

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



Proyecto Especial de Graduación
**Evaluación de tres tipos de fertilización en dos sustratos para
producción de plántulas de *Tectona grandis* en contenedores plásticos
en el vivero de Zamorano**

Estudiante

María Montserrat Mejía Sandoval

Asesores

Josué Aníbal León Carvajal, Mtr.

Lesly Yanéx Liconá Velásquez, Mtr.

Abner Obed Cortez Martínez, Dr.

Honduras, agosto 2024

Autoridades

SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

VICTORIA CORTÉS MATAMOROS

Directora Departamento de Ambiente y Desarrollo

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros.....	5
Índice de Figuras	6
Índice de Anexos	7
Resumen	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Metodología.....	13
Sitio de Estudio	13
Diseño del Estudio	13
Etapa 1. Elaboración del Óxido Reductor	14
Etapa 2. Preparación de Sustratos, Mezclas para Contenedores y Aplicación de Fertilizantes	17
Etapa 3. Germinación y Trasplante.....	20
Etapa 4. Aplicaciones de Óxido Reductor	21
Etapa 5. Toma de Datos	21
Etapa 6. Análisis Estadístico	22
Resultados y Discusión.....	24
Cromatografía de Muestras de Suelo Base para Elaboración de Óxido Reductor	24
Medición de Nitrógeno y Fósforo Total en Óxido Reductor	24
Altura de las Plántulas.....	25
Diámetro de la Plántulas.....	28
Crecimiento Radicular de las Plántulas.....	30
Índice de Biomasa	33
Potencial de Reutilización de Turba Pindstrup®	35

	4
Desarrollo de Plántulas de Teca.....	36
Conclusiones	38
Recomendaciones.....	40
Referencias.....	41
Anexos.....	44

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Composición de Sustrato Pindstrup® (cabul)	17
Cuadro 2 Características de Turba TS1®	19
Cuadro 3 Análisis de Sustrato Pindstrup® Reutilizado	20
Cuadro 4 Separación de Medias Duncan para Altura (cm)	25
Cuadro 5 Separación de Medias Duncan para Diámetro (mm)	29
Cuadro 6 Media de Variable Volumen Radicular (cm ³)	31
Cuadro 7 Media de Índice de Proporcionalidad Biométrica (IPB)	34

Índice de Figuras

Figura 1 Vivero de la Unidad de Forestales, Zamorano.	13
Figura 2 Etapas de la Investigación	14
Figura 3 Proceso Seguido para Realizar la Cromatografía	16
Figura 4 Pasos para la Elaboración del Óxido Reductor.....	16
Figura 5 Turbera de Sphagnum	18
Figura 6 Altura de las Plántulas Según Tratamientos.....	26
Figura 7 Diámetro (mm) de Plántulas Según Tratamientos.....	30
Figura 8 Volumen Radicular (cm ³) de Plántulas de <i>Tectona grandis</i> Según Tratamiento	32
Figura 9 Índice de Proporcionalidad Biométrica (IPB)	35

Índice de Anexos

Anexo A Diseño de Tratamientos.....	44
Anexo B Cromatografía de Muestras de Suelo	45
Anexo C Semillas de <i>Tectona grandis</i> en Tratamiento Pre-germinativo	46
Anexo D Formato Físico para Toma de Datos.....	47

Resumen

La gestión sostenible de las plantaciones forestales comerciales se ha vuelto esencial para equilibrar la producción de madera con la conservación ambiental. La teca es un árbol de gran valor económico y el más plantado para maderas duras tropicales, destaca por su alto valor y rápida adaptación. El estudio se centró en evaluar tres tipos de fertilización en dos sustratos para la producción de plántulas de teca en el vivero de Zamorano. Se probó Osmocote®, Fastrac® y Óxido Reductor en diferentes dosis, combinados con sustratos como la turba Pindstrup® y la turba TS1®. Los resultados mostraron que Osmocote® mejoró significativamente la altura, diámetro y crecimiento radicular de las plántulas. La combinación de Osmocote® con Óxido Reductor también mostró buenos resultados, mientras que los tratamientos con Fastrac® fueron menos efectivos. El Óxido Reductor, aunque prometedor como biofertilizante, no tuvo los efectos esperados, probablemente debido a la baja microbiota en el sitio de recolección y las condiciones inadecuadas para su desarrollo. La turba Pindstrup®, especialmente combinada con perlita y vermiculita, demostró un alto potencial para reutilización y optimización del crecimiento, proporcionando un entorno favorable para las plántulas. Las conclusiones subrayan la importancia de elegir cuidadosamente los fertilizantes y sustratos para maximizar el crecimiento y la calidad de las plántulas. La liberación controlada de nutrientes y la selección adecuada de sustratos son cruciales para una producción forestal eficiente y sostenible. Estos hallazgos ofrecen directrices prácticas para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en los viveros forestales.

Palabras clave: Crecimiento, microorganismos, oxidación, sustrato, viveros forestales

Abstract

Sustainable management of commercial forest plantations has become essential to balance timber production with environmental conservation. Teak, the most widely planted tropical hardwood, stands out for its high value and rapid adaptation. The study evaluated three types of fertilization methods with Osmocote[®], Fastrac[®], and Reducing Oxide, at different doses, combined with substrates like Pindstrup[®] peat and TS1[®] peat, for producing teak seedlings in the Zamorano nursery. . The results showed that Osmocote[®] significantly improved seedling height, diameter, and root growth. The combination of Osmocote[®] with Reducing Oxide also showed good results, while the Fastrac[®] treatments were less effective. Reducing Oxide, although promising as a biofertilizer, did not have the expected effects, probably due to low microbiota at the collection site and inadequate conditions for its development. Pindstrup[®] peat, especially combined with perlite and vermiculite, showed a high potential for reuse and growth optimization, providing a favorable environment for seedlings. The findings underline the importance of carefully choosing fertilizers and substrates to maximize seedling growth and quality. Controlled nutrient release and proper substrate selection are crucial for efficient and sustainable forest production. These findings provide practical guidelines for improving efficiency and sustainability in forest nurseries.

Keywords: Forest nurseries, growth, microorganisms, oxidation, substrate

Introducción

En la actualidad, existe la necesidad de satisfacer la creciente demanda de recursos naturales, es por esta razón que, la gestión sostenible de las plantaciones forestales comerciales se ha convertido en una prioridad crítica. Una plantación forestal es un entorno forestal creado mediante la introducción en el suelo de plántulas, semillas, o ambas, como parte del proceso de forestación o reforestación (Carnus et al., 2006).

La gestión sostenible de plantaciones forestales comerciales es un enfoque fundamental en la silvicultura moderna, según Valladares (2004) busca equilibrar la producción de madera y otros productos forestales con la conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente. Este enfoque se basa en la idea de que las plantaciones forestales pueden ser manejadas de manera que sean económicamente viables a largo plazo, al tiempo que contribuyen a la conservación de la biodiversidad, la calidad del suelo y del agua, y la mitigación del cambio climático.

Tectona grandis, conocida comúnmente como "teca" es un árbol caducifolio de gran tamaño, originario del sudeste de Asia, donde puede crecer hasta los 45 metros de altura y desarrollar un tronco con contrafuertes a medida que alcanza la madurez (Francis y Lowe, 2000). Es una especie de alto valor económico ampliamente cultivada en muchas partes del mundo por su madera valiosa, rápido crecimiento y su capacidad de adaptación a diversas condiciones climáticas. Representa el 74% del total de la superficie destinada a la plantación de maderas duras tropicales a nivel mundial, consolidándose como la especie de mayor relevancia en esta categoría. Otro dato interesante es que, en el año 2013, el valor de la madera de teca para aserrío alcanzó los USD 717 por metro cúbico de plantación (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza [CATIE], 2013; Hine-Gómez et al., 2013)

El estudio realizado por Landis et al. (1990), menciona que el éxito de las plantaciones forestales está determinado por la calidad de las plantas que se producen en el vivero. Por otra parte, la fertilización, después del riego, es la práctica que más influye en la calidad de las plantas, ya que el

estado nutricional incide en procesos fisiológicos como la regulación del crecimiento, el flujo de energía y la síntesis de los complejos orgánicos que las conforman. El aumento en la fertilización puede generar plantas más robustas, con un mayor contenido de nutrientes y una mayor capacidad para desarrollar nuevas raíces (Douglass y Seifert, 2005; Escobar, 2007; Penuelas y Ocana, 1996; Van Den Driessche, 1992).

Frecuentemente se subestima la efectividad de emplear agentes biológicos y fito estimulantes que promueven el crecimiento y la calidad de las plántulas (Lagos Matute, 2023). Los biofertilizantes, que comprenden una variedad de microorganismos beneficiosos y compuestos orgánicos, pueden mejorar la eficiencia de la fertilización, reducir la dependencia de fertilizantes químicos y promover la salud del suelo (Peña-Cabriales et al., 2012).

Uno de estos biofertilizantes es el Óxido Reductor, que ha demostrado tener un potencial significativo para mejorar el crecimiento y la calidad de las plantas, así como para enriquecer la microbiota del suelo (Perea-Vélez et al., 2017). El Óxido Reductor es un caldo de microorganismos derivado de productos de origen orgánico que posee la capacidad de mejorar tanto el suelo como las plantas debido a su contenido de vitaminas, inductores hormonales, auxinas, minerales, materia orgánica en descomposición, enzimas, proteínas y ácidos orgánicos (húmicos y fúlvicos), así como la contribución de microorganismos óxido reductores. Estos microorganismos tienen la capacidad de acelerar procesos químicos y bioquímicos, tanto en sustratos como a nivel vegetal (Molina-Nuñez, 2023).

Por esta razón, es fundamental explorar en detalle cómo la aplicación del Óxido Reductor como biofertilizante en viveros forestales y plantaciones de teca puede influir en la salud y calidad del suelo, así como en el óptimo crecimiento de las plantas. En la búsqueda por mantener y aumentar la productividad de las plantaciones de teca, la elección cuidadosa de sustratos se convierte en un factor crucial. El sustrato funciona como un sostén que suministra a las raíces cantidades adecuadas de aire, agua y nutrientes minerales (Ansorena Miner, 1994). La formulación de la mezcla para el sustrato debe

equilibrar adecuadamente los materiales; de lo contrario, el crecimiento de la planta podría sufrir problemas como asfixia por falta de oxígeno, deshidratación por falta de agua, o exceso/carencia de nutrientes (Lemaire et al., 2013).

La turba, también llamada *peat moss*, se forma a partir de la fosilización de material vegetal sobre la superficie terrestre. Este recurso, considerado no renovable, se clasifica en diferentes tipos según su grado de descomposición (Cruz-Crespo et al., 2013). Pindstrup® es un producto comercial, su base se conforma de turba de rubia *Sphagnum* spp con un nivel medio de abono y con un pH 6, que es utilizado para la producción de plántulas (Pindstrup Mosebrug SAE, 2012). La incorporación de la perlita y vermiculita son importantes en estas mezclas ya que, en el caso de la perlita, permite una mayor aireación y retención de humedad; y la vermiculita proporciona volumen, retención de humedad y tiene una alta capacidad de intercambio catiónico.

La importancia de esta investigación radica en su capacidad para proporcionar información valiosa tanto para la Universidad Zamorano, como para los productores de teca y gestores de plantaciones, contribuyendo así a la optimización de los sistemas de producción de esta especie de alto valor económico. Al enfocarse en la nutrición de las plántulas en viveros, este estudio optimiza el crecimiento y la calidad de las plántulas de teca mediante la selección adecuada de sustratos y fertilizantes. Los hallazgos ofrecen directrices prácticas para mejorar la eficiencia y productividad en viveros forestales, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles y responsables.

El objetivo principal del presente estudio fue evaluar tres tipos de fertilización en dos sustratos para producción de plántulas de teca en contenedores plásticos en el vivero forestal de Zamorano. Para lograrlo, se propusieron los siguientes objetivos específicos: Evaluar el desarrollo de plántulas de teca en vivero y evaluar el potencial de reutilización de sustrato Pindstrup® (cabul) para producción de plántulas de teca en contenedores plásticos.

Metodología

Sitio de Estudio

El estudio se realizó en el vivero de la Unidad Forestal de la Escuela Agrícola Panamericana (Figura 1), ubicado a 32 km de Tegucigalpa, Honduras. El lugar tiene una temperatura promedio anual de 24 °C, una precipitación anual de 1,100 mm y se encuentra a una altura de 800 msnm.

Figura 1

Vivero de la Unidad de Forestales, Zamorano



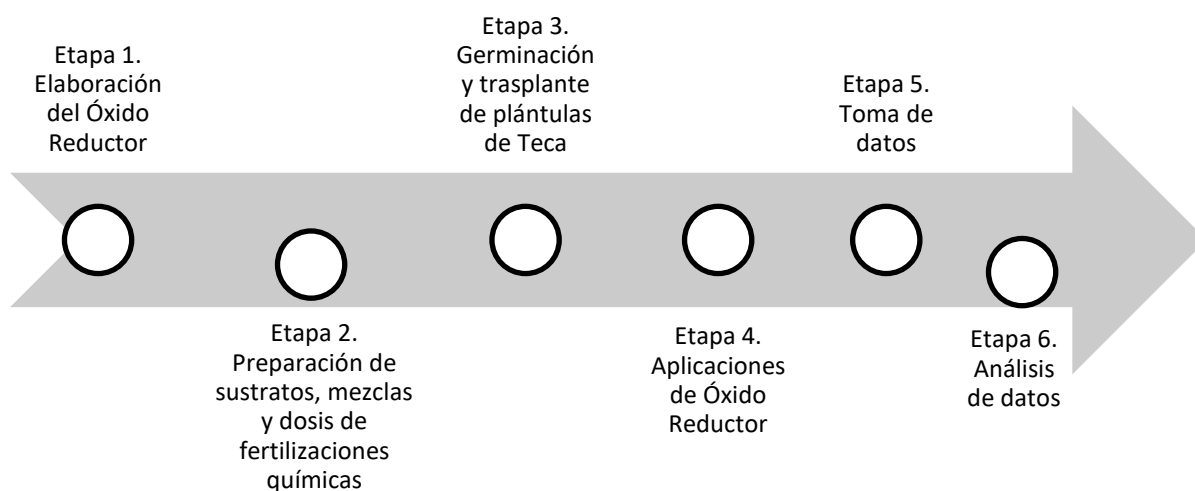
Diseño del Estudio

El diseño experimental del estudio es factorial 3×4, con un arreglo de Bloques Completos al Azar (BCA) y con un enfoque cuantitativo. Se investigaron los efectos de tres tipos de fertilización (Osmocote®, Fastrac®, Óxido Reductor), en dosis de 0 g, 1 g, 1.5 g y 2 g, aplicados sobre dos tipos de sustrato (Turba Pinstrup® (cabul) reutilizado y Turba TS1®) (Anexo A). Para la turba Pinstrup® (cabul), se realizaron dos mezclas: 80% cabul y 20% perlita, y 80% cabul, 10% perlita y 10% vermiculita. El sustrato turba TS1® se empleó con 60% TS1®, 20% perlita y 20% vermiculita.

Cada tratamiento poseía 45 plantas de teca por caja (porta tubete) y cada tratamiento tenía tres repeticiones. Se eligieron aleatoriamente 10 plantas para medir el diámetro y la altura, mientras que, para medir la biomasa y el crecimiento radicular, solamente se seleccionó una planta al azar. En total se utilizaron 50 cajas de contenedores plásticos de 400 ml, resultando en una población total de 1,215 plantas. Se mantuvieron las condiciones controladas de riego, luz y temperatura para garantizar la uniformidad en el ambiente de crecimiento. Las variables de respuesta dependientes medidas incluyeron características como altura, diámetro, masa radicular e índice de biomasa, destinadas a evaluar el impacto de los tratamientos en el desarrollo de las plántulas. Para cumplir con los objetivos de este estudio, la investigación se dividió en seis etapas según se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Etapas de la Investigación



Etapa 1. Elaboración del Óxido Reductor

Recolección de Microorganismos.

Se recolectaron microorganismos provenientes de la Estación Forestal Santa Rosa, Cholulteca, una plantación de teca establecida desde 1990. Esto con el fin de obtener la mayor cantidad de microorganismos con información genética de la especie para la elaboración del Óxido Reductor. Se

colectaron dos muestras de suelo para un posterior análisis con el fin de determinar el contenido de nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio) y pH. Una muestra se recolectó en un camino en medio de la plantación de teca, y la otra muestra se tomó de una parte no perturbada de la plantación. Los análisis de suelo ayudaron a comprender la composición inicial del suelo y su influencia en los resultados del estudio. Al final, se compararon los resultados de las muestras realizando una cromatografía de suelo para evaluar el estado y salud del suelo en distintas ubicaciones. Luego de haber recolectado las muestras, en bolsas plásticas, se almacenaron en sacos para conservar humedad y proporcionar un ambiente adecuado a los microorganismos.

Cromatografía de Muestras de Suelo.

Para evaluar el estado de la microbiota del suelo que se recolectó en la plantación de teca ubicada en Choluteca, se realizó una cromatografía, ya que, este es un método que permite la separación, identificación y determinación de los componentes químicos presentes en una mezcla compleja, es decir, en una mezcla que contenga muchos componentes en proporciones que no son exactas (Sgariglia et al., 2010).

Para realizar la cromatografía, se utilizaron los siguientes materiales y pasos: dos *Beaker* de 100 ml, un macerador para triturar las muestras, un agitador de vidrio, dos platos *Petri* para contener las muestras preparadas, papel *Whatman*[®], nitrito de plata e hidróxido de potasio para preparar las soluciones necesarias, y un gotero para transferir las muestras al papel *Whatman*. Para llevar a cabo este método, se tomaron en cuenta los siguientes pasos:

Figura 3*Proceso Seguido para Realizar la Cromatografía*

- 1 Macerar las muestras de suelo recolectadas en la visita de campo y colocar cada una en un beaker diferente.
- 2 Diluir cada muestra en una solución madre y dejar que sedimenten.
- 3 Preparar el papel Whatman colocándole unas gotitas de nitrito de plata e hidróxido de potasio en el centro.
- 4 Cuando las mezclas se hayan sedimentado, extraer con un gotero un poco de la mezcla de la parte más superficial y colocarla en el papel Whatman.
- 5 Esperar al día siguiente a que los componentes de la mezcla se hayan desplazado en el papel para poder hacer la correcta lectura de la cromatografía.

Elaboración de Óxido Reductor.

Para la preparación de la mezcla de Óxido Reductor, se utilizaron los siguientes materiales: 1 gal de melaza, 4 kg de microorganismos obtenidos de muestras de suelo recolectadas, 4 kg de harina de roca, 4 kg de gallinaza, 55 gal de agua potable, y dos unidades de electrodos para medir las condiciones necesarias de la mezcla. En la Figura 4 se observa el proceso de elaboración del Óxido Reductor.

Figura 4*Pasos para la Elaboración del Óxido Reductor*

- 1 Colocar todos los materiales en un recipiente de gran tamaño.
- 2 Mezclar todos los materiales con agua potable hasta que se homogenice la mezcla.
- 3 Colocar a la mezcla 2 electrodos que permitirán una oxigenación por difusión

Nota: Formulación de prueba entre equipo de investigación.

Se realizó una medición de nitrógeno y fósforo total para conocer el contenido de nutrientes del Óxido Reductor (OR). Los métodos utilizados para realizar las mediciones fueron: *Lovibond method* # 281 basado en el *Standar Methods (STMM)* (4500 N. *C-Persulfate method*) para nitrógeno y *Lovibond method* # 318 basado en *STMM* (4500 P. *J-Persulfate method*) para fósforo.

Etapa 2. Preparación de Sustratos, Mezclas para Contenedores y Aplicación de Fertilizantes

Preparación de Sustratos.

Para iniciar la preparación del sustrato, se comenzó con la limpieza de turba Pindstrup® reutilizado. Este sustrato proviene de una plantación de sandía cercana a la Universidad de Zamorano, quienes conocen a este sustrato como cabul. La limpieza se hizo con el objetivo de eliminar los restos de semillas de sandía y otras impurezas del sustrato que contenía al ser desechado.

Mezclas de Sustratos para Contenedores.

Se llevó a cabo una mezcla del sustrato con la perlita y la vermiculita, según los tratamientos definidos para el estudio. Las formulaciones para los tratamientos incluyeron: 80% de Pindstrup® (cabul) y 20% de perlita; 80% de Pindstrup®, 10% de perlita y 10% de vermiculita; y 60% de turba TS1®, 20% de perlita y 20% de vermiculita.

Pindstrup® (cabul) está compuesto principalmente de turba rubia de *Sphagnum* spp, con un nivel medio de fertilizante y un pH de 6, siendo utilizado para la producción de plántulas (Pindstrup Mosebrug SAE, 2012). En el Cuadro 1 se puede observar la composición de este sustrato en estado original.

Cuadro 1

Composición de Sustrato Pindstrup® (cabul)

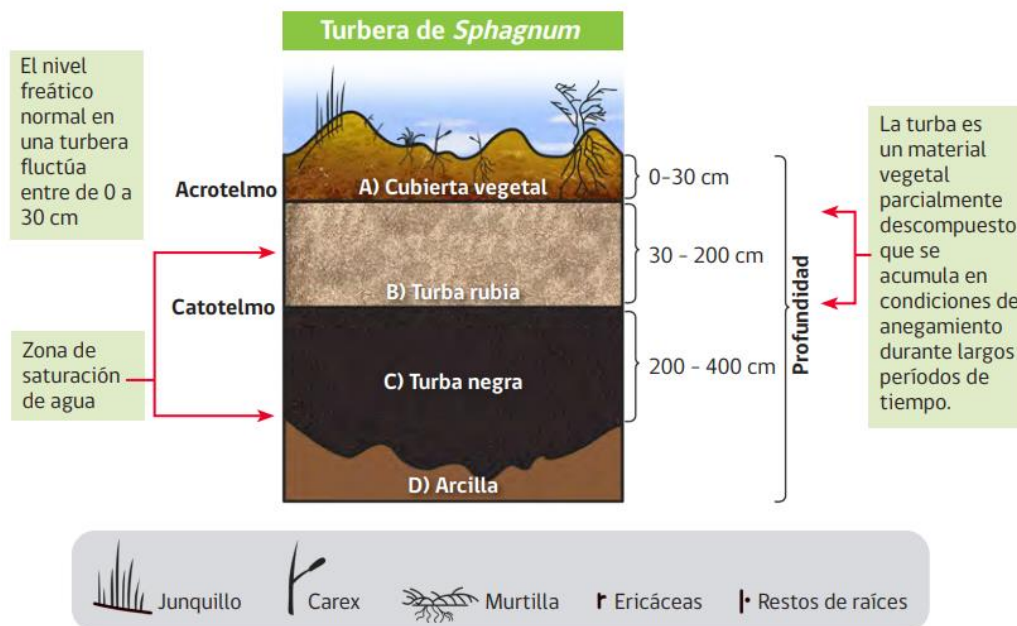
Composición	Cantidad
Cribado	0-0.6 mm/0-10 mm
pH	5.5-6.0
Materia seca	55-75 g/L
Conductividad	2.0-4.0
Fertilizante NPK	1 kg
Microelementos	0.050 kg
Nitrato-N	70 g
Amonio-N	50 g
Fósforo (P ₂ O ₅)	140 g
Potasio (K ₂ O)	240 g
Magnesio (MgO)	23 g

Nota. Tomado de Agronegocios Génesis (2021)

El color de la turba se asocia con la profundidad del suelo del cual fue extraída (Dominguez et al., 2017). En este caso fue la capa superior de la turbera, dicha capa está por debajo del acrotelmo que es la capa donde están todas las plantas vivas (Figura 5). El Cuadro 2 se observan los componentes y características de la turba TS1®. En esta investigación se utiliza turba rubia, específicamente turba TS1®, pues es el sustrato estandarizado para plántulas de bosques latifoliados; Suazo Gonzales (2020), realizó una investigación de evaluación de sustratos en el vivero de la Unidad Forestal, demostrando que el uso de estos sustratos y combinaciones con perlita y vermiculita tuvo un muy buen desempeño.

Figura 5

Profundidad de la Turbera de Sphagnum



Cuadro 2

Características de Turba TS1®

Características	Valores
Contenido de sales	1,000 mg/L
Densidad aparente seca	100 g/L
Materia orgánica sobre materia seca	90%
Conductividad eléctrica (CE) (UNE-EN13038)	35 mS/m
pH (UNE-EN13037)	5.5-6.5
Volumen al envasar	210 L
Estructura	Fina/Media

Nota: Klasmann-Dellmann GmbH (2024)

Para un mejor desempeño, a los sustratos se les agregó materiales como perlita, que es un silicato de origen volcánico que recibe un tratamiento de precalentado y horneado para convertirlo en un material liviano, este brinda porosidad y una mayor retención de agua (Abad et al., 2001), y vermiculita, que es un silicato de aluminio-hierro-magnesio, que proporciona volumen, retención de humedad y tiene una alta capacidad de intercambio catiónico. Los viveros forestales, son espacios dedicados a la propagación y desarrollo inicial de árboles y plantas forestales con una mejor calidad y al menor costo posible (Rojas-Rodríguez, 2006), desempeñan un papel crucial en el proceso de establecimiento de plantaciones de teca y en la conservación de este recurso forestal valioso.

La mezcla de turba, perlita y vermiculita en contenedores (tubetes) se considera una combinación estándar en numerosos viveros forestales (Núñez, 2009). Según Hernández et al., (2014) utilizar turba junto con perlita y vermiculita contribuyen a una calidad superior de plántulas.

Análisis de Sustrato.

En el Cuadro 3 se observan los resultados del análisis de sustrato que se realizó a la turba Pindstrup® (cabul) en el que se evaluó el contenido de materia orgánica, NPK y pH con el fin conocer los aportes nutricionales que este sustrato tiene previo a la preparación de la mezcla.

Cuadro 3

Análisis de Sustrato Pindstrup® Reutilizado

Muestra	pH	dS m ⁻¹		g/100 g (%)		
		CE	MO	N	P	K
Cabul	5.67	4.07	65.0	1.06	0.14	0.38

Dosis de Fertilizante.

Se emplearon tres tipos de fertilizantes: Osmocote® y Fastrac®, ambos de liberación lenta y naturaleza química; y el Óxido Reductor, que es un fertilizante orgánico. Fastrac® posee la siguiente composición química (% p/p): 20% nitrógeno, 15% fósforo (P₂O₅) y 5% potasio (K₂O). Se aplicó Fastrac® ya que es recomendado y ha sido probado para plantaciones forestales en terrenos de Zamorano. Fastrac® es un fertilizante de liberación lenta, el tiempo de liberación de nutrientes es de 3 meses, lo cual evita deficiencias y mejora el aprovechamiento de los nutrientes. Por otro lado, Osmocote® (15-9-12) presenta la siguiente composición química (% p/p): 15% nitrógeno, 9% fósforo (P₂O₅), 5% potasio (K₂O), 2.1% magnesio (MgO), 5.9% azufre (S), 0.66% micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo).

En el caso de los fertilizantes químicos, se trabajó con diferentes dosis: 1 g, 1.5 g y 2 g, incorporadas directamente en la mezcla del sustrato con perlita y vermiculita. En el caso de los tratamientos con Óxido Reductor, las dosis fueron de 15 ml/planta en aplicaciones de una y dos veces por semana mediante aplicaciones foliares.

Etapas 3. Germinación y Trasplante

La semilla de teca que se utilizó para este estudio proviene de huerto semilleros de Costa Rica y fue previamente escarificada como tratamiento pre germinativo. En el germinador de la Unidad Forestal, las semillas se establecieron en camas con arena esterilizada (Anexo C). Cuando las plántulas alcanzaron una altura aproximada de 1.5 cm, se trasladaron hacia los contenedores plásticos con las mezclas para cada tratamiento; este proceso se realizó durante las primeras horas de la mañana para evitar el estrés de las plántulas al momento del trasplante.

Etapa 4. Aplicaciones de Óxido Reductor

Los tratamientos que recibieron Óxido Reductor consistieron en dos aplicaciones diferentes: para la dosis 1, se aplicaron 15 ml por plántula, una vez a la semana, totalizando 12 aplicaciones. Para la dosis 2, se aplicaron 30 ml por plántula, distribuidos en dos aplicaciones semanales de 15 ml cada una, totalizando 24 aplicaciones. Se realizaron un total de tres aplicaciones, una por cada mes de crecimiento. La primera aplicación de óxido reductor se hizo a los 15 días de haber trasplantado las plántulas. Las aplicaciones se realizaron utilizando una bomba de mochila

Etapa 5. Toma de Datos

Variables Evaluadas.

Las variables evaluadas para determinar el efecto de los tratamientos fueron: altura total de la plántula (h), diámetro en el cuello (DAC), crecimiento radicular y biomasa. Para medir el diámetro y la altura, se realizaron tres mediciones: la primera al mes de edad después del trasplante (noviembre), la segunda al segundo mes (diciembre) y la tercera al tercer mes (enero). Para facilitar el registro, se empleó un formato físico en el que se registró las variables de campo (Anexo D).

El crecimiento radicular y el índice de biomasa se midieron en una plántula por cada repetición de cada tratamiento. Para el evaluar el crecimiento radicular, se utilizó el programa *WinRhizo*® disponible en el laboratorio del Programa de Investigación del Frijol del departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria de Zamorano, escaneando y analizando las imágenes de las raíces de las plántulas seleccionadas previamente.

WinRhizo® (Régent Instruments Inc., 2001) es un *software* creado para analizar la cantidad y distribución de raíces en el suelo, las cuales son extraídas mediante métodos de muestreo sistemático y luego lavadas antes de su procesamiento. El programa ofrece datos sobre diversos aspectos como la morfología, topología, densidad, apariencia, arquitectura, ramificación, color, presencia de relaciones simbióticas y estado sanitario, entre otros.

Para estimar la biomasa, se utilizó el Índice de Proporcionalidad Biométrica (IPB). Las plántulas se colocaron en un horno a 100 °C durante 4 horas, y luego se pesaron las hojas y las raíces con una balanza analítica. El crecimiento de los órganos vegetativos de la planta está directamente relacionado con la producción de biomasa en términos de tamaño y cantidad. Este índice es la relación entre la biomasa seca aérea dividido entre la biomasa seca radicular. Esta proporción se caracteriza por reflejar el desarrollo de la planta en vivero. Una buena relación debe variar entre 1.5 y 2.5, ya que valores superiores indican desproporción ya que el sistema radicular no es suficiente para proveer de energía a la parte aérea de la planta (Sáenz-Reyes et al., 2010). Para estimar el Índice de Proporcionalidad Biométrica (IPB) se utilizó la Ecuación 1.

$$IPB = \frac{Biomasa\ seca\ aérea\ (g)}{Biomasa\ secaradicular\ (g)} \quad [1]$$

Donde:

IPB = Índice de Proporcionalidad Biométrica

Etapa 6. Análisis Estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para evaluar la influencia de los sustratos y las fertilizaciones en el crecimiento de las plántulas. Se llevó a cabo un análisis factorial que consideró como factores principales los dos tipos de sustratos utilizados, las tres mezclas de sustratos, las diferentes dosis de fertilización aplicadas y los tres tipos de fertilizantes empleados.

Posteriormente, se utilizó el programa JMP (*John's Macintosh Project*) para realizar el análisis estadístico, aplicando el método de separación de medias de Duncan al diseño BCA. Este análisis evaluó las alturas y diámetros de las 10 plántulas de cada tratamiento para identificar el mejor tratamiento según el tipo de sustrato, la mezcla del sustrato, el tipo de fertilizante y la dosis de fertilización. Este enfoque permitió descomponer la variabilidad observada en el crecimiento de las plántulas y entender la contribución relativa de cada factor. La combinación de estos análisis

estadísticas proporcionó una comprensión más detallada de cómo los distintos factores afectan las respuestas observadas en el estudio.

Resultados y Discusión

Cromatografía de Muestras de Suelo Base para Elaboración de Óxido Reductor

Los resultados de la cromatografía de las muestras de suelo tomadas de la plantación de teaca en Cholulteca para la recolección de microorganismos indicaron que la muestra 1 tiene una mayor concentración de oxígeno y una menor concentración de microorganismos. Esto se debe a que la muestra 1 fue recolectada de un camino que atraviesa la plantación de teaca. En contraste, la muestra 2 mostró una mayor concentración de nitrógeno, con una mayor presencia de hongos y actividad microbiana en comparación con la muestra 1, evidenciada por los picos alrededor del anillo (Anexo B). La muestra 2 fue tomada en el centro de la plantación de teaca, en una zona menos intervenida.

Medición de Nitrógeno y Fósforo Total en Óxido Reductor

Siguiendo los pasos de la metodología seleccionada para realizar la medición de nitrógeno y fósforo total, los resultados fueron los siguientes: 10.1 mg/L para nitrógeno y 62.5 mg/L para fósforo. El contenido de nutrientes en el Óxido Reductor puede variar ampliamente dependiendo de la materia prima utilizada, el proceso de elaboración y las condiciones de almacenamiento, lo que hace que los valores reportados puedan ser diferentes a otros estudios (Marín Rodríguez, 2016).

En un estudio sobre la caracterización de bioles, se reportaron rangos de 1.2 a 5.2 g/L para nitrógeno total y de 0.1 a 1.2 g/L para fósforo total (Balám-Che et al., 2015), ubicándose los valores obtenidos de 10.1 mg/L para N y 62.5 mg/L para P por debajo de estos rangos. Otro estudio encontró valores de 1.2 a 3.2 g/L para N y 0.2 a 0.8 g/L para P en diferentes bioles (Alvarado, 2006), mostrando nuevamente que los resultados son inferiores.

Debido a los bajos resultados de N y P, es probable que por esta razón los tratamientos con el Óxido Reductor no presentaron los resultados esperados, lo cual podría atribuirse a problemas en el proceso de elaboración o las condiciones de almacenamiento no fueron apropiadas.

Altura de las Plántulas

El análisis de los datos de altura de las plántulas mostró diferencias significativas entre los tratamientos, indicando que la combinación de sustratos y fertilizantes afecta notablemente el crecimiento en altura de las plantas. El análisis estadístico arrojó un F Ratio de 99.3171 con una $p < 0.05$, lo cual confirma la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos. Los resultados de la separación de medias Duncan suelen presentarse con letras para indicar grupos. Los valores de medias que comparten al menos una letra no son significativamente diferentes entre sí (Cuadro 4). En términos de altura, se observa que el tratamiento con mejores resultados fue 80% Pindstrup® (cabul), 10% Perlita y Vermiculita, y 1.5g de fertilizante Osmocote® (Figura 6).

Cuadro 4

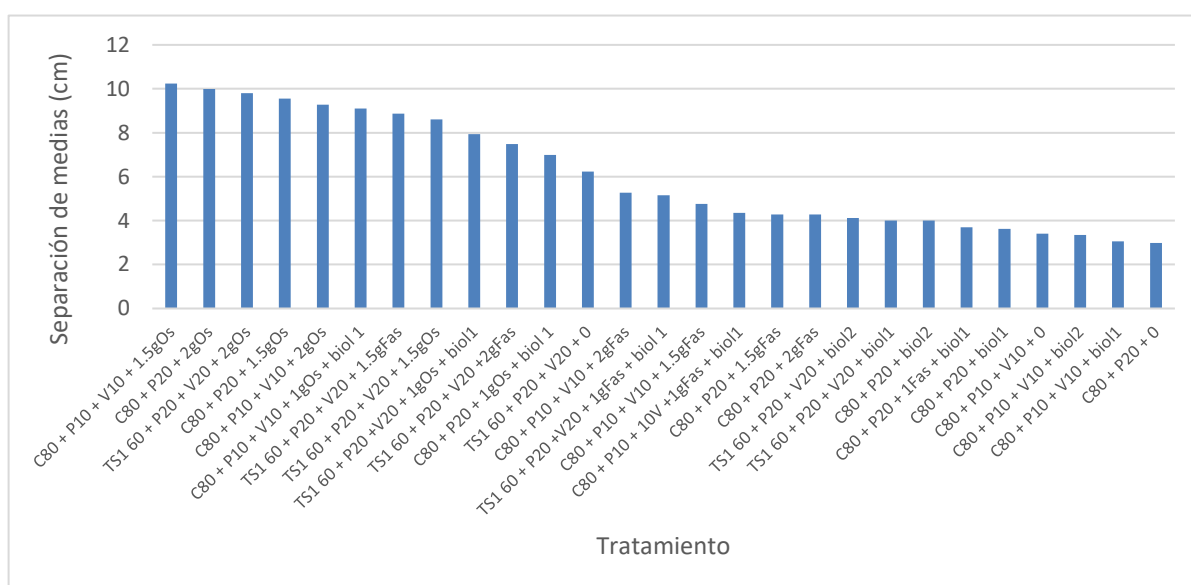
Separación de Medias Duncan para Altura (cm)

Tratamiento					Media de Cuadrados Mínimos
C80+P10+V10+1.5gOs	A				10.24
C80+P20+2gOs	A	B			9.99
TS160+P20+V20+2gOs	A	B	C		9.80
C80+P20+1.5gOs	A	B	C		9.56
C80+P10+V10+2gOs	A	B	C		9.28
C80+P10+V10+1gOs+OR1	A	B	C	D	9.10
TS160+P20+V20+1.5gFas		B	C	D	8.86
TS160+P20+V20+1.5gOs			C	D E	8.61
TS160+P20+V20+1gOs+OR1				D E F	7.93
TS160+P20+V20+2gFas				E F G	7.49
C80+P20+1gOs+OR1				F G	6.99
TS160+P20+V20+0				G H	6.24
C80+P10+V10+2gFas				H I	5.27
TS160+P20+V20+1gFas+OR1				I J	5.15
C80+P10+V10+1.5gFas				I J K	4.76
C80+P10+V10+1gFas+OR1				I J K L	4.35
C80+P20+1.5gFas				I J K L	4.27
C80+P20+2gFas				I J K L	4.27
TS160+P20+V20+OR2				I J K L	4.12
TS160+P20+V20+OR1				I J K L	4.01

Tratamiento		Media de Cuadrados Mínimos
C80+P20+OR2	J K L	4.00
C80+P20+1gFas+OR1	J K L	3.70
C80+P20+OR1	K L	3.62
C80+P10+V10+0		3.40
C80+P10+V10+OR2	K L	3.35
C80+P10+V10+OR1	K L	3.05
C80+P20+0	L	2.98

Figura 6

Altura de las Plántulas Según Tratamientos



Los tratamientos que mostraron la mejor respuesta en la variable de altura fueron aquellos en los que se aplicó el fertilizante Osmocote®, en todas las dosis y combinaciones. En particular, el tratamiento C80 + P10 + V10 + 1.5gOs mostró la mayor altura con una media de 10.24 cm, ubicándose en la designación estadística A. Este resultado puede atribuirse a la adecuada combinación de turba (C), perlita (P), vermiculita (V) y Osmocote® (Os) a una dosis de 1.5 g, lo cual proporciona un ambiente nutricional óptimo y una liberación controlada de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plántulas. Según Suazo Gonzales (2020) existe una relación positiva entre las variables altura y contenido de turba lo que sugiere que un mayor porcentaje de turba está asociado con una mayor altura.

Otro tratamiento con buena respuesta fue C80+P20+2gOs, con una media de 9.99 cm. Este tratamiento subraya la efectividad del fertilizante Osmocote® a una dosis de 2 g en combinación con una mayor proporción de turba. Asimismo, los tratamientos TS160+P20+V20+2gOs y C80+P20+1.5gOs lograron medias de 9.80 cm y 9.56 cm respectivamente, ubicándose en los grupos A, B y C. Osmocote® incluye contenido de micronutrientes en mejores proporciones que Fastrac®.

Por otro lado, los tratamientos con menor rendimiento fueron aquellos que no incluían fertilizantes químicos. El tratamiento control con mezcla C80+P20+0, que no incluye fertilizantes, reportó una de las menores alturas con una media de 2.98 cm, ubicándose en la designación estadística L. Este resultado resalta la importancia del uso de fertilizantes para el crecimiento adecuado de las plántulas. Además, los tratamientos C80+P10+V10+OR1 y C80+P10+V10+OR2, con medias de 3.05 cm y 3.35 cm respectivamente, se situaron en los grupos K y L.

El Óxido Reductor no reportó los resultados esperados en combinación con sustratos especiales de alta porosidad. Este puede deberse a la rapidez del lixiviado de la forma líquida, ya que el sustrato era altamente poroso. Además, otros autores como Molina-Nuñez (2023) reportan que el Óxido Reductor si funciona en producción en bolsa y suelo orgánico.

Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Hernández et al. (2014) quienes demostraron que la combinación de turba con perlita y vermiculita produce plántulas de mayor calidad. López (2012) menciona que “para la variable altura de planta y número de hojas verdaderas Pindstrup® obtuvo los mejores valores” para plántulas de café. Rose et al. (2004) mencionan que los productores de *Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp. de Brasil, Chile y Argentina aplicaron Osmocote® en la etapa de vivero con resultados exitosos. Según Olivo y Buduba (2006), los sustratos que contienen vermiculita son los que tienen mejor comportamiento, ya que la vermiculita brinda buenas condiciones fisicoquímicas en el desarrollo de las plantas.

Diámetro de la Plántulas

Se evaluaron las medias de los diámetros de los diferentes tratamientos, y los resultados muestran variaciones significativas en función de los tratamientos del estudio. Según el análisis de separación de medias Duncan, los tratamientos se agruparon en diferentes niveles de respuesta al efecto de los tipos de fertilizantes y diferente dosificación (Cuadro 5).

El tratamiento C80+P20+2gOs presentó la mayor media de diámetro con 0.63 mm, situándose en la designación estadística A. Este resultado sugiere que la combinación de turba, perlita y Osmocote® en una dosis de 2 g por planta proporciona un ambiente nutricional óptimo que favorece el crecimiento en diámetro de las plántulas. El Osmocote® es conocido por su liberación controlada de nutrientes, lo que asegura un suministro constante de elementos esenciales y micronutrientes, mejorando así el desarrollo del tallo.

Los tratamientos C80+P20+1.5gOs, C80+P10+V10+1.5gOs, TS160+P20+V20+1.5gOs y TS160+P20+V20+2gOs se situaron en el grupo B, con medias de diámetro que oscilan entre 0.55 y 0.603 mm. Estos resultados indican que, aunque no tan efectivos como el tratamiento con 2 g de Osmocote®, las combinaciones de turba, perlita, vermiculita y Osmocote® en diferentes dosis siguen siendo efectivas para el crecimiento del diámetro.

Por otro lado, los tratamientos con las menores medias de diámetro se agruparon en el grupo E. Estos incluyen C80+P10+V10+1Fas+OR1, C80+P10+V10+0, C80+P20+OR2 y otros, con medias que van desde 0.183 a 0.186 mm. Estos resultados reflejan que los tratamientos que no incluyen fertilizantes químicos de liberación controlada, como Osmocote®, o que utilizan dosis más bajas de otros fertilizantes, no son tan efectivos para estimular el crecimiento en diámetro. Los sustratos ejercen una influencia en el diámetro de las plántulas, así como la fertilización. El mayor diámetro del tallo se debe a un mayor contenido de raíces que presentaron estos sustratos, ya que influyen directamente en la absorción de nutrientes (Rodríguez, 2001)

En Canadá, Haase et al. (2006) observaron que los abetos (*Pseudotsuga menziesii*) experimentaron mayores incrementos en altura, diámetro basal, volumen del tallo y reservas internas de nutrientes al emplear fertilizantes de lenta liberación en lugar de los fertilizantes solubles convencionales. En México, Mateo-Sánchez et al. (2011) encontraron resultados similares al aplicar Osmocote® (15N-9P-12K) en cedros (*Cedrela odorata*), observándose un mayor crecimiento en altura, diámetro, biomasa aérea, biomasa radical e índices de calidad. Esto se atribuye a la composición química de Osmocote®, que incluye cinco macronutrientes y seis micronutrientes, favoreciendo el desarrollo óptimo de las plantas.

La Figura 7 muestra el valor de los diámetros (mm) de las plántulas según diferentes tratamientos, en el tercer registro de medición. Los tratamientos están ordenados de mayor a menor valor. Esto sugiere que ciertos tratamientos son significativamente más efectivos para el crecimiento en diámetro de las plántulas, mientras que otros no presentan tanta eficacia.

Cuadro 5

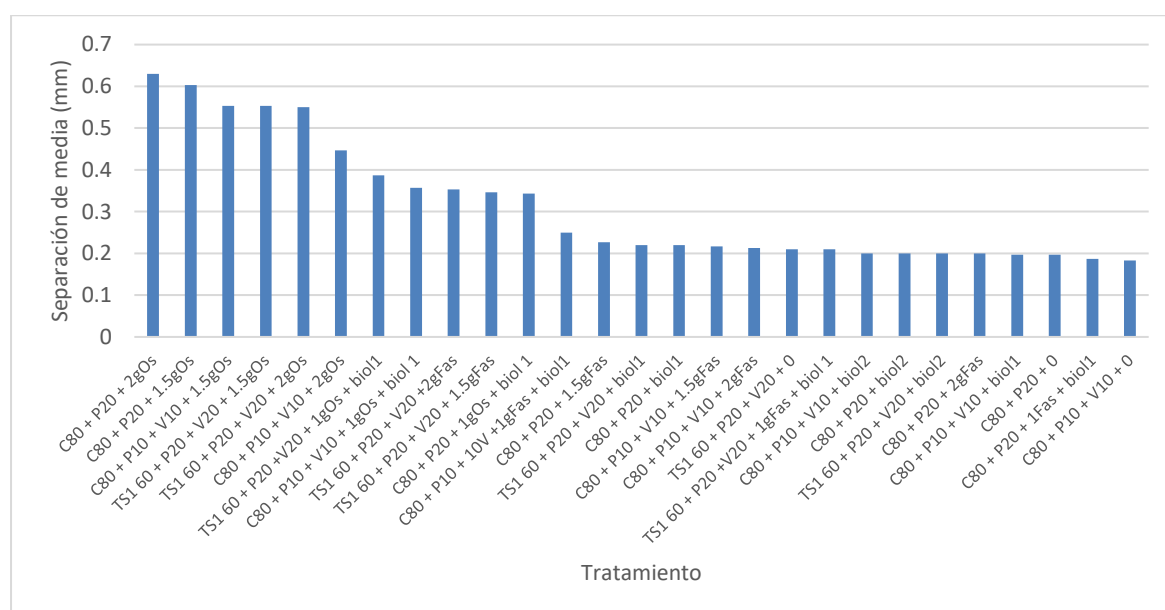
Separación de Medias Duncan para Diámetro (mm)

Tratamiento		Separación de Cuadrados Mínimos
C80+P20+2gOs	A	0.63
C80+P20+1.5gOs	A B	0.60333333
C80+P10+V10+1.5gOs	B	0.55333333
TS160+P20+V20+1.5gOs	B	0.55333333
TS160+P20+V20+2gOs	B	0.55
C80+P10+V10+2gOs	C	0.44666667
TS160+P20+V20+1gOs+OR1	C D	0.38666667
C80+P10+V10+1gOs+OR1	D	0.35666667
TS160+P20+V20+2gFas	D	0.35333333
TS160+P20+V20+1.5gFas	D	0.34666667
C80+P20+1gOs+OR1	D	0.34333333
C80+P10+V10+1gFas+OR1	E	0.25
C80+P20+1.5gFas	E	0.22666667
TS160+P20+V20+OR1	E	0.22
C80+P20+OR1	E	0.22
C80+P10+V10+1.5gFas	E	0.21666667
C80+P10+V10+2gFas	E	0.21333333

Tratamiento	Separación de Cuadrados Mínimos	
TS160+P20+V20+0	E	0.21
TS160+P20+V20+1gFas+OR1	E	0.21
C80+P10+V10+OR2	E	0.2
C80+P20+OR2	E	0.2
TS160+P20+V20+OR2	E	0.2
C80+P20+2gFas	E	0.2
C80+P10+V10+OR1	E	0.19666667
C80+P20+0	E	0.19666667
C80+P10+V10+1Fas+OR1	E	0.18666667
C80+P10+V10+0	E	0.18333333

Figura 7

Diámetro (mm) de Plántulas Según Tratamientos



Crecimiento Radicular de las Plántulas

Se analizaron las imágenes previamente escaneadas con el programa *WinRhizo*[®] y se seleccionó el parámetro de volumen radicular (cm³). Con los resultados obtenidos por el programa, se realizó un cálculo de media para cada tratamiento (Cuadro 6). Los resultados mostraron una notable variación en el volumen radicular entre los diferentes tratamientos.

Según la Figura 8, el tratamiento C80+P10+V10+1.5Os presentó el mayor volumen radicular con una media de 6.915 cm³, seguido por C80+P10+V10+2Os (5.162 cm³) y TS60+P20+V20+2Os (5.380

cm³). Estos resultados destacan la eficacia del fertilizante Osmocote en combinación con una mezcla de turba, perlita y vermiculita. La turba rubia de *Sphagnum* proporciona propiedades físicas favorables, como un espacio poroso total del 91%, una capacidad de aireación del 18% del volumen y una capacidad de retención de agua de 804 ml/L creando un ambiente óptimo para el desarrollo radicular (Núñez, 2009).

Por otro lado, el tratamiento TS60+P20+V20+OR1 presentó el menor volumen radicular con una media de 0.359 cm³. Este tratamiento, al no incluir fertilizantes de liberación lenta como Osmocote, muestra una menor eficacia en el desarrollo radicular, lo que sugiere que la combinación de sustratos orgánicos con fertilizantes adecuados es crucial para el crecimiento óptimo de las raíces.

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos. Aguilera-Rodríguez et al. (2015) evaluaron dos sustratos elaborados con aserrín de pino combinados con los fertilizantes de liberación lenta Multicote® y Osmocote® en *Pinus pseudostrobus*. Encontraron que Osmocote® mostró los mejores resultados para variables como diámetro del tallo, peso seco aéreo, peso seco radical y la relación entre peso seco aéreo y radical.

Cuadro 6

Media de Variable Volumen Radicular (cm³)

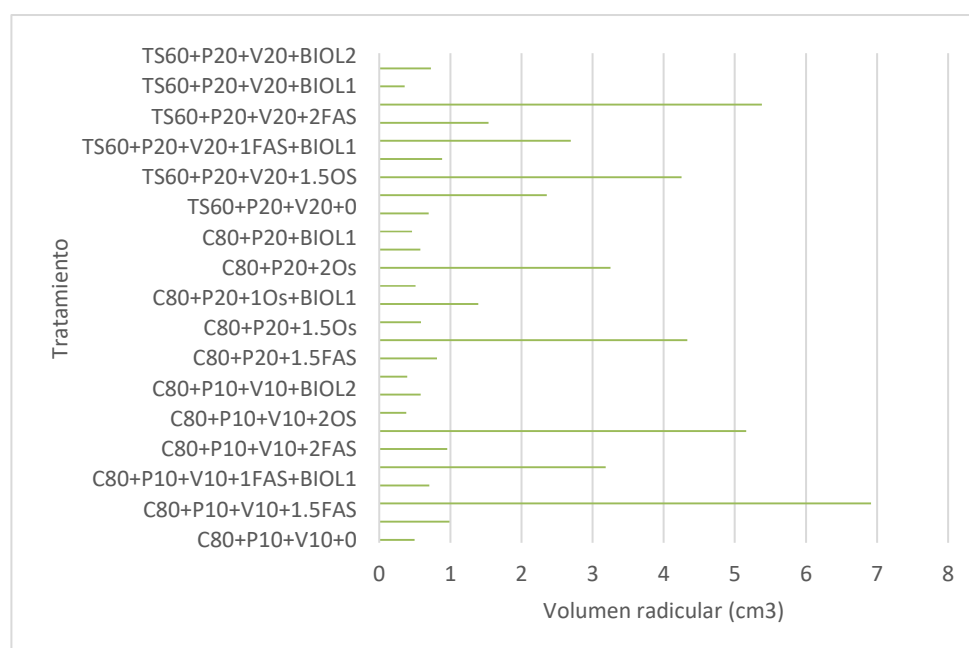
Tratamiento	Media Vol. radicular
C80+P10+V10+0	0.497
C80+P10+V10+1.5FAS	0.986
C80+P10+V10+1.5OS	6.915
C80+P10+V10+1FAS+OR1	0.704
C80+P10+V10+1OS+OR1	3.184
C80+P10+V10+2FAS	0.958
C80+P10+V10+2OS	5.162
C80+P10+V10+OR1	0.379
C80+P10+V10+OR2	0.582
C80+P20+0	0.395
C80+P20+1.5FAS	0.810
C80+P20+1.5Os	4.334
C80+P20+1FAS+OR1	0.589
C80+P20+1Os+OR1	1.394
C80+P20+2FAS	0.509

Tratamiento	Media Vol. radicular
C80+P20+2Os	3.250
C80+P20+OR1	0.578
C80+P20+OR2	0.463
TS60+P20+V20+0	0.696
TS60+P20+V20+1.5FAS	2.357
TS60+P20+V20+1.5OS	4.251
TS60+P20+V20+1FAS+OR1	0.883
TS60+P20+V20+1OS+OR1	2.693
TS60+P20+V20+2FAS	1.536
TS60+P20+V20+2OS	5.380
TS60+P20+V20+OR1	0.359
TS60+P20+V20+OR2	0.726

De manera similar, Escamilla-Hernández et al. (2015) investigaron el efecto de tres sustratos (vermiculita, agrolita y "peat moss") combinados con los fertilizantes de liberación lenta Basacote plus®, Osmocote plus® y Multicote® en teca. Encontraron que las plantas fertilizadas con Osmocote plus® en dosis media y alta experimentaron el mayor incremento en todas las variables de crecimiento evaluadas, incluyendo diámetro del tallo, altura del cuello, biomasa aérea y biomasa radical.

Figura 8

Volumen Radicular (cm³) de Plántulas de *Tectona grandis* Según Tratamiento



Índice de Biomasa

Siguiendo la fórmula de Sáenz-Reyes et al. (2010), se calculó el índice de proporcionalidad biométrica (IPB) para una plántula por repetición de cada tratamiento, y posteriormente se obtuvo la media por tratamiento (Cuadro 7). Los resultados muestran que el tratamiento C80+P2+2Fas presentó mayor IPB con un valor de 2.480 (Figura 9). Según Suazo Gonzales (2020), el fertilizante Fastrac® es recomendado para plantaciones forestales, este es un fertilizante de liberación lenta, el tiempo de liberación de nutrientes es de 3 meses, lo cual evita deficiencias y mejora el aprovechamiento de los nutrientes.

En comparación, otros tratamientos como C80+P20+2Os (1.866) y C80+P20+1.5Os (1.216) también mostraron un IPB relativamente alto, indicando que los fertilizantes de liberación lenta como Osmocote® también son efectivos en mejorar la relación aérea-radicular. Esto es consistente con estudios previos, como el de Haase et al. (2006), que encontraron que los fertilizantes de lenta liberación mejoran significativamente el crecimiento en altura, diámetro basal, y volumen del tallo en plantas de abeto (*Pseudotsuga menziesii*).

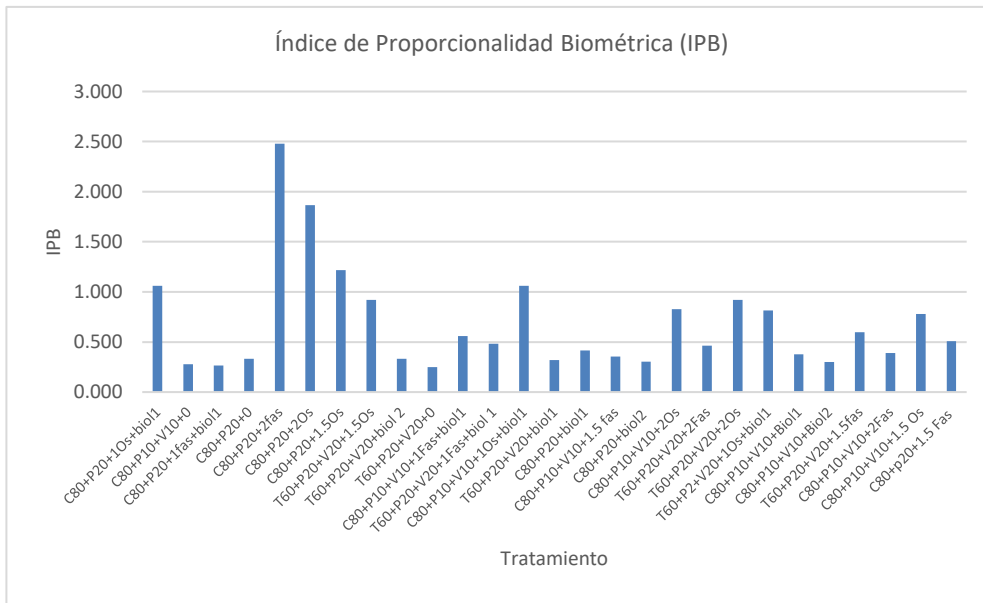
Por otro lado, tratamientos como C80+P10+V10+0 (0.279) y T60+P20+V20+0 (0.249) presentaron los menores IPB, lo que sugiere que la ausencia de fertilización química afecta negativamente el balance de biomasa entre las partes aéreas y radicales. Este resultado subraya la importancia de una adecuada nutrición para el desarrollo equilibrado de las plántulas.

Además, algunos tratamientos con combinaciones de Óxido Reductor, como C80+P20+1Os+OR1 (1.059) y C80+P10+V10+1Os+OR1 (1.060), mostraron IPB positivos, lo que indica que el uso de OR en combinación con fertilizantes de liberación lenta puede ser beneficioso. Sin embargo, los valores fueron menores que los obtenidos con fertilizantes químicos de liberación lenta sin Óxido Reductor, lo que sugiere que la eficacia de OR puede depender de la combinación específica y las condiciones de aplicación.

Cuadro 7*Media de Índice de Proporcionalidad Biométrica (IPB)*

Tratamiento	Media IPB
C80+P20+1Os+OR1	1.059
C80+P10+V10+0	0.279
C80+P20+1fas+OR1	0.267
C80+P20+0	0.332
C80+P20+2fas	2.480
C80+P20+2Os	1.866
C80+P20+1.5Os	1.216
T60+P20+V20+1.5Os	0.921
T60+P20+V20+OR 2	0.332
T60+P20+V20+0	0.249
C80+P10+V10+1Fas+OR1	0.558
T60+P20+V20+1Fas+OR 1	0.483
C80+P10+V10+1Os+OR1	1.060
T60+P20+V20+OR1	0.320
C80+P20+OR1	0.414
C80+P10+V10+1.5Fas	0.356
C80+P20+OR2	0.305
C80+P10+V10+2Os	0.827
T60+P20+V20+2Fas	0.464
T60+P20+V20+2Os	0.919
T60+P2+V20+1Os+OR1	0.815
C80+P10+V10+OR1	0.376
C80+P10+V10+OR2	0.301
T60+P20+V20+1.5Fas	0.599
C80+P10+V10+2Fas	0.388
C80+P10+V10+1.5Os	0.780
C80+P20+1.5Fas	0.509

Índice de Proporcionalidad Biométrica (IPB)



Potencial de Reutilización de Turba Pindstrup®

El segundo objetivo de esta investigación es evaluar el potencial de reutilización de turba Pindstrup® en combinación con diferentes sustratos y fertilizantes. Con base en los resultados obtenidos para las variables de altura, diámetro, índice de relación aérea y radicular (RAR), y crecimiento radicular, se puede inferir el desempeño de esta turba y su idoneidad para su reutilización en plantaciones forestales.

Los tratamientos que utilizaron turba Pindstrup®, especialmente aquellos combinados con Osmocote®, mostraron un crecimiento notable en altura. Por ejemplo, el tratamiento C80+P10+V10+1.5gOs alcanzó una media de altura de 10.24 cm, situándose en el grupo A. Este tratamiento demostró que la combinación de turba Pindstrup® con perlita, vermiculita y Osmocote® proporciona un entorno favorable para el crecimiento en altura de las plántulas. La liberación controlada de nutrientes por parte de Osmocote®, junto con las propiedades físicas de la turba Pindstrup®, contribuyeron significativamente al desarrollo en altura. El diámetro de las plántulas también fue influenciado positivamente por la combinación de turba Pindstrup® y Osmocote®. Los tratamientos C80+P20+2gOs y C80+P20+1.5gOs, con medias de diámetro de 0.63 y 0.603 cm

respectivamente, se situaron en los grupos A y B. Estos resultados sugieren que la turba Pindstrup[®], en combinación con Osmocote[®], proporciona un sustrato adecuado para un crecimiento robusto en diámetro, lo cual es crucial para la estabilidad y salud general de las plantas.

El índice IPB también mostró resultados positivos con el uso de turba Pindstrup[®]. El tratamiento C80+P20+2Os presentó un índice IPB de 1.866, indicando un equilibrio favorable entre la biomasa aérea y radicular. La combinación de turba con perlita y Osmocote[®] aseguró una distribución equilibrada de nutrientes, promoviendo un desarrollo uniforme de las plántulas tanto en la parte aérea como en la radicular.

El volumen radicular fue significativamente mayor en los tratamientos que incluían turba Pindstrup[®] y Osmocote[®]. El tratamiento C80+P10+V10+1.5gOs mostró un volumen radicular de 6.915 cm³, mientras que el tratamiento C80+P10+V10+2Os alcanzó 5.162 cm³. Estos resultados destacan la capacidad de la turba Pindstrup[®] para retener humedad y proporcionar un entorno aireado que favorece el crecimiento radicular. Las propiedades físicas de la turba, como su alta capacidad de retención de agua y porosidad, son factores clave que contribuyen a este crecimiento.

Desarrollo de Plántulas de Teca

Los resultados muestran variaciones significativas en la altura de las plántulas de teca en respuesta a los diferentes fertilizantes aplicados. Los mejores resultados en altura lo obtuvieron los tratamientos que poseían Osmocote[®], seguidos de Fastrac[®] y por último el Óxido Reductor. Esta variabilidad sugiere que cada fertilizante puede tener un efecto distinto en el crecimiento vertical de las plántulas, probablemente debido a diferencias en la composición de nutrientes, velocidad de liberación o interacciones con el suelo.

El diámetro de las plántulas también mostró respuestas diferenciadas frente a los diferentes fertilizantes utilizados. Los tratamientos con fertilizante Osmocote[®] promovieron un diámetro medio de 0.63 mm, seguidos por los tratamientos con mezcla de Osmocote[®] y Óxido Reductor, luego Fastrac[®] y Óxido Reductor. Estos resultados indican que ciertos fertilizantes pueden favorecer el

crecimiento en grosor del tallo de las plántulas de teca más en que otros, posiblemente debido a la disponibilidad y movilidad de nutrientes esenciales en el sustrato.

El IPB proporciona información sobre la distribución de biomasa entre la parte aérea y radicular de las plántulas. Los tratamientos con diferentes fertilizantes mostraron variaciones en el índice IPB, reflejando diferentes estrategias de crecimiento y desarrollo. Por ejemplo, el tratamiento con fertilizante Fastrac® mostró un IPB que sugiere un balance adecuado entre crecimiento aéreo y radicular, mientras que otros tratamientos pueden haber favorecido más el crecimiento de una parte sobre la otra. Estas diferencias pueden ser cruciales para la adaptación y supervivencia de las plántulas durante su posterior trasplante.

El crecimiento radicular también fue influenciado por los diferentes tipos de fertilizantes aplicados. Los tratamientos que utilizaron fertilizante Osmocote®, Fastrac® y Óxido Reductor mostraron variaciones en el volumen radicular de las plántulas de teca, siendo el mejor resultado Osmocote® que obtuvo 6.915 cm³. Este resultado indica que la composición y liberación de nutrientes de cada fertilizante pueden afectar la exploración del suelo y la absorción de agua y nutrientes por parte de las raíces, aspecto fundamental para el establecimiento y desarrollo inicial de las plántulas en vivero.

Este estudio ha demostrado que la selección adecuada de sustratos y fertilizantes es crucial para optimizar el crecimiento de plántulas de *Tectona grandis* en vivero. El tratamiento C80+P10+V10+1.5gOs destacó por su efectividad en promover tanto el crecimiento en altura como el desarrollo radicular, lo que es esencial para el establecimiento exitoso de plantaciones. Estas características aseguran plántulas con un equilibrio adecuado entre raíces robustas y crecimiento aéreo, aumentando su supervivencia en campo y reduciendo las pérdidas en el proceso de plantación. Además, el uso de biofertilizantes como el Óxido Reductor se mostró como una alternativa sostenible para mejorar la producción en viveros forestales.

Conclusiones

El uso de Osmocote® en diferentes dosis mostró resultados consistentes en el aumento de la altura de las plántulas. Los tratamientos que incluyeron Osmocote®, tanto en combinaciones con Óxido Reductor como en diversas dosis, reportaron mejor respuesta en altura, diámetro y crecimiento radicular. Por otro lado, los tratamientos que incluyeron Fastrac® (Fas) también mostraron un buen rendimiento, sobre todo en el índice RAR, aunque en menor medida en comparación con Osmocote®.

Los tratamientos con aplicación de Óxido Reductor y sin fertilizante químico reportaron los resultados más bajos para diámetro y altura. Lo anterior sugiere que la liberación gradual y controlada de nutrientes es crucial para el desarrollo óptimo de las plántulas en vivero y en contenedores plásticos con sustrato especial. El uso de Óxido Reductor no mostró los resultados esperados. Esto probablemente se debe a la baja presencia de microbiota en el lugar de recolección de microorganismos, así como a las condiciones inadecuadas para su desarrollo en el suelo. Estos hallazgos enfatizan la importancia de seleccionar cuidadosamente tanto los sustratos como los fertilizantes para optimizar el crecimiento y la calidad de las plántulas en vivero. Además, resaltan la necesidad de crear condiciones adecuadas para la microbiota y de formular correctamente los productos utilizados.

La turba Pindstrup® muestra un alto potencial de reutilización al combinarse con complementos como la perlita y vermiculita, así como con fertilizantes de liberación controlada, proporcionando un entorno propicio para el crecimiento óptimo de plántulas en viveros forestales. Los resultados de las cuatro variables analizadas confirman que esta combinación favorece el desarrollo en términos de altura, diámetro, índice RAR y crecimiento radicular.

La variabilidad en altura, diámetro, índice RAR y crecimiento radicular entre tratamientos destaca la importancia de seleccionar el fertilizante adecuado para optimizar el crecimiento y la calidad de las plántulas en vivero. Estos hallazgos destacan la necesidad de evaluar y seleccionar

cuidadosamente los fertilizantes según los objetivos de manejo en el vivero forestal y las condiciones locales de crecimiento.

Recomendaciones

Para la producción de plántulas en contenedor plástico y sustratos especiales en vivero, se recomienda utilizar fertilizantes de liberación controlada, como Osmocote®, ya que demuestran mayor eficiencia en mejorar las variables de crecimiento por su continuo suministro y balanceado de nutrientes esenciales a lo largo del crecimiento.

Utilizar los tratamientos C80+P10+V10+1.5Os y C80+P20+2Os para producción de plántulas de teca en el vivero de la Unidad Forestal de Zamorano, ya que mostró resultados superiores en altura, diámetro y crecimiento radicular en contenedores plásticos.

Continuar utilizando la turba Pindstrup® con otros sustratos como perlita al 10% y vermiculita al 10%, para aprovechar sus propiedades físicas y optimizar el entorno de crecimiento de las plántulas. Esto podría representar una reducción en costos de producción para la Unidad Forestal en comparación a la utilización de turba virgen.

Realizar un análisis de costo-beneficio para determinar con mayor claridad los beneficios de utilizar *Pindstrup*® reutilizado, considerando factores como el impacto económico y la sostenibilidad ambiental.

Realizar un segundo estudio incluyendo otra formulación de Óxido Reductor. Se sugiere para ello, realizar un análisis exhaustivo de la microbiota presente en el lugar de recolección de microorganismos, con el fin de evaluar su composición y diversidad. Además, se recomienda revisar y ajustar la formulación del Óxido Reductor para optimizar sus propiedades y asegurar su eficacia

Referencias

- Abad, M., Noguera, P. y Burés, S. (2001). National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: Case study in Spain. *Bioresource Technology*, 77(2), 197–200. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00152-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00152-8)
- Agronegocios Génesis. (2021). *Ficha técnica: Sustrato Pindstrup Pluss Orange [Afiche]*. Agronegocios Génesis. <https://agrogenesis.com/wp-content/uploads/2021/08/agronegocios-genesis-ag-ficha-tecnica-sustrato-pindstrup-pluss-orange.pdf>
- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A. y Martínez-Trinidad, T. (2015). Producción de *Pinus pseudostrubus* Lindl. con sustratos de aserrín y fertilizantes de liberación controlada. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 7(34), 7–19.
- Alvarado, A. (2006). Nutrición y fertiización de la Teca. *Informaciones Agronómicas*, Artículo 61, 1–16. <http://www.ipni.net/publication/ia-la hp.nsf/0/31A0615834C27F92852579A3006D8237/%24FILE/Nutrici%C3%B3n%20y%20Ferti lizaci%C3%B3n%20de%20la%20Teca.pdf>
- Ansorena Miner, J. (1994). *Sustratos: Propiedades y caracterización*. Mundi-Prensa.
- Balám-Che, M., Gómez-Guerrero, A., Vargas-Hernández, J. J., Idrete, A. y Obrador-Olán, J. J. (2015). Fertilización inicial de plantaciones comerciales de teca (*Tectona grandis* Linn F.) en el sureste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(2), Artículo 0187-7380. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802015000200011&script=sci_arttext
- Carnus, J.-M., Parrotta, J., Brockerhoff, E., Arbez, M., Jactel, H., Kremer, A., Lamb, D., O'Hara, K. y Walters, B. (2006). Planted Forests and Biodiversity. *Journal of Forestry*, 104(2), 65–77. <https://academic.oup.com/jof/article/104/2/65/4599206>
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Ed.). (2013). *Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades*.
- Cruz-Crespo, E., Can-Chulim, A., Sandoval-Villa, M., Bugarín-Montoya, R., Robles-Bermúdez, A. y Juárez-López, P. (2013). Sustratos en la horticultura. *Bio Ciencias*, 2(2), 17–26. <http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/719>
- Dominguez, E., Mc Leod, C., Águila, K., Ojeda, A. y Ivelic-Sáez, J. (2017). *Cómo utilizar la turba rubia de Sphagnum en horticultura*. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/4876/Informativo%20INIA%20N% c2%b0%2075?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=La%20turba%20rubia%20se%20usa,las%20ra%C3%ADces%20no%20se%20pudran>.
- Douglass, J. K. y Seifert, F. Y. (2005). Growth and nutritional response of hardwood seedlings to controlled-release fertilization at outplanting. *Forest Ecology and Management*, 214, 28–39.
- Escamilla-Hernández, N., Obrador-Olán, J. J. Carrillo-Ávila, E. y Palma-López, D. J. (2015). Uso de fertilizantes de liberación controlada en plantas de teca (*Tectona grandis*), en la etapa de vivero. *Fitotecnia Mexicana*, 38(3), 329–333.
- Escobar, R. (2007). *Manual de Viverización en Eucalyptus globulus a Raíz Cubierta*. Instituto Forestal, Proyecto Innova Chile – INFOR.

- Francis, J. K. y Lowe, C. A. (2000). *Bioecología de Árboles Nativos y Exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales*. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. https://data.fs.usda.gov/research/pubs/iitf/Bioecologia_gtr15.pdf#page=536
- Haase, D. L., Rose, R. y Trobaugh, J. (2006). Field performance of three stock sizes of Douglas-fir container seedlings grown with slowrelease fertilizer in the nursery growing medium. *New Forests*, 1, 1–24.
- Hernández, L., Aldrete, A., Ordaz, V., López, J. y López, M. (2014). Crecimiento de *Pinus montezumae* Lamb. en vivero influenciado por diferentes mezclas de sustratos. *Agrociencia*, 48, 627–637.
- Hine-Gómez, A., Vargas-Castillo, P. y Abdelnour-Esquivel, A. (2013). Crioconservación de semillas de teca (*Tectona grandis* L.f). *Agronomía Costarricense*, 37(1), 51–60.
- Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E. y Barnett, J. P. (1990). *The Container Tree Nursery Manual, Volume 2*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- Lemaire, F., Dartigues, A., Rivière, L. M., Charpentier, S. y Morel, P. (2013). *Cultivos en macetas y contenedores* (2ª ed.). Mundi-Prensa.
- López, J. (2012). *Evaluación de cuatro sustratos para el establecimiento de almácigos de café (Coffea arabica L.) en tubetes en la Escuela Agrícola Panamericana, Honduras* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/1b29860b-66d7-459c-92fd-350782a730a3/content>
- Marín Rodríguez, M. G. (2016). *Efecto de la fertilización de la Teca (Tectona grandis L. f.) con fosfato diamónico (18-46-0) y nitrato de amonio (34.4-0-0)* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/3ff8f1a5-c699-491a-a391-caa475a69971/content>
- Mateo-Sánchez, J. J., Bonifacio-Vázquez, R., Pérez-Ríos, S. R., Capulín-Grande, J. y Mohedano-Caballero, L. (2011). Producción de (*Cedrela odorata* L.) en aserrín crudo con diferentes dosis de fertilización, en Tecpan de Galeana, Guerrero. *Ra Ximhai*, 7, 195–204.
- Molina-Nuñez, E. J. (2023). *Efecto de la inoculación de caldo de óxido reductor en la germinación, desarrollo, calidad y la sobrevivencia de las plantas de la especie Swietenia macrophylla G. KING. (caoba del atlántico) en el vivero central de programa nacional de reforestación* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Ciencias Forestales UNACIFOR, Tegucigalpa Honduras.
- Núñez, A. (2009). Turba y zeolita como soportes de inoculantes microbianos con acción fertilizante. *ICIDCA Sobre Los Derivados De La Caña De Azúcar*, 43(3), 22–27. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120660004.pdf>
- Olivo, V. B. y Buduba, C. G. (2006). Influencia de seis sustratos en el crecimiento de *Pinus ponderosa* producido en contenedores bajo condiciones de invernáculo. *Bosque*, 27(3), 267–271. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173113289007>
- Penuelas, J. L. y Ocana, L. (1996). Cultivo de once especies mediterráneas en vivero: implicaciones prácticas. *Revista Ecológica*, 15, 213–223.

- Peña-Cabriales, J. J., Grageda-Cabrera, O. A., Díaz-Franco, A. y Vera-Nuñez, J. A. (2012). Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 3(6), 1261–1274. <https://doi.org/0934>
- Perea-Vélez, Y. S., Carrillo-González, R. y González-Chávez, M. C. (2017). Fitorremediación asistida por microorganismos: énfasis en bacterias promotoras del crecimiento de las plantas. *Agroproductividad*, 10(4), 34–40. <https://mail.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1000/854>
- Pindstrup Mosebrug SAE. (2012). *Pindstrup Plus Naranja*. http://www.pindstrup.es/prod_lv_dk.htm
- Régent Instruments Inc. (2001). *WinRhizo* (Versión Mac/WinRHIZOTM 2002a) [Software de computación].
- Rodriguez, J. (2001). *Efecto del biofertilizante Mycoral® (micorriza arbuscular) en el desarrollo del café (Coffea arabica L.)* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/ee2acc94-0892-4ad9-a8be-1a45579bd83d/content>
- Rose, R., Haase, D. y Arellano, E. (2004). Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. *Bosque*, 25, 89–100.
- Sáenz-Reyes, J. T., Villaseñor-Ramírez, F. J., Muñoz-Flores, H. J. y Rueda-Sánchez, A. (2010). *Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán*. (Vol. 17).
- Sgariglia, M. A., Soberón, J. R., Sampietro, D. A. y Vattuone, M. A. (2010). Cromatografía: conceptos y aplicaciones. *Arakuku*(1), 1–6. www.csnat.unt.edu.ar/academica/publicaciones/revista-arakuku
- Suazo Gonzales, C. M. (2020). *Evaluación de ocho sustratos para la producción de plántulas de Pinus oocarpa en tubetes*, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/ae356b09-f443-4475-b287-8e0725cef305/content>
- Valladares, F. (Ed.). (2004). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (1ª ed.). Ministerio de Medio Ambiente EGRAF S.A. <https://www.researchgate.net/publication/253650026>
- Van Den Driessche, R. (1992). Changes in drought resistance and root grow the capacity of container seedlings in response to nursery drought, nitrogen and potassiun treatments. *Canadian Journal Forest Research*, 22, 740–749.

Anexos

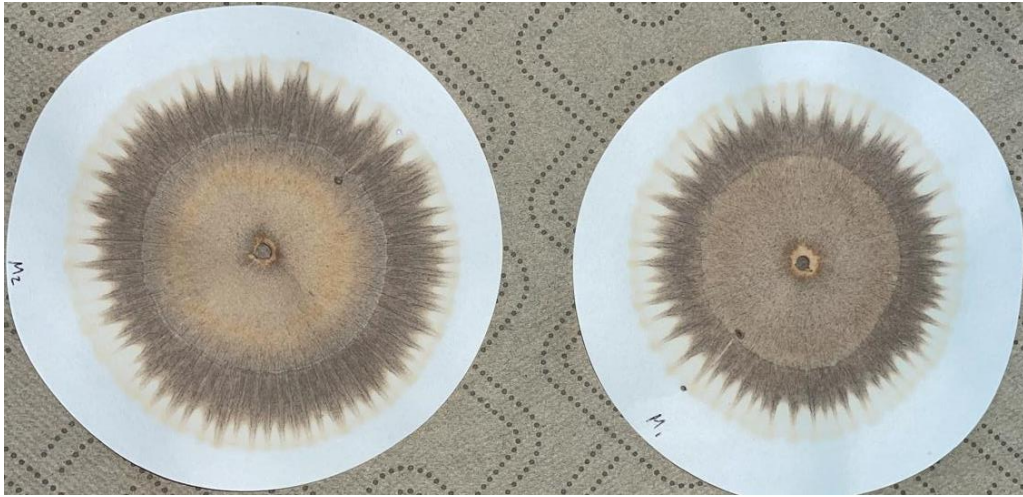
Anexo A

Diseño de Tratamientos

Tipo de sustrato	Mezclas	Tipo de fertilización	Dosis fertilización	Tratamiento
Cabul (Pindstrup reutilizable)	Cabul 80% + 20% perlita	Osmocote	1 g/planta + OR 1	C80+20P + 1gOs+OR1
			1.5 g/planta	C80+20P + 1.5gOs
			2 g/planta	C80+20P + 2gOs
		Fastrac plantia	1 g/planta + OR 1	C80+20P + 1gFas + OR1
			1.5 g/planta	C80+20P + 1.5gFas
			2 g/planta	C80+20P + 2gFas
		Óxido Reductor	Dosis 1	C80+20P + OR 1
			Dosis 2	C80+20P + OR 2
			Control	C80+20P + 0
	Cabul 80% + 10% Perlita + 10% Vermiculita	Osmocote	1 g/planta + OR 1	C80+10P+10V+1gOs+OR1
			1.5 g/planta	C80+10P+10V+1.5gOs
			2 g/planta	C80+10P+10V+2gOs
		Fastrac plantia	1 g/planta + OR 1	C80+10P+10V +1gFas+OR1
			1.5 g/planta	C80+10P+10V +1.5gFas
			2 g/planta	C80+10P+10V +2gFas
Óxido Reductor		Dosis 1	C80+10P+10V + OR 1	
		Dosis 2	C80+10P+10V + OR 2	
		Control	C80+10P+10V +0	
Turba TS1 - Balanace - T 416	TS1 60% + 20% Perlita + 20% vermiculita	Osmocote	1 g/planta + OR1	T60+20P + 20 V+1gOs+ OR1
			1.5 g/planta	T60+20P + 20 V+1.5gOs
			2 g/planta	T60+20P + 20 V+2gOs
		Fastrac plantia	1 g/planta + OR1	T60+20P + 20 V+1Fas + OR1
			1.5 g/planta	T60+20P + 20 V+1.5Fas
			2 g/planta	T60+20P + 20 V+2Fas
		Óxido Reductor	Dosis 1- 15 ml/plántula/semana (1 aplicación)	T60+20P + 20 V+ OR1
			Dosis 2 - 30 ml/plántula/semana (2 aplicación)	T60+20P + 20 V+ OR2
			Control	T60+20P + 20 V+0

Anexo B

Cromatografía de Muestras de Suelo



Anexo C

Semillas de Tectona grandis en Tratamiento Pre-germinativo



