

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTAD DE INGENIERÍA



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
AMBIENTAL**

**EFFECTO DEL TIPO Y DOSIFICACIÓN DE
FERTILIZANTES NITROGENADOS SOBRE EL
CRECIMIENTO Y CONTENIDO DE CLOROFILA EN
Cinchona micrantha EN ETAPA DE VIVERO**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL**

Autores:

Bach. Luis Yoel Diaz Tantalean

Bach. Jhermis Anibal Sanchez Burga

Asesora:

Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo

Línea de investigación: Conservación, manejo aprovechamiento de recursos naturales

JAÉN – PERÚ

2025

Luis Yoel Diaz Tantalean Jhermis Anibal Sanchez B...

EFECTO DEL TIPO Y DOSIFICACIÓN DE FERTILIZANTES NITROGENADOS SOBRE EL CRECIMIENTO Y CONTENIDO DE ...

Quick Submit

Quick Submit

Universidad Nacional de Jaén

Detalles del documento

Identificador de la entrega:

trn:oid::1_3450292651

48 páginas

Fecha de entrega:

23 dic 2025, 10:33 a.m. GMT-5

10.973 palabras

Fecha de descarga:

23 dic 2025, 10:39 a.m. GMT-5

62.592 caracteres

Nombre del archivo:

FINAL-FERTILIZACI_N_C.MICRANTHA-22-12_-_Yoel_Diaz_Tantalean.pdf

Tamaño del archivo:

1.6 MB

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
Dr. Alexander Humberto Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para el

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 7% Fuentes de Internet
- 4% Publicaciones
- 6% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitan distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarse.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dr. Alexander Huidán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

ACTA DE SUSTENTACIÓN

El día 30 de diciembre del año 2025, siendo las 11:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado de manera presencial, en la sala de docentes de la escuela de Ingeniería Forestal y Ambiental.

Presidente: Dr. Segundo Edilberto Vergara Medrano

Secretario: M.Sc. Gustavo Adolfo Martínez Sovero

Vocal: Dr. Luis Arturo Gil Ramírez

() Informe final de tesis

() Proyecto de tesis

() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: **“EFECTO DEL TIPO Y DOSIFICACIÓN DE FERTILIZANTES NITROGENADOS SOBRE EL CRECIMIENTO Y CONTENIDO DE CLOROFILA EN *Cinchona micrantha* EN ETAPA DE VIVERO”** presentado por Luis Yoel Díaz Tantalean y Jhermis Anibal Sánchez Burga, de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental de la Universidad Nacional de Jaén.

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:


() Aprobar () Desaprobar () Unanimidad () Mayoría

Con la siguiente mención:

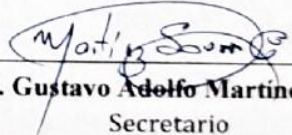
- | | | |
|----------------|------------|-----------------------------------------|
| a) Excelente | 18, 19, 20 | (<input type="checkbox"/>) |
| b) Muy bueno | 16, 17 | (<input type="checkbox"/>) |
| c) Bueno | 14, 15 | (<input checked="" type="checkbox"/>) |
| d) Regular | 13 | (<input type="checkbox"/>) |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | (<input type="checkbox"/>) |

Siendo las 12:40 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.

Jaén, 30 de diciembre del 2025



Dr. Segundo Edilberto Vergara Medrano
Presidente



M.Sc. Gustavo Adolfo Martínez Sovero
Secretario



Dr. Luis Arturo Gil Ramírez
Vocal

“Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia”

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

DE LA TESIS

Los que suscribimos, LUIS YOEL DIAZ TANTALEAN, identificado con DNI 60994619 y JHERMIS ANIBAL SANCHEZ BURGA identificado con DNI 75987057 egresados de la carrera Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental de la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén.

Declaramos bajo juramento que:

1. Somos los autores del trabajo titulado:

“Efecto del tipo y dosificación de fertilizantes nitrogenados sobre el crecimiento y contenido de clorofila en *Cinchona micrantha* en etapa de vivero”.

Asesorados por la Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo.

El mismo que presentamos bajo la modalidad de tesis para optar; el Título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Forestal y Ambiental.

2. El texto de nuestro trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de nuestro trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual se ha respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.

3. El texto del trabajo final que presentamos no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.

4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.


5. Declaro que nuestro trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.

6. Somos consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumir frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Jaén, viernes 06 de febrero del 2026


LUIS YOEL DIAZ TANTALEAN


JHERMIS ANIBAL SANCHEZ BURGA

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	9
ABSTRACT.....	10
I. INTRODUCCIÓN	11
II. MATERIALES Y MÉTODOS	14
2.1. Área de estudio.....	14
2.2. Población, muestra y muestreo.....	14
2.2.1. Población.....	14
2.2.2. Muestreo.....	14
2.2.3. Muestra.....	14
2.3. Diseño experimental y tratamientos.....	14
2.4. Mediciones y cálculos	15
2.5. Análisis estadístico	17
III. RESULTADOS.....	18
3.1. Determinación del rango de dosis óptimo para aplicar a plantones en <i>C. micrantha</i>	18
3.1.1. Mediciones en los plantones	18
3.1.2. Biomasa del plantón	21
3.1.3. Cuantificación del contenido de clorofila de las plantas en <i>C. micrantha</i> a nivel de vivero.....	24
3.2. Mediciones en sustrato suelo del plantón.....	26
3.3. Generación de modelos matemáticos que puedan predecir las variables de crecimiento a nivel de vivero.....	29
IV. DISCUSIÓN.....	33
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
5.1. Conclusiones.....	36
5.2. Recomendaciones	36
VI. REFERENCIAS	37
AGRADECIMIENTO	41
DEDICATORIA.....	42
VII. ANEXOS.....	43
Anexo 1.....	43
Anexo 2.....	44
Anexo 3.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	18
<i>Efecto de diferentes tratamientos sobre la mortandad en los plantones de C. micrantha.</i>	18
Figura 2	19
<i>Efecto de diferentes tratamientos sobre el incremento de altura en plantones de C. micrantha.</i>	19
Figura 3	20
<i>Efecto de diferentes tratamientos sobre el diámetro de tallo en plantones de C. micrantha.</i>	20
Figura 4	21
<i>Efecto de diferentes tratamientos sobre el número de hojas en plantones de C. micrantha.</i>	21
Figura 5	21
<i>Efecto de diferentes tratamientos sobre el peso seco de hojas en plantones de C. micrantha ..</i>	21
Figura 6	22
<i>Efecto de diferentes tratamientos sobre el peso seco en el tallo en plantones de C. micrantha.</i>	22
Figura 7	23
<i>Efecto de diferentes tratamientos sobre el peso seco de la raíz de plantones de C. micrantha.</i>	23
Figura 8	24
<i>Efecto de diferentes tratamientos sobre el área foliar en plantones de C. micrantha.....</i>	24
Figura 9	25
<i>Evolución del contenido de clorofila (SPAD) en función al inicio y al final del ensayo y tratamientos de fertilización en los plantones de C. micrantha.</i>	25
Figura 10.....	26
<i>Evolución del contenido de clorofila (SPAD) en función al tiempo (100 días) y tratamientos de fertilización en los plantones de C. micrantha.</i>	26
Figura 11.....	26
<i>Efecto de diferentes tratamientos sobre el pH en el sustrato de los plantones de C. micrantha.</i>	26
Figura 12.....	27
<i>Efecto de diferentes tratamientos sobre el contenido de materia orgánica en el sustrato de los plantones de C. micrantha.....</i>	27
Figura 13.....	28
<i>Efecto de diferentes tratamientos sobre el contenido de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) en el sustrato de los plantones de C. micrantha: a, contenido de nitrógeno total; b, contenido de fósforo; c, contenido de potasio.</i>	28
Figura 14.....	29

<i>Efecto de diferentes tratamientos sobre la conductividad eléctrica en el sustrato de los plantones de C. micrantha.....</i>	29
Figura 15.....	30
<i>Modelos de predicción del incremento en altura bajo diferentes tratamientos de fertilización en plantones de C. micrantha en vivero.</i>	30
Figura 16.....	32
<i>Modelos de predicción del incremento dimétrico bajo diferentes tratamientos de fertilización en plantones de C. micrantha en vivero.....</i>	32
Figura 17.....	44
<i>Selección de hojas intermedias del plantón para la toma de lectura de datos con el equipo SPAD-502.....</i>	44
Figura 18.....	45
<i>Parte de la hoja para la toma de lectura con el equipo SPAD-502.</i>	45
Figura 19.....	45
<i>Instalación y distribución de plantones de C. micrantha según tratamiento y dosificación.</i>	45
Figura 20.....	46
<i>Medición de contenido de clorofila en plantas de C. micrantha en vivero.....</i>	46
Figura 21.....	46
<i>Peso fresco de hojas de C. micrantha al término de los 100 días del ensayo de fertilización</i>	46
Figura 22.....	47
<i>Montaje de hojas de C. micrantha para tomas fotográficas (vivero)</i>	47
Figura 23.....	47
<i>Plantón de C. micrantha al término de los 100 días del ensayo de fertilización. (vivero).....</i>	47
Figura 24.....	48
<i>Muestras de C. micrantha para determinación de biomasa.</i>	48
Figura 25.....	48
<i>Muestras de hojas, tallo y raíz de plantones de C. micrantha al final del ensayo para determinación de biomasa.....</i>	48
Figura 26.....	49
<i>Toma de datos del Peso seco de hojas, raíz y tallo de C. micrantha al término del ensayo de fertilización.....</i>	49
Figura 27.....	49
<i>Preparación de muestras de suelo para análisis de laboratorio.....</i>	49

RESUMEN

En la actualidad el uso de fertilizantes orgánicos y químicos son esenciales para suministrar el suelo y promover el desarrollo vegetativo y crecimiento de las plantas. Este estudio investiga el impacto de fertilizantes nitrogenados (urea convencional, urea con inhibidor de ureasa NBPT y urea con inhibidor de nitrificación DMPP) en dosis de 0.3, 0.6 y 0.9 g/plantón sobre el crecimiento y contenido de clorofila en plantones de *Cinchona micrantha* en vivero, en Jaén, Perú. Utilizando un diseño factorial 3x4 con 465 plantas, se midieron variables como mortandad, incremento de altura, diámetro de tallo, número de hojas, biomasa del plantón, área foliar y contenido de clorofila (SPAD) cada 15 días durante 4 meses, analizadas vía ANOVA y Tukey. Los resultados destacan que tratamientos con urea modificada (T2 A - T2 C) optimizan el crecimiento, con incrementos superiores en altura (hasta 16 cm), diámetro (hasta 2.46 cm) y biomasa (hasta 1.53 g foliar), así como clorofila (hasta 49.1 SPAD), frente al control y urea convencional. Los modelos lineales ($R^2 > 0.89$) predicen respuestas dosis-dependientes, atribuidas a mayor eficiencia en absorción de nitrógeno y menor volatilización. En conclusión, los fertilizantes con inhibidores NBPT y DMPP mejoraron significativamente el crecimiento de *Cinchona micrantha* frente a la urea convencional, con dosis óptimas de 0.3–0.6 g/planta, también se registró un aumento del 52% en clorofila, asociado a mayor eficiencia fotosintética y absorción de nitrógeno. Los modelos lineales ($R^2 = 0.86–0.99$) confirmaron respuestas dosis-dependientes, evidenciando el potencial de estas formulaciones para optimizar el cultivo y la sostenibilidad agroforestal.

Palabras clave: *Absorción de nitrógeno, Contenido de clorofila, Cinchona micrantha, Fertilizantes nitrogenados, Inhibidor de ureasa, Inhibidor de nitrificación.*

ABSTRACT

Currently the use of organic and chemical fertilizers is essential to supply soil and promote vegetative development and plant growth. This study investigates the impact of nitrogen fertilizers (conventional urea, urea with urease inhibitor NBPT, and urea with nitrification inhibitor DMPP) at doses of 0.3, 0.6, and 0.9 g/plant on the growth and chlorophyll content of *Cinchona micrantha* seedlings in a nursery in Jaén, Peru. Using a 3x4 factorial design with 465 plants, variables such as height increase, diameter of stem, leaf numbers, biomass of seedling, leaf area and chlorophyll contained (SPAD) were measured every 15 days for 4 months and analyzed using ANOVA and Tukeys test. The results highlight that treatments with modified urea (T2 A - T2 B) optimize growth, with higher increases in height (up to 16 cm), diameter (up to 2.46 cm), and biomass (up to 1.53 g leaf), as well as chlorophyll (up to 49.1 SPAD), compared to the control and conventional urea. Linear models ($R^2 > 0.89$) predict dose-dependent responses, attributed to greater efficiency in N absorption and lower volatilization. In conclusion, fertilizers containing NBPT and DMPP significantly improved the growth of *Cinchona micrantha* compared to conventional urea, with optimal doses ranging from 0.3 to 0.6 g per plant. Chlorophyll increased by 52%, associated with higher photosynthetic efficiency and nitrogen uptake. Linear models ($R^2 = 0.86-0.99$) confirmed dose-dependent trends, demonstrating the potential of these formulations to optimize cultivation and agroforestry sustainability.

Keywords: *Nitrogen uptake, chlorophyll content, Cinchona micrantha, nitrogen fertilizers, Nitrification inhibitors, Urease inhibitors.*

I. INTRODUCCIÓN

El género *Cinchona*, que comprende especies de alto valor medicinal como *C. micrantha*, se enfrenta a importantes restricciones en su multiplicación por la insuficiencia de información acerca de sus demandas nutricionales en las primeras etapas de desarrollo (Albán-Castillo et al., 2020; Fernandez & Huaccha, 2022). El nitrógeno (N), como macronutriente vital, regula mecanismos fisiológicos fundamentales, desde la elaboración de clorofila hasta la generación de alcaloides (Bharadwaj et al., 2018; Cui et al., 2024). Aun así, en contextos de invernadero, la reacción morfo-fisiológica de las especies de *Cinchona* ante variadas fuentes de N (orgánicas o químicas) y sus concentraciones, continúa siendo un campo escasamente examinado (Fernandez-Zarate et al., 2024). Pese a los logros recientes en la comprensión de las interacciones micorrízicas que impulsan la brotación y el progreso inicial en taxones próximos (Fernandez-Zarate et al., 2022), se evidencia una marcada carencia de análisis que contrastan fuentes de N, tales como urea básica versus preparaciones con aditivos inhibidores, junto con sus impactos por dosis dependientes en la biología de las plantas jóvenes. Esta deficiencia entorpece la formulación de métodos óptimos para generar plántulas, indispensables en esquemas de repoblación forestal (Albán-Castillo et al., 2020; Fernandez-Zarate et al., 2024; Olier et al., 2009).

Análisis contemporáneos subrayan que la efectividad del uso del nitrógeno (NUE) en zonas arbóreas de regiones ecuatoriales fluctúa notablemente en función del origen utilizado, mostrando contrastes evidentes entre sustancias orgánicas y sintéticas (Ferreira et al., 2020; Groenbaek et al., 2016). La integración de urea potenciada con bloqueadores de ureasa o de nitrificación podría proponer enfoques para atenuar pérdidas de N y potenciar su incorporación vegetal (Rehman et al., 2022). La inclusión de bloqueadores de ureasa, como el N-(n-butyl) tiofosforotriamida (NBPT), obstaculiza el funcionamiento de dicha enzima, demorando la transformación de urea en amoníaco (NH_3). Tal mecanismo alivia el ascenso del pH próximo a la urea, reduce la evaporación de NH_3 y promueve la conservación de N en el sustrato, extendiendo su accesibilidad para los vegetales (Abalos et al., 2014).

De igual modo, los abonos nitrogenados fortificados con supresores de nitrificación, como el 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP), han probado su utilidad al posponer la transformación microbiana de amonio hacia nitrato, suprimiendo particularmente la enzima amonio monooxigenasa (AMO), primordial en el proceso de nitrificación (Bozal-

Leorri et al., 2022); ello alarga la persistencia del N como amonio (NH_4^+), elevando su disposición para las plantas y disminuyendo fugas por filtración o desgasificación (Ma et al., 2025), tal es el caso que en *C. micrantha*, cuyo ciclo vital se alinea con fluctuaciones periódicas de nutrientes (Fernandez & Huaccha, 2022), estas podrían modular la repartición de masa biológica y la elaboración de compuestos secundarios (Meng et al., 2024).

En el plano biológico, el N afecta de manera inmediata la aptitud fotosintética al intervenir en la formación de la enzima RuBisCO (Ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa) y la configuración de tilacoides (Bloomfield et al., 2014). Exploraciones en otras especies demuestran que la escasez de N disminuye el área foliar unitaria y la productividad acuífera (Islam Bhuiyan et al., 2021; Wheeler et al., 2017). Sin embargo, dichas indagaciones no separan orígenes de N ni establecen límites ideales para *Cinchona*, que exigen mayor irradiación y resisten menos a sobrecargas de fertilizantes (Fernandez-Zarate et al., 2024) lo que restringe la racionalización de activos en invernaderos donde los suministros son limitados (Massone et al., 2018).

El abonado con N es una práctica agraria primordial para incrementar la producción (Guo et al., 2022). Múltiples investigaciones corroboran que una dosificación equilibrada de N incrementa substancialmente las cosechas agrarias al refinar la provisión de este elemento crucial (Miao et al., 2015); sin embargo, dosis desmedidas pueden resultar desfavorables, originando efectos en la toxicidad de vegetales y modificaciones en el suelo (Ladha et al., 2005).

Desde un enfoque metodológico, la evaluación conjunta de indicadores morfofisiológicos, como parámetros de crecimiento (altura, diámetro, superficie foliar) e índices relacionados con la luz (nivel de clorofila), facilita determinar con precisión la productividad nutritiva de las plantas (Meng et al., 2024; Mu & Chen, 2021). Sin embargo, en el caso del género *Cinchona*, gran parte de las investigaciones se concentran en etapas maduras, dejando de lado la fase de plántula en vivero. Esta ausencia resulta determinante, puesto que las estructuras radiculares desarrolladas en el invernadero condicionan el éxito de la planta en campo definitivo (Kaur et al., 2023; Massone et al., 2018; Souri & Hatamian, 2019).

Este estudio busca cubrir tales vacíos a través de los siguientes objetivos específicos 1) Determinar el rango de dosis óptimo para aplicar a plantones en *C. micrantha*, 2) Cuantificar el contenido de clorofila de las plantones en *C. micrantha* a nivel de vivero y 3) Generar modelos matemáticos que puedan predecir el contenido de nitrógeno existente

en las hojas en función del contenido de clorofila; bajo condiciones controladas; con el fin de conocer finalmente en qué medida las procedencias de N y sus cantidades inciden en el crecimiento y contenido de clorofila en plantones de *C. micrantha*, y con ello al comprender la interacción entre el tipo de fertilizante y su dosificación, se podrán establecer recomendaciones que optimicen las prácticas de fertilización y mejorar el rendimiento de los cultivos, con implicaciones inmediatas en estrategias de preservación y silvicultura.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el centro poblado La Cascarilla (coordenadas UTM 732697.45 E, 9372588.42 S), ubicada en la provincia de Jaén, Cajamarca, Perú, a una altitud aproximada de 1810 msnm. La zona registra una precipitación anual de 1730 mm, con temperaturas que oscilan entre una mínima de 13 °C y una máxima de 20.5 °C (Fernandez, Huaccha, Quiñones, & Sanchez, 2021)(ver anexo 1).

2.2. Población, muestra y muestreo

2.2.1. Población

Estuvo formada por 2000 plántones de *C. micrantha* existentes en el vivero temporal “El árbol de la quina” ubicado en el Centro Poblado La Cascarilla. Se utilizó un modelo factorial 3x4 con 465 plántones, Basados en modelos de medida (MDM) de primer orden multidimensionalidad de un constructo (Vargas Halabí & Mora-Esquivel, 2017).

2.2.2. Muestreo

Se aplicó un muestreo no probabilístico de tipo intencional. La selección se basó en criterios específicos de homogeneidad, escogiendo plántones de *C. micrantha* con foliaje y altura uniforme para minimizar la variabilidad dentro de cada grupo de tratamiento con fertilizante.

2.2.3. Muestra

La muestra estuvo conformada por 465 plántones de *C. micrantha*.

2.3. Diseño experimental y tratamientos

Se aplicó un diseño de parcelas y bloques divididos en celdas de 3 x 4, con cuatro divisiones y con cinco repeticiones (Tabla 1).

Tabla 1

Distribución de los tratamientos y sus dosificaciones.

Unidad experimental	Tratamiento 1			Tratamiento 2			Tratamiento 3			Testigo												
	urea convencional (g urea/planta)			urea + NBPT (inhibidor de ureasa) (g urea/planta)			urea + DMPP (molécula inhibidora de nitrificación) (g urea/planta)			(g urea/ planta)												
	T1 A	T1 B	T1 C	T2 A	T2 B	T2 C	T3 A	T3 B	T3 C	T4												
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4
2																						
3																						
4																						
...																						
1																						
5																						

Dosis de fertilizante nitrogenado:

Dosis A: 0.3 g urea/plantón.

Dosis B: 0.6 g urea/plantón.

Dosis C: 0.9 g urea/plantón.

Variables independientes:

- Dosis del fertilizante nitrogenado (g urea/planta): 0; 0.3; 0.6; 0.9 y el tipo de fertilizante nitrogenado: urea convencional; urea + NBPT; urea + DMPP.

Variables dependientes:

- Mortandad, Incremento de altura, Diámetro del tallo, Número de hojas, Biomasa del plantón, Área foliar, Contenido de clorofila.

2.4. Mediciones y cálculos

Montaje de ensayo: Se utilizaron plantones de *C. micrantha* con un mínimo de 4 meses en vivero luego del repique. Los fertilizantes nitrogenados (urea convencional, urea + NBPT, urea + DMPP) se aplicaron sobre el sustrato de forma manual, evitando que los gránulos tengan contacto con el tallo del plantón y queden expuestos en la superficie. La aplicación de los fertilizantes se realizó de acuerdo con la dosificación y tipos de fertilizantes establecidos para el ensayo. (Fernandez H. Q., 2024)

Dosificación óptima: Se realizó un diseño experimental completamente aleatorio con 4 dosificaciones; testigo: 0 g. urea/plantón; dosis 1: 0.3 g. urea/plantón; dosis 2: 0.6 g. urea/plantón; dosis 3: 0.9 g. urea/plantón, con 3 tipos de fertilizantes nitrogenados; urea convencional (tratamiento 1), urea + DMPP (tratamiento 2), urea + NBPT (tratamiento 3), testigo (tratamiento 4) y se hicieron 3 repeticiones por cada dosificación (Fernandez H. Q., 2024).

Mortandad: En cada monitoreo quincenal se realizó un registro del número total de plántones establecidos y el número de individuos muertos. A partir de estos datos se calculó el porcentaje de mortandad mediante la relación entre plántones muertos y la total inicial establecido (Villar del Aguila, 2022).

Incremento de altura: Esta medida se registró con una regla de 20 cm. La regla se colocó en posición paralela al tallo del plantón desde la superficie del sustrato. Se midió desde la base del plantón (desde que el tallo entra en contacto con el sustrato) hasta el meristemo apical caulinar. Tomando la lectura con la regla (cm) a los individuos experimentales cada 15 días durante 4 meses al unísono (Fernandez H. Q., 2024).

Diámetro de tallo: Se utilizó la medición directa de diámetro mediante un vernier digital, asegurando de que las mordazas del vernier estén alineadas perpendicularmente al tallo, ajustando suavemente. El vernier digital proporcionó una lectura de diámetro en milímetros, siendo anotadas en cuaderno de campo para ser procesadas posteriormente. Esta medición se realizó cada 15 días por cuatro meses (Massone, 2018).

Número de hojas: Se realizó un conteo de hojas en cada plantón, cada 15 días durante los 4 meses de duración del ensayo (Fernandez H. Q., 2024).

Biomasa del plantón: Al final del ensayo se extrajeron las hojas, tallos y sistema radicular de 5 plantas por cada dosis y tipo de fertilizante ureico, estas estructuras se secaron en horno a 70 °C durante 48 horas. Finalmente, se determinó el peso seco de cada componente mediante pesaje (Massone, 2018).

Área foliar: Se fotografiaron las hojas sobre un fondo de color blanco (pizarra acrílica de 20 x 20 cm), se colocó con una cinta métrica de 2 cm como referencia, necesario para mantener la escala en el procesamiento de imágenes. Para extender las hojas se cubrieron con vidrio transparente de 20 x 20 cm y 3 mm de espesor, luego, las imágenes se procesaron en el software ImageJ (Schneider y otros, 2012).

Contenido de clorofila: Se utilizó un medidor SPAD-502 para realizar las mediciones de clorofila cada 15 días a las 16 horas, durante un período de cuatro meses. Siguiendo la metodología establecida por (Shibaeva et al., 2020). En cada muestreo, se midieron los dos pares de hojas intermedias del plantón como se muestra en el anexo 2, tomando una lectura por hoja con el equipo de medición antes mencionado en la parte central de la hoja plantón (cuatro en total) y evitando siempre la nervadura principal como se muestra en el anexo 2. Finalmente, estos cuatro valores se promediaron para obtener un único valor SPAD representativo por planta. A lo largo del ensayo, se mantuvo la consistencia midiendo siempre los mismos pares de hojas a la misma hora (ver anexo 2).

Análisis de suelo

Al final del ensayo se tomaron fracciones de suelo de los diferentes plantones de *C. micrantha*, se clasificó según tratamiento, se mezcló hasta tener una homogeneidad separando residuos de raíces para luego enviar a laboratorio y analizar los siguientes parámetros: Medida de pH, Contenido de materia orgánica, contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, y también la conductividad eléctrica. (Sales-Dávila y otros, 2024).

2.5. Análisis estadístico

Se verificó el cumplimiento de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Kol-mogorov-Smirnov y Levene, respectivamente, luego se aplicó el análisis de la varianza (ANOVA) basado en un diseño factorial 3x4 completamente aleatorizado. Cuando se evidenció diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%, se empleó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para comparaciones detalladas.

III. RESULTADOS

3.1. Determinación del rango de dosis óptimo para aplicar a plantones en *C. micrantha*.

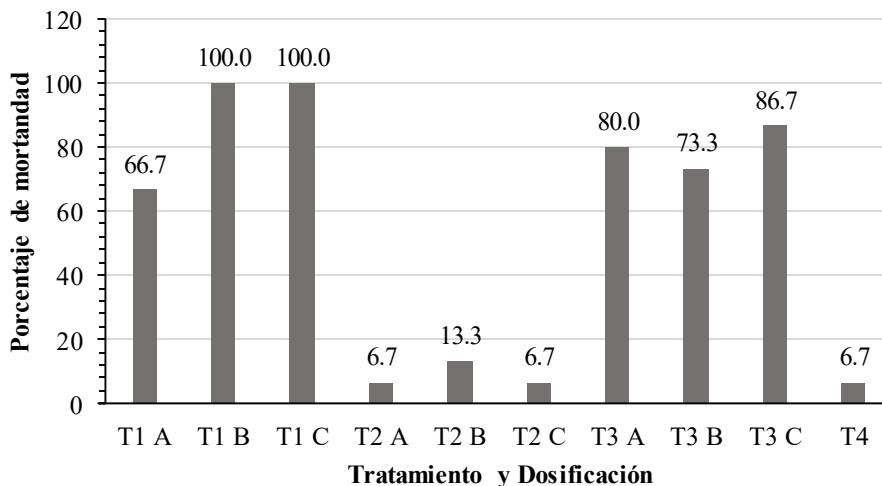
3.1.1. Mediciones en los plantones

Mortandad

La Figura 1 muestra el porcentaje de mortandad de los plantones de *Cinchona micrantha* registrado en los diferentes tratamientos evaluados en vivero. Se observa que los tratamientos T1 B y T1 C alcanzaron la máxima mortandad (100 %), lo que indica un fracaso total en la supervivencia de plántulas. El tratamiento T1 A también presentó un nivel alto de mortalidad (66,7 %), mientras que T3 A, T3 B y T3 C evidenciaron valores igualmente elevados, con 80,0 %, 73,3 % y 86,7 %, respectivamente. En contraste, los tratamientos del grupo T2 mostraron los menores porcentajes de pérdida, destacando T2 A, T2 B y T2 C, con 6,7 %, 13,3 % y 6,7 %, lo que sugiere condiciones más favorables de manejo o adaptación. El tratamiento T4 registró igualmente un valor bajo (6,7 %), equiparable a los del grupo T2. La variabilidad observada entre tratamientos refleja diferencias significativas en la capacidad de supervivencia de las plántulas. Estos resultados sugieren que ciertos factores asociados a los tratamientos del grupo T1 y T3 incrementaron de manera crítica la mortandad, mientras que los grupos T2 y T4 generaron un mejor desempeño en términos de supervivencia.

Figura 1

Efecto de diferentes tratamientos sobre la mortandad en los plantones de C. micrantha.

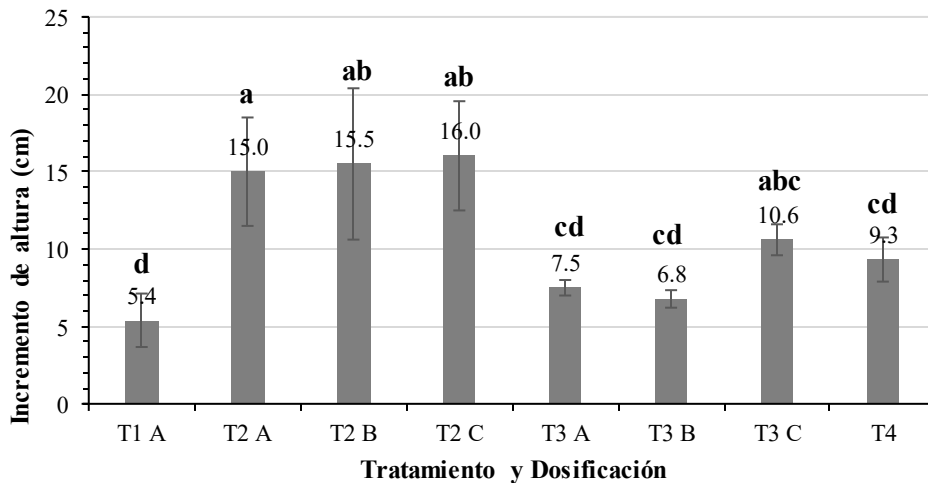


Incremento de altura

En Figura 2, que mide la altura (cm), se observa que los tratamientos T2 B y T2 C exhiben los valores más altos, con aproximadamente 15.5 cm y 16 cm, marcados con letras ab que indican similitud estadística en el grupo superior; en contraste, T1 A muestra el menor incremento de 5.4 cm (letra d), mientras que T3 B (6.8 cm, cd), T3 A (7.5 cm, cd), T3 C (10.6 cm, abc) y T4 (alrededor de 9,3 cm, cd) presentan valores intermedios a bajos, sugiriendo una respuesta diferencial al tratamiento.

Figura 2

Efecto de diferentes tratamientos sobre el incremento de altura en plantones de C. micrantha.

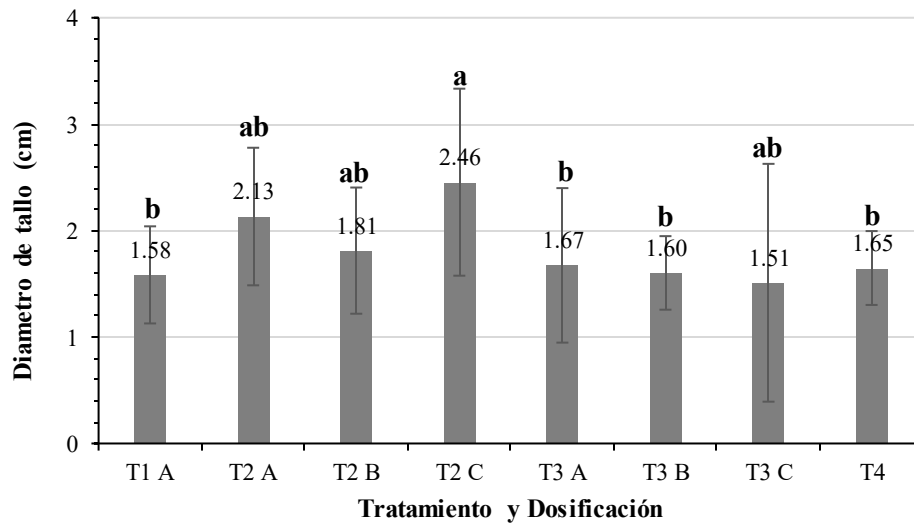


Diámetro de tallo

La Figura 3, enfocada en el diámetro del tallo (cm), destaca a T2 C con el máximo de 2.46 cm (a), seguido por T2 A (2.13 cm, ab), T2 B (1.81 cm, ab) y T3 A (1.67 cm, b), mientras que los demás tratamientos como T1 A (1.58 cm, b), T3 B (1.60 cm, b), T3 C (1.51 cm, ab) y T4 (1.65 cm, b) quedan en el grupo inferior, lo que implica que ciertas dosis favorecen el engrosamiento del tallo.

Figura 3

Efecto de diferentes tratamientos sobre el diámetro de tallo en plántones de C. micrantha.

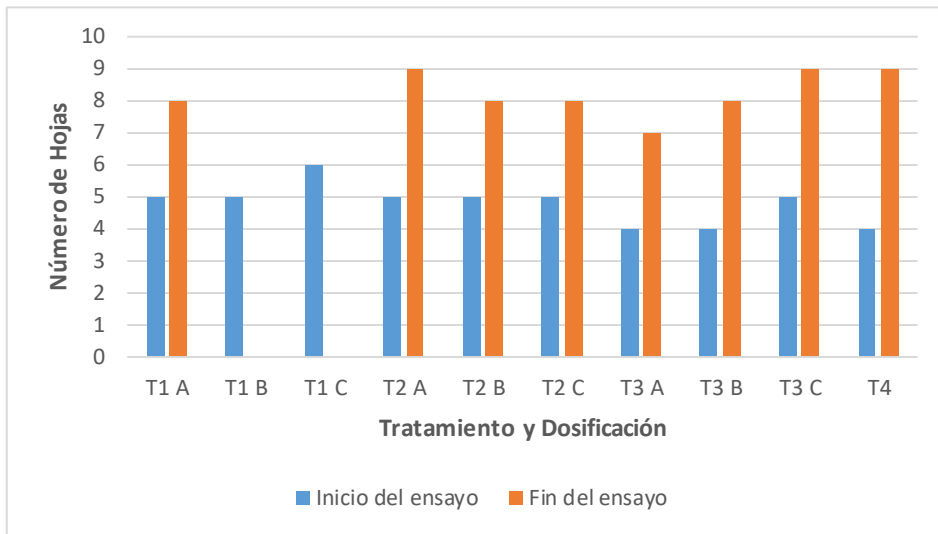


Número de hojas

La Figura 4 muestra el aumento de hojas en promedio por cada tratamiento y dosificación desde el inicio del ensayo hasta el final. Como se observa en el gráfico del grupo T1 antes de la aplicación del fertilizante se tenían individuos con un promedio de 5 a 6 hojas/plánton ya para el final del ensayo quedó solo el T1 A con 8 hojas/plánton, en el grupo T2 se inició con un promedio de 5 hojas/plánton para cada dosificación y finalizó con el T2 A siendo el más representativo con 9 hojas/plánton mientras que el T2 B y T2 C con 8 hojas/plánton, para el grupo de T3 se inició el ensayo con un promedio de 4 a 5 hojas/plánton y se finalizó con un resultado en el T3 A con 7 hojas/plánton, T3 B con 8 hojas/plánton, T3 C siendo más representativo del grupo con 9 hojas/plánton; en el caso del T4 se inició el ensayo con 4 hojas/plánton y se finalizó con un promedio de 9 hojas/plánton igualándose a los tratamientos T2 A y T3 C.

Figura 4

Efecto de diferentes tratamientos sobre el número de hojas en plantones de C. micrantha.



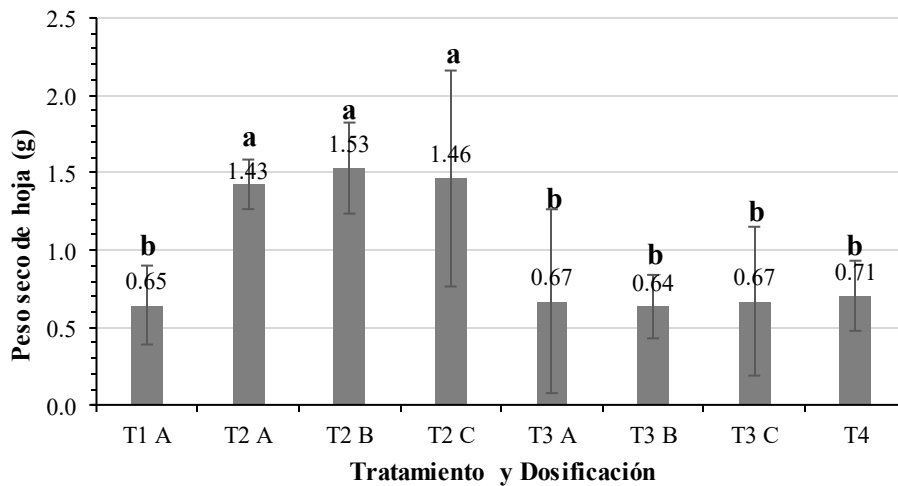
3.1.2. Biomasa del plantón

Peso de seco de hoja

La Figura 5 que representa la biomasa seca de hojas, T2 B lidera con 1.53 (a), seguido de cerca por T2 A (1.43, a) y T2 C (1.46, a), aunque este último se agrupa en un nivel ligeramente inferior pese a su valor cercano; los tratamientos restantes, incluyendo T1 A (0.65, b), T3 A (0.67, b), T3 B (0.64, b), T3 C (0.67, b) y T4 (0.71, b), muestran valores bajos de biomasa foliar.

Figura 5

Efecto de diferentes tratamientos sobre el peso seco de hojas en plantones de C. micrantha

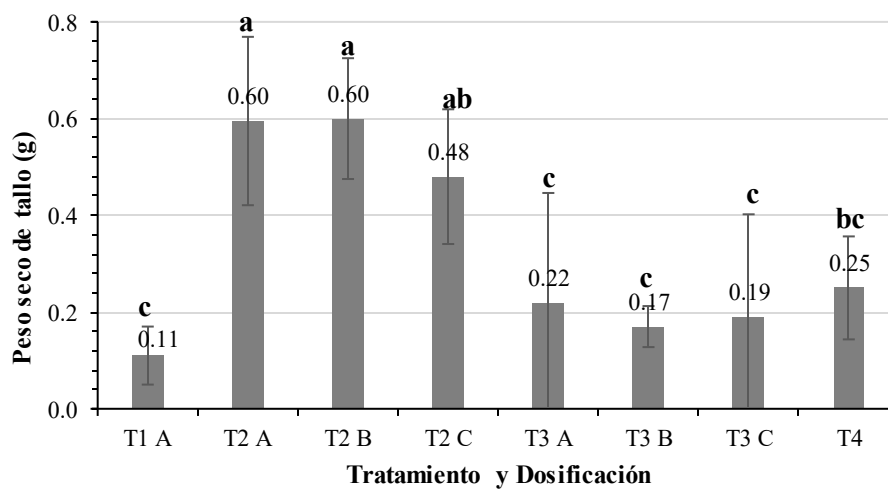


Peso seco del tallo

La Figura 6, mide el peso seco del tallo (g), revela patrones similares, con T2 A y T2 B en la cima a 0.60 g (a), T2 C en 0.48 g (ab) como intermedio, y valores bajos para T1 A (0.11 g, c), T3 A (0.22 g, c), T3 B (0.17 g, c), T3 C (0.19 g, c) y T 4 (0.25 g, bc), lo que resalta la acumulación de biomasa en tratamientos específicos.

Figura 6

Efecto de diferentes tratamientos sobre el peso seco en el tallo en plantones de C. micrantha.

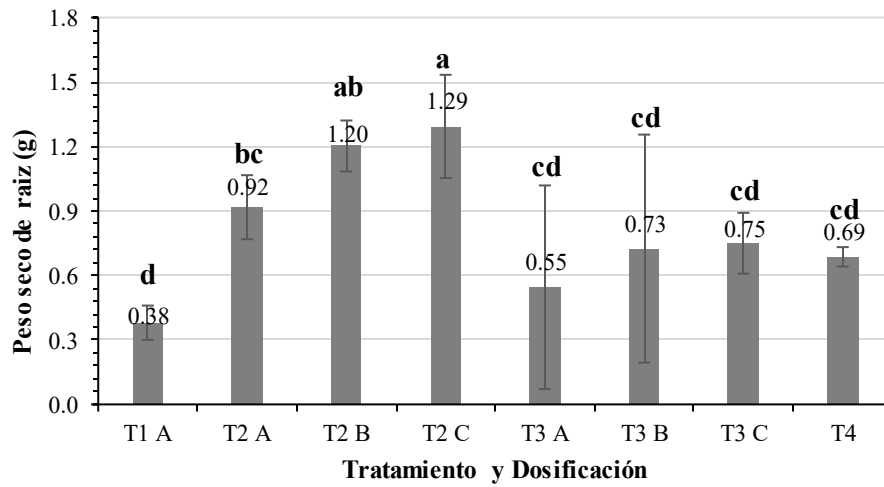


Peso seco de raíz

La Figura 7, que evalúa el peso seco de raíz (g), posiciona a T2 C como el más alto con 1.29 g (a), seguido por T2 B (1.20 g, ab) y T2 A (0.92 g, bc), mientras que T1 A (0.38 g, d) es el más bajo, y los demás (T3 A: 0.55 g cd, T3 B: 0.73 g cd, T3 C: 0.75 g cd, T4: 0.69 g cd) se agrupan en niveles intermedios, sugiriendo un impacto variable en el desarrollo radicular. Las letras sobre las barras denotan grupos de significancia estadística. Esta figura revela que los tratamientos T2 A, T2 B y T2 C consistentemente superan a los demás en la mayoría de los parámetros medidos, sugiriendo que representan el rango de dosis óptimo para promover el crecimiento vigoroso en plantones de *C. micrantha*, una especie arbórea de interés farmacológico por su contenido en alcaloides como la quinina. Esta superioridad se evidencia en el incremento de altura, donde T2 B y T2 C duplican o triplican los valores de tratamientos como T1 A o T 4, posiblemente indicando una estimulación hormonal o nutricional óptima que evita toxicidad por sobredosis observada en T2 C (menor altura, pero alto diámetro y raíz).

Figura 7

Efecto de diferentes tratamientos sobre el peso seco de la raíz de plantones de C. micrantha.

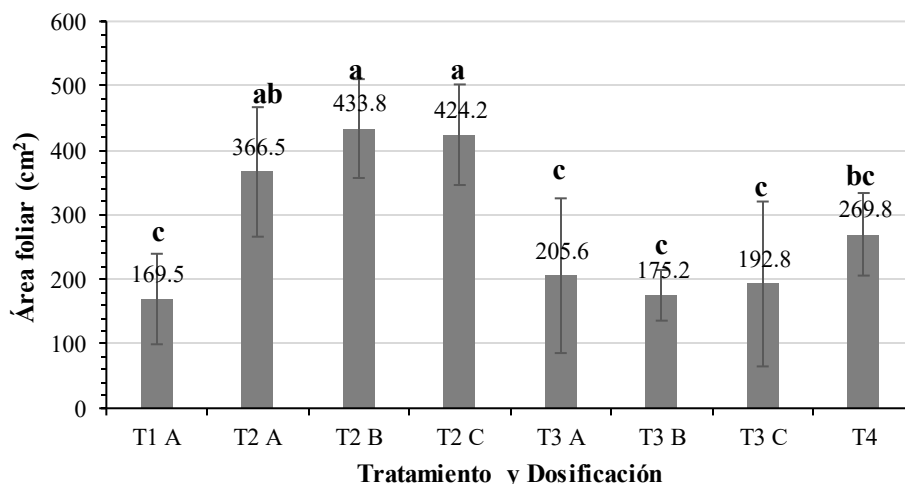


Área foliar

En la figura 8 se observa el efecto sobre el área foliar al final del ensayo de los diferentes tratamientos aplicados, donde el T1 A (169.5 cm²) presenta una de las áreas foliares más bajas mientras que las dosificaciones del tratamiento 2 (T2) muestran los valores más altos del Área foliar especialmente en el T2 B (433.8 cm²) seguido por T2 C (424.2 cm²) incremento notable formando el grupo estadísticamente superior; el tratamiento T3 presenta consistentemente áreas foliares bajas como T3 A (205.6 cm²), T3 B (175.2 cm²), T3 C (192.8 cm²) ligeramente mayor que T3 A y T3 B, sin diferencias significativas dentro de sus tres dosificaciones; el tratamiento T4 muestra un comportamiento intermedio con un valor de 269.8 cm² valor intermedio. Las diferencias estadísticas permiten afirmar que la eficacia del tratamiento depende de la dosificación (A, B, C).

Figura 8

Efecto de diferentes tratamientos sobre el área foliar en plántulas de C. micrantha.



3.1.3. Cuantificación del contenido de clorofila de las plantas en *C. micrantha* a nivel de vivero

La Figura 9 presenta la evolución del contenido de clorofila foliar, medido en valores SPAD (Soil and Plant Analysis Development), en dos momentos clave: al inicio y al final del ensayo bajo los tratamientos de fertilización T1 A, T2 A, T2 B, T2 C, T3 A, T3 B, T3 C y T4. Se observa un incremento generalizado del contenido de clorofila en todos los tratamientos. El incremento más destacado se evidencia en el T2 C, que pasó de 32.3 a 49.1 SPAD, representando el valor final más alto del ensayo. De manera similar, T2 A y T2 B mostraron aumentos significativos, alcanzando 45.7 y 46.5 unidades SPAD, respectivamente, lo que sugiere que el grupo T2 presenta mayor efectividad en promover la acumulación de clorofila, por ende, potencia la capacidad fotosintética. En contraste, T1 A y T4 registraron los valores más bajos durante el periodo evaluado, con incrementos más modestos menor acumulación de clorofila, lo que refleja una menor eficiencia del esquema de fertilización utilizado.

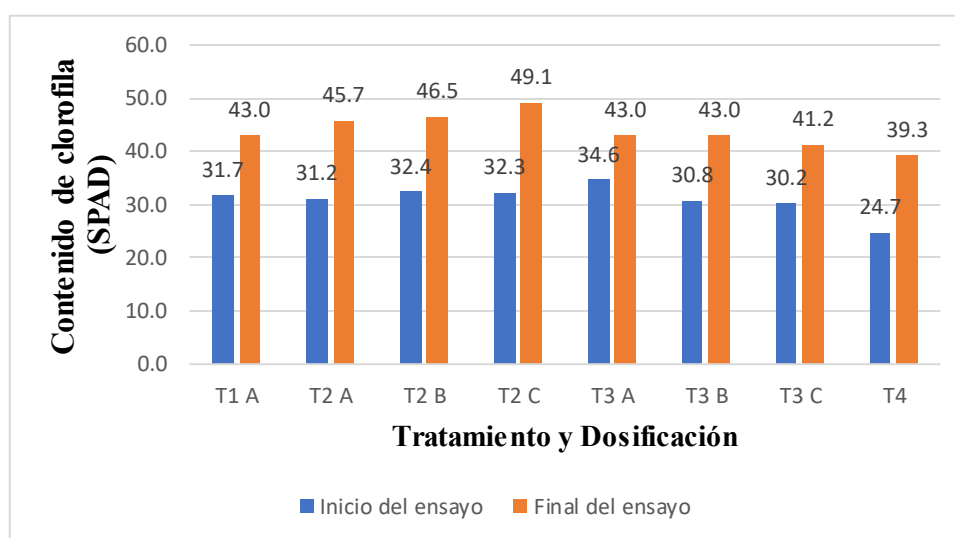
Por otro lado, al analizar el comportamiento de los tratamientos del grupo T3 (T3 A, T3 B y T3 C), se aprecia un patrón intermedio, aunque con fluctuaciones en el crecimiento como se puede observar el T3 A, T3 B, se aproxima en rendimiento a los tratamientos más eficientes (T2), lo que sugiere que este manejo puede ser una alternativa viable: aunque todos lograron incrementos notables, sus valores

finales se situaron entre 41.2 y 43.0 SPAD, siendo inferiores a los obtenidos en el grupo T2.

Los datos confirman que las estrategias de fertilización no solo influyen en el aumento del contenido de clorofila, sino también en la magnitud de la respuesta fisiológica del cultivo, destacando al grupo T2 como el más eficiente para potenciar la capacidad fotosintética y posiblemente el rendimiento productivo.

Figura 9

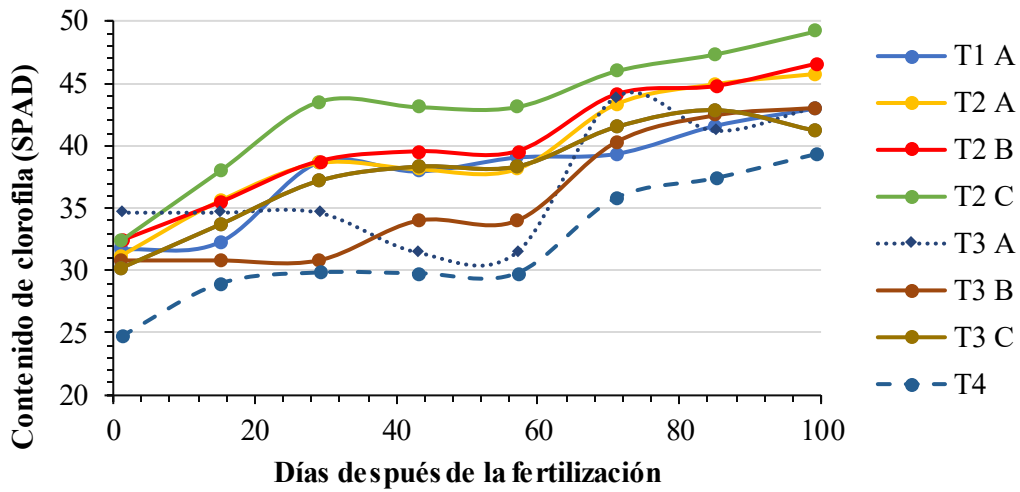
Evolución del contenido de clorofila (SPAD) en función al inicio y al final del ensayo y tratamientos de fertilización en los plantones de C. micrantha.



En la Figura 10, se observa el análisis temporal y el incremento del contenido de clorofila en base a los 100 días de evaluación, donde se evidencia que las mayores diferencias entre tratamientos se marcan entre los 40 y 70 días después de la fertilización, etapa crítica para el establecimiento del contenido de clorofila, mientras que hacia el final las curvas tienden a estabilizarse. Este comportamiento refuerza la importancia de la fertilización diferenciada en las etapas iniciales del desarrollo, ya que define la capacidad de acumulación de clorofila y, por ende, la eficiencia fotosintética y productiva del cultivo.

Figura 10

*Evolución del contenido de clorofila (SPAD) en función al tiempo (100 días) y tratamientos de fertilización en los plantones de *C. micrantha*.*



3.2. Mediciones en sustrato suelo del plantón

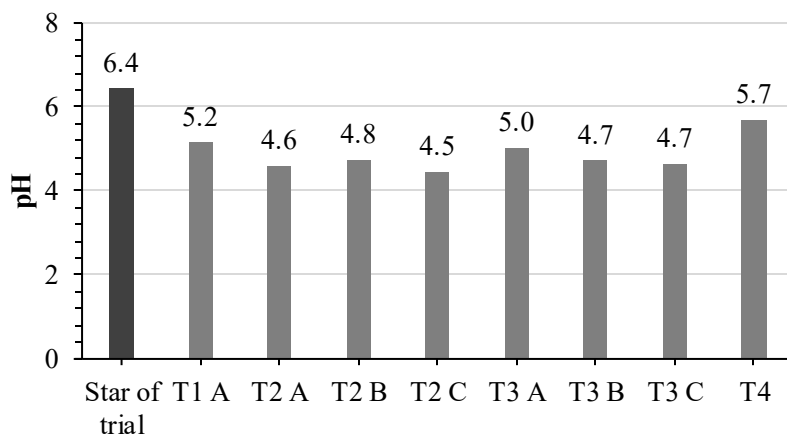
El efecto de tratamientos en las propiedades fisicoquímicas y biomasa de sustrato para *C. micrantha*.

Medida de pH

La Figura 11, muestra un pH relativamente estable entre 4.5 y 5.7, sugiriendo que los tratamientos no alteran la acidez, un factor clave para la absorción de nutrientes como los observados en la biomasa foliar y radicular del análisis anterior.

Figura 11

*Efecto de diferentes tratamientos sobre el pH en el sustrato de los plantones de *C. micrantha*.*

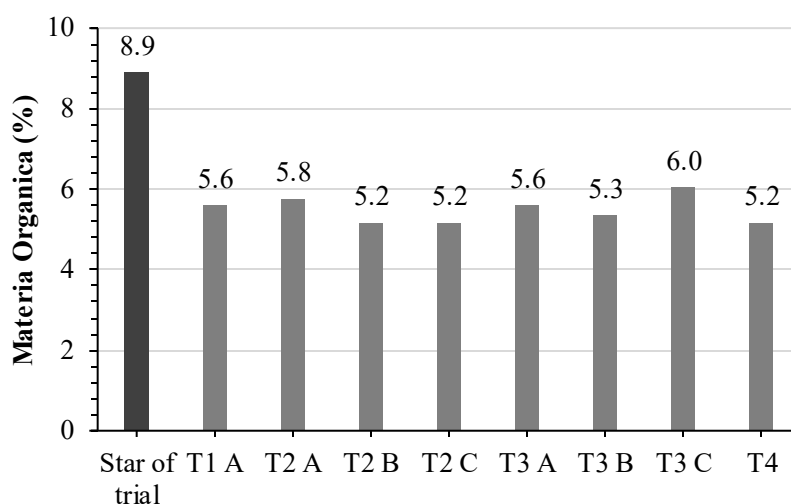


Contenido de materia orgánica

La Figura 12 indica un contenido de materia orgánica que oscila entre 5.2% y 6.0%, con T3C, indicando un sustrato rico que favorece el crecimiento.

Figura 12

Efecto de diferentes tratamientos sobre el contenido de materia orgánica en el sustrato de los plantones de C. micrantha.



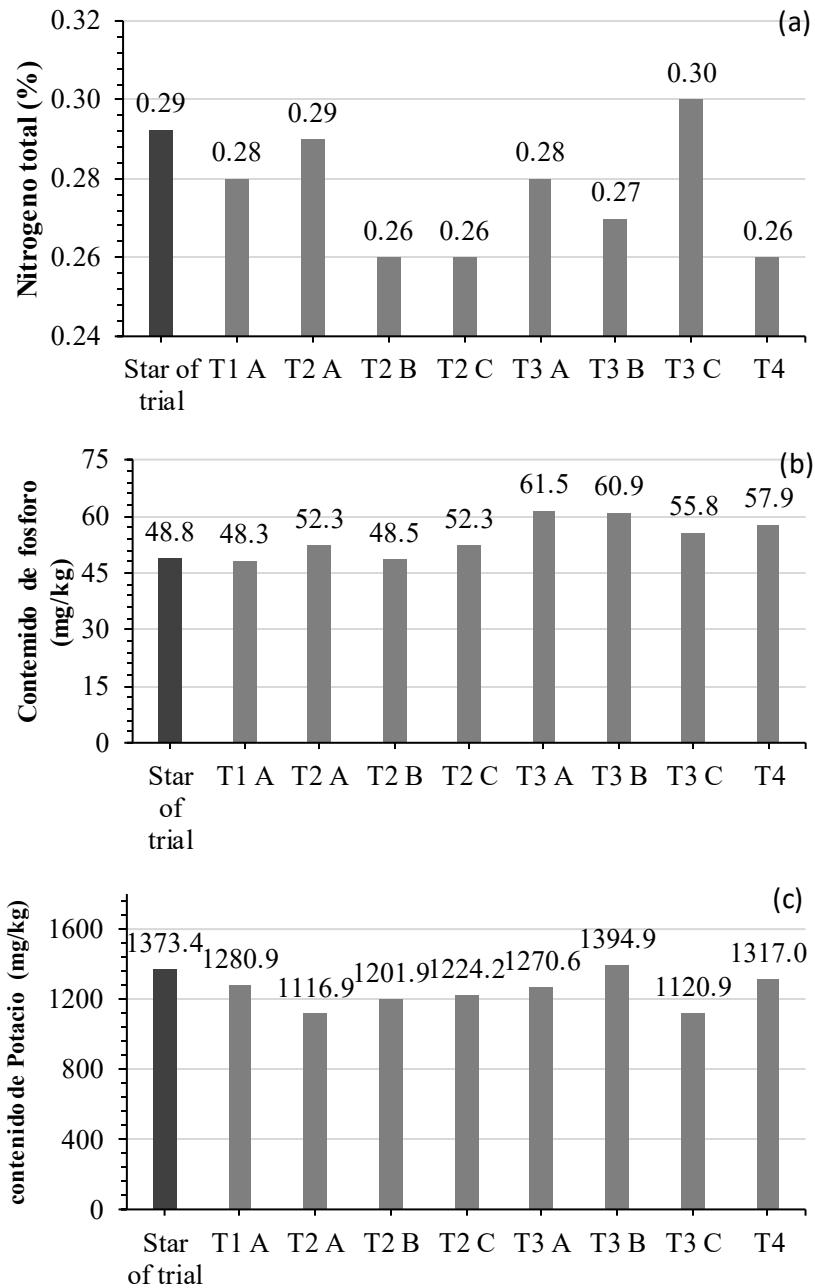
Contenido de Nitrógeno total, Fósforo, Potasio

La Figura 13a, muestra el nitrógeno total (0.26-0.30%), con pico en T3 C (0.30%).

La Figura 13b presenta un contenido de fósforo de 48.3-61.5 mg/kg que aumenta progresivamente hacia T4 (57.9 mg/kg). La Figura 13c, con potasio (1120.9-1349.9 µg/g), muestra un incremento notable en T4 (1317.0 µg/g), lo que podría explicar la robustez radicular observada en T2 C y T4 en la figura anterior, ya que el potasio es esencial para el transporte de agua y nutrientes a las raíces.

Figura 13

Efecto de diferentes tratamientos sobre el contenido de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) en el sustrato de los plantones de C. micrantha: a, contenido de nitrógeno total; b, contenido de fósforo; c, contenido de potasio.



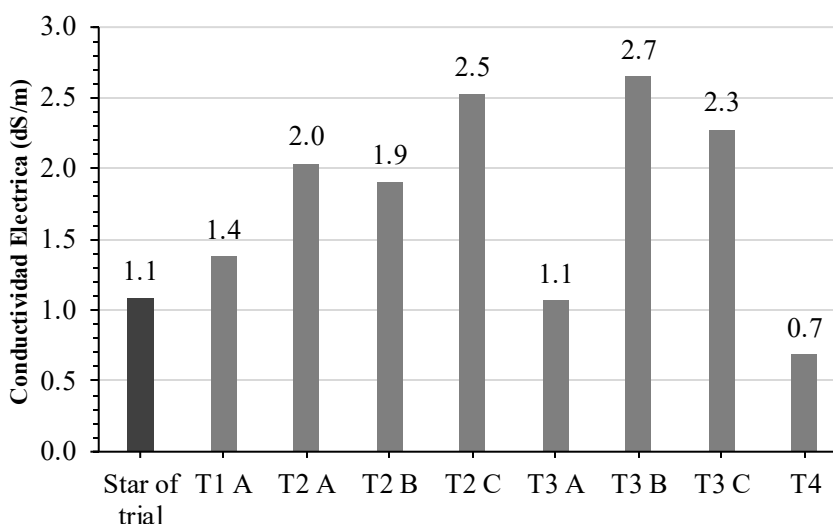
Conductividad eléctrica

En la Figura 14, se presenta la conductividad eléctrica (0.7-2.7 dS/m) con pico en T4 (2.7 dS/m), indicando una posible saturación de nutrientes o sales que podría

limitar el crecimiento si excede el rango óptimo, alineándose con la menor performance de T4 en algunos parámetros de la Figura 2.

Figura 14

*Efecto de diferentes tratamientos sobre la conductividad eléctrica en el sustrato de los plántones de *C. micrantha*.*



3.3. Generación de modelos matemáticos que puedan predecir las variables de crecimiento a nivel de vivero

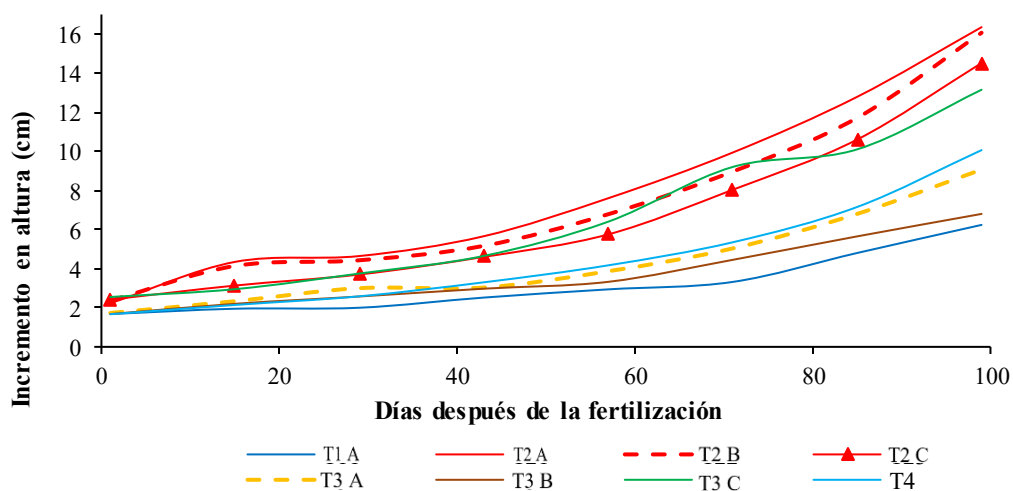
La Figura 15, muestra la evolución del incremento en altura (cm) de plantas a lo largo de 100 días después de la fertilización, bajo diferentes tratamientos, junto con sus respectivas ecuaciones de regresión lineal y coeficientes de determinación (R^2). Se observa un crecimiento diferenciado entre los tratamientos, con una clara superioridad de los pertenecientes al grupo T2 (T2 A, T2 B y T2 C), que alcanzan incrementos superiores a 14 cm al final del ensayo, respaldados por altos valores de R^2 (0.9395, 0.9032 y 0.8947, respectivamente).

Estos resultados evidencian que la respuesta del crecimiento en altura está estrechamente asociada a la eficiencia de las estrategias de fertilización aplicadas, ya que no solo promueven un mayor crecimiento absoluto, sino también una mayor consistencia predictiva en los modelos matemáticos generados. En contraste, el tratamiento T1 A presenta la menor pendiente de crecimiento ($0.043x$) y el valor más bajo de R^2 (0.8616), lo que refleja un desempeño inferior y una menor capacidad para explicar la variabilidad observada en los datos.

Por otro lado, los tratamientos del grupo T3 (T3 A, T3 B y T3 C) muestran un comportamiento intermedio, con pendientes de crecimiento entre 0.0503 y 0.1089 y valores de R^2 superiores a 0.89, lo que indica que, aunque generan una tendencia positiva en el incremento de altura, su desempeño es menos sobresaliente frente al grupo T2. El tratamiento T4 también evidencia una respuesta moderada, con pendiente baja (0.0791x) y un ajuste de R^2 de 0.8952, posicionándose en un nivel similar a los tratamientos T3 A y T3 B. Estos resultados resaltan la importancia de los modelos matemáticos como herramientas predictivas, ya que permiten identificar con precisión los tratamientos más eficientes y proyectar el crecimiento de las plantas a lo largo del tiempo.

Figura 15

*Modelos de predicción del incremento en altura bajo diferentes tratamientos de fertilización en plántulas de *C. micrantha* en vivero.*



$$T1 A: y = 0.043x + 1.0324 / R^2 = 0.8616$$

$$T2 A: y = 0.1351x + 1.1875 / R^2 = 0.9395$$

$$T2 B: y = 0.1267x + 1.1165 / R^2 = 0.9032$$

$$T2 C: y = 0.1158x + 0.8036 / R^2 = 0.8947$$

$$T3 A: y = 0.0685x + 0.9315 / R^2 = 0.8906$$

$$T3 B: y = 0.0503x + 1.1935 / R^2 = 0.9341$$

$$T3 C: y = 0.1089x + 1.1494 / R^2 = 0.9421$$

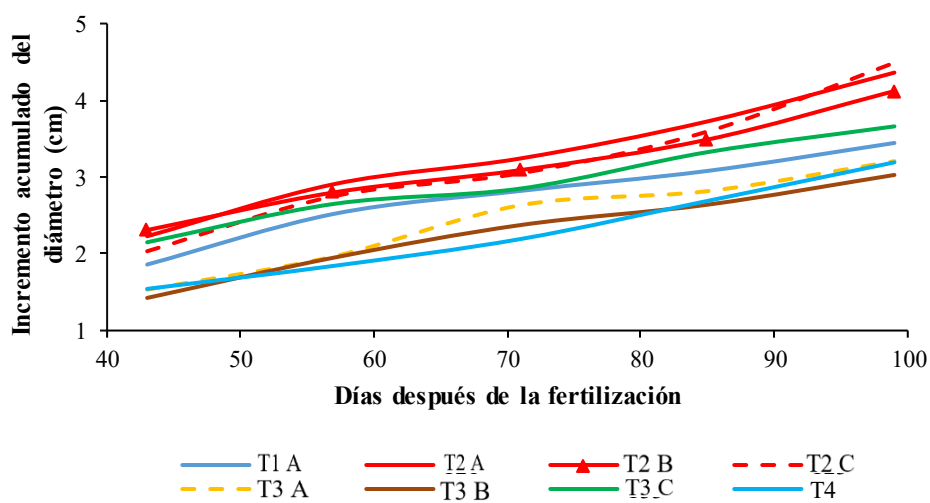
$$T4: y = 0.0791x + 0.6003 / R^2 = 0.8952$$

La Figura 16 muestra la evolución del incremento acumulado del diámetro (cm) en función del tiempo, expresado en días después de la fertilización, para los tratamientos T1 A, T2 A, T2 B, T2 C, T3 A, T3 B, T3 C y T4. Se observa una tendencia creciente en todos los casos, aunque con diferentes pendientes y valores de ajuste (R^2), lo que indica variaciones en la respuesta de las plantas según el tratamiento aplicado. Los tratamientos T2 A, T2 B y T2 C, representados con líneas rojas, presentan los mayores incrementos en el diámetro, alcanzando valores cercanos a 5 cm hacia el día 100, lo que sugiere que la estrategia de fertilización implementada en estos casos fue más eficiente en promover el crecimiento. En contraste, tratamientos como T3 B y T3 C muestran una respuesta más moderada, mientras que T4 evidencia un incremento menor respecto a los tratamientos más efectivos, aunque mantiene una tendencia positiva de crecimiento.

Las ecuaciones lineales ajustadas permiten cuantificar el efecto del tiempo sobre el incremento del diámetro, destacando pendientes mayores en los tratamientos T2 C ($0.0411x$) y T2 A ($0.0363x$), lo cual refleja un crecimiento más acelerado en comparación con otros tratamientos. Además, los altos valores de R^2 (superiores a 0.96 en todos los casos) indican un buen ajuste de los modelos lineales, lo que refuerza la validez de las tendencias observadas. En este contexto, se puede inferir que los tratamientos de la serie T2 (T2 A, T2 B y T2 C) fueron los más efectivos en promover el incremento diametral, lo que posiblemente esté relacionado con un mejor equilibrio de nutrientes, una mayor disponibilidad de elementos esenciales o una sincronización más adecuada entre la aplicación de fertilizantes y las demandas fisiológicas de la planta. Estos resultados subrayan la importancia de seleccionar tratamientos de fertilización adecuados, ya que las diferencias entre ellos generan impactos significativos en el desarrollo vegetativo y, por ende, en el rendimiento productivo potencial de los cultivos.

Figura 16

Modelos de predicción del incremento dimétrico bajo diferentes tratamientos de fertilización en plántones de C. micrantha en vivero.



T1 A: $y = 0.0266x + 0.8542 / R^2 = 0.9649$

T2 A: $y = 0.0363x + 0.7155 / R^2 = 0.9892$

T2 B: $y = 0.0308x + 0.9751 / R^2 = 0.984$

T2 C: $y = 0.0411x + 0.2652 / R^2 = 0.9738$

T3 A: $y = 0.03x + 0.303 / R^2 = 0.9716$

T3 B: $y = 0.0278x + 0.3082 / R^2 = 0.9869$

T3 C: $y = 0.0264x + 1.0531 / R^2 = 0.9879$

T4: $y = 0.0296x + 0.1905 / R^2 = 0.987$

IV. DISCUSIÓN

El análisis de los resultados evidencia que la fertilización nitrogenada influye de manera significativa en el crecimiento y desarrollo de *C. micrantha* en vivero, particularmente en los parámetros de altura, diámetro y acumulación de biomasa. Los tratamientos con urea modificada mediante inhibidores (T2 A, T2 B y T2 C) superaron ampliamente a los tratamientos con urea convencional y al testigo, lo que confirma que la eficiencia del uso de N depende en gran medida del tipo de fertilizante empleado. Estudios similares en especies forestales han reportado que la inclusión de inhibidores como NBPT o DMPP reduce la volatilización de amoníaco y mejora la absorción del nutriente, prolongando su disponibilidad en el suelo (Abalos et al., 2014; Rehman et al., 2022). Esta tendencia refuerza la idea de que la sincronización entre el suministro de nutrientes y la demanda fisiológica de las plantas es crucial para maximizar el rendimiento inicial en vivero.

Los resultados en altura muestran que los tratamientos T2 A y T2 B duplicaron los valores observados en T1 A y T4, lo que evidencia una relación positiva entre la aplicación de inhibidores y el vigor vegetativo. Este hallazgo es coherente con investigaciones en *Quercus ilex* y *Austrocedrus chilensis*, donde se demostró que dosis balanceadas de nitrógeno incrementan la elongación apical y la producción de biomasa aérea (Massone et al., 2018; Oliet et al., 2009). La eficiencia observada en T2 A y T2 B también puede asociarse a un equilibrio en la absorción de otros nutrientes como fósforo y potasio, esenciales para sostener la fotosíntesis y el crecimiento estructural. En este contexto, el comportamiento diferencial de T2 C, con mayor diámetro y biomasa radicular pero menor altura, sugiere un redireccionamiento de recursos hacia la robustez estructural y el anclaje, fenómeno que ha sido descrito en especies sometidas a estrés nutricional moderado (Bloomfield et al., 2014; Wheeler et al., 2017).

La acumulación de clorofila, medida mediante valores SPAD, mostró incrementos consistentes en el grupo T2, alcanzando hasta 50 unidades al día 100. Este indicador se correlaciona directamente con la capacidad fotosintética y, por ende, con la productividad futura de la especie. En concordancia, investigaciones en arroz y maíz han reportado que la aplicación de fertilizantes nitrogenados de liberación lenta incrementa significativamente los valores SPAD y mejora la eficiencia fotosintética (Islam Bhuiyan et al., 2021; Mu & Chen, 2021). De manera similar, el comportamiento superior de T2 A,

T2 B y T2 C sugiere que estos tratamientos garantizan una mayor disponibilidad de N en momentos críticos del desarrollo foliar, reforzando el rol del N en la formación de rubisco y tilacoides, componentes esenciales de la maquinaria fotosintética (Bloomfield et al., 2014; Cui et al., 2024; Shibaeva et al., 2020).

En relación con la biomasa aérea y radicular, los tratamientos del grupo T2 registraron los valores más altos, con T2 B destacando en biomasa foliar y T2 C en biomasa radicular. Este patrón refleja una distribución equilibrada de recursos, que permite tanto el desarrollo de estructuras fotosintéticas como el fortalecimiento de sistemas de absorción. Trabajos en agroforestería señalan que este balance es determinante para la sobrevivencia en campo, ya que una relación armónica entre biomasa aérea y radicular facilita la adaptación a condiciones adversas (Kaur et al., 2023; Souri & Hatamian, 2019). Además, la mayor biomasa foliar observada en T2 B podría estar vinculada con un mayor contenido de clorofila, confirmando la asociación positiva entre nutrición nitrogenada y rendimiento fotosintético (Miao et al., 2015; Rehman et al., 2022).

El análisis de las propiedades fisicoquímicas del sustrato mostró que las variaciones de pH, fósforo y potasio se relacionan con los patrones de crecimiento observados. En particular, el incremento de potasio en T4 puede explicar la respuesta relativamente favorable en biomasa radicular, ya que este nutriente cumple un papel clave en la osmorregulación y el transporte de agua (Groenbaek et al., 2016; Massone et al., 2018). Sin embargo, la alta conductividad eléctrica observada en este tratamiento sugiere una posible saturación de sales, lo que podría limitar el crecimiento aéreo, tal como lo reportan investigaciones en sistemas intensivos de fertilización nitrogenada (Ferreira et al., 2020; Ladha et al., 2005). Este hallazgo confirma la necesidad de balancear la aplicación de nutrientes para evitar efectos adversos.

Los modelos matemáticos desarrollados mostraron altos valores de R^2 , especialmente en T2 A y T2 C, lo que indica una fuerte capacidad predictiva del crecimiento bajo condiciones de fertilización óptima. Este resultado valida la utilidad de los modelos lineales para proyectar el comportamiento de especies forestales en vivero, alineándose con estudios en *C. officinalis* y otras Rubiaceae donde los modelos estadísticos fueron empleados con éxito para predecir incremento en altura y diámetro (Fernandez-Zarate et al., 2022, 2024). La aplicación de este tipo de herramientas en *C. micrantha* constituye

un avance significativo, pues permite anticipar la respuesta de las plántulas en función de la fertilización, optimizando así los programas de repoblamiento y conservación.

Finalmente, los hallazgos del presente estudio tienen implicancias prácticas y ecológicas. Desde una perspectiva productiva, la aplicación de fertilizantes con inhibidores de ureasa y nitrificación mejora la eficiencia en el uso del nitrógeno y favorece un crecimiento balanceado de *C. micrantha*. Desde el punto de vista ecológico, esta estrategia contribuye a reducir la lixiviación de nitratos y la emisión de gases de efecto invernadero, lo que la convierte en una alternativa sostenible frente a la fertilización convencional (Abalos et al., 2014; Bozal-Leorri et al., 2022). En el contexto de la reforestación y conservación en los Andes peruanos, estos resultados sugieren que la adopción de prácticas de fertilización inteligente podría incrementar las tasas de sobrevivencia y crecimiento de las plántulas, fortaleciendo los esfuerzos de restauración ecológica y preservación de especies de alto valor medicinal como *C. micrantha*.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los tratamientos urea con inhibidor de ureasa (NBPT) y urea con inhibidor de nitrificación (DMPP) superan a la urea convencional en promover un crecimiento equilibrado en *C. micrantha*, con dosis óptimas de 0.3-0.6 g/planta maximizando altura, diámetro y biomasa, mientras que 0.9 g/planta induce redirección hacia robustez radicular sin comprometer viabilidad.
- El contenido de clorofila se incrementa significativamente (hasta 52% en tratamientos óptimos), correlacionándose con eficiencia fotosintética y asimilación de N, validando el SPAD como un método no destructivo para monitoreo nutricional en vivero.
- Los modelos lineales predictivos ($R^2 = 0.86-0.99$) demuestran respuestas dosis-dependientes lineales en etapas iniciales, facilitando proyecciones para optimización de protocolos de cultivo y conservación de especies medicinales como *Cinchona*, con implicaciones en mitigación de pérdidas de N y sostenibilidad agroforestal.

5.2. Recomendaciones

- Aplicar urea con inhibidores (NBPT/DMPP) en dosis 0.3-0.6 g/planta como estándar en viveros de *Cinchona* spp. para maximizar NUE y minimizar impactos ambientales, integrando monitoreo SPAD para ajustes dinámicos basados en fenotipos.
- Expandir ensayos a campo abierto, incorporando variables abióticas (variabilidad climática andina) y micorrizas para evaluar transiciones de vivero a campo definitivo, empleando modelos predictivos para escalar repoblación en ecosistemas degradados.
- Fomentar colaboraciones interdisciplinarias con instituciones como INIA-Perú para políticas de conservación y producción sostenible de *Cinchonas*.

VI. REFERENCIAS

- Sales-Dávila, B., Samaniego-Vivanco, T., Durand-Pasco, K., Norabuena-Segovia, A., Calderón-Espinoza, R., Ortega-Vega, J., & Munayco-Peralta, K. (2024). *Manual para el análisis de suelos agrícolas y agua para riego*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Perú. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12955/2473>
- Ahirwal, J., Puja, S., Amitabha, N., Arun, J., Nath, S., Uttam K. S. (2021). Forests litter dynamics and environmental patterns in the Indian Himalayan region. *Forest Ecology and Management* 499:119612. doi: 10.1016/j.foreco.2021.119612.
- Berg, B. (2000). Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management* 133(1):13-22. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00294-7.
- Berg, B., McClaugherty, C. (2003). *Plant Litter*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Abalos, D., Jeffery, S., Sanz-Cobena, A., Guardia, G., Vallejo, A. (2014). Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 189, 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.036>
- Albán-Castillo, J., Chilquillo, E., Melchor- Castro, B., Arakaki, M., León, B., Suni, M. (2020). Cinchona L. «Árbol de la Quina»: Repoblamiento y reforestación en el Perú. *Revista Peruana de Biología*, 27(3), 423-426. <https://doi.org/10.15381/rpb.v27i3.18697>
- Bharadwaj, K. C., Gupta, T., Singh, R. M. (2018). Chapter 9 - Alkaloid group of Cinchona officinalis: Structural, synthetic, and medicinal aspects. En A. Tewari & S. Tiwari (Eds.), *Synthesis of Medicinal Agents from Plants* (pp. 205-227). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102071-5.00009-X>
- Bloomfield, K. J., Farquhar, G. D., Lloyd, J. (2014). Photosynthesis-nitrogen relationships in tropical forest tree species as affected by soil phosphorus availability: A controlled environment study. *Functional Plant Biology: FPB*, 41(8), 820-832. <https://doi.org/10.1071/FP13278>
- Bozal-Leorri, A., Corrochano-Monsalve, M., Vega-Mas, I., Aparicio-Tejo, P. M., González-Murua, C., Marino, D. (2022). Evidences towards deciphering the mode of action of dimethylpyrazole-based nitrification inhibitors in soil and pure

- cultures of *Nitrosomonas europaea*. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 56. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00321-3>
- Cui, E., Zhou, Z., Cui, B., Fan, X., Ali Abid, A., Chen, T., Gao, F., Du, Z. (2024). Effects of nitrogen fertilization on the fate of high-risk antibiotic resistance genes in reclaimed water-irrigated soil and plants. *Environment International*, 190, 108834. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108834>
- Fernandez, F. H., Huaccha, A. E. (2022). Fenología vegetativa y reproductiva de *Cinchona micrantha* (Rubiaceae) en un bosque húmedo de Jaén, Perú. *Caldasia*, 44(3), Article 3. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v44n3.88298>
- Fernandez-Zarate, F. H., Huaccha-Castillo, A. E., Quiñones-Huatangari, L., Vacamarquina, S. P., Sanchez-Santillan, T., Morales-Rojas, E., Seminario-Cunya, A., Guelac-Santillan, M., Barturén-Vega, L. M., Coronel-Bustamante, D. (2022). Effect of arbuscular mycorrhiza on germination and initial growth of *Cinchona officinalis* L. (Rubiaceae). *Forest Science and Technology*, 18(4), 182-189. <https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2124318>
- Fernandez-Zarate, F. H., Huaccha-Castillo, A. E., Quiñones-Huatangari, L., Vacamarquina, S. P., Goñas, M., Milla-Pino, M. E., Seminario-Cunya, A. (2024). Effect of synthetic fertilization dose on the diameter increase, height and mortality of *Cinchona officinalis* L. (Rubiaceae). *Forest Science and Technology*, 20(2), 194-200. <https://doi.org/10.1080/21580103.2024.2343346>
- Fernandez Zarate, F. H., Huaccha Castillo, A. E., Quiñones Huatangari, L., & Sanchez Santillán, T. (2021). Influencia del tamaño de plántula de *Cinchona officinalis* (Rubiaceae) en la supervivencia y deformación del tallo posterior al repique. *Revista Cubana De Ciencias Forestales*, 9(3), 412–422. <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/713>
- Ferreira, G., Teets, C. L., Huffard, J. B., Aguerre, M. J. (2020). Effects of planting population, genotype, and nitrogen fertilization on dry matter yield, nutrient composition, in vitro ruminal neutral detergent fiber disappearance, and nitrogen and phosphorus removal of corn for silage. *Animal Feed Science and Technology*, 268, 114615. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114615>
- Groenbaek, M., Jensen, S., Neugart, S., Schreiner, M., Kidmose, U., Kristensen, H. L. (2016). Fertilización con dosis divididas de nitrógeno, edad de la planta y efectos de las heladas sobre el contenido fitoquímico y las propiedades sensoriales de la

- col rizada (*Brassica oleracea* L. var. *Sabellica*). *Food Chemistry*, 197, 530-538.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.108>
- Guo, X., Zhao, D., Hu, J., Wang, D., Wang, J., Shakeel, M. (2022). The Effects of Water and Fertilizer Coupling on Plant and Soil Nitrogen Characteristics and Fruit Growth of Rabbiteye Blueberry Plants in a Semi-Arid Region in China. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 92(1), 209-223.
<https://doi.org/10.32604/phyton.2022.023050>
- Islam Bhuiyan, M. S., Rahman, A., Kim, G. W., Das, S., Kim, P. J. (2021). Eco-friendly yield-scaled global warming potential assists to determine the right rate of nitrogen in rice system: A systematic literature review. *Environmental Pollution*, 271, 116386. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116386>
- Kaur, A., Paruchuri, R. G., Nayak, P., Devi, K. B., Upadhyay, L., Kumar, A., Pancholi, R., Yousuf, M. (2023). The Role of Agroforestry in Soil Conservation and Sustainable Crop Production: A Comprehensive Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 3089-3095.
<https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i113478>
- Ladha, J. K., Pathak, H., J. Krupnik, T., Six, J., van Kessel, C. (2005). Efficiency of Fertilizer Nitrogen in Cereal Production: Retrospects and Prospects. En *Advances in Agronomy* (Vol. 87, pp. 85-156). Academic Press.
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)87003-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87003-8)
- Massone, D. S., Bartoli, C. G., Pastorino, M. J., Massone, D. S., Bartoli, C. G., Pastorino, M. J. (2018). Efecto de la fertilización con distintas concentraciones de nitrógeno y potasio en el crecimiento de plantines de ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*) en vivero. *Bosque (Valdivia)*, 39(3), 375-384.
<https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000300375>
- Meng, T., Shi, J., Zhang, X., Zhao, X., Zhang, D., Chen, L., Lu, Z., Cheng, Y., Hao, Y., Zhao, X., Wang, Y. (2024). Slow-release nitrogen fertilizer application regulated rhizosphere microbial diversity to increase maize yield. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1481465>
- Miao, Y., F., Wang, Z., H., Li, S., X. (2015). Relation of nitrate N accumulation in dryland soil with wheat response to N fertilizer. *Field Crops Research*, 170, 119-130.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.09.016>

- Mu, X., Chen, Y. (2021). The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.019>
- Oliet, J. A., Tejada, M., Salifu, K. F., Collazos, A., Jacobs, D. F. (2009). Performance and nutrient dynamics of holm oak (*Quercus ilex* L.) seedlings in relation to nursery nutrient loading and post-transplant fertility. *European Journal of Forest Research*, 128(3), 253-263. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0261-y>
- Rehman, H. ur, Alharby, H. F., Al-Zahrani, H. S., Bamagoos, A. A., Alsulami, N. B., Alabdallah, N. M., Iqbal, T., Wakeel, A. (2022). Enriching Urea with Nitrogen Inhibitors Improves Growth, N Uptake and Seed Yield in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) Affecting Photochemical Efficiency and Nitrate Reductase Activity. *Plants*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/plants11030371>
- Shibaeva, T. G., Mamaev, A. V., Sherudilo, E. G. (2020). Evaluation of a SPAD-502 Plus Chlorophyll Meter to Estimate Chlorophyll Content in Leaves with Interveinal Chlorosis. *Russian Journal of Plant Physiology*, 67(4), 690-696. <https://doi.org/10.1134/S1021443720040160>
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Vargas Halabí, T., & Mora-Esquivel, R. (2017). Tamaño de la muestra en modelos de ecuaciones estructurales con constructos latentes: Un método práctico. *Actualidades Investigativas en Educación*, 17(1), 25-60. [doi:http://dx.doi.org/10.15517/aie.v17i1.27294](http://dx.doi.org/10.15517/aie.v17i1.27294)
- Villar del Aguila, E. V. (2022). *Crecimiento, estado fitosanitario y mortalidad de la plantación N° 11 de Carapa guianensis “andiroba”, CIEFOR – Puerto Almendra, Loreto – Perú*. IQUITOS: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.
- Souri, M. K., Hatamian, M. (2019). Aminochelates in plant nutrition: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 42(1), 67-78. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1549671>
- Wheeler, J. A., Frey, S. D., Stinson, K. A. (2017). Tree seedling responses to multiple environmental stresses: Interactive effects of soil warming, nitrogen fertilization, and plant invasion. *Forest Ecology and Management*, 403, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.010>

AGRADECIMIENTO

- Expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesora de tesis, la Mg. Ing. Annick Estefany Huaccha Castillo, por su inquebrantable paciencia, su perspicaz guía y su experto asesoramiento durante todo este proceso.
- También extiendo mi agradecimiento al Mg. Ing. Franklin Hitler Fernández Zárate y al Instituto Nacional de Innovación Agraria por el proyecto de inversión titulado “Fortalecimiento de los Servicios de Investigación y Transferencia de Tecnología en la Estación Experimental Agraria Baños del Inca, en la localidad de Los Baños del Inca, distrito de Los Baños del Inca, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca”, identificado con el código único de inversión 2472675. Agradezco profundamente su colaboración, sus comentarios constructivos y su apoyo, que enriquecieron enormemente este trabajo. Sus contribuciones fueron esenciales para hacer posible este logro.
- A la memoria del señor Neftalí Fernández, por su apoyo incondicional y por demostrar su pasión por la especie *Cinchona micrantha* y su conservación. Su interés y disposición contribuyeron de manera significativa al desarrollo de este trabajo.

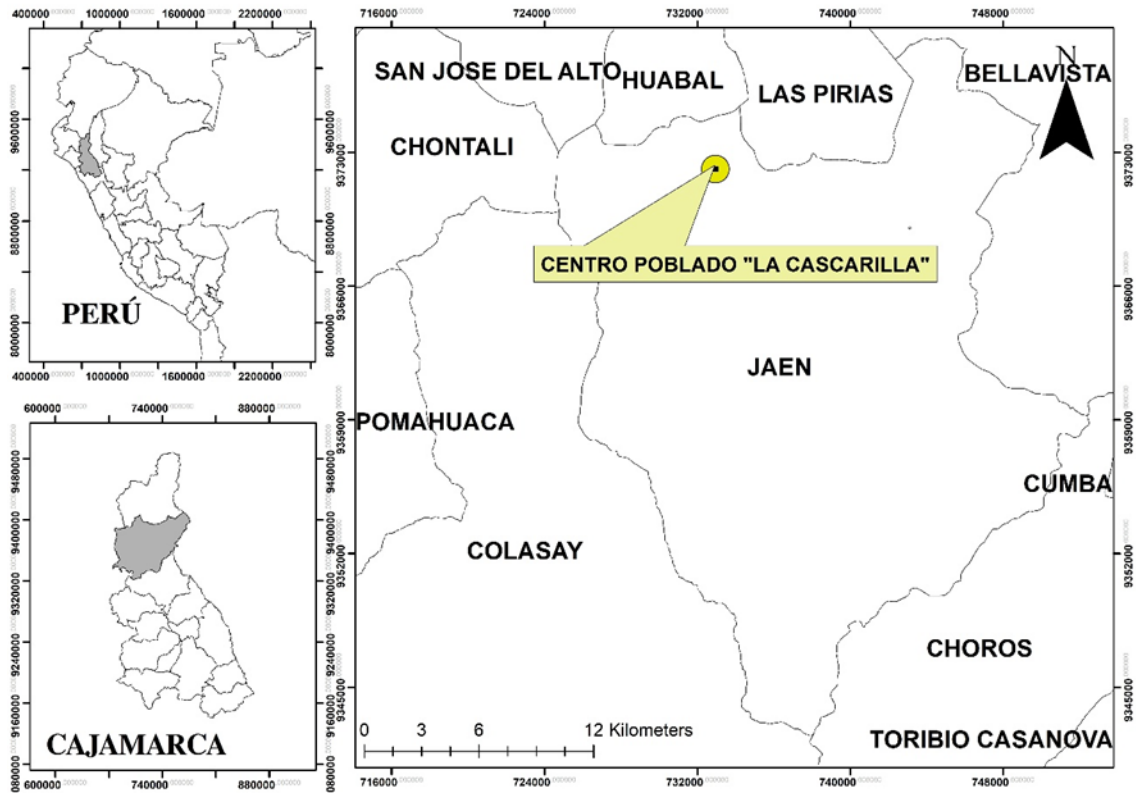
DEDICATORIA

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y enseñanzas que han sido mi guía en cada paso de este camino; por ser mi pilar en los momentos de duda y alegría. Esta tesis es el resultado de su acompañamiento y fe en mí.

VII. ANEXOS

Anexo 1

Ubicación de la zona de estudio



Anexo 2

Zonas del plantón donde se realizó la toma de datos

Figura 17

Selección de hojas intermedias del plantón para la toma de lectura de datos con el equipo SPAD-502.

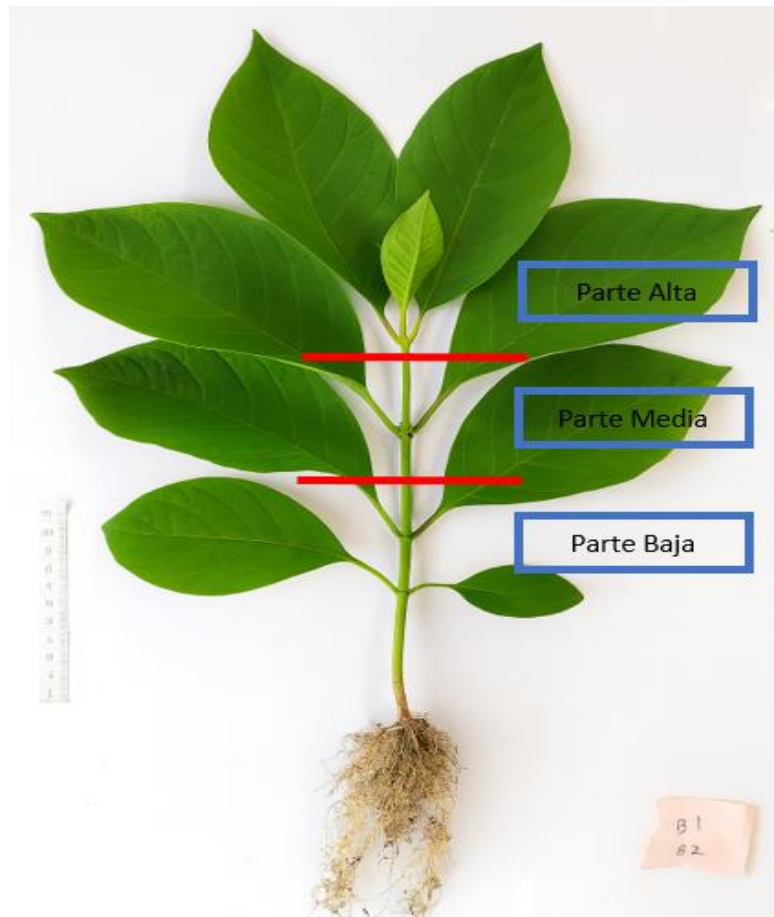


Figura 18

Parte de la hoja para la toma de lectura con el equipo SPAD-502.



Anexo 3

Panel fotográfico

Figura 19

Instalación y distribución de plantones de C. micrantha según tratamiento y dosificación.



Figura 20

Medición de contenido de clorofila en plantas de C. micrantha en vivero



Figura 21

Peso fresco de hojas de C. micrantha al término de ellos 100 días del ensayo de fertilización



Figura 22

Montaje de hojas de C. micrantha para tomas fotográficas (vivero)



Figura 23

Plantón de C. micrantha al término de los 100 días del ensayo de fertilización. (vivero).



Figura 24

Muestras de C. micrantha para determinación de biomasa.



Figura 25

Muestras de hojas, tallo y raíz de plántulas de C. micrantha al final del ensayo para determinación de biomasa.



Figura 26

Toma de datos del Peso seco de hojas, raíz y tallo de C. micrantha al término del ensayo de fertilización.



Figura 27

Preparación de muestras de suelo para análisis de laboratorio.

