuentra a una altitud de 810 msnm con una precipitación anual de 1,100 mm distribuida durante los meses de mayo a noviembre con temperatura promedio de 24°C . El terreno de 1.2 ha se encuentra bajo la responsabilidad de la Unidad de Manejo Forestal. El suelo presenta una textura franco-arenosa, con una composición granulométrica de 62% de arena, 18% de limo y 20% de arcilla con abundante materia orgánica.

Figura 1

Mapa de ubicación de plantación de teca, Zamorano.



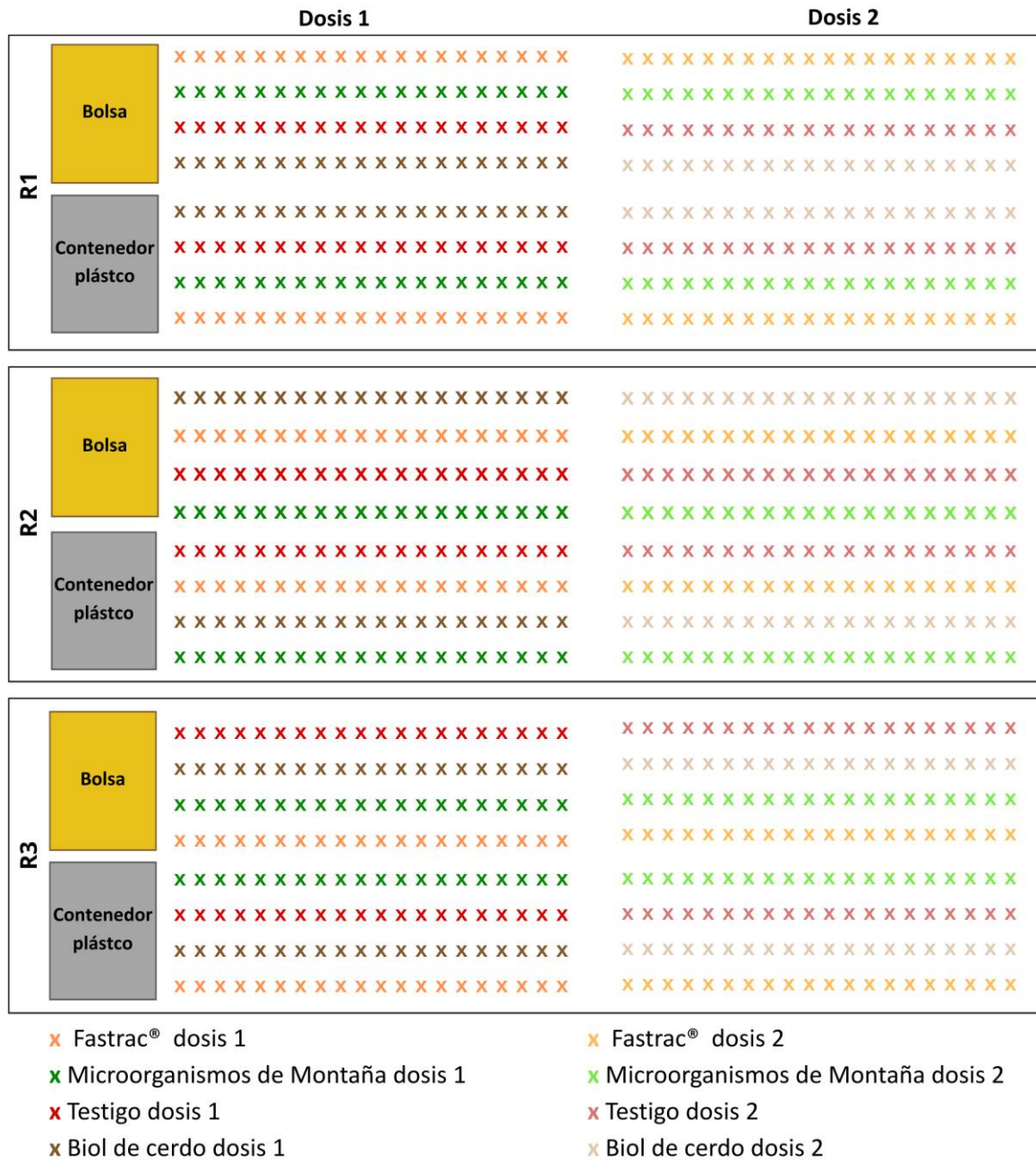
Diseño Experimental

Para este estudio se implementó un diseño experimental de parcelas divididas con un arreglo en bloques en un área de 1.2 ha. El diseño incluyó tres bloques (R1, R2 y R3), dos factores en parcelas principales que corresponden a métodos de establecimiento (bolsas de polietileno 1810 cc y contenedores plásticos de 400 cc) y un arreglo factorial 4×2 en subparcelas (cuatro tipos de fertilizantes y dos dosis), resultando un total de 48 unidades experimentales (Figura 2). En cada bloque de 0.4 ha se, las parcelas principales correspondientes a los métodos de establecimiento donde se evaluó el efecto sobre la altura total (cm) y el diámetro basal (mm) de las plántulas. Cada parcela principal contenía hileras de 40 plantas que fueron divididas en dos secciones de 20 plantas cada una. La primera sección recibió la dosis 1 y la segunda sección la dosis 2, estableciendo así las subparcelas donde se evaluaron los diferentes tratamientos de fertilización.

Los tratamientos de fertilización consistieron en cuatro tipos de fertilizantes (Fastrac®, Microorganismos de montaña, testigo sin fertilización y biol de cerdo) aplicados en dos niveles de dosis. Para los fertilizantes orgánicos (biol de cerdo y Microorganismos de Montaña), la dosis 1 se aplicó con mayor frecuencia, mientras que la dosis 2 correspondió a menor frecuencia. En el caso del fertilizante sintético Fastrac®, la dosis 1 se aplicó con mayor cantidad y la dosis 2 fue de menor cantidad. Si bien la distribución de los métodos de establecimiento dentro de cada bloque fue sistemática, los tratamientos de fertilización dentro de cada parcela principal se asignaron aleatoriamente utilizando la fórmula de aleatorización de "Microsoft Excel®" para garantizar mayor robustez estadística del experimento. La disposición completa del diseño experimental permitió evaluar simultáneamente los efectos del método de establecimiento, tipo de fertilizante y dosis, así como sus posibles interacciones sobre el desarrollo inicial de *Tectona grandis*.

Figura 2

Representación gráfica del diseño experimental.



El sitio experimental se caracteriza por sus condiciones homogéneas del suelo en todos los bloques, garantizando la uniformidad del ensayo. Las variables dependientes consideradas para evaluar el efecto de los tratamientos fueron la altura total (cm) y el diámetro basal del tallo (mm) y para la sobrevivencia se realizó el inventario de plantas vivas.

Para el logro de los objetivos propuestos, la investigación siguió una metodología secuencial y estructurada que integró ocho procesos fundamentales (Figura 3). El trabajo comenzó con la producción de plántulas de *Tectona grandis* por un periodo de 3 meses y el análisis de suelo del área a plantas para determinar las condiciones edáficas iniciales. Posteriormente, se realizó el establecimiento de la plantación experimental según el diseño previamente descrito en una extensión de 1.2 ha aproximadamente. El manejo silvicultural se implementó de manera estandarizada para todas las unidades experimentales, asegurando condiciones homogéneas a excepción de los factores en estudio. Paralelamente, se preparó la solución a base de los Microorganismo de Montaña y se realizó el análisis de los biofertilizantes para caracterizar el aporte nutricional. Finalmente, se aplicaron los tratamientos de fertilización según las dosis establecidas, permitiendo evaluar sistemáticamente el efecto de los métodos de establecimiento y los regímenes de fertilización sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas de teca en sus etapas iniciales.

Figura 3

Actividades de campo realizadas durante la investigación.



Producción de Plántulas en Vivero

En esta investigación se evaluaron dos métodos iniciales de establecimiento de *Tectona grandis*: el primero consistió en el uso de bolsas de polietileno, comúnmente empleadas en la Unidad de Viveros y Manejo Forestal; el segundo método evaluado fue el uso de contenedores plásticos de 400 cc, comúnmente utilizados para producción de especies latifoliadas.

Plántulas en Contenedor Plástico

Mejía (2024) aplicó un protocolo para la propagación de *Tectona grandis*, iniciando con la germinación en camas de arena estabilizada bajo condiciones controladas en febrero del 2024. En la fase de trasplante, utilizó contenedores plásticos de 400 cc (Figura 4) con un sustrato técnicamente formulado compuesto por 80% de Pindstrup® (sustrato reutilizado de alta calidad), 10% de perlita y 10% de vermiculita, enriquecido con 1.5 g de fertilizante de liberación controlada Osmocote®. Esta composición específica fue seleccionada para estudiar su desempeño en campo tras comprobar en estudios previos, su efectividad para promover un desarrollo radicular significativamente superior en términos de volumen y ramificación (Mejía, 2024). El fertilizante empleado en esta composición presenta una formulación balanceada que incluye 15% de nitrógeno, 9% de fósforo (P_2O_5), 5% de potasio (K_2O), complementada con 2.1% de magnesio (MgO), 5.9% de azufre (S), y 0.66% de micronutrientes esenciales (Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo) que garantizan un suministro sostenido de nutrientes durante las fases críticas de desarrollo.

Figura 4

Dimensión del contenedor plástico para la propagación de plántulas de teca.

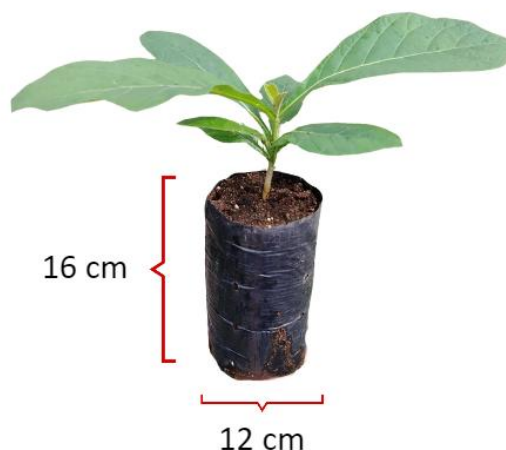


Plántulas en Bolsas de Polietileno

Las plántulas en bolsa se produjeron en el vivero de la Unidad Forestal en febrero del 2024 y se utilizó bolsas de 1,810 cc (Figura 5) con un sustrato compuesto por 60% tierra negra, 20% estiércol y 20% arena. La fertilización se realizó mediante dos aplicaciones planificadas de Fastrac®: 0.5 g 1 semana después del trasplante y una dosis idéntica a los 2 meses, optimizando así la nutrición durante las fases críticas de desarrollo. Esta metodología se alinea con las prácticas recomendadas por Aldrete et al. (2015), quienes demostraron que las aplicaciones fraccionadas de fertilizantes de liberación lenta en etapas específicas del desarrollo mejoran significativamente el crecimiento inicial y la calidad de plántulas forestales en vivero.

Figura 5

Dimensión de bolsas de polietileno para plántulas de teca



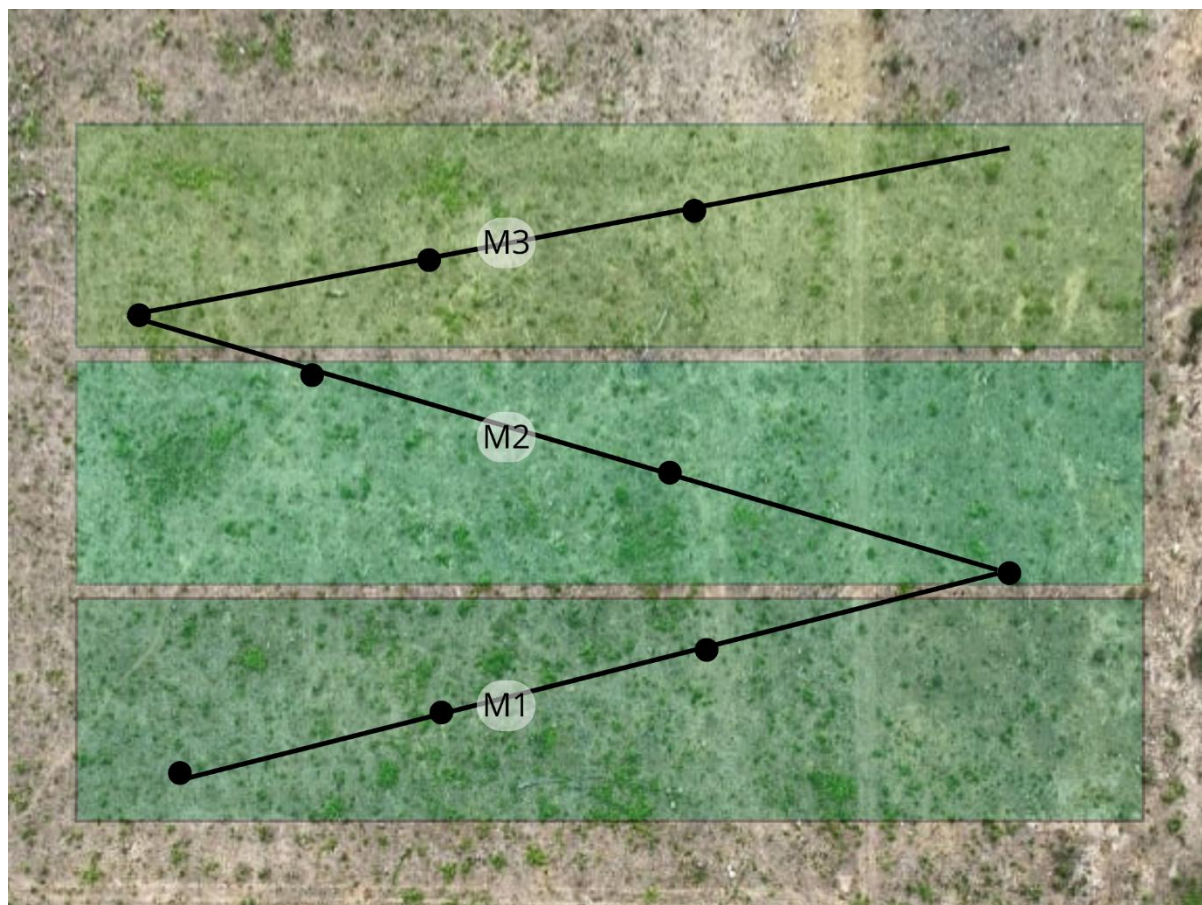
Análisis de Suelo en el Sitio de Estudio

El muestreo edáfico se llevó a cabo mediante un diseño compuesto estratificado por bloque experimental. En cada bloque, se recolectó una muestra compuesta formada por submuestras (M1, M2, M3) extraídas a 10 cm de profundidad según Múnera (2012), siguiendo el protocolo de zigzag (Figura 6). Posteriormente, se mezclaron las submuestras y se identificaron a través de etiquetas con

datos básicos como nombre de muestra, nombre del estudiante, fecha y hora para ser llevadas al Laboratorio de Suelos de Zamorano.

Figura 6

Sitio y protocolo de muestreo de suelo en el área de estudio.



Nota. M1= muestra 1; M2= muestra 2; M3=muestra 3.

El análisis proporcionado por el laboratorio de suelos de Zamorano permitió evaluar la homogeneidad fisicoquímica de los bloques experimentales y reducir la variabilidad interna mediante parámetros como el pH, el porcentaje de materia orgánica (%M.O.), textura, granulometría, saturación de bases, relaciones iónicas y las concentraciones de macronutrientes y micronutrientes. Este enfoque metodológico aseguró una representación precisa de las condiciones edáficas en cada bloque experimental de 0.4 ha, así como en la totalidad del ensayo (1.2 ha), estableciendo una base comparativa sólida para interpretar los efectos asociados a los tratamientos evaluados.

Manejo y Acondicionamiento del Sitio Experimental

La preparación del terreno comenzó con el desmalezado y la recolección de residuos de madera de la cosecha anterior para reducir la competencia por espacio y nutrientes facilitando el establecimiento de las plántulas. Se realizó el comaleo alrededor de cada planta, delimitando un área de 1 m de diámetro para controlar malezas, ya que la planta es heliófila y requiere de un espacio amplio para el desarrollo apropiado (Fonseca, 2004). La plantación dependió exclusivamente de las lluvias, sin sistema de riego. A los 7 meses se efectuó la poda de rebrotes para optimizar el desarrollo, complementada con monitoreos periódicos para detectar plagas o daños mecánicos.

Establecimiento de la Plantación

El establecimiento del ensayo experimental se realizó en un lote seleccionado por su accesibilidad, uniformidad de textura del suelo y topografía plana. Este terreno albergó previamente una plantación de pino con más de 30 años de antigüedad, presentando mínima intervención antropogénica. El trasplante en campo se realizó manualmente en julio de 2024, con un distanciamiento de 4 x 3.5 metros entre plantas similar al distanciamiento recomendado por Fonseca (2004). También, Tamarit-Urias et al. (2019), evaluaron diversos espaciamientos para maximizar el crecimiento inicial y la calidad de madera en plantaciones comerciales de teca. Para el ensayo, se establecieron cuatro hileras con plántulas provenientes de bolsas, seguidas de cuatro hileras con plántulas de contenedores plásticos (Anexo A), repitiendo este patrón hasta completar las 24 hileras, con un total de 960 plantas incluidas en el estudio.

Determinación de Supervivencia de la Plantación

Para determinar el porcentaje de supervivencia, se realizó un conteo exhaustivo de plantas vivas transcurridos los 7 meses desde el establecimiento inicial. Este periodo fue seleccionado estratégicamente para evaluar la adaptación de las plántulas después de haber superado la época crítica de estrés hídrico en la zona de estudio, la cual se extiende desde noviembre hasta abril del siguiente año. Esta temporada seca representa el periodo de mayor vulnerabilidad para las

plantaciones forestales recién establecidas en Zamorano, Honduras.

Para el cálculo del porcentaje de sobrevivencia se adaptó la Ecuación 1 de Jiménez y Palacios (2023):

$$\%sobrevivencia = \frac{\sum \bar{pv}}{pv+pm} \times 100 \quad [1]$$

Donde:

\bar{pv} = promedio de plantas vivas por tratamiento

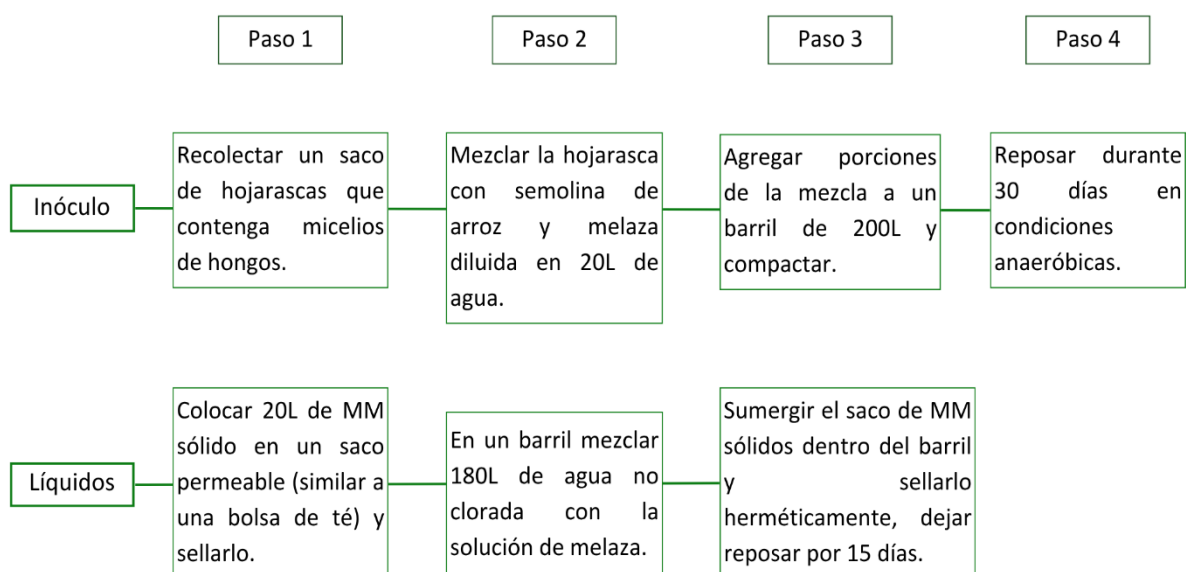
pm = número de plantas muertas

Elaboración de Microorganismos de Montaña

Para elaborar biofertilizantes a base de Microorganismos de Montaña provenientes de la Finca Agroecológica se llevaron a cabo dos procesos. El primero consistió en preparar el inóculo sólido, posteriormente, este inóculo se activó o diluyó para obtener microorganismos líquidos (Figura 7), que son los que se utilizaron como insumo en los tratamientos de fertilización de *Tectona grandis*.

Figura 7

Proceso para elaborar Microorganismos de Montaña.



Nota. MM= Microorganismos de Montaña.

Análisis Físicoquímico del Biol de Cerdo (BC) y Microorganismos de Montaña (MM)

Se realizó un análisis físicoquímico de biol de cerdo y Microorganismos de Montaña en el Laboratorio de Agua y Manejo Ambiental, Zamorano. Las muestras utilizadas fueron biol de cerdo (BC) proveniente de la Granja Porcina de Zamorano y los Microorganismos de Montaña (MM) obtenidos de la Finca Agroecológica. Esta evaluación fue crucial dado que ambos insumos presentan concentraciones variables de estos elementos esenciales que optimizan la fertilización de la plantación de teca. Primeramente, se realizó la preparación de las muestras de BC y MM para medir parámetros físicos como pH, conductividad eléctrica, sales totales disueltas y sólidos totales.

Seguidamente se llevó a cabo el análisis de nitrógeno amoniacal (mg N-NH_3) mediante el método de destilación seguido de titulación con ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 0.02 N (Anexo B). Para el análisis de fosfatos (PO_4), se empleó un método estándar basado en la reacción y digestión del fosfato con el reactivo VARIO Phos 3 F10 (Powder Pack), que permite formar un complejo coloreado cuantificable mediante espectrofotometría (Baird et al., 2017).

Fertilizantes y Dosis de Aplicación

Los tratamientos comprenden fertilizantes orgánicos que incluyen al biol de cerdo y los Microorganismos de Montaña. Como el fertilizante sintético se adoptó el uso de Fastrac® de liberación lenta con una composición de 20-15-5 ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$) debido que, anteriormente se aplicó en plantaciones de la Unidad Forestal de Zamorano observándose crecimiento y desarrollo uniforme de la plantación. Este producto se caracteriza por liberar sus nutrientes de forma prolongada, durante aproximadamente 3 meses, según las especificaciones técnicas proporcionadas por los proveedores. La aplicación se realizó cada 3 meses de manera localizada, a 10 cm del tallo. Adicionalmente, se estableció un testigo sin fertilización para cada método de establecimiento, únicamente se le agregó 2 L de agua por cada aplicación.

En la dosificación de los tratamientos se ajustaron los valores tomando como referencia otras investigaciones, en el caso del fertilizante sintético se consideró el estudio de crecimiento inicial de

teca en México (45 g de N, 30 g de P y 22.5 g de K por cada árbol) (Balám-Che et al., 2015). De esta manera, se ajustó la primera dosis de Fastrac® a 50 g/planta y la segunda dosis con 50% más, quedando en 75 g/planta aplicados cada 3 meses a partir de octubre del 2024 (Anexo C). El uso de fertilizantes de liberación lenta permite reducir la lixiviación de nitratos en comparación con abonos orgánicos o fertilizantes convencionales. Daza et al. (2015), demuestran que la lixiviación de nitratos con fertilizante de liberación lenta fue entre un 30% y 50% menor respecto a los fertilizantes convencionales, dependiendo de la dosis aplicada y las condiciones del suelo.

Para la determinar la dosis de biofertilizantes se utilizaron valores de referencias debido a la falta de información sobre fertilización en plantaciones iniciales de *Tectona grandis*. Según estudios realizados por Espinoza et al. (2020), la aplicación de un litro de biol diluido en el suelo para mejorar áreas verdes destacó más en el crecimiento y disminuyó la compactación. De manera similar en el *Manual de Biol* del Sistema Biobolsa (2021), se recomienda la aplicación de biol en dosis de 0.5 L en combinación con pesticidas en intervalos de 15 días. Considerando estas recomendaciones se estableció una dosis de 500 ml para el tratamiento de biol de cerdo de esta investigación.

Para establecer la dosis de aplicación de los Microorganismos de Montaña (MM), se revisaron las recomendaciones de diversos investigadores. Alvarez et al. (2018), aplicaron 400 ml de MM en 8 L de agua para fertilizar fresas. Asimismo, la *Guía para la captura, reproducción y aplicación artesanal de microorganismos benéficos en la caficultura*, destinada a apoyar a productores de café, sugiere aplicar 2 L de MM diluidos en 4 L de agua (Asociación Nacional del Café [ANACAFE], 2024). En el presente estudio con *Tectona grandis*, al tratarse de una planta leñosa con mayores requerimientos nutricionales, se ajustó la dosis a 600 ml para su aplicación considerando que, aproximadamente entre el 50 y 70% del fertilizante aplicado se pierde debido a procesos de nitrificación y lixiviación (Singh y Verma, 2007).

Aplicación de Tratamientos

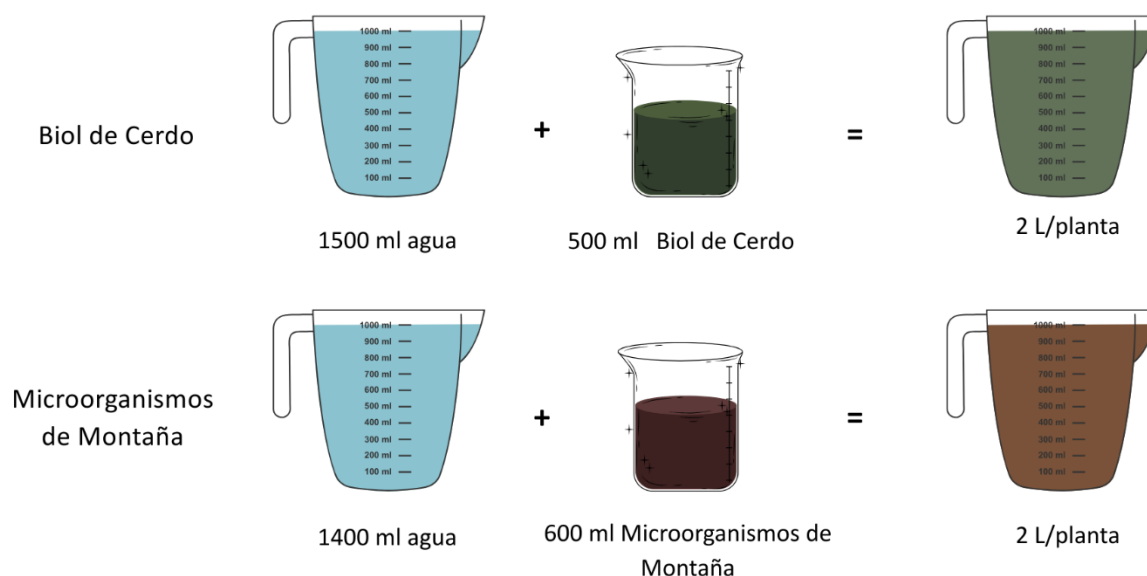
Se recolectó el biol de cerdos en la granja porcina y dejando reposar 10 días previo a la aplicación para promover la descomposición de materia orgánica y aumentar la disponibilidad de nutrientes asimilables (Anexo D). Este proceso se llevó a cabo en horas de la mañana, entre 7:00 y 10:00 a.m., bajo condiciones de temperatura que oscilaron entre 19 °C y 28 °C. Para realizar aplicaciones de biol en condiciones de baja humedad, el Sistema Biobolsa recomienda diluirlo (Anexo E), ya que esta práctica mejora la disponibilidad de nutrientes en el suelo, incrementa su capacidad de retención hídrica y favorece la creación de un microclima adecuado para el desarrollo óptimo de las plantas (Sistema Biobolsa, 2021).

La aplicación de los tratamientos en el experimento se realizó principalmente durante la época seca (noviembre-marzo). Considerando que los tratamientos con biol de cerdo y Microorganismos de Montaña se aplicaron en forma líquida, se administró el mismo volumen de agua (sin adición de fertilizante) a los tratamientos testigo y al tratamiento con Fastrac®. Esta práctica de estandarización, es usualmente utilizada en estudios comparativos de fertilizantes convencionales y bioinsumos, permitió controlar el efecto potencialmente confundidor de la disponibilidad diferencial de humedad entre tratamientos, especialmente crítico durante la época seca, asegurando así que las diferencias observadas en el crecimiento y desarrollo de las plantas respondieran exclusivamente al efecto nutricional de los fertilizantes evaluados y no a variaciones en la disponibilidad hídrica (Kafkafi y Tarchitzky, 2012).

Ante la alta concentración de Sólidos Totales (ST) que caracteriza a estos bioinsumos, Porkcolombia recomienda realizar diluciones del biol producido en temperaturas que oscilan entre 30 y 40 °C un pH entre 6.8 y 7.5 (Porkcolombia, 2020). La Figura 8 muestra la preparación de la dilución de biol de cerdo y Microorganismos de Montaña antes de la aplicación. Se mantuvo el mismo volumen en cada aplicación, diferenciándose únicamente en la frecuencia con la que se aplicaron la primera y la segunda dosis.

Figura 8

Dilución de biofertilizantes por planta.



La dosis de los fertilizantes orgánicos se determinó mediante un esquema basado en la frecuencia de aplicación, en lugar de variar la concentración o cantidad aplicada en cada intervención. Los fertilizantes de liberación controlada proporcionan un suministro gradual y sostenido de nutrientes entre 10-20 g cada 3, 6 y 9 meses, optimizando la absorción radicular y mejorando la eficiencia fisiológica del cultivo, lo que se traduce en un crecimiento vegetal uniforme y vigoroso (Reyes-Millalón et al., 2012). La dosis 1 de fertilizantes orgánicos se aplicó con una frecuencia de cada 3 semanas, mientras que la dosis 2 se administró cada 6 semanas, manteniendo constante el volumen y concentración en cada aplicación (Cuadro 1). Los fertilizantes orgánicos (biol de cerdo y Microorganismos de montaña) se aplicaron a 10 cm del tallo, depositándolos directamente sobre el suelo mediante un chorro continuo.

Después de cada aplicación, se cubrió la zona tratada con una capa de mulch y suelo, práctica que, según estudios de Pérez-Luna y Álvarez (2021), la cobertura puede reducir la lixiviación y volatilización del biofertilizante, permitiendo el aporte de mayor cantidad de nutrimentos, carbono

orgánico y mejorar las propiedades del suelo. El mulch orgánico nutre a los microorganismos del suelo mientras ayuda a conservar la humedad y a mantener una temperatura estable en el terreno (Aguirre y Zambrano, 2023). Este enfoque de fraccionamiento temporal de las aplicaciones permite sincronizar mejor la disponibilidad de nutrientes con las necesidades fisiológicas de las plantas de teca durante su fase de establecimiento, mejorando la eficiencia de uso de los nutrientes contenidos en los biofertilizantes líquidos, caracterizados por su persistencia limitada en el suelo comparados con fertilizantes sintéticos de liberación controlada como Fastrac®.

Cuadro 1

Dosis de aplicación de fertilizantes y frecuencia por planta según cada tratamiento.

Tratamiento	Código	Dosis/planta	F.A.
Bolsa + biol de cerdo + Dosis 1	BBCD1	500 ml	3 semanas
Bolsa + biol de cerdo + Dosis 2	BBCD2	500 ml	6 semanas
Bolsa + Microorganismos de Montaña + Dosis 1	BMMD1	600 ml	3 semanas
Bolsa + Microorganismos de Montaña + Dosis 2	BMMD2	600 ml	6 semanas
Bolsa + Fastrac® + Dosis 1	BFD1	50 g	3 meses
Bolsa + Fastrac® + Dosis 2	BFD2	75 g	3 meses
Testigo de Bolsa + 2 L agua	BTF ₀ 1	N/A	3 semanas
Testigo Bolsa + 2 L agua	BTF ₀ 2	N/A	6 semanas
Contenedor + biol de cerdo + Dosis 1	CBCD1	500 ml	3 semanas
Contenedor + biol de cerdo + Dosis 2	CBCD2	500 ml	6 semanas
Contenedor + Microorganismos de Montaña + Dosis 1	CMMD1	600 ml	3 semanas
Contenedor + Microorganismos de Montaña + Dosis 2	CMMD2	600 ml	6 semanas
Contenedor + Fastrac® + Dosis 1	CFD1	50 g	3 meses
Contenedor + Fastrac® + Dosis 2	CFD2	75 g	3 meses
Testigo de Contenedor + 2 L agua	CTF ₀ 1	N/A	3 semanas
Testigo Contenedor + 2 L agua	CTF ₀ 2	N/A	6 semanas

Nota. F.A. = frecuencia de aplicación; N/A = no aplica.

Recolección de Datos

Se contabilizó el número total de plantas vivas en cada tratamiento para determinar el porcentaje de sobrevivencia conforme al formulario de registro de campo diseñado para este estudio. Se seleccionaron 10 plantas por tratamiento mediante muestreo sistemático, considerando únicamente las ubicadas en posiciones impares, método recomendado por la Comisión Nacional

Forestal de México para reducir sesgos en evaluaciones de plantaciones forestales comerciales (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2012). La altura se midió con cinta métrica graduada en centímetros desde el suelo hasta el meristemo apical, previa remoción cuidadosa del mulch circundante. El diámetro basal se registró a 3 cm del suelo utilizando un pie de rey con precisión milimétrica, siguiendo el protocolo estandarizado para evaluaciones dendrométricas en plantaciones juveniles (Anexo F). Finalmente, se registró el número total de plantas vivas en cada tratamiento de estudio para calcular el porcentaje de sobrevivencia (Anexo G).

Análisis Estadístico

Los datos obtenidos fueron procesados y analizados mediante el “software Statistical Analysis System” (SAS®). Inicialmente, se revisaron los datos para detectar valores atípicos y analizar la causa de estos. Se evaluó la normalidad de los datos mediante la prueba de histogramas y Kolmogorov-Smirnov ($p < 0.05$) para cada combinación de tipo de fertilizante con las variables dependientes de altura total y diámetro basal. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) debido a que los datos se acercaron a la normalidad.

Para el análisis estadístico del diseño experimental completo, se empleó el procedimiento de modelos lineales generalizados (PROC GLM) con estructura de parcelas divididas. La comparación de medias se realizó utilizando la prueba de rangos múltiples de “Duncan’s Multiple Range Test” basada en mínimos cuadrados con un nivel de significancia de $p = 0.05$ tanto para los principales factores como para las interacciones relevantes. Además, se calculó la media ajustada (LSMEANS) y sus errores estándar, y se realizaron comparaciones de diferencias de medias ajustadas (PDIFF) para identificar diferencias significativas entre tratamientos utilizando el modelo estadístico explicado en la Ecuación 2 a continuación:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + A_j + (R \times A)_{ij} + B_k + (A \times B)_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad [2]$$

Donde:

Y_{ijk} : observación en el bloque i , parcela principal j (método) y subparcela k (fertilizante).

μ : media general.

R_i : efecto aleatorio del bloque i ,

A_j : efecto fijo del nivel j del factor parcela principal (A),

$(R \times A)_{ij}$: efecto aleatorio de la interacción bloque (R) \times parcela principal (A), en combinación ij ,

B_k : efecto fijo del nivel k del factor subparcela (tratamientos y dosis),

$(A \times B)_{jk}$: interacción fija entre los factores parcela principal (A) y subparcela (B), en combinación jk ,

E_{ijk} : error experimental residual asociado a las subparcelas.

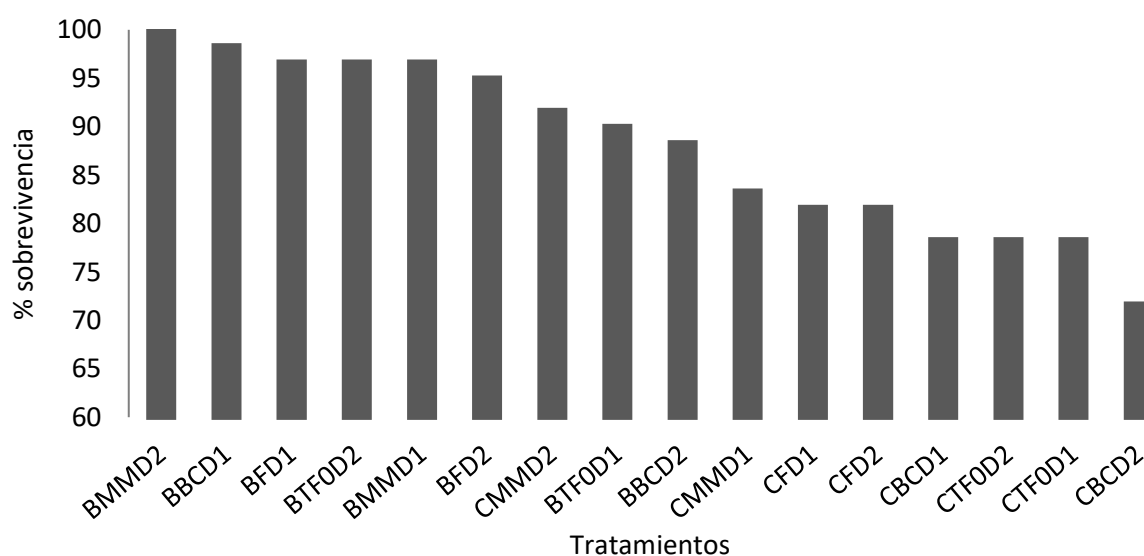
Resultados y Discusión

Sobrevivencia de la Plantación de *Tectona grandis* en Función de los Métodos de Establecimiento, Tipo y Dosis de Fertilización

A los 7 meses después de establecida la plantación, se evaluó la sobrevivencia mediante el conteo exhaustivo de plantas vivas en cada tratamiento, partiendo de una población inicial de 20 plantas por unidad experimental. Como se muestra en la Figura 9 el tratamiento de bolsa de polietileno combinado con Microorganismos de Montaña aplicados cada 6 semanas (BMMD2) alcanzó el mayor porcentaje de sobrevivencia. El segundo mejor desempeño fue bolsa de polietileno con biol de cerdo aplicado a cada 3 semanas (BBCD1). En contraste, la combinación de contenedor plástico con biol de cerdo aplicado cada 6 semanas (CBCD2) registró la menor tasa de sobrevivencia. Estos resultados indican una clara influencia tanto del método de establecimiento como del régimen de fertilización sobre la capacidad de las plántulas de teca para adaptarse y sobrevivir durante los primeros meses después del trasplante, periodo crítico que incluye la temporada seca en la zona de estudio.

Figura 9

Porcentaje de sobrevivencia en campo de plantas de teca por tratamiento



Las diferencias en sobrevivencia pueden explicarse por la morfología radicular de la *Tectona grandis*, caracterizada por un sistema pivotante con numerosas raíces laterales que resultan críticas para la captación de agua y nutrientes. El método de establecimiento en bolsas de polietileno proporcionó mayor volumen de sustrato y espacio para el desarrollo radicular durante la fase de vivero, favoreciendo una adaptación más efectiva post-trasplante. En contraste, aunque los contenedores plásticos de 400 cc son utilizados con éxito en viveros norteamericanos, donde se reconoce que el tamaño del contenedor es uno de los factores más significativos que afectan el desarrollo final de la planta en vivero (Stuewe y Rose, 2006). En particular, este estudio presentó limitaciones, posiblemente atribuibles a las condiciones edafoclimáticas específicas de Zamorano.

Particularmente relevante fue el extenso periodo seco de 6 meses que enfrentaron las plántulas tras el trasplante. Según S. Grossnickle (2018), el tamaño inicial de la planta y el desarrollo radicular previo son factores críticos para la sobrevivencia durante periodos de estrés hídrico. Por su parte el tamaño del contenedor influye significativamente en el desempeño posterior al trasplante de las plántulas de árboles forestales, afectando su supervivencia y crecimiento. Estudios realizados por Siqueira et al. (2025), destacan que los contenedores más grandes, en conjunto con sitios de alta calidad, promueven una mayor supervivencia y un crecimiento más rápido en las primeras etapas. La menor cantidad de sustrato en los contenedores, combinada con su mayor porosidad, pudo haber reducido la capacidad de retención hídrica durante el establecimiento debido que la zona de estudio se caracteriza por suelos francos, afectando negativamente la adaptabilidad inicial.

Fascella y Rouphael (2015), en su investigación menciona que, algunas especies en contenedores puede reducir los costos de producción y la generación de residuos plásticos, incluso puede mejorar la eficiencia en el aprovechamiento de espacio en vivero, sin embargo, no beneficia el crecimiento vegetativo. Esto contrasta con los resultados de Mejía (2024), que obtuvo un mejor rendimiento en plántulas de teca en viveros, sin embargo, en esta segunda fase de investigación las plantas de teca en contenedor plástico tuvieron menor desempeño en campo.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado para *Pinus pinea* por Domínguez (1997), donde los contenedores favorecieron la supervivencia inicial, aunque advirtiendo potenciales limitaciones a largo plazo por deficiencias en el desarrollo radicular secundario y tendencia al enrollamiento radicular. Estos factores son particularmente críticos para especies con sistema radicular pivotante pronunciado como la *Tectona grandis*. El periodo de lluvias fue muy corto, y la planta gasta mayor energía en épocas de verano hasta botar sus hojas (Fonseca, 2004), por ello, las condiciones de humedad limitada y estrés térmico durante el trasplante evidenciaron la superioridad adaptativa de las plántulas desarrolladas en bolsas.

Comparación del Crecimiento Inicial en Campo de *Tectona grandis* en Dos Métodos de Establecimiento de la Plantación

Validación del Modelo de Parcelas Dividas

El crecimiento inicial de *Tectona grandis* en campo se evaluó a partir las variables de altura total (cm) y diámetro basal de tallo (mm). Para este análisis, se seleccionó el 50% de las unidades experimentales ($n = 10$ por tratamiento) aplicando un muestreo sistemático. Los tratamientos correspondientes a bolsas de polietileno y contenedores plásticos fueron analizados conjuntamente, con previa corrección de datos atípicos para asegurar la validez de los resultados (Cuadro 2).

Cuadro 2

Prueba de comparación de medias para la plantación de teca

Variables	Observaciones	GL	R^2	CV	Media	Valor F	$p > F$
Altura total (cm)	475	1	0.45	46.83	56.18	3.91	< 0.0001
Diámetro basal (mm)	473	1	0.58	30.48	24.73	6.65	< 0.0001

Nota. Duncan, $p < 0.05$; GL= grados de libertad; R^2 = Coeficiente de determinación; CV= coeficiente de variación.

El análisis estadístico reveló diferencias significativas ($p < 0.0001$) entre métodos de establecimiento para ambas variables evaluadas. El modelo presentó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.45 para altura total y 0.58 para diámetro basal, explicando una proporción moderada pero aceptable de la variabilidad observada, considerando las limitaciones inherentes a estudios en

condiciones de campo donde factores como lixiviación, mineralización, evaporación e inmovilización de nutrientes no pueden ser controlados completamente.

Los coeficientes de variación (CV) de 46.83% para altura total y 30.48% para diámetro basal reflejan la heterogeneidad característica de los ensayos forestales en fase inicial, particularmente bajo condiciones ambientales no controladas. No obstante, la significancia estadística del modelo ($F = 3.91$, $p < 0.0001$ y $F = 6.65$, $p < 0.0001$ respectivamente) confirma su validez para interpretar el efecto diferencial de los métodos de establecimiento sobre el desarrollo temprano de las plántulas de *Tectona grandis*, proporcionando una base sólida para las recomendaciones técnicas derivadas de este estudio. Una vez validado el modelo de parcelas se analizó la respuesta de los tratamientos para las variables diámetro y altura.

Altura Total en Respuesta al Método de Establecimiento

El análisis de varianza reveló que el factor de método de establecimiento presenta un efecto altamente significativo sobre la altura total de las plántulas ($F = 190.07$, $p < 0.0001$), mientras que ni el tipo de fertilizante ($F = 1.07$, $p = 0.3635$), ni la dosis aplicada ($F = 0.25$, $p = 0.6208$), ni la interacción triple método \times fertilizante \times dosis ($F = 1.08$, $p = 0.3785$) mostraron efectos estadísticamente significativos (Cuadro 3).

Cuadro 3

Modelo lineal general mediante mínimos cuadrados para la variable altura total (cm).

Factor	GL	MS	Valor F	$p > F$
Método	1	131563.64	190.07	<.0001
Fertilizante	3	737.69	1.07	0.3635
Dosis	1	169.66	0.25	0.6208
Método*Fertilizante*Dosis	3	745.65	1.08	0.3785

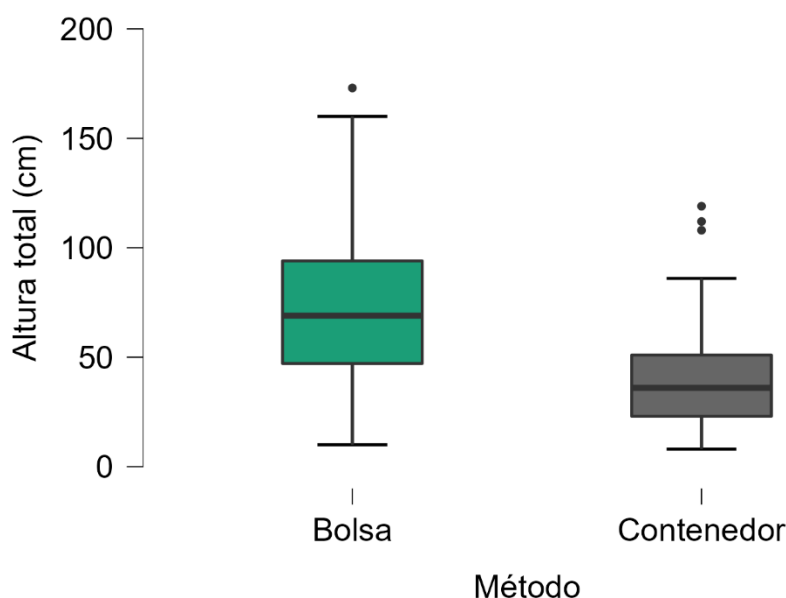
Nota. $p < 0.05$; GL= grados de libertad; MS= cuadrado medio.

Las plántulas establecidas en bolsas de polietileno alcanzaron una altura media de 72.83 cm, significativamente superior a las desarrolladas en contenedores plásticos, que promediaron 39.46 cm. Esta diferencia absoluta de 33.37 cm (84.5% mayor) evidencia la respuesta positiva de *Tectona grandis* al mayor volumen y profundidad que ofrecen las bolsas. La Figura 10 muestra una distribución con

asimetría positiva y mayor dispersión en el método de bolsa, mientras que los datos del contenedor plástico presentan menor variabilidad, aunque con valores atípicos más frecuentes.

Figura 10

Distribución de altura de la teca en campo por cada método de establecimiento.



Estos resultados pueden explicarse por las características morfológicas, ya que *Tectona grandis* presenta un sistema radicular profundo, caracterizado por una raíz pivotante dominante acompañada de numerosas raíces laterales, lo cual es fundamental para la absorción de agua y nutrientes, especialmente en condiciones de sequía (Clément et al., 2019). La mayor variabilidad observada en las plantas establecidas en bolsas sugiere que, al disponer de mejores condiciones para el desarrollo radicular, se manifiesta con mayor intensidad la variabilidad genética intrínseca en el crecimiento. Estos resultados concuerdan con estudios previos que destacan la importancia del volumen y la profundidad del contenedor en el desarrollo del sistema radicular de especies forestales.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por La Fuente et al. (2017), quienes destacan la importancia crítica del volumen y profundidad del contenedor en el desarrollo radical de especies forestales, particularmente aquellas con arquitectura radicular pivotante. La restricción del

crecimiento radicular no solo limita la absorción de nutrientes y agua, sino que puedes inducir señales fisiológicas que reducen el crecimiento aéreo como mecanismo adaptativo frente al estrés (Poorter et al., 2012).

Diámetro Basal en Respuesta al Método de Establecimiento

El análisis de varianza para la variable diámetro basal reveló un efecto altamente significativo del método de establecimiento ($F = 340.48$, $p < 0.0001$). En contraste, ni el tipo de fertilizante ($F = 2.01$, $p = 0.1122$), ni la dosis aplicada ($F = 0.55$, $p = 0.4603$), ni la interacción triple método \times fertilizante \times dosis ($F = 1.34$, $p = 0.206$) mostraron efectos estadísticamente significativos (Cuadro 4).

Cuadro 4

Modelo lineal general mediante mínimos cuadrados para la variable diámetro basal.

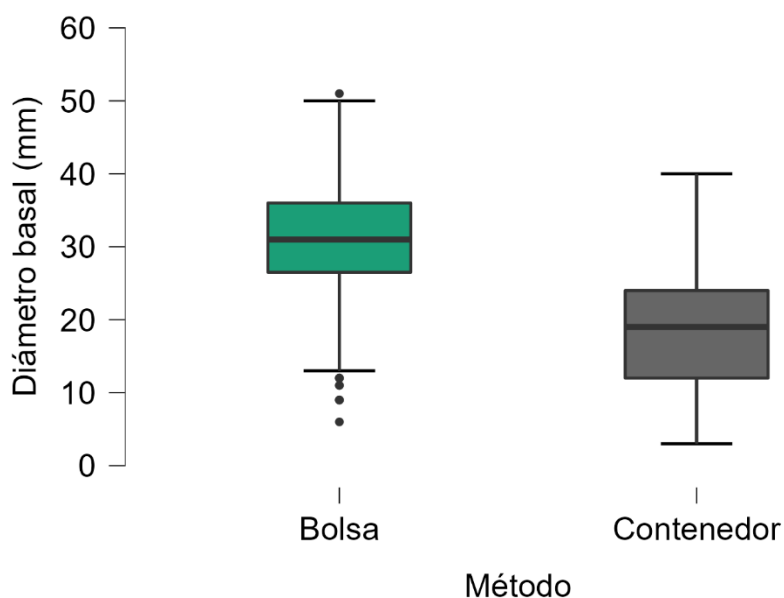
Fuente	GL	Cuadrado medio	Valor F	$p > F$
Método	1	19323.92	340.48	<.0001
Fertilizante	3	114.01	2.01	0.1122
Dosis	1	30.99	0.55	0.4603
Método*Fertilizante*Dosis	3	76.15	1.34	0.206

Nota. $p < 0.05$; GL= grados de libertad.

El modelo estadístico presentó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.58, indicando que explica el 58% de la variabilidad observada en el diámetro basal. Las plántulas establecidas en bolsas de polietileno desarrollaron un diámetro basal promedio de 31.14 mm, significativamente superior al de las plántulas en contenedores plásticos, que alcanzaron 18.38 mm. Esta diferencia representa un incremento del 69.4% a favor del método de bolsas. La Figura 11 muestra la distribución de diámetros según el método de establecimiento. Las plantas establecidas en bolsas presentan una distribución con asimetría negativa y mayor dispersión, con un rango intercuartílico más amplio y valores extremos en ambos extremos de la distribución. En contraste, las plantas en contenedores plásticos muestran una distribución más uniforme, aunque con un desarrollo significativamente menor.

Figura 11

Distribución de diámetro por métodos de establecimiento.



Esta marcada diferencia puede atribuirse al mayor volumen de sustrato disponible en las bolsas de polietileno, que permite un desarrollo radicular más extenso y, consecuentemente, favorece la captación de agua y nutrientes necesarios para el crecimiento secundario. El desarrollo del diámetro basal está directamente relacionado con la capacidad de la planta para transportar agua y nutrientes desde las raíces hasta el dosel, así como con la resistencia mecánica necesaria para sostener un mayor desarrollo aéreo (South et al., 2005).

Estos resultados coinciden con lo señalado por Andivia et al. (2021), quienes documentan que plántulas de mayor tamaño al momento del trasplante generalmente presentan mejor supervivencia y desarrollo, aunque este efecto está modulado por las condiciones climáticas, características específicas de la especie y técnicas de manejo durante el trasplante. Para *Tectona grandis*, especie con pronunciado desarrollo radicular pivotante, el volumen del contenedor representa un factor crítico que condiciona el potencial de crecimiento en diámetro durante la fase de establecimiento (Aphalo y Rikala, 2003).

Efecto Diferencial de Dos Dosis de Fertilizantes Químicos y Orgánicos en el Crecimiento Inicial de la Tectona grandis

Se realizó la separación de medias mediante la prueba de Duncan para analizar en detalle las combinaciones de tratamientos. Este análisis permitió identificar diferencias internas entre los tratamientos evaluados y facilitó la identificación de la combinación más favorable, proporcionando información valiosa para la selección de prácticas agronómicas óptimas, a pesar de la ausencia de significancia global en la interacción.

Altura total en Respuesta a Tratamientos de Fertilización

El análisis estadístico reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos combinados de método de establecimiento y fertilización para la variable altura total (Cuadro 5). Los tratamientos con bolsa de polietileno combinados con biol de cerdo en dosis 1 (BBCD1) alcanzaron la mayor altura media (84.26 cm), sin diferencias estadísticamente significativas respecto a combinaciones de bolsa con Fastrac® (dosis 1 y 2), testigo dosis 2 y biol dosis 2, evidenciando un efecto similar entre estos tratamientos dentro del mismo método de establecimiento.

Cuadro 5

Medias ajustadas (LSMEANS) para altura total según método y fertilizante

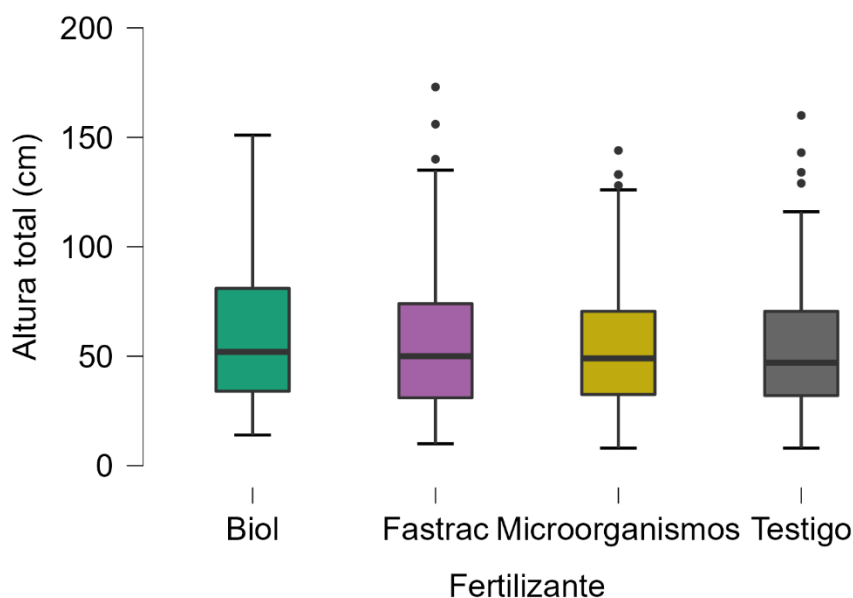
Tratamiento	Separación de medias (cm)			Error estándar
	a	ab	b	
BBCD1	84.26			4.8991
BFD1	77.10			4.8034
BFD2	72.63			4.8034
BTF ₀ D2	72.63			4.8034
BBCD2	71.93			4.8034
BMMD2		69.97		4.8990
BTF ₀ D1		69.30		4.8034
BMMD1		64.83		4.8034
CMMD1			46.77	4.8034
CFD2			41.63	4.8034
CBCD1			39.90	4.8991
CBCD2			39.73	4.8034
CMMD2			38.53	4.8034
CTF ₀ D2			37.91	4.8990
CFD1			37.28	4.8990
CTF ₀ D1			33.90	4.8034

Nota. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas.

Es notable que, aunque el análisis global mostró significancia estadística, el efecto del tipo de fertilizante considerado independientemente del método de establecimiento no resultó significativo, como se aprecia en la Figura 12. Todos los tipos de fertilizantes mostraron distribuciones similares, con el biol de cerdo y Fastrac® exhibiendo tendencia a mayores alturas, pero también mayor variabilidad, mientras que los Microorganismos de Montaña y testigo presentaron valores ligeramente inferiores con presencia de valores atípicos superiores.

Figura 12

Distribución de altura por tipo de fertilizante



Las características edáficas del sitio experimental (Cuadro 6) evidencian condiciones generalmente favorables para el desarrollo de *Tectona grandis*, con pH entre 5.52 y 6.28, aunque con niveles de fósforo ($2-4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) considerados limitantes para el óptimo crecimiento de esta especie. Como señala Fernández-Moya et al. (2015), el fósforo constituye frecuentemente el nutriente más deficiente en plantaciones de *Tectona grandis* en la región centroamericana. Sin embargo, durante este periodo inicial de evaluación, los requerimientos nutricionales parecen haber sido satisfechos principalmente por la fertilidad natural del suelo.

Cuadro 6

Resultado de Análisis de suelo en el sitio de diseño experimental.

Muestreo	pH	M.O.	N	P	K	Rel N/C
		%		$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$	
Repetición 1	6.28	5.13	0.26	4	0.75	19.51
Repetición 2	5.52	4.1	0.21	2	0.79	21.28
Repetición 3	5.97	3.71	0.19	2	0.74	25.8

Nota. M.O. = Materia orgánica; N = nitrógeno; P = fósforo; K = potasio; Rel N/C = relación carbono-nitrógeno.

Es importante considerar que el pH del suelo en el área experimental (5.52-6.28) se encuentra en el rango inferior del óptimo para teca. La elevada relación C/N observada, particularmente en la repetición 3 (25.8), sugiere una descomposición lenta de la materia orgánica, donde los microorganismos inmovilizan temporalmente el nitrógeno disponible (Gamarra et al., 2018), lo que podría explicar el menor crecimiento observado en esta sección del experimento comparado con la repetición 1 (C/N 19.51). Los valores atípicos registrados en altura están asociados espacialmente a la proximidad (< 50 cm) de troncos residuales de *Pinus* spp. de la cosecha previa al establecimiento de la plantación (Anexo H). Diversos estudios han demostrado que la colonización de *Tectona grandis* por hongos micorrízicos arbusculares incrementa significativamente el crecimiento y la supervivencia de las plantas, lo que respalda que las plantas cercanas a árboles viejos con micorriza presenten mayor desarrollo (Chaiyasen et al., 2017). Esta observación sugiere que las redes micorrícicas preexistentes podrían estar ejerciendo un efecto promotor del crecimiento, como han documentado en estudios sobre interacciones suelo-planta en sistemas forestales recién establecidos (Verhoeven et al., 2018).

Diámetro Basal en Respuesta a Tratamientos de Fertilización

El análisis estadístico para la variable diámetro basal reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos de fertilización combinados con el método de establecimiento (Cuadro 7). El análisis de medias ajustadas (LSMEANS) identificó cuatro grupos estadísticamente diferenciados (a, b, c y cd), evidenciando una respuesta más estratificada que la observada para la variable altura.

Cuadro 7

Medias ajustadas (LSMEANS) para diámetro basal según método y fertilizante.

Tratamiento	Separación de medias (mm)				Error estándar
	a	b	c	cd	
BBCD1	35.44				1.440
BBCD2		31.47			1.403
BTF ₀ D2		31.33			1.375
BMMD2		31.07			1.403
BFD1		30.80			1.375
BTD1		30.57			1.375
BMMD1		29.93			1.375
BFD2		29.42			1.403
CMMD1			21.07		1.375
CTF ₀ D2			19.57		1.375
CMMD2			19.54		1.403
CBCD1			18.80		1.375
CTF ₀ D1			17.43		1.375
CBCD2			17.10		1.375
CFD2				16.75	1.375
CFD1				16.63	1.403

Nota. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas.

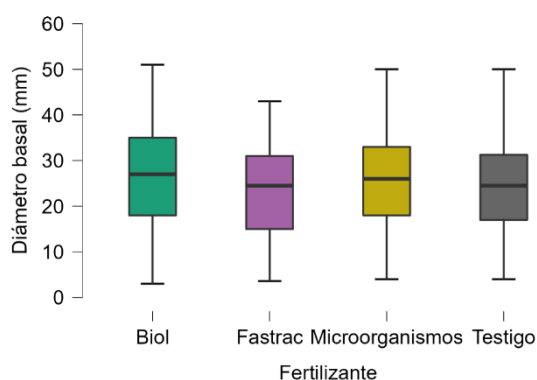
El tratamiento bolsa de polietileno + biol de cerdo con aplicación cada 3 semanas (BBCD1) alcanzó el mayor diámetro basal (35.44 mm), diferenciándose significativamente de todos los demás tratamientos. Un segundo grupo estadístico (b) incluyó siete tratamientos, todos implementados en bolsas de polietileno con distintos fertilizantes y dosis, con valores entre 31.47 mm (BBCD2) y 29.42 mm (BFD2). Esta agrupación confirma que las diferencias entre tipos de fertilizantes fueron menos determinantes que el método de establecimiento.

Los tratamientos con contenedores plásticos se distribuyeron en los grupos c y cd, con valores significativamente inferiores, entre 21.07 mm (CMMD1) y 16.63 mm (CFD1). Es destacable que la combinación contenedor plástico + Microorganismos de Montaña con dosis 1 (CMMD1) mostró el mejor desempeño entre los tratamientos con contenedores plásticos, alcanzando un diámetro basal 27% superior al tratamiento menos efectivo (CFD1).

Como se observa en la Figura 13, la distribución general de diámetros por tipo de fertilizante no mostró diferencias estadísticamente significativas independientemente del método de establecimiento. El tratamiento que contiene biol de cerdo presentó valores ligeramente superiores, pero con solapamiento considerable con los demás tratamientos. Esta respuesta es consistente con resultados reportados por Madrid-Aispuro et al. (2021), quienes documentaron que el volumen del contenedor y el espacio disponible para el desarrollo radicular ejercen mayor influencia sobre el crecimiento diamétrico que el régimen de fertilización en especies forestales.

Figura 13

Distribución de diámetro basal por tipo de fertilizante.



Es notable que los tratamientos testigo mostraron desempeño comparable a los tratamientos con fertilización, lo que puede atribuirse al manejo experimental y las condiciones edáficas. Durante la aplicación de fertilizantes orgánicos líquidos, los tratamientos testigo recibieron volúmenes equivalentes de agua (2 L/planta), lo que pudo haber mitigado el estrés hídrico durante la época (C. Grossnickle, 2012) seca, factor particularmente crítico para el desarrollo del diámetro en especies forestales. Adicionalmente, como se observó en el análisis de suelo (Cuadro 7), las condiciones edáficas presentaban niveles moderados de materia orgánica (3.71-5.13%) que podrían estar aportando nutrientes suficientes para el desarrollo inicial.

Estos resultados sugieren que, durante la fase inicial de establecimiento de *Tectona grandis*, el volumen disponible para el desarrollo radicular ejerce mayor influencia sobre el crecimiento

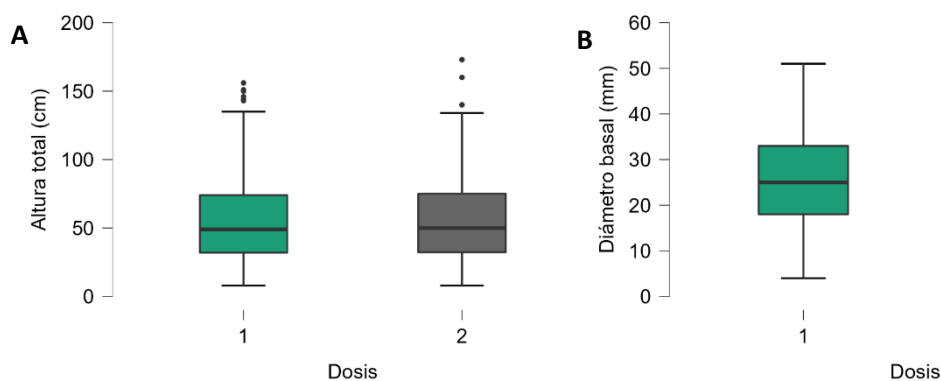
diamétrico que el régimen de fertilización. Esta observación coincide con lo reportado por Hubbel et al. (2018). en estudios con *Pinus occidentalis*, donde el tipo de contenedor resultó más determinante que el régimen nutricional para el desarrollo del diámetro basal.

Efectos entre Dosis de Tratamientos

El análisis comparativo entre las dosis aplicadas (frecuencia de aplicación) por cada tipo de fertilizante no reveló diferencias estadísticamente significativas para ninguna de las variables evaluadas (altura y diámetro). Como se muestra en la Figura 14, los tratamientos con dosis 1 (mayor frecuencia de aplicación) alcanzaron valores medios de 56.81 cm de altura y 24.98 mm de diámetro, mientras que los de dosis 2 (menor frecuencia) registraron 55.56 cm y 24.46 mm, respectivamente. Las distribuciones estadísticas para ambas dosis presentan medianas similares y patrones de dispersión comparables. Esto puede estar relacionado a las condiciones físicas y nutricionales del suelo.

Figura 14

Distribución de altura total (A) y diámetros (B) para dosis 1 y dosis 2.



Esta ausencia de diferencias significativas entre dosis concuerda con lo reportado por Balám-Ché et al. (2015), en estudios de fertilización inicial de *Tectona grandis*, donde diversas dosis de tratamientos no generaron diferencias significativas en variables dasométricas. Fallas (2014) sugiere que este comportamiento podría atribuirse a la baja demanda nutricional de *Tectona grandis* durante su primer año, periodo en que la planta obtiene sus nutrientes principalmente de las reservas edáficas.

Similarmente, Vázquez et al. (2015), documentaron que distintas dosis de fertilizantes en plantaciones iniciales de *Pinus patula* no impactaron significativamente la productividad primaria neta.

Análisis de Fertilizantes Orgánicos

El análisis de los biofertilizantes utilizados (Cuadro 8) reveló diferencias importantes en su composición que podrían influir en su eficacia a largo plazo. El biol de cerdo (BC) presentó un pH ligeramente alcalino (7.26), conductividad eléctrica elevada (7,074.90 $\mu\text{s}/\text{cm}$) y mayor concentración de nitrógeno amoniacal (525 mg/L), forma rápidamente asimilable fundamental para el desarrollo vegetativo. Su contenido de sólidos totales (2,832.83 mg/L) indica alta concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden constituir una importante reserva nutricional. En contraste, los Microorganismos de montaña (MM) mostraron pH moderadamente ácido (4.39), menor conductividad eléctrica (5,647.50 $\mu\text{s}/\text{cm}$) y considerablemente mayor contenido de fósforo (394.46 mg/L), aunque con menor nivel de nitrógeno amoniacal (133 mg/L).

Cuadro 8

Composición fisicoquímica de los fertilizantes del biol de cerdo y los Microorganismos de montaña.

Parámetro	Unidad	BC	MM
pH		7.26	4.39
C. E.	$\mu\text{s}/\text{cm}$	7,074.90	5,647.50
Salinidad	ppt	3.86	3.02
Sólidos totales (ST)	mg/L	2,832.83	2,263.70
Contenido (mg/L PO_4)	mg/L	390	1,210
P (mg/l)	mg/L	127.26	394.46
N- NH_3 (mg/L)	mg/L	525	133

Nota. C.E. = conductividad eléctrica; N- NH_3 = Nitrógeno en forma de amoniacal; P = fósforo elemental; BC = biol de cerdo; MM = Microorganismos de Montaña.

Los MM tienen mayor contenido de fósforo debido a la carga de hongos y bacterias que poseen estos elementos en su pared celular, por ello, podrían ser más efectivos a largo plazo, particularmente en suelos con buen contenido de materia orgánica que según Castro Barquero et al. (2020), favorecen procesos de mineralización y liberación gradual de nutrientes, especialmente fósforo. Por otra parte Martínez (2015), indica que valores de pH cercanos a 4.5 limitan el crecimiento

de esta especie, afectando la dinámica microbiana y la disponibilidad de nutrientes. Esto podría explicar parcialmente la respuesta moderada a los biofertilizantes aplicados, particularmente a los MM, cuya eficacia depende significativamente de la actividad biológica del suelo. Por contrario, El biol de cerdo presenta mayor contenido de nitrógeno amoniacal (N-NH_3) debido a que es un proceso anaerobio y posee alto contenido de materia orgánica.

Con los resultados de nitrógeno amoniacal y fosfatos se estima la cantidad de nutrientes acumulados durante el periodo de observación en este estudio debido que no se encontraron requerimientos nutricionales para *Tectona grandis*, pero es importante conocer los aportes realizados de nitrógeno y fosforo. Para el tratamiento con biol de cerdo y Microorganismos de Montaña en dosis 1 se llevaron a cabo 7 aplicaciones y para las dosis 2 se realizó un total de cuatro aplicaciones. En el Cuadro 9 se muestra los valores del nitrógeno y fósforo acumulado desde octubre 2024 hasta marzo de 2025.

Cuadro 9

Fertilizante acumulado en todas las aplicaciones desde octubre 2024 a marzo 2025.

Código de tratamiento	Dosis/planta	Nitrógeno acumulado	Fósforo acumulado
BBCD1	500 ml	1.83 g N-NH_3	0.44 g P
BBCD2	500 ml	1.05 g N-NH_3	0.25 g P
BMMD1	600 ml	0.55 g N-NH_3	1.65 g P
BMMD2	600 ml	0.31 g N-NH_3	0.94 g P
BFD1	50 g	20 g N	6.54 g P
BFD2	75 g	30 g N	9.81 g P
BTF ₀ 1	0	0	0
BTF ₀ 2	0	0	0
CBCD1	500 ml	1.83 g N-NH_3	0.44 g P
CBCD2	500 ml	1.05 g N-NH_3	0.25 g P
CMMD1	600 ml	0.55 g N-NH_3	1.65 g P
CMMD2	600 ml	0.31 g N-NH_3	0.94 g P
CFD1	50 g	20 g N	6.54 g P
CFD2	75 g	30 g N	9.81 g P
CTF ₀ 1	0	0	0
CTF ₀ 2	0	0	0

Nota. N-NH_3 = nitrógeno en forma de amoniacal; P= fosforo elemental; N=nitrógeno elemental.

A diferencia del Fastrac®, los fertilizantes orgánicos poseen una carga de microorganismos benéficos que pueden mejorar la eficiencia en el uso y reciclaje de P y otros nutrientes, y su aplicación contribuye al desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles, alineadas con el funcionamiento de los ecosistemas, por ello, su uso resulta viable tanto desde el punto de vista ecológico como económico (Vargas-Barrantes y Castro-Barquero, 2019). Tanto el biol de cerdo como Microorganismos de montaña presentan cantidades considerables de macro y micronutrientes para mejorar positivamente el desarrollo y crecimiento de las plantas y mantener condiciones saludables del suelo (Gil et al., 2022). De modo que se conserva la calidad del suelo determinada por la presencia de materia orgánica que mejora sus propiedades, como la capacidad para transportar diferentes sustancias, la retención de agua, la aireación, la porosidad y la densidad aparente (Izquierdo y Arévalo, 2021). Es necesario reponer los nutrientes absorbidos por la planta y evitar la escasez de nutrientes a largo tiempo (Martínez, 2015).

Estos resultados sugieren que, aunque los biofertilizantes aplicados contienen menos nutrientes que Fastrac®, su impacto en el crecimiento inicial de *Tectona grandis* podría manifestarse de forma más clara en etapas posteriores del desarrollo. Esto ocurre cuando la demanda nutricional de la especie se intensifica y las condiciones edáficas se modifican debido a la actividad de la microbiota introducida. Las condiciones del suelo representan un factor determinante en el comportamiento de los testigos, que no mostraron diferencias significativas respecto a los tratamientos. Esto indica que el suelo cuenta con nutrientes disponibles suficientes para esta etapa inicial de crecimiento y desarrollo de la plantación. Sin embargo, es fundamental realizar aplicaciones y proveer nutrientes de manera planificada para conservar las propiedades de estos suelos saludables a largo plazo.

Conclusiones

Las plántulas de *Tectona grandis* establecidas en bolsas de polietileno mostraron una superioridad estadísticamente significativa tanto en sobrevivencia (95%) como en crecimiento inicial, alcanzando valores medios de altura (72.83 cm) y diámetro basal (31.14 mm) considerablemente mayores que las establecidas en contenedores plásticos de 400 cc.

El método de establecimiento tuvo mayor influencia en el desarrollo inicial de *Tectona grandis* que el tipo de fertilizante aplicado, aunque entre los tratamientos, la combinación de bolsa de polietileno con biol de cerdo aplicado cada tres semanas (BBCD1) mostró el mejor desempeño en diámetro basal y altura total.

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las distintas dosis de fertilización aplicadas durante los primeros siete meses de evaluación. Esto sugiere que la demanda nutricional de *Tectona grandis* en esta etapa inicial puede satisfacerse con frecuencias de aplicación menos intensivas, lo que permite optimizar el uso de recursos teniendo en cuenta la calidad nutricional actual del suelo. Sin embargo, es importante considerar que estos resultados están condicionados por las características del suelo evaluado, que aparentemente cuenta con nutrientes disponibles suficientes.

Recomendaciones

Evaluar contenedores plásticos de mayor volumen (600 cc o superior) que permitan un desarrollo radicular más amplio y profundo para satisfacer las necesidades de especies con raíz pivotante pronunciada como *Tectona grandis*, antes de descartar completamente su uso en la transición desde las bolsas de polietileno.

Se recomienda realizar análisis foliar y desarrollar curvas de absorción de nutrientes en *Tectona grandis* durante sus etapas de crecimiento, debido a la falta de información sobre sus requerimientos nutricionales, considerando los procesos de dilución de los biofertilizantes para mejorar la absorción de nutrientes y evitar el daño radicular. Estos datos permitirán diseñar programas de fertilización orgánica y su evaluación económica, utilizando biol de cerdo aplicado cada tres semanas en los primeros años de establecimiento. Esta práctica sostenible aprovecha el biol disponible en la granja porcina de Zamorano, promoviendo un manejo nutricional eficiente y responsable con el medio ambiente.

Extender la evaluación de este estudio por al menos 12 meses adicionales para determinar si las diferencias iniciales entre métodos de establecimiento y regímenes de fertilización se mantienen, se amplían o se reducen con el tiempo, especialmente tras un ciclo completo de estaciones secas y lluviosas.

Referencias

- Aguirre, D. y Zambrano, A. (2023). *Análisis comparativo de lixiviación de fertilizantes de fuentes de liberación simple (N-P-K) y fuentes de liberación controlada en suelos agrícolas del cantón La Concordia, provincia Santo Domingo de los Tsáchillas* [Proyecto de Investigación]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/22053/1/236T0852.pdf>
- Aldrete, A [A.], Aguilera, M., Martínez, T. y Ordaz, V. (2015). Producción de *Pinus pseudostrobus* Lindl. con sustratos de aserrín y fertilizantes de liberación controlada. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 7(34), 7–19. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v7n34/2007-1132-remcf-7-34-00007.pdf>
- Alvarez, M., Tucta, F., Quispe, E. y Meza, V. (2018). Incidence of the inoculation of beneficial microorganisms in the strawberry (*Fragaria sp.*) crop. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 33–42. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.04>
- Andivia, E., Villar-Salvador, P., Oliet, J. A., Puértolas, J., Dumroese, R. K., Ivetić, V., Molina-Venegas, R., Arellano, E. C., Li, G. y Ovalle, J. F. (2021). Climate and species stress resistance modulate the higher survival of large seedlings in forest restorations worldwide. *Ecological Applications : A Publication of the Ecological Society of America*, 31(6), e02394. <https://doi.org/10.1002/eap.2394>
- Aphalo, P. y Rikala, R. (2003). Field performance of silver-birch planting-stock grown at different spacing and in containers of different volume. *New Forests*, 25, Artículo 93–108. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1022618810937>
- Arévalo, G. E., Sánchez-Amaya, J. M. y Guillen-Marquina, I. (2022). Estudio del contenido materia orgánica por dos métodos analíticos en suelos de Honduras. *Revista De Ciencias Ambientales*, 57(1), 1–13. <https://doi.org/10.15359/rca.57-1.11>
- Asociación Nacional del Café. (2024). *Microorganismos: Guía Técnica 4* (núm. 4). Jica. <https://www.anacafe.org/uploads/file/a6f6eace150d84ecba6cd73c50341ec07/Guia-Microorganismos.pdf>
- Baird, R., Eaton, A., Rice, E. y Clesceri, L. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23^a ed.). American Public Health Association. <https://repositori.mypolycc.edu.my/jspui/handle/123456789/4588>
- Balám-Che, M., Gómez-Guerrero, A., Vargas-Hernández, J., Aldrete, A [A.] y Obrador-Olán, J. (2015). Fertilización inicial de plantaciones comerciales de teca (*Tectona grandis* Linn F.) en el sureste de México. *Revista Fititecnia México*, 38(2), 205–212. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v38n2/v38n2a11.pdf>
- Barraza, O., Ovalle, B. y Peña, E. (2019). Producción y caracterización de bioestimulantes para la producción agrícola a partir de residuos locales. *Revista Electrónica ANFEI Digital*, 6(11). <https://www.anfei.mx/revista/index.php/revista/article/view/550>
- Blanco-Flórez, J., Fernando-Trugilho, P., Tarcisio-Lima, J., Gherardi-Hein, R. y Moreira da Silva, J. R. (2014). Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil. *Primavera*, 20(1), 11–20. <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v20n1/v20n1a2.pdf>

- Camino, d. R. y Pierre, J. (2013). *Las plantaciones de teca en America Latina. Serie técnica.*
- Castro Barquero, L., Martínez Vargas, V., Castro Zúñiga, Ó. y Blanco Meneses, M. (2020). Abono orgánico, microorganismos de montaña (MM) y fertibiól para el control biológico de la hernia de las crucíferas (*Plasmodiophora brassicae* wor.) en el cultivo de mostaza china (*Brassica rapa* sp. *pekinensis* var. Taranko F1). *Agronomía Costarricense*. Publicación en línea avanzada. <https://doi.org/10.15517/RAC.V44I2.43088>
- Chaiya, L., Gavinlertvatana, P., Teaumroong, N., Pathom-Aree, W., Chaiyasen, A., Sungthong, R. y Lumyong, S. (2021). Enhancing Teak (*Tectona grandis*) Seedling Growth by Rhizosphere Microbes: A Sustainable Way to Optimize Agroforestry. *Microorganisms*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091990>
- Chaiyasen, A., Douds, D. D., Gavinlertvatana, P. y Lumyong, S. (2017). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in *Tectona grandis* Linn.f. plantations and their effects on growth of micropropagated plantlets. *New Forests*, 48(4), 547–562. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9584-6>
- Clément, C., Pierret, A., Maeght, J.-L., Hartmann, C., Xayyathip, K., Soulléuth, B., Sounyafong, P., Latschack, K., Thammahacksa, C. y Sengtaheuanghoung, O. (2019). Linking tree-rooting profiles to leaf phenology: a first attempt on *Tectona Grandis* Linn F. *Trees*, 33(5), 1491–1504. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01876-9>
- Comisión Nacional Forestal. (2012). *Manual y procedimientos para el muestreo de campo: Remuestreo 2012.* https://www.conafor.gob.mx/apoyos/docs/externos/2022/DocumentosMetodologicos/2012/Manual_remuestreo_2012.pdf
- Daza, M. C., Díaz, J., Aguirre, E. y Urrutia, N. (2015). Efecto de abonos de liberación lenta en la lixiviación de nitratos y nutrición nitrogenada en estevia. *Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas*, 9(1), 112. <https://doi.org/10.17584/rcch.2015v9i1.3750>
- Domínguez, S. (1997). La importancia del envase en la producción de plantas forestales. *Quercus*, 137, 34–37. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/publicaciones/env_quercus_tcm30-155871.pdf
- Espinoza, J., Apaza, C. y Luizaga, I. (2020). Caracterización y análisis para la aplicación de biól obtenido a partir de residuos orgánicos en la Unidad Experimental de Producción de Biogás en los laboratorios de Petróleo, Gas y Energías de la Universidad Privada del Valle. *Journal Boliviano De Ciencias*, 16(48), 2075–8944. <https://doi.org/10.52428/20758944.v16i48.347>
- Fallas, J. (2014). *Respuesta a la fertilización de la teca (Tectona grandis L.f) con NPK en ultisoles de la zona norte de Costa Rica* [Tesis de graduación]. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/3286>
- Fascella, G. y Roupheal, Y. (2015). Growth and water use efficiency of potted *Murraya paniculata* as affected by irrigation system and container size. *European Journal of Horticultural Science*, 80(2), 81–86. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2015/80.2.6>
- Fernández-Moya, J., Alvarado, A [Alfredo], Mata, R., Thiele, H., Segura, J. M., Vaides, E [Edwin], San Miguel-Ayanz, A. y Marchamalo-Sacristán, M. (2015). Soil fertility characterisation of teak

- (*Tectona grandis* L.f.) plantations in Central America. *Soil Research*, 53(4), 423. <https://doi.org/10.1071/SR14256>
- Fonseca, W. (2004). *Manual para productores de teca (Tectona grandis L. f) en Costa Rica*. <https://www.fonafifo.go.cr/media/1332/manual-para-productores-de-teca.pdf>
- Gamarra, C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortiz, M., Del Galeano, M. P. y Cabrera Cardús, A. J. N. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 9(46). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>
- Gil, L., Leiva, F., Cabos, J., Jara, E., Bardales, C. y León, C. (2022). Influencia de las concentraciones del “biol” en el crecimiento y desarrollo de *Medicago sativa* (Fabaceae) “alfalfa”. *Arnaldoa*, 29(1), 149–162. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.291.29109>
- Grossnickle, C. (2012). Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests*, 43(5-6), 711–738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>
- Grossnickle, S. (2018). Seedling establishment on a forest restoration site – An ecophysiological perspective. *Reforesta*, 6, 110–139. <https://doi.org/10.21750/R>
- Hubbel, K. L., Ross-Davis, A. L., Pinto, J. R., Burney, O. T. y Davis, A. S. (2018). Toward Sustainable Cultivation of *Pinus occidentalis* Swartz in Haiti: Effects of Alternative Growing Media and Containers on Seedling Growth and Foliar Chemistry. *Forests*, 9(7), 422. <https://doi.org/10.3390/f9070422>
- Itzá-Kantún, G. M., Castillo-Caamal, J. B., Escalante-Euán, J. F. y Santos-Flores, J. S. (2024). Efecto de microorganismos de monte y abonos en el suelo y el rendimiento de maíz en Yucatán. *Bioagrociencias*, 17(1). <https://doi.org/10.56369/BAC.5527>
- Izquierdo, J. y Arévalo, J. J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería Y Región*, 26, 20–28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Jiménez, T. P. y Palacios, B. G. (2023). Establecimiento de una plantación de nueve especies forestales con fines de rehabilitación de suelos degradados en la hacienda la Florencia en el Cantón y provincia de Loja. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 2036–2051. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7031
- Kafkafi, U. y Tarchitzky, J. (2012). *Fertirrigación: Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua*. International Potash Institute. https://www.ipipotash.org/uploads/udocs/391-2012_ifa_ipi_fertirrigacion.pdf
- Kollert, W. y Kleine, M. (Eds.). (2017). *The global teak Study.: Analysis, evaluation an future potential of teak resources*. International Union of Forest Research Organizations (IUFRO).
- La Fuente, L. M. de, Ovalle, J. F., Arellano, E. C. y Ginocchio, R. (2017). Use of alternative containers for promoting deep rooting of native forest species used for dryland restoration: the case of *Acacia caven*. *Forest*, 10(5), Artículo 2101, 776–782. <https://doi.org/10.3832/ifor2101-010>
- López, G., Vaidés, E [E.] y Alvarado, A [A.] (2018). Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 42(1). <https://doi.org/10.15517/rac.v42i1.32201>

- Madrid-Aispuro, R., Prieto-Ruiz, J., Hernández-Díaz, J., Aldrete, A [A.], Wehenkel, C. y Chávez-Simental, J. (2021). Crecimiento de *Pinus cembroides* ZUCC. en vivero y campo producido en diferente tipo de contenedor. *Revista Fititec*, 44(3), 435–442. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.3.435>
- Martínez, H. (2015). *Teca (Tectona grandis L. f.): condiciones para su cultivo “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”*. https://www.onfcr.org/wp-content/uploads/media/uploads/documents/ff_5_teca.pdf
- Mejía, M. (2024). *Evaluación de tres tipos de fertilización en dos sustratos para producción de plántulas de Tectona grandis en contenedores plásticos en el vivero de Zamorano* [Proyecto Especial de Graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/items/697f1d2a-c728-4856-943c-054fdfe10aee>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (Ed.) (2016). *La extensión agropecuaria y forestal en bioestimulantes y bioinsumos*.
- Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H. y Eibi, B. (2015). *Sistemas agroforestales: Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales* (1ª ed.).
- Múnera, G. (2012). *Análisis de suelos y tejido vegetal*. Universidad Tecnológica de Preira. <https://repositorio.utp.edu.co/entities/publication/db73924d-a858-47b0-bae7-82fc6e0625f8>
- Patiño, S., Suárez, L., Andrade, H. y Segura, M. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 9(2), 121–133. <https://doi.org/10.22490/21456453.2312>
- Pérez-Luna, Y. y Álvarez, J. (2021). Efecto de la aplicación de biofertilizantes sobre el rendimiento de maíz en parcelas con y sin cobertura vegetal. *IDESIA*, 39(4). <https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000400029>
- Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P. y Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *The New Phytologist*, 193(1), 30–50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
- Porkcolombia. (2020). *Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia*. <https://economiacircular.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/09/guia-biogas-sector-porcicola-ministerio-de-ambiente-desarrollo-sostenible.pdf>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2020). *Guía base para el establecimiento de viveros forestales*. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/cr/undp_cr_Guia_base_establecimiento_viveros_forestales_20.pdf
- Quemada, M. y Gabriel, J. (2023). *Impacto de los fertilizantes y la energía en la producción de alimentos*. <https://www.upa.es/Anuario2023/020-Anuario-2023-Quemada-Gabriel.pdf>
- Ramos, E. y Zúñiga, D. (2008). Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología Aplicada*, 7(1, 2), 123–130. <https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v39n4/0718-3429-idesia-39-04-29.pdf>

- Reyes-Millalón, J., Gerding, V. y Thiers-Espinoza, O. (2012). Fertilizantes de liberación controlada aplicados al establecimiento de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 18(3), 313–328. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.08.060>
- Rodríguez-Calampa, N. y Tafur-Torres, Z. (2014). *Producción de Microorganismos de Montaña para el desarrollo de una agricultura orgánica*. Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental. https://estaticos.qdq.com/swdata/files/950/950904418/CIn_3256.pdf
- Salcedo Pérez, E., Ruiz Blandon, B. A., Hernández Álvarez, E., González Cruz, R., Bernabé-Antonio, A., Orozco-Guareño, E., Ramírez-López, C. B., Hernández, J. A. y Delgado-Fornué, E. (2019). Propiedades del suelo y nitrógeno como indicadores del crecimiento en plantaciones comerciales de teca. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 10(52). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i52.398>
- Santos, M. L. d., Leite, H. G., Cavalcante, V. S., Fernandes, L. V. y Neves, J. C. L. (2022). Allometric equations for biomass and contents of macronutrients in a young *Tectona grandis* stand. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 46, Artículo e0220030. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20220030>
- Singh, S. y Verma, A. (2007). Environmental review the potential of nitrification inhibitors to manage the pollution effect of nitrogen fertilizers in agricultural and other soils. *Environmental Practice*, 9(4). <https://www.cambridge.org/core/journals/environmental-practice/article/abs/environmental-review-the-potential-of-nitrification-inhibitors-to-manage-the-pollution-effect-of-nitrogen-fertilizers-in-agricultural-and-other-soils-a-review/CBD793FCE4AF664974488846ED471F28>
- Siqueira, D. P., Ford, C., Lloyd, A., White, D., Salvatierra, G. y Dungey, H. (2025). Container size and site quality affect survival and early growth performance of New Zealand native tree species. *Journal of Forestry Research*, 36(1). <https://doi.org/10.1007/s11676-025-01851-w>
- Sistema Biobolsa. (2021). *Manual del biol.* https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SISTEMA%20BIOBOLSA%20s.f.%20Manual%20del%20BIOL.pdf
- South, D. B., Harris, S. W., Barnett, J. P., Hains, M. J. y Gjerstad, D. H. (2005). Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, U.S.A. *Forest Ecology and Management*, 204(2-3), 385–398. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.09.016>
- Stuewe y Rose. (2006). *Manual de viveros para la producción de especies forestales en contenedor. Volumen 2: Contenedores y medios de crecimiento*. <https://restauramerica.org/wp-content/uploads/2022/03/Volumen-2-Completo.pdf>
- Tamarit-Urias, J. C., los Santos-Posadas, H. M. de, Aldrete, A [Arnulfo], Valdez-Lazalde, J. R., Maldonado, H. R. y La Guerra-De 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). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531908>
- Vargas-Barrantes, P. y Castro-Barquero, L. (2019). Aislamiento y evaluación de microorganismos solubilizadores de fósforo de andisoles en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 43(1). <https://doi.org/10.15517/rac.v43i1.35649>

- Vásquez, I., López, M., Pérez, G., Santos, A., Jiménez, M. y Aguilar, G. (2015). Aclareo y fertilización química en la productividad primaria neta de plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 6(31), 82–93. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v6n31/v6n31a7.pdf>
- Verhoeven, K. J. F., Verbon, E. H., van Gurp, T. P., Oplaat, C., Ferreira de Carvalho, J., Morse, A. M., Stahl, M., Macel, M. y McIntyre, L. M. (2018). Intergenerational environmental effects: Functional signals in offspring transcriptomes and metabolomes after parental jasmonic acid treatment in apomictic dandelion. *The New Phytologist*, 217(2), 871–882. <https://doi.org/10.1111/nph.14835>

Anexo

Anexo A

Fotografía del establecimiento del ensayo en la plantación



Anexo B

Fotografía del análisis de Nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$) y Fosfatos (PO_4) en laboratorio



Anexo C

Visualización de dosis de fastrac® a 50 g (A) y 75 g (B)



A

B

Anexo D*Almacenamiento y reposo de los fertilizantes orgánicos*

Anexo E*Sensor de medición de humedad en el suelo*

Anexo F

Registro de variables de altura y diámetro

Medición dendrométrica						
Método					Fecha:	
Código	R1		R2		R3	
	Altura total (cm)	Diámetro basal (mm)	Altura total (cm)	Diámetro basal (mm)	Altura total (cm)	Diámetro basal (mm)
BCD2						
1						
3						
5						
7						
9						
11						
13						
15						
17						
19						
BCD2						
1						
3						
5						
7						
9						
11						
13						
15						
17						
19						
MMD1						
1						
3						
5						
7						
9						
11						
13						
15						
17						
19						

Nota. R1= Repetición 1; R2= Repetición 2; R3= Repetición 3.

Anexo G

Registro de datos de sobrevivencia por tratamiento

PLANTAS SOBREVIVIENTES			
Método		Fecha:	11/1/2025
Código del tratamiento	R1	R2	R3
BBCD1			
BBCD2			
BMMD1			
BMMD2			
BFD1			
BFD2			
BTF ₀ D1			
BTF ₀ D2			
CBCD1			
CBCD2			
CMMD1			
CMMD2			
CFD1			
CFD2			
CTF ₀ D1			
CTF ₀ D2			

Nota. R1= Repetición 1; R2= Repetición 2; R3= Repetición 3.

Anexo H

Datos atípicos en tratamiento de contenedor y bolsa de polietileno

