

Córdova García Luz Karina Y Togas Zurita Janet Ar...

LA FERTILIZACIÓN Y SU INCIDENCIA EN EL DESARROLLO DE PLÁNTULAS DE *Handroanthus chrysanthus*

 Quick Submit Quick Submit Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3532890065

63 páginas

Fecha de entrega

10 abr 2026, 8:40 a.m. GMT-5

15.680 palabras

Fecha de descarga

10 abr 2026, 8:47 a.m. GMT-5

83.200 caracteres

Nombre del archivo

NFORME_FINAL_DE_TESIS_JANET_Y_LUZ_-_JANET_ARELY_TOGAS_ZURITA.pdf

Tamaño del archivo

3.0 MB

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

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




3% Similitud general

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

Filtrado desde el informe


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

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
31 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

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

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

Fuentes principales

- 2% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 2% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repositorio.unj.edu.pe	<1%
2	Trabajos del estudiante	Universidad TecMilenio	<1%
3	Trabajos del estudiante	Universidad de Costa Rica	<1%
4	Internet	apps.worldagroforestry.org	<1%
5	Trabajos del estudiante	Colegio Mayor Secundario Presidente del Perú	<1%
6	Internet	repositorio.uma.edu.pe	<1%
7	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de Jaen	<1%
8	Internet	ctr.utexas.edu	<1%
9	Internet	repositorio.xoc.uam.mx	<1%
10	Internet	datos.unjfsc.edu.pe	<1%
11	Internet	handwiki.org	<1%

12	Internet	repositorio.uchile.cl	<1%
13	Internet	www.saber.ula.ve	<1%
14	Internet	www.slideshare.net	<1%
15	Publicación	Tito Sánchez Santillán, Jegnes Meléndez Mori, Eli Morales Rojas, Ariel Chichipe Pu...	<1%
16	Internet	www.dspace.uce.edu.ec	<1%

7

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN**FACULTAD DE INGENIERÍA****CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
AMBIENTAL****UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN****LA FERTILIZACIÓN Y SU INCIDENCIA EN EL DESARROLLO DE
PLÁNTULAS DE *Handroanthus chrysanthus*****TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL****Autoras: Córdova García Luz Karina
Togas Zurita Janet Arely****Asesora: Mg. Huaccha Castillo Annick Estefany**

1

**Línea de investigación: conservación, manejo y aprovechamiento de los recursos
naturales****JAÉN – PERÚ, 2026**

ÍNDICE

	Pág.
ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE TABLAS	3
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
I. INTRODUCCIÓN	7
II. MATERIALES Y MÉTODOS	10
2.1. Ubicación del estudio	10
2.2. Población, muestra y muestreo	12
2.2.1. Población	12
2.2.2. Muestra	12
2.2.3. Muestreo	12
2.3. Hipótesis de la investigación	13
2.4. Materiales y metodología	13
2.4.1. Materiales	13
2.4.2. Diseño experimental	13
2.4.3. Procedimiento	14
2.5. Análisis de datos	18
III. RESULTADOS	22
3.1. Determinación de la dosis de fertilizante que optimice el desarrollo de <i>H. chrysanthus</i>	22
3.2. Evaluación del efecto de diferentes dosis de fertilizante sobre el crecimiento inicial de <i>H. chrysanthus</i>	27
IV. DISCUSIÓN	44
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
5.1. Conclusiones	47
5.2. Recomendaciones	48
VI. REFERENCIAS	49
DEDICATORIA	55
AGRADECIMIENTO	56
ANEXOS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Mapa de ubicación del área de estudio — Vivero INIA Centro Experimental Yanayacu, Jaén, Cajamarca, Perú.....	11
Figura 2 Evolución del número de hojas por tratamiento (días 1–75)	28
Figura 3 Evolución de la altura (cm) por tratamiento (días 1–75)	31
Figura 4 Altura (cm) al inicio y final del ensayo por tratamiento	32
Figura 5 Evolución del diámetro de tallo (mm) por tratamiento (días 1–75).....	34
Figura 6 Diámetro de tallo (mm) al inicio y final por tratamiento	36
Figura 7 Evolución acumulada de contenido de clorofila (SPAD) por tratamiento.....	38
Figura 8 Área foliar en <i>H. chrysanthus</i> bajo diferentes dosis de fertilización.....	40
Figura 9 TCR de la altura ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$) por intervalo de evaluación	41
Figura 10 TCR del diámetro del tallo ($\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$) por intervalo de evaluación	43

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Tratamientos y dosis de fertilizante aplicadas en plántulas de <i>H. chrysanthus</i>	14
Tabla 2 Distribución de las 15 unidades experimentales según tratamiento y repetición...	15
Tabla 3 Variables evaluadas, unidades de medida, instrumentos y frecuencia de medición durante el ensayo	16
Tabla 4 Operacionalización de variables.....	21
Tabla 5 ANOVA de biomasa seca foliar (g) según dosis de fertilizante.....	22
Tabla 6 Medias y prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) de biomasa seca foliar (g) por tratamiento	23
Tabla 7 ANOVA de biomasa seca de tallo (g) según dosis de fertilizante	23
Tabla 8 Medias de biomasa seca de tallo (g) por tratamiento	24
Tabla 9 ANOVA de biomasa seca de raíz (g) según dosis de fertilizante.....	24
Tabla 10 Medias y Duncan (0,05) de biomasa seca de raíz (g) por tratamiento	25
Tabla 11 ANOVA de biomasa seca total (g) según dosis de fertilizante	25
Tabla 12 Medias y Duncan (0,05) de biomasa seca total (g) por tratamiento	26

Tabla 13 Índice de Calidad de Dickson (ICD) por tratamiento al día 75 post-fertilización	27
Tabla 14 Medias del número de hojas por tratamiento y fecha de evaluación.....	28
Tabla 15 ANOVA unifactorial del número de hojas por fecha de evaluación.....	29
Tabla 16 Análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con réplicas del número de hojas en plántulas de <i>H. chrysanthus</i>	29
Tabla 17 Medias de altura (cm) por tratamiento y fecha de evaluación.....	30
Tabla 18 Análisis de varianza (ANOVA) unifactorial de la altura de plántula (cm) por fecha de evaluación en <i>H. chrysanthus</i>	31
Tabla 19 Análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con réplicas de la altura de plántula (cm) en <i>H. chrysanthus</i>	32
Tabla 20 Medias y prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) del factor tratamiento para la altura de plántula (cm) en <i>H. chrysanthus</i>	32
Tabla 21 Medias de diámetro de tallo (mm) por tratamiento y fecha de evaluación	34
Tabla 22 Análisis de varianza (ANOVA) unifactorial del diámetro de tallo (mm) por fecha de evaluación en <i>H. chrysanthus</i>	34
Tabla 23 Análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con réplicas del diámetro de tallo (mm) en <i>H. chrysanthus</i>	35
Tabla 24 Medias y prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) del factor tratamiento para el diámetro de tallo (mm) en <i>H. chrysanthus</i>	35
Tabla 25 Medias (\bar{x}) y desviación estándar (DE) de la concentración de clorofila (SPAD) por tratamiento y fecha de evaluación.....	36
Tabla 26 Análisis de varianza (ANOVA) unifactorial de la concentración de clorofila (SPAD) por fecha de evaluación en <i>H. chrysanthus</i>	37
Tabla 27 Análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con réplicas de la concentración de clorofila (SPAD) en <i>H. chrysanthus</i>	37
Tabla 28 Medias y prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) del factor tratamiento para la concentración de clorofila (SPAD) en <i>H. chrysanthus</i>	37
Tabla 29 Verificación de supuestos estadísticos para el área foliar (cm ²) en plántulas de <i>H. chrysanthus</i>	39
Tabla 30 ANOVA del área foliar (cm ²) según dosis de fertilizante	39
Tabla 31 Medias y Duncan (0,05) del área foliar (cm ²) por tratamiento.....	40
Tabla 32 TCR de altura (cm·cm ⁻¹ ·día ⁻¹) por tratamiento e intervalo (días 1–75).....	41
Tabla 33 TCR de diámetro de tallo (mm·mm ⁻¹ ·día ⁻¹) por tratamiento e intervalo	42

RESUMEN

Los bosques secos tropicales del norte del Perú son ecosistemas amenazados que requieren plántulas de alta calidad para programas de restauración. Este estudio evaluó el efecto de la fertilización y su incidencia en el desarrollo de plántulas de *Handroanthus chrysanthus* en vivero durante 75 días post-aplicación. Se utilizó un diseño completamente al azar con cinco dosis (0; 0,2; 0,5; 0,8 y 1,1 g/plántula), tres repeticiones y 30 plántulas por unidad experimental (n=450). Se midieron variables dasométricas (altura, diámetro, número de hojas), área foliar, concentración de clorofila (SPAD), biomasa seca por órgano y el Índice de Calidad de Dickson (ICD). Los resultados mostraron un efecto positivo dosis-dependiente en la mayoría de variables morfológicas. La dosis de 0,8 g/plántula optimizó la biomasa seca total (8,30 g), biomasa radical (5,53 g; 66,6% del total), tasa de crecimiento relativo en altura ($0,0102 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$) y el ICD (3,03), logrando el mejor equilibrio entre crecimiento aéreo, inversión radical y robustez estructural. La concentración de clorofila aumentó significativamente con el tiempo, pero no presentó diferencias entre dosis. Se concluye que la fertilización con 0,8 g/plántula de Yaramila Complex produce plántulas de *H. chrysanthus* con atributos morfológicos y de calidad óptimos para restauración de bosques secos tropicales en condiciones similares al norte peruano.

Palabras clave: Guayacán amarillo, bosque seco tropical, vivero forestal, fertilización NPK, calidad de planta.

ABSTRACT

Tropical dry forests in northern Peru are highly threatened ecosystems that demand high-quality seedlings for effective restoration. This study evaluated the effect of fertilization and its impact on the development of *Handroanthus chrysanthus* seedlings in a nursery for 75 days post-application. A completely randomized design was used with five doses (0; 0.2; 0.5; 0.8 and 1.1 g/seedling), three replicates, and 30 seedlings per experimental unit (n=450). Evaluated variables included dasometric traits (height, diameter, leaf number), leaf area, chlorophyll concentration (SPAD), dry biomass by organ, and the Dickson Quality Index (ICD). Results revealed a positive dose-dependent response in most morphological variables. The 0,8 g/seedling dose optimized total dry biomass (8,30 g), root biomass (5,53 g; 66,6% of total), relative height growth rate (0,0102 cm·cm⁻¹·day⁻¹), and DQI (3,03), achieving the best balance between shoot growth, root investment, and structural robustness. Chlorophyll concentration increased significantly over time but showed no differences among doses. It is concluded that fertilizing with 0.8 g/seedling of Yaramila Complex yields *H. chrysanthus* seedlings with optimal morphological and quality attributes for tropical dry forest restoration under northern Peruvian conditions.

Key words: yellow guayacan, tropical dry forest, forest nursery, NPK fertilization, seedling quality.

I. INTRODUCCIÓN

Los bosques secos tropicales constituyen uno de los ecosistemas más amenazados a escala global, debido principalmente a la conversión del uso del suelo, la expansión agropecuaria y la extracción selectiva de madera, procesos que han reducido severamente su extensión y funcionalidad ecológica (Espinosa-Palomeque *et al.*, 2020; Maza-Maza *et al.*, 2025). Estos ecosistemas se caracterizan por una marcada estacionalidad hídrica que limita la productividad primaria y condiciona la dinámica de la vegetación, aunque también favorecen altos niveles de endemismo y biodiversidad (Jadán *et al.*, 2022). En el norte del Perú, particularmente en Cajamarca, Piura y Tumbes, la pérdida de cobertura del bosque seco se ha intensificado por la agricultura migratoria, la expansión de la ganadería y la tala ilegal de especies valiosas como el guayacán (Cerrón *et al.*, 2019; Global Forest Watch, 2025).

La restauración ecológica de estos ecosistemas no se limita a recuperar la cobertura vegetal, sino que implica favorecer el establecimiento de especies capaces de sobrevivir bajo condiciones de estrés hídrico y baja fertilidad edáfica. Toro *et al.* (2024) sostienen que la restauración en bosques secos requiere intervenciones que incrementen la probabilidad de establecimiento en las primeras fases del crecimiento. En este contexto, la producción de plántulas de calidad en vivero constituye una acción clave, dado que el desempeño inicial del material vegetal influye de manera decisiva en la supervivencia y adaptación posterior en campo (Grossnickle & MacDonald, 2018).

La calidad de una plántula forestal no depende únicamente de su tamaño, sino del equilibrio funcional entre sus órganos y su capacidad de respuesta al sitio de plantación. Landis *et al.* (2010) reconocen como indicadores morfológicos fundamentales la altura, el diámetro en la base del tallo, la relación altura/diámetro (H/D), la biomasa seca y la relación raíz/parte aérea. Dickson *et al.* (1960) propusieron el Índice de Calidad de Dickson (ICD) como medida integradora de estos atributos, y Grossnickle & MacDonald (2018) confirmaron su utilidad para predecir el desempeño post-trasplante en campo. Gallegos-Cedillo *et al.* (2021) destacan que variables morfológicas bien seleccionadas permiten anticipar la supervivencia y el establecimiento exitoso de las plántulas en sitios de restauración.

La fertilización en viveros forestales representa una práctica de manejo fundamental para complementar la disponibilidad de nutrientes del sustrato y favorecer un desarrollo más

vigoroso de las plántulas. Tsakaldimi *et al.* (2021) señalan que la fertilización controlada mejora el crecimiento y la robustez del material forestal, mientras que Lanuza-Lanuza *et al.* (2021) destacan su importancia en especies con potencial de uso en restauración de bosques tropicales secos. No obstante, Calderón-Ureña *et al.* (2025) advierten que dosis excesivas pueden ocasionar desequilibrios nutricionales y afectar negativamente la calidad del material producido, por lo que resulta necesario establecer experimentalmente rangos de fertilización que optimicen el crecimiento sin comprometer los atributos morfológicos y fisiológicos del material de plantación.

Las bases fisiológicas de la fertilización explican por qué el suministro equilibrado de nutrientes influye directamente sobre el crecimiento vegetal. Marschner (2012) sostiene que el nitrógeno regula la síntesis de aminoácidos, proteínas y clorofila, asociándose estrechamente con la elongación del tallo y la expansión foliar. El fósforo interviene en la transferencia de energía, la división celular y el crecimiento radical, mientras que el potasio regula la actividad enzimática, el equilibrio hídrico y la apertura estomática (Taiz *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2013). Este último nutriente resulta especialmente relevante en especies de bosques secos tropicales, donde la tolerancia al estrés hídrico condiciona directamente la supervivencia post-trasplante.

Handroanthus chrysanthus, conocido como guayacán amarillo, es una especie arbórea emblemática de los bosques secos tropicales neotropicales con relevancia ecológica, ornamental y forestal (Medina *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022). Su distribución natural abarca desde México hasta Perú, con presencia en ecosistemas secos donde cumple funciones ecológicas importantes (POWO, 2024). Medina *et al.* (2020) destacan su adaptación a la sequía estacional, expresada en rasgos como la caducifolia y el desarrollo radical profundo, lo que la convierte en una especie promisoría para programas de restauración. Sin embargo, sus poblaciones naturales han sido afectadas severamente por la deforestación y el cambio de uso del suelo, y la IUCN (2021) la clasifica como Vulnerable (VU), lo que refuerza la necesidad de fortalecer estrategias de propagación y producción viverística de calidad.

A pesar de la importancia de la fertilización en la producción forestal, el conocimiento disponible sobre dosis adecuadas para *H. chrysanthus* en viveros de mediana tecnología bajo las condiciones edafoclimáticas del norte del Perú sigue siendo limitado. Medina *et al.*

(2020) aportan información sobre germinación y crecimiento inicial, pero no profundizan en respuestas dosis-dependientes de fertilización. Zhang *et al.* (2022) demuestran que la calidad de las plántulas puede modificarse según el tipo de sustrato y el manejo nutricional, mientras que persiste una brecha de conocimiento respecto al rango de fertilización que optimiza el crecimiento inicial, los atributos de calidad morfológica y la aptitud para el trasplante en *H. chrysanthus*. Esta situación justifica la generación de evidencia experimental orientada a sustentar técnicamente prácticas de manejo nutricional en viveros forestales con fines de restauración de bosques secos tropicales (Toro *et al.*, 2024).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo general evaluar la fertilización y su incidencia en el desarrollo de plántulas de *Handroanthus chrysanthus*. Los objetivos específicos fueron: determinar la dosis de fertilizante que optimice el desarrollo de *H. chrysanthus*, y evaluar el efecto de diferentes dosis de fertilizante sobre el crecimiento inicial de *H. chrysanthus*.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ubicación del estudio

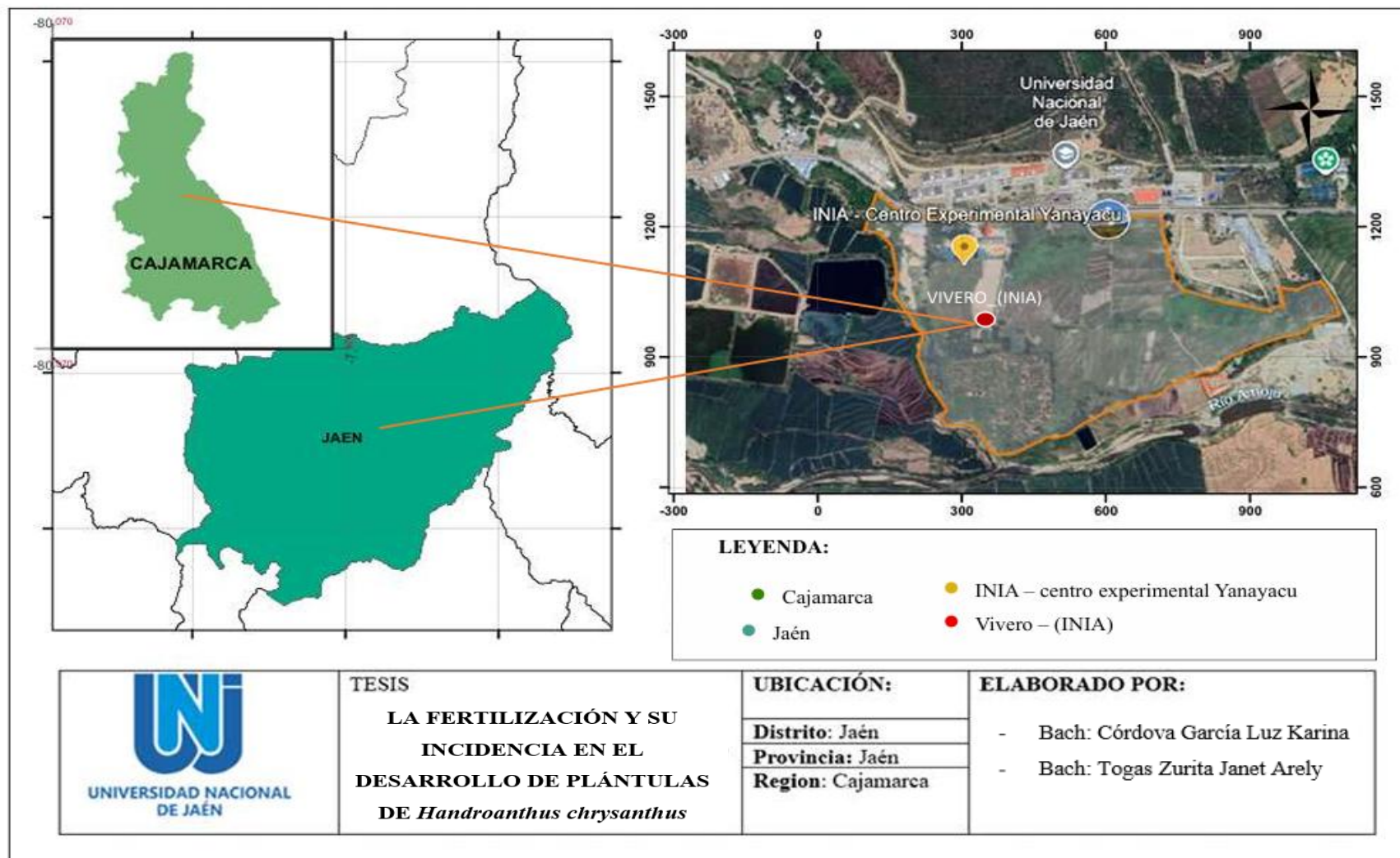
El estudio se realizó en el vivero de mediana tecnología del Centro de Producción de Plantas para la Investigación y Transferencia Tecnológica del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), ubicado en el Centro Experimental Yanayacu, provincia de Jaén, región Cajamarca, Perú (Figura 1). El área experimental se localiza a las coordenadas 07°09'56" S y 78°27'07" O, a una altitud de 629 m s. n. m., en la zona de piedemonte de los valles interandinos del Marañón inferior, en la vertiente occidental de los Andes norperuanos.

La zona presenta un clima tropical seco clasificado como bosque seco tropical (bs-T) según el sistema de zonas de vida de Holdridge, con temperatura media anual de 24–26 °C (máximas diurnas que pueden superar los 32–35 °C y mínimas nocturnas de 18–20 °C), y precipitación anual promedio entre 800 y 1 200 mm, concentrada en una estación lluviosa corta (diciembre–marzo) y una estación seca prolongada de 6–8 meses (abril–noviembre) (Cerrón *et al.*, 2019; SENAMHI, 2025).

Esta marcada estacionalidad hídrica, combinada con suelos aluviales y coluviales de textura franco-arenosa, baja materia orgánica y fertilidad natural moderada-baja, genera condiciones edafoclimáticas representativas de los bosques secos tropicales (BST) del norte del Perú (Espinosa-Palomeque *et al.*, 2020; Cerrón *et al.*, 2019). La marcada estacionalidad hídrica y la baja disponibilidad de nutrientes hacen de este sitio un escenario adecuado para evaluar el desarrollo de especies nativas adaptadas al estrés hídrico y edáfico, como *H. chrysanthus*.

Figura 1

Mapa de ubicación del área de estudio — Vivero INIA Centro Experimental Yanayacu, Jaén, Cajamarca, Perú



2.2. Población, muestra y muestreo

2.2.1. Población

La población de estudio estuvo constituida por la totalidad de plántulas de *H. chrysanthus* disponibles en el vivero de mediana tecnología del Centro de Producción de Plantas para la Investigación y Transferencia Tecnológica del INIA – Centro Experimental Yanayacu, ubicado en la provincia de Jaén, región Cajamarca, al momento de la ejecución del ensayo. Dicha población estuvo conformada por $N = 700$ plántulas, obtenidas mediante germinación de semillas de procedencia local, bajo condiciones controladas de sustrato, riego y sombreado (50–70%), lo que garantizó una base poblacional con características de desarrollo relativamente homogéneas al inicio del experimento.

2.2.2. Muestra

Se trabajó con una muestra de $n = 450$ plántulas, distribuidas en 15 unidades experimentales, correspondientes a cinco tratamientos con tres repeticiones cada uno, con 30 plántulas por unidad experimental ($5 \text{ tratamientos} \times 3 \text{ repeticiones} \times 30 \text{ plántulas}$). Las 450 plántulas seleccionadas presentaban un estado de desarrollo óptimo al momento del repique, con una altura entre 4 y 6 cm y 2 a 3 pares de hojas verdaderas, aproximadamente a los 15–20 días post-germinación. Adicionalmente, todas las plántulas seleccionadas se encontraban en buen estado fitosanitario, libres de plagas, enfermedades, malformaciones y daños físicos visibles que pudieran alterar el normal desarrollo vegetativo durante el período experimental (Domínguez-Liévano & Espinoza-Zaragoza, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Este criterio de uniformidad morfológica garantizó la comparabilidad inicial entre unidades experimentales, constituyendo un requisito básico para la validez interna del diseño estadístico empleado.

2.2.3. Muestreo

La selección inicial de las 450 plántulas se realizó bajo criterios de uniformidad morfológica (altura 4–6 cm, 2–3 pares de hojas verdaderas, buen estado fitosanitario), a partir de la población disponible en el vivero ($N=700$). La asignación a tratamientos y repeticiones se efectuó de forma completamente aleatoria, conforme al Diseño Completamente al Azar (DCA) adoptado, garantizando que las diferencias observadas fueran atribuibles al factor fertilizante (Calderón-Ureña *et al.*, 2025; Tsakalimi *et al.*, 2021). Aunque la selección

inicial fue por conveniencia debido al control estricto de condiciones en vivero, la aleatorización en la asignación maximizó la validez interna del experimento.

2.3. Hipótesis de la investigación

Hipótesis general (H_1): La aplicación de distintas dosis del fertilizante Yaramila Complex influye de manera significativa en el desarrollo inicial de las plántulas de *Handroanthus chrysanthus*.

Hipótesis nula (H_0): La variación en las dosis del fertilizante Yaramila Complex no produce cambios significativos en el desarrollo inicial de las plántulas de *Handroanthus chrysanthus*

2.4. Materiales y metodología

2.4.1. Materiales

Marcadores de tinta indeleble, libreta de apuntes, lapiceros, regla milimétrica de 30 cm, wincha de 5 m, bolsas de polietileno de 5x8 pulgadas, regadera de plástico de 8 L, vernier digital, jeringa de 20 ml, medidor de clorofila Minolta SPAD 502, laptop HP Core i5, GPS Garmin, cámara fotográfica, balanza analítica, lupa, pinzas, palana, carretillas de 150 kg, zaranda, fertilizante sintético (Yaramila Complex®), biochar, tierra agrícola, compost, formol.

2.4.2. Diseño experimental

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar (DCA) con cinco tratamientos correspondientes a diferentes dosis de fertilizante NPK (0; 0,2; 0,5; 0,8 y 1,1 g/plántula), tres repeticiones por tratamiento y una unidad experimental conformada por 30 plántulas, lo que generó un total de 15 unidades experimentales (5 tratamientos \times 3 repeticiones) y un tamaño muestral global de 450 plántulas ($n = 450$).

2.4.3. Procedimiento

1. Preparación general, diseño experimental y procedimientos comunes

Las plántulas seleccionadas una vez alcanzaron el estado óptimo (4–6 cm de altura y 2–3 pares de hojas verdaderas), aproximadamente 15–20 días post-germinación, se repicaron en bolsas de polietileno negro de 5 × 8 pulgadas con sustrato desinfectado. El sustrato fue desinfectado con solución de formol al 1% (20 ml de formol comercial al 37-40% por 20 L de agua), aplicando suficiente volumen para humedecer uniformemente el sustrato antes del llenado de bolsas. El sustrato en proporción 3:2:1 (tierra agrícola : biochar : compost), genera un equilibrio óptimo entre retención de humedad, drenaje y disponibilidad de nutrientes orgánicos, favoreciendo el crecimiento inicial en especies nativas de bosques secos tropicales bajo condiciones de vivero controlado (Medina *et al.*, 2020).

2. Aplicación de fertilización de plántulas en vivero

A los 60 días post-repique (etapa de establecimiento radicular estable), se inició la fertilización con gránulos de Yaramila Complex® (12% nitrógeno total, 11% fósforo, 18% potasio, 8% azufre, más micronutrientes). La aplicación granular fue incorporada superficialmente en el sustrato, sin contacto directo con tallo o raíces para evitar quemaduras siguiendo las dosis y distribución establecidas en la Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1

Tratamientos y dosis de fertilizante aplicadas en plántulas de H. chrysanthus

Tratamiento	Dosis fertilizante (g/plántula)
T0	0,0
T1	0,2
T2	0,5
T3	0,8
T4	1,1

Tabla 2*Distribución de las 15 unidades experimentales según tratamiento y repetición*

T0-1	T1-2	T2-2	T3-2	T4-1
T2-1	T3-1	T4-2	T1-3	T0-3
T1-1	T4-3	T0-2	T3-3	T2-3

Nota:

La distribución mostrada corresponde a una asignación aleatoria de las 15 unidades experimentales. Cada tratamiento aparece exactamente tres veces (una por repetición), garantizando el balance del diseño experimental.

3. Control de condiciones de manejo

Para garantizar que las respuestas observadas en las variables dependientes fueran atribuibles exclusivamente al efecto de la dosis de fertilizante, se controlaron estrictamente las variables externas: riego uniforme diario, exposición lumínica al 50–70% de sombra, temperatura y humedad ambiental monitoreadas, y prácticas fitosanitarias preventivas idénticas en todas las unidades experimentales y con ello minimizar la varianza atribuible a factores extraños, contribuyendo a la validez de los resultados (Tsakalimi *et al.*, 2021; Calderón-Ureña *et al.*, 2025).

4. Evaluación de variables y procedimientos de medición

Con el fin de identificar la dosis de fertilizante que optimiza el desarrollo de las plántulas, las variables: altura, diámetro de tallo, número hojas y clorofila fueron evaluadas en 6 momentos, a intervalos de 15 días, durante un periodo de 75 días posteriores a la fertilización. Las mediciones se efectuaron en horario matutino, entre las 7:00 y 9:00 h, para asegurar condiciones ambientales relativamente estables y minimizar variaciones debidas a la temperatura, la humedad y la pérdida de turgencia foliar (Martínez & Guiamet, 2004; Chiarenza *et al.*, 2024). Las variables área foliar y biomasa se evaluaron por única vez al finalizar el ensayo a los 75 días (Tabla 3).

Tabla 3

Variables evaluadas, unidades de medida, instrumentos y frecuencia de medición durante el ensayo

Variable	Unidad de medida	Instrumento	Frecuencia de medición (días)	Momentos	Recolección de datos (anexo)
altura	cm	regla	15	6	1
diámetro	mm	vernier digital	15	6	1
clorofila	SPAD	SPAD 502	15	6	1
numero de hojas	unidad	conteo manual	15	6	1
área foliar	cm ²	software ImageJ	75	1	2
biomasa	g	balanza analítica	75	1	3

A. Diámetro del tallo: Se midió con un vernier digital (precisión 0.01 mm) a menos de 1 cm por encima del nivel del sustrato (cuello radicular), seleccionando cuidadosamente el punto para evitar daños tisulares y garantizar mediciones consistentes (Rocha *et al.*, 2025; Menes & Mohammed, 1995).

B. Altura de la planta: Se midió con una regla milimetrada de 30 cm, tomando como referencia la distancia desde el meristemo apical hasta 1 cm por encima del nivel del sustrato, con el propósito de mantener uniformidad y precisión en todas las mediciones (Gallegos-Cedillo *et al.*, 2021).

C. Número de hojas: Se registró mediante conteo manual exhaustivo de todas las hojas presentes en cada plántula, excluyendo hojas senescentes o dañadas (Xie *et al.*, 2023).

D. Concentración de clorofila: Se midió con un medidor portátil SPAD-502, una herramienta ampliamente utilizada por su rapidez y carácter no destructivo para evaluar el estado nutricional de las plantas (Coste *et al.*, 2010; Ling *et al.*, 2011; Hurtado *et al.*, 2017). En cada plántula se seleccionaron 2 hojas sanas y plenamente desarrolladas, siguiendo los criterios de selección empleados en estudios recientes (Chiarenza *et al.*, 2024).

E. Área foliar: Se seleccionaron 10 plántulas por repetición para estimar con fiabilidad el área foliar y la biomasa (Altimira *et al.*, 2015), ya que este tamaño de muestra captura de forma adecuada la variabilidad natural entre individuos y permite detectar diferencias entre tratamientos sin aumentar innecesariamente el esfuerzo experimental y, en cada una de

1 ellas, se eligieron hojas de manera sistemática y en óptimas condiciones fitosanitarias (Suárez *et al.*, 2018) y sin peciolo (Huaccha *et al.*, 2023) para tomar fotos a 20 cm de altura de la hoja y delante de un fondo blanco con una cinta métrica de referencia para escalado al momento de procesar las imágenes (Castillo *et al.*, 2023; Rincón *et al.*, 2012) con ImageJ siguiendo la secuencia descrita por Baker *et al.* (1996). Las mediciones se realizaron de manera independiente por tres personas a fin de disminuir el sesgo en el procesamiento (Huaccha *et al.*, 2023; Suárez *et al.*, 2018). Los datos se registraron en la ficha correspondiente (Anexo 2).

F. Biomasa: Al finalizar el ensayo, se seleccionaron 10 plántulas por repetición para determinar biomasa seca (Altimira *et al.*, 2015). Cada plántula se separó en componentes morfológicos (hojas, tallo y raíces), eliminando residuos de sustrato. Se pesó el material fresco con balanza digital (precisión 0,1 g), se colocó en sobres rotulados y se secó en estufa a 70 °C por 72 h hasta peso constante (adaptado de protocolos estándar para plántulas forestales) (Domínguez-Liévano & Espinosa-Zaragoza, 2021; Jagodziński *et al.*, 2020). Tras enfriamiento a temperatura ambiente (~30 min), se realizó el pesaje seco y se registraron los datos en la ficha correspondiente (Anexo 3).

G. Tasa de crecimiento de planta en el tiempo: La tasa de crecimiento relativo (TCR) para la altura de la plántula y el diámetro de tallo se calculó en cada intervalo de evaluación mediante la fórmula clásica propuesta por Hunt (1990):

$$TCR = \frac{\ln(W_2) - \ln(W_1)}{t_2 - t_1}$$

Donde:

- W_2 y W_1 son los valores de la variable al final e inicio del intervalo, respectivamente.
- $t_2 - t_1$ es la longitud del intervalo en días.
- El resultado se expresa en $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ para altura de la plántula y $\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ para diámetro de tallo.

A diferencia de la tasa de crecimiento absoluto (TCA), que expresa simplemente el incremento de una variable en unidades por día ($\text{cm} \cdot \text{día}^{-1}$), la TCR integra el tamaño inicial de la planta como referencia, expresando el incremento producido por unidad de tamaño existente por unidad de tiempo ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$). Esta propiedad la convierte en una métrica estandarizada y comparativamente más equitativa, dado que neutraliza el efecto del tamaño

inicial sobre la magnitud del crecimiento observado (Hunt, 1990; Escalante & Kohashi, 1993).

H. Índice de Calidad de Dickson: se calculó como indicador integrado de calidad morfológica de las plántulas al finalizar el período experimental (día 75 post-fertilización), utilizando los datos de biomasa seca total, altura final de la plántula, diámetro de tallo final y partición de biomasa entre componentes aéreos y radicales, mediante la fórmula propuesta por Dickson *et al.* (1960), donde la biomasa aérea corresponde a la suma de la biomasa foliar y la biomasa de tallo. Este índice integra en una sola métrica el tamaño, la robustez estructural y el equilibrio funcional entre los órganos de la plántula, siendo ampliamente utilizado en viveros forestales para evaluar la aptitud del material vegetal para el trasplante (Grossnickle & MacDonald, 2018; Landis *et al.*, 2010).

$$ICD = \frac{\text{Biomasa seca total (g)}}{\frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Diámetro (mm)}} + \frac{\text{Biomasa aérea (g)}}{\text{Biomasa radical (g)}}}$$

5. Comparación de las variables dasométricas

Para comparar las variables dasométricas (altura, diámetro del tallo, número de hojas y concentración de clorofila) entre los tratamientos, se utilizaron los registros obtenidos en cada fecha de evaluación y en la medición final, considerando las dosis de fertilizante como el factor principal de estudio. Esta comparación permitió identificar el comportamiento de cada variable frente al incremento de la dosis, diferenciando los tratamientos con respuestas favorables, estables o con posibles indicios de exceso nutricional.

En función de los valores promedio y de la variabilidad observada, se identificaron los tratamientos que alcanzaron mayores incrementos de altura y diámetro, así como un número de hojas y contenido de clorofila compatibles con un crecimiento vigoroso y equilibrado. Con estos resultados se establecieron rangos de dosis recomendados, priorizando aquellas que lograron buenos valores dasométricos sin evidenciar síntomas de toxicidad ni desbalances marcados en la planta, de modo que puedan ser utilizados como referencia para la producción de plántulas de *H. chrysanthus* en vivero.

2.5. Análisis de datos

El análisis estadístico se estructuró en función del diseño completamente al azar (DCA) adoptado y de la naturaleza temporal de las mediciones. Dado que el factor de estudio fue la

dosis de fertilizante y las unidades experimentales fueron homogéneas, el ANOVA permitió evaluar si las diferencias observadas en las variables dependientes eran atribuibles al efecto real del tratamiento y no al azar experimental.

Para las variables evaluadas en una sola medición final se empleó un ANOVA de un factor. Para las variables medidas en seis fechas se utilizó un ANOVA de dos factores con réplicas (tratamiento y tiempo), lo cual permitió evaluar no solo el efecto de la dosis y del tiempo, sino también la interacción entre ambos factores sobre el crecimiento de las plántulas.

Los datos obtenidos en campo y laboratorio se organizaron en una base de datos digital estructurada por tratamiento, repetición y fecha de evaluación, utilizando Microsoft Excel versión 2021 para el registro, organización y cálculo de estadísticos descriptivos, e IBM SPSS Statistics para los análisis inferenciales. Para cada variable evaluada (altura, diámetro de tallo, número de hojas, concentración de clorofila, área foliar y biomasa seca por órgano) se calcularon la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación, con el fin de caracterizar el comportamiento general de las mediciones y la uniformidad de los datos en cada tratamiento.

2

Previo al análisis inferencial, se verificaron los supuestos de normalidad de residuos y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. En todos los casos los datos cumplieron ambos supuestos ($p > 0,05$), por lo que los análisis se realizaron sobre los valores originales sin necesidad de transformación.

El análisis inferencial se organizó en dos niveles según la naturaleza y frecuencia de medición de cada variable:

a) Variables evaluadas en una sola medición final (área foliar y biomasa): Se aplicó un análisis de varianza de un factor (ANOVA-DCA), cuyo modelo matemático es:

$$Y_{ij} = u + T_i + \varepsilon_{ij}$$

donde:

- Y_{ij} = observación o valor medido de la j -ésima unidad experimental en el i -ésimo nivel del factor.
- u = media global de todas las observaciones.
- T_i = efecto del tratamiento
- ε_{ij} = error experimental

b) Variables evaluadas en seis fechas (altura, diámetro de tallo, número de hojas y concentración de clorofila SPAD): El análisis se realizó en dos etapas. Primero, un ANOVA unifactorial independiente por cada fecha de evaluación (días 1, 15, 30, 45, 60 y 75 post-fertilización) para determinar si existían diferencias entre tratamientos en cada momento puntual. Segundo, un ANOVA de dos factores con réplicas (Factor A: tratamiento; Factor B: tiempo), cuyo modelo es:

$$Y_{ijk} = u + T_i + D_j + (TD)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

- T_i es el efecto del tratamiento
- D_j el efecto del tiempo
- $(TD)_{ij}$ es la interacción tratamiento \times tiempo
- ε_{ijk} es el error experimental

Este enfoque permitió evaluar simultáneamente el efecto de la dosis, el efecto del tiempo sobre el crecimiento y la existencia de interacción entre ambos factores.

12 En ambos niveles de análisis, cuando el ANOVA detectó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), se aplicó la prueba de comparación múltiple de Duncan ($\alpha = 0,05$) para identificar los grupos homogéneos (Duncan, 1955).

Para cuantificar la dinámica de crecimiento de las plántulas a lo largo del período experimental, se calculó la Tasa de Crecimiento Relativo (TCR) para la altura y el diámetro de tallo en cada intervalo de evaluación, mediante la fórmula clásica propuesta por Hunt (1990):

$$TCR = \frac{\ln(W_2) - \ln(W_1)}{t_2 - t_1}$$

Donde:

- W_2 y W_1 son las medidas de la variable en el tiempo final e inicial, respectivamente.
- $t_2 - t_1$ es el intervalo de tiempo entre mediciones.

Con la finalidad de establecer de manera clara la relación entre las variables evaluadas en el estudio, se presenta la Tabla 4 de operacionalización de variables, donde se detallan los indicadores medidos, las unidades de medición y los instrumentos utilizados durante el experimento.

Tabla 4
Operacionalización de variables

Variable	Tipo	Indicador	Unidad	Método	Instrumento	Frecuencia (días)
dosis de fertilizante	Independiente	cantidad	g/plántula	aplicación granular	balanza digital	única
altura	Dependiente	longitud desde meristemo a sustrato	cm	medición directa	regla milimétrica	15
diámetro de tallo		grosor en cuello radicular	mm		vernier digital	
número de hojas		conteo total de hojas sanas	unidad	conteo manual	observación directa	
clorofila		índice SPAD	SPAD	lectura foliar	SPAD-502	
área foliar		superficie foliar	cm ²	análisis digital	ImageJ	75
biomasa seca		peso seco por órgano	g	secado en estufa	balanza analítica	
TCR		crecimiento relativo	$\text{cm} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{día}^{-1} / \text{mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$	cálculo logarítmico	fórmula de Hunt	15
ICD		índice integrado de calidad	adimensional	cálculo matemático	fórmula de Dickson	75

III. RESULTADOS

3.1. Determinación de la dosis de fertilizante que optimice el desarrollo de *H. chrysanthus*

Para determinar la dosis óptima de fertilizante, se analizó la biomasa seca acumulada en hojas, tallo y raíces de las plántulas al finalizar el periodo experimental (75 días post-fertilización).

3.1.1. Biomasa foliar

En la Tabla 5 se presenta el análisis de varianza de un factor el cual revela diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para la biomasa seca foliar ($F = 4,88$; $p = 0,0192 < 0,05$), lo que indica que la dosis de fertilizante influye de manera real y diferenciada sobre la producción de tejido foliar.

Tabla 5

ANOVA de biomasa seca foliar (g) según dosis de fertilizante

Fuente de variación	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	Valor p
Tratamientos	4	0,99	0,25	4,88	0,0192
Error	10	0,51	0,05	—	—
Total	14	1,50	—	—	—

Nota:

- F crítico (4, 10; $\alpha = 0,05$) = 3,48. Como F calculado (4,88) > F crítico (3,48), se rechaza la hipótesis nula. Existen diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,0192 < 0,05$).

El mejor resultado fue registrado por T3 (0,8 g/plántula), con una biomasa foliar media de 2,17 g, valor que superó en un 57,4% al control (Tabla 6). Este resultado refleja que la disponibilidad de nitrógeno y fósforo proporcionada por el fertilizante favoreció la síntesis de estructuras foliares, optimizando la superficie fotosintéticamente activa sin evidenciar saturación nutricional como en T4, cuya mayor variabilidad ($DE = 0,39$ g) sugiere posibles desequilibrios a dosis de 1,1 g/plántula.

La prueba de comparación de Duncan ($\alpha = 0,05$) identificó dos grupos homogéneos: el tratamiento control T0 (0,0 g/plántula), con la menor biomasa foliar ($1,38 \pm 0,10$ g), conformó el grupo inferior (grupo b), diferenciándose significativamente de todos los

tratamientos fertilizados. Los tratamientos T1, T2, T3 y T4 conformaron el grupo superior (grupo a), con medias de 1,79; 1,93; 2,17 y 1,84 g, respectivamente.

Tabla 6

Medias y prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) de biomasa seca foliar (g) por tratamiento

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Media (g)	Desviación estándar (DE)	Duncan ($\alpha = 0,05$)
T0	0,0	1,38	0,10	b
T1	0,2	1,79	0,19	a
T2	0,5	1,93	0,15	a
T3	0,8	2,17	0,16	a
T4	1,1	1,84	0,39	a

Nota:

- Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos

3.1.2. Biomasa tallo

El ANOVA (Tabla 7) no detectó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para la biomasa seca de tallo ($F = 1,18$; $p = 0,3782 > 0,05$), por lo que no se aplicó prueba de comparación múltiple. La dosis de fertilizante (Tabla 8) no influyó de forma significativa sobre la acumulación de biomasa en el tejido caulinar durante el período evaluado.

Tabla 7

ANOVA de biomasa seca de tallo (g) según dosis de fertilizante

Fuente de variación	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	Valor p
Tratamientos	4	0,07	0,02	1,18	0,3782
Error	10	0,15	0,02	—	—
Total	14	0,23	—	—	—

Nota:

- F crítico (4, 10; $\alpha = 0,05$) = 3,48. Como F calculado (1,18) < F crítico (3,48), no se rechaza la hipótesis nula. No existen diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,3782 > 0,05$). Por lo tanto, no se aplica prueba de comparación múltiple de medias.

3

Tabla 8

Medias de biomasa seca de tallo (g) por tratamiento

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Media (g)	Desviación estándar (DE)
T0	0,0	0,21	0,02
T1	0,2	0,27	0,025
T2	0,5	0,42	0,26
T3	0,8	0,33	0,03
T4	1,1	0,32	0,08

3.1.3. Biomasa radical

El análisis de varianza reveló diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para la biomasa seca radical ($F = 5,59$; $p = 0,0126 < 0,05$), confirmando que la fertilización tuvo un efecto real sobre el desarrollo del sistema radicular (Tabla 9).

La prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) identificó que el tratamiento control T0 ($3,61 \pm 0,67$ g) constituyó el grupo inferior (grupo b), diferenciándose significativamente de todos los tratamientos fertilizados T1, T2, T3 y T4, los cuales conformaron el grupo superior (grupo a) sin diferencias significativas entre sí, con medias de 4,62; 4,68; 5,53 y 4,81 g, respectivamente (Tabla 10). El mejor resultado fue obtenido por T3 (0,8 g/plántula), con una biomasa radical media de $5,53 \pm 0,63$ g, representando un incremento del 53,2% sobre el control. La mayor inversión en biomasa radical en este tratamiento refleja una asignación eficiente de recursos hacia la exploración y captación de agua y nutrientes en el sustrato, lo que resulta determinante para la supervivencia posterior al trasplante en ecosistemas de bosque seco tropical con alta variabilidad hídrica (Toro *et al.*, 2024).

Tabla 9

ANOVA de biomasa seca de raíz (g) según dosis de fertilizante

Fuente de variación	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	Valor p
Tratamientos	4	5,67	1,42	5,59	0,0126
Error	10	2,54	0,25	—	—
Total	14	8,21	—	—	—

Nota:

- F crítico (4, 10; $\alpha = 0,05$) = 3,48. Como F calculado (5,59) > F crítico (3,48), se rechaza la hipótesis nula. Existen diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,0126 < 0,05$).

Tabla 10

Medias y Duncan (0,05) de biomasa seca de raíz (g) por tratamiento

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Media (g)	Desviación estándar (DE)	Duncan ($\alpha = 0,05$)
T0	0,0	3,61	0,67	b
T1	0,2	4,62	0,19	a
T2	0,5	4,68	0,17	a
T3	0,8	5,53	0,63	a
T4	1,1	4,81	0,60	a

Nota:

- Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos

3.1.4. Biomasa total

El análisis de varianza de un factor (Tabla 11) aplicado a la biomasa seca total de las plántulas de *H. chrysanthus* al finalizar el periodo experimental (75 días post-fertilización) reveló diferencias estadísticamente significativas entre los 5 tratamientos de fertilización ($F_{(4,10)} = 7,39$; $p = 0,0049 < 0,05$), lo que indica que la dosis de fertilizante aplicada tuvo un efecto real y diferenciado sobre la acumulación de biomasa en las plántulas. Dado que el F calculado (7,39) superó ampliamente el F crítico (3,48), se rechazó la hipótesis nula de igualdad entre tratamientos, validando la aplicación de una prueba de comparación múltiple de medias para identificar los grupos estadísticamente distintos.

Tabla 11

ANOVA de biomasa seca total (g) según dosis de fertilizante

Fuente de variación	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	Valor p
Tratamientos	4	13,73	3,43	7,39	0,0049
Error	10	4,65	0,46	—	—
Total	14	18,37	—	—	—

Nota:

- F crítico (4, 10; $\alpha = 0,05$) = 3,48. Como F calculado (7,39) > F crítico (3,48), se rechaza la hipótesis nula. Existen diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,0049 < 0,05$).

La prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) identificó tres grupos estadísticamente diferenciados (Tabla 12). Los tratamientos T3 ($8,30 \pm 0,76$ g), T2 ($7,25 \pm 0,16$ g) y T4 ($7,21 \pm 1,11$ g) conformaron el grupo de mayor rendimiento (grupo a), sin diferencias significativas entre sí. El

16

tratamiento T1 ($6,68 \pm 0,39$ g) constituyó un grupo intermedio independiente (grupo b), mientras que el control T0 ($5,33 \pm 0,58$ g) conformó el grupo de menor biomasa (grupo c), diferenciándose significativamente de todos los demás tratamientos y confirmando que la ausencia de fertilización limita severamente el crecimiento de *H. chrysanthus*.

Tabla 12

Medias y Duncan (0,05) de biomasa seca total (g) por tratamiento

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Biomasa total (g)	Desviación estándar (DE)	Duncan ($\alpha = 0,05$)
T0	0,0	5,33	0,58	c
T1	0,2	6,68	0,39	b
T2	0,5	7,25	0,16	ab
T3	0,8	8,30	0,76	a
T4	1,1	7,21	1,11	ab

Nota:

- Letras distintas en la columna Duncan indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

3.1.5. Índice de Calidad de Dickson

El Índice de Calidad de Dickson calculado a partir de los datos obtenidos al día 75 post-fertilización muestra una tendencia dosis-dependiente positiva (Tabla 13). T3 registró el ICD más alto (3,03), reflejando el mejor equilibrio entre biomasa total, robustez estructural y proporción entre órganos aéreos y radicales. El control T0 obtuvo el ICD más bajo (2,39), confirmando que la ausencia de fertilización limita el desarrollo integral de la plántula. Todos los tratamientos fertilizados superaron el umbral mínimo de $ICD > 0,20$ establecido por Dickson *et al.* (1960) como criterio de aptitud para trasplante, evidenciando que cualquier dosis del rango evaluado produce plántulas morfológicamente aptas. Sin embargo, la dosis de 0,8 g/plántula (T3) optimiza de manera simultánea la biomasa total, la inversión radical y la calidad integrada, posicionándose como la dosis más adecuada para la producción de plántulas de *H. chrysanthus* con fines de restauración.

Tabla 13*Índice de Calidad de Dickson (ICD) por tratamiento al día 75 post-fertilización*

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	H/D	Biomasa aérea (g)	Biomasa radical (g)	Biomasa total (g)	ICD
T0	0,0	1,75	1,72	3,61	5,33	2,39
T1	0,2	1,91	2,06	4,62	6,68	2,84
T2	0,5	2,02	2,57	4,68	7,25	2,82
T3	0,8	2,24	2,76	5,53	8,29	3,03
T4	1,1	2,01	2,39	4,81	7,20	2,87

Nota:

- ICD calculado mediante la fórmula de Dickson *et al.* (1960).
- H/D = relación altura de la plántula desde el cuello de la raíz hasta el ápice (cm) y, diámetro del tallo (mm).

3.2. Evaluación del efecto de diferentes dosis de fertilizante sobre el crecimiento inicial de *H. chrysanthus*

Las variables número de hojas, altura, diámetro, y concentración de clorofila fueron medidas en 6 momentos (días 0, 15, 30, 45, 60 y 75 post-fertilización). Dado que cada plántula fue medida repetidamente en el tiempo, el análisis estadístico se organizó en dos niveles complementarios: (a) ANOVA por fecha de evaluación, para determinar si existían diferencias entre tratamientos en cada momento de medición; y (b) análisis de la trayectoria temporal, para describir el patrón de crecimiento a lo largo de las 6 fechas. Este enfoque permite responder tanto a cuál tratamiento fue mejor como a cuándo comenzaron a evidenciarse esas diferencias.

A. Número de hojas de *H. chrysanthus*

El número de hojas de las plántulas de *H. chrysanthus* mostró un patrón de incremento desde el día 1 hasta el día 45, con una ligera reducción hacia el día 75 atribuible a senescencia foliar natural, comportamiento observado en todos los tratamientos (Tabla 14, Figura 2). El análisis de varianza por fecha (Tabla 15) no detectó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en ninguno de los seis momentos de medición ($p > 0,05$ en todos los casos), indicando que las dosis de fertilizante no generaron respuestas diferenciadas en el número de hojas en ninguna fecha puntual. El análisis de varianza de dos factores con réplicas (Tabla 16) confirmó que el factor tratamiento no fue significativo ($F = 0,6747$; $p = 0,6121 > 0,05$), mientras que el factor tiempo sí resultó muy significativo ($F =$

12,12; $p < 0,0001$), reflejando el crecimiento natural propio de la especie durante la fase de vivero. La interacción tratamiento \times tiempo tampoco fue significativa ($F = 0,33$; $p = 0,9959$), lo que indica que el patrón temporal de producción foliar fue homogéneo e independiente de la dosis aplicada. Dado que no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, todos los tratamientos pertenecen al mismo grupo homogéneo, con medias que oscilaron entre 10,14 hojas (T0) y 10,46 hojas (T1), por lo que no se aplica prueba de comparación múltiple de medias.

Tabla 14

Medias del número de hojas por tratamiento y fecha de evaluación

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Día						Media (g)	Desviación estándar (DE)
		1	15	30	45	60	75		
T0	0,0	9,41	9,96	10,37	10,89	10,33	9,89	10,14	0,76
T1	0,2	9,44	10,07	10,82	11,04	10,78	10,59	10,46	0,61
T2	0,5	9,60	10,07	10,48	10,93	10,67	9,78	10,25	0,80
T3	0,8	9,00	9,78	10,41	10,70	10,82	10,37	10,18	0,95
T4	1,1	9,07	10,04	10,37	11,22	10,74	10,49	10,32	0,82

Figura 2

Evolución del número de hojas por tratamiento (días 1–75)

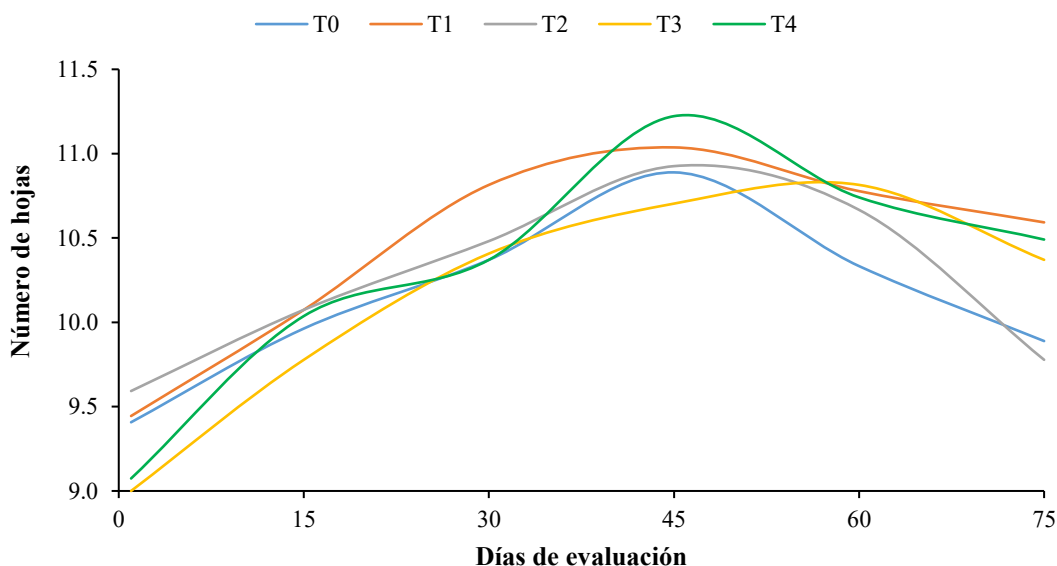


Tabla 15*ANOVA unifactorial del número de hojas por fecha de evaluación*

Día	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	Valor p	F crítico	Sig.
1	4	0,79	0,20	0,87	0,5131	3,48	ns
15	4	0,19	0,05	0,10	0,9782	3,48	ns
30	4	0,43	0,11	1,27	0,3430	3,48	ns
45	4	0,44	0,11	0,47	0,7601	3,48	ns
60	4	0,46	0,12	0,21	0,9279	3,48	ns
75	4	1,62	0,41	0,42	0,7926	3,48	ns

Nota:

- Sig. = significancia
- ns = no significativo ($p > 0,05$)

Tabla 16*Análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con réplicas del número de hojas en plántulas de *H. chrysanthus**

Fuente	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	Valor p	F crítico	Sig.
Tratamiento (A)	4	1,13	0,28	0,67	0,6121	2,53	ns
Tiempo/Días (B)	5	25,39	5,07	12,12	<0,0001	2,37	***
Interacción (A×B)	20	2,79	0,14	0,33	0,9959	1,75	***
Error	60	25,14	0,42	—	—	—	
Total	89	54,45	—	—	—	—	

Nota:

- Sig. = significancia
- ns = no significativo ($p > 0,05$)
- *** = muy significativo ($p < 0,001$); no se aplica prueba post hoc

B. Altura de plántula de *H. chrysanthus*

La altura de plántula (Tabla 17) mostró un incremento progresivo y sostenido en todos los tratamientos a lo largo del período de evaluación (días 1 al 75 post-fertilización). El tratamiento control (T0, 0 mg) registró el menor incremento, partiendo de 3,32 cm y alcanzando 6,04 cm al día 75. Por su parte, T1 llegó a 6,49 cm, T2 a 6,80 cm, T3 a 7,31 cm y T4 obtuvo el valor más alto con 7,43 cm al día 75. Las dosis intermedias y altas (T2, T3 y T4) mostraron una pendiente más pronunciada a partir del día 45 (Figura 3), reflejando una mayor asimilación de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, que favorece un crecimiento exponencial sostenido.

Las curvas de altura fueron ascendentes y paralelas, pero con pendientes progresivamente mayores conforme aumentó la dosis de fertilizante aplicada. El análisis por fecha no detectó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en ninguno de los seis momentos de medición ($p > 0,05$ en todos los casos), lo que indica que las diferencias entre dosis se manifestaron de forma acumulada a lo largo del tiempo más que en momentos puntuales (Tabla 18).

El análisis de varianza de dos factores con réplicas (Tabla 19) reveló que tanto el factor tratamiento ($F = 5,67$; $p = 0,0006$) como el factor tiempo ($F = 90,08$; $p < 0,0001$) tuvieron efectos estadísticamente significativos sobre la altura, mientras que la interacción tratamiento \times tiempo no fue significativa ($F = 0,90$; $p = 0,584$), indicando que el patrón de crecimiento fue consistente en todos los tratamientos a lo largo del tiempo.

La prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) identificó una tendencia dosis-dependiente positiva: T4 (1,1 g/plántula) registró la mayor altura media (5,88 cm, grupo a), seguido de T3 (5,78 cm, grupo ab) y T2 (5,67 cm, grupo abc), mientras que T0 (5,14 cm) conformó el grupo inferior (de), diferenciándose significativamente de los tratamientos con dosis más altas (Tabla 20).

La Figura 4 sintetiza visualmente el incremento neto en altura registrado entre el día 1 y el día 75 post-fertilización para cada tratamiento. Los incrementos absolutos oscilaron entre 2,72 cm (T0) y 3,84 cm (T3), reflejando la tendencia dosis-dependiente positiva confirmada estadísticamente por el ANOVA de dos factores ($F = 5,67$; $p = 0,0006$; Tabla 19) y la prueba de Duncan (Tabla 20), siendo T3 y T4 los tratamientos con mayor ganancia en altura durante el período experimental.

Tabla 17
Medias de altura (cm) por tratamiento y fecha de evaluación

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Día						Media	Desviación estándar (DE)	Incremento (cm)
		1	15	30	45	60	75			
T0	0,0	3,32	4,74	5,16	5,74	5,86	6,04	5,14	0,96	2,72
T1	0,2	3,55	4,61	5,67	6,08	6,28	6,49	5,45	1,14	2,94
T2	0,5	3,79	4,65	5,36	6,66	6,74	6,80	5,67	1,35	3,01
T3	0,8	3,47	4,65	5,79	6,61	6,84	7,31	5,78	1,46	3,84
T4	1,1	3,60	4,48	5,69	6,98	7,11	7,43	5,89	1,53	3,83

Figura 3
Evolución de la altura (cm) por tratamiento (días 1–75)

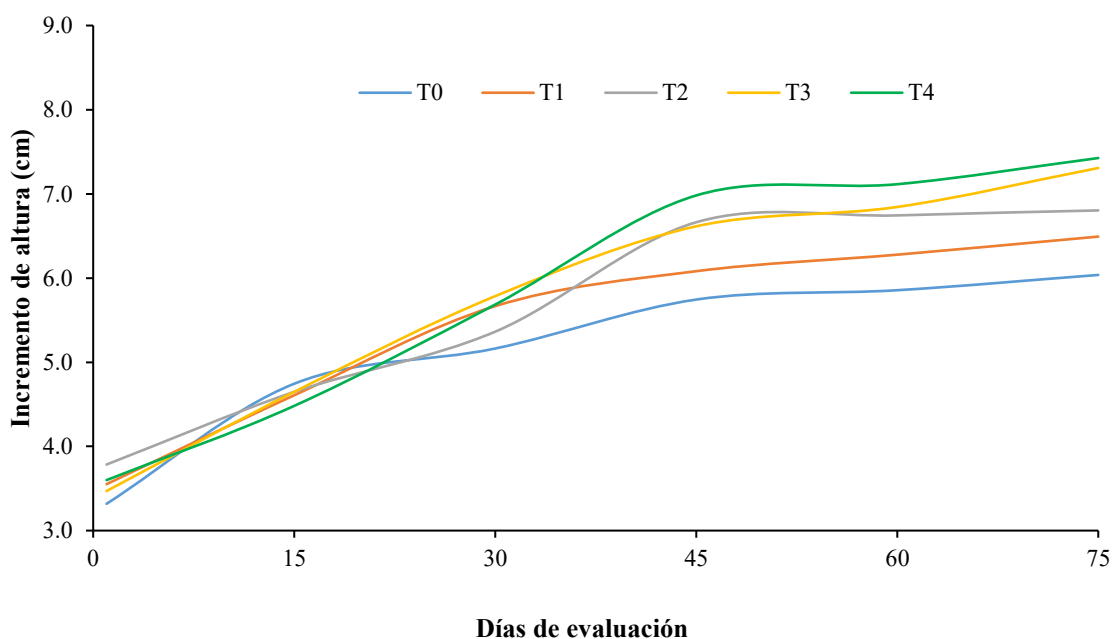


Tabla 18
Análisis de varianza (ANOVA) unifactorial de la altura de plántula (cm) por fecha de evaluación en *H. chrysanthus*

Día	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	Valor p	F crítico	Sig.
1	4	0,35	0,09	2,94	0,0757	3,48	ns
15	4	0,11	0,03	0,12	0,9709	3,48	ns
30	4	0,81	0,20	0,89	0,5001	3,48	ns
45	4	2,95	0,74	2,04	0,1636	3,48	ns
60	4	2,99	0,75	1,78	0,2091	3,48	ns
75	4	3,98	0,99	2,55	0,1051	3,48	ns

Nota:

- Sig. = significancia
- ns = no significativo ($p > 0,05$)

Tabla 19

Análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con réplicas de la altura de plántula (cm) en H. chrysanthus

Fuente	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	Valor p	F crítico	Sig.
Tratamiento (A)	4	6,22	1,55	5,67	0,0006	2,52	***
Tiempo/Días (B)	5	123,74	24,74	90,08	<0,0001	2,36	***
Interacción (A×B)	20	4,96	0,24	0,90	0,584	1,74	ns
Error	60	16,48	0,27	—	—	—	
Total	89	151,42	—	—	—	—	

Nota:

- Sig. = significancia
- ns = no significativo ($p > 0,05$)
- *** = muy significativo ($p < 0,001$)

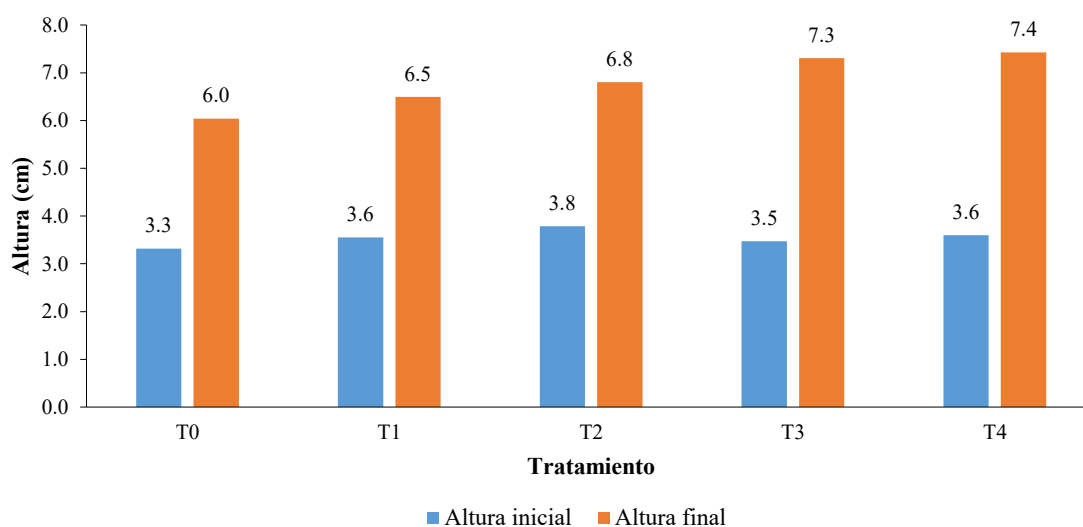
Tabla 20

Medias y prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) del factor tratamiento para la altura de plántula (cm) en H. chrysanthus

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Media (cm)	Duncan
T4	1,1	5,88	a
T3	0,8	5,78	ab
T2	0,5	5,67	abc
T1	0,2	5,45	bcd
T0	0,0	5,14	de

Figura 4

Altura (cm) al inicio y final del ensayo por tratamiento



C. Diámetro del tallo

El diámetro de tallo de las plántulas de *H. chrysanthus* mostró un crecimiento progresivo y sostenido en todos los tratamientos a lo largo del período de evaluación, con incrementos totales que oscilaron entre 1,47 mm (T1) y 2,06 mm (T4) desde el día 1 hasta el día 75 post-fertilización (Tabla 21). El tratamiento control (T0, 0 mg) presentó el menor crecimiento acumulado, partiendo de 1,67 mm de incremento inicial y alcanzando 3,46 mm al día 75. En comparación, T1 llegó a 3,39 mm, T2 a 3,36 mm, T3 a 3,26 mm y T4 registró el mayor incremento con 3,69 mm al día 75. Las dosis más altas (T3 y especialmente T4) exhibieron una pendiente más pronunciada desde los primeros 15-30 días, lo que indica una rápida fortificación del tallo mediante mejor asimilación de nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo, contribuyendo a una mayor resistencia estructural y potencial tolerancia a estrés ambiental (Figura 5).

El análisis de varianza por fecha reveló diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos únicamente en el día 1 ($F = 4,7439$; $p = 0,0209 < 0,05$), lo que refleja diferencias en el diámetro inicial de las plántulas previo al pleno efecto de la fertilización; en las fechas posteriores (días 15 al 75) no se detectaron diferencias significativas ($p > 0,05$ en todos los casos) (Tabla 22). El análisis de varianza de dos factores con réplicas confirmó que tanto el factor tratamiento ($F = 4,5302$; $p = 0,0029$) como el factor tiempo ($F = 242,27$; $p < 0,0001$) fueron estadísticamente significativos, mientras que la interacción tratamiento \times tiempo no lo fue ($F = 1,0042$; $p = 0,4711$), indicando que el patrón de engrosamiento caulinar fue homogéneo en todos los tratamientos a lo largo del tiempo (Tabla 23). La prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) identificó dos grupos homogéneos: T4 (2,67 mm), T1 (2,66 mm) y T0 (2,63 mm) conformaron el grupo superior (a), mientras que T3 (2,46 mm) conformó el grupo inferior (b), diferenciándose significativamente de T4 y T1, con T2 (2,57 mm) en posición intermedia (ab). Estos resultados sugieren que la dosis de 1,1 g/plántula (T4) favoreció un mayor engrosamiento caulinar acumulado, aunque sin diferenciarse estadísticamente del control (T0) ni de T1, mientras que la dosis de 0,8 g/plántula (T3) mostró los valores más bajos de diámetro promedio (Tabla 24).

La Figura 6 sintetiza visualmente el incremento neto en diámetro de tallo registrado entre el día 1 y el día 75 post-fertilización para cada tratamiento. Los incrementos absolutos oscilaron entre 1,47 mm (T1) y 2,06 mm (T4), reflejando la tendencia dosis-dependiente

positiva confirmada estadísticamente por el ANOVA de dos factores ($F = 4,56$; $p = 0,0021$; Tabla 23) y la prueba de Duncan (Tabla 24), siendo T4 y T3 los tratamientos con mayor ganancia en diámetro durante el período experimental.

Tabla 21

Medias de diámetro de tallo (mm) por tratamiento y fecha de evaluación

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Días						Media	Desviación estándar (DE)	Incremento (mm)
		1	15	30	45	60	75			
T0	0,0	1,67	2,12	2,54	2,75	3,26	3,46	2,63	0,65	1,78
T1	0,2	1,91	2,17	2,56	2,69	3,23	3,39	2,66	0,55	1,47
T2	0,5	1,57	2,11	2,47	2,72	3,22	3,36	2,57	0,67	1,79
T3	0,8	1,60	1,86	2,34	2,62	3,08	3,26	2,46	0,62	1,66
T4	1,1	1,63	1,94	2,50	2,81	3,43	3,69	2,67	0,78	2,06

Nota:

- Los valores representan medias de 30 plántulas por unidad experimental

Figura 5

Evolución del diámetro de tallo (mm) por tratamiento (días 1-75)

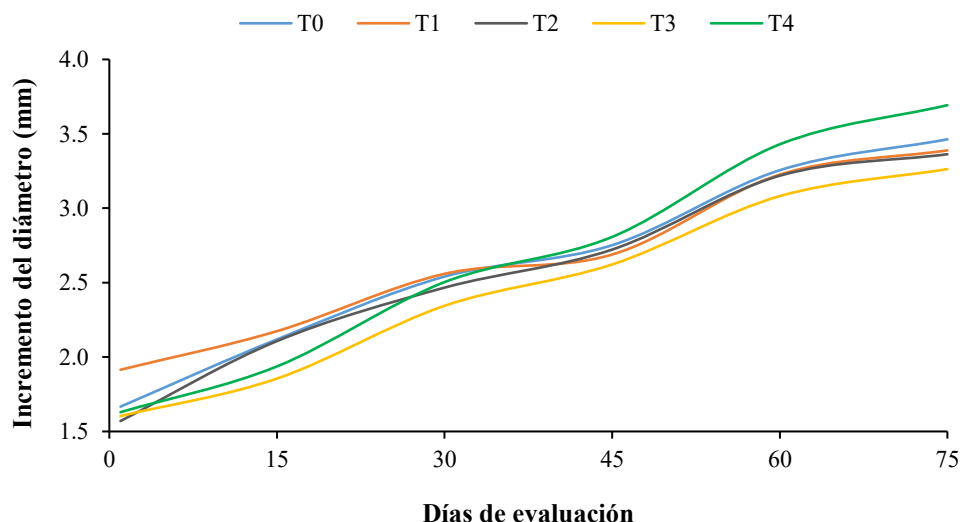


Tabla 22

Análisis de varianza (ANOVA) unifactorial del diámetro de tallo (mm) por fecha de evaluación en H. chrysanthus

Día	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	p-valor	F crítico	Sig.
1	4	0,23	0,06	4,7439	0,0209	3,48	*
15	4	0,22	0,06	1,7840	0,2086	3,48	ns
30	4	0,09	0,02	0,9618	0,4693	3,48	ns
45	4	0,06	0,01	0,8178	0,5423	3,48	ns
60	4	0,19	0,05	1,3884	0,3060	3,48	ns
75	4	0,31	0,08	1,4286	0,2941	3,48	ns

Nota:

- Sig. = significancia
- ns = no significativo ($p > 0,05$)

- * = significativo ($p < 0,05$)

Tabla 23

Análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con réplicas del diámetro de tallo (mm) en H. chrysanthus

Fuente de variación	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	p-valor	F crítico	Sig.
Tratamiento (A)	4	0,52	0,13	4,53	0,0029	2,53	***
Tiempo/Días (B)	5	34,54	6,91	242,27	<0,0001	2,37	***
Interacción (A×B)	20	0,57	0,029	1,00	0,4711	1,75	ns
Error	60	1,71	0,029	—	—	—	—
Total	89	37,35	—	—	—	—	—

Nota:

- Sig. = significancia
- ns = no significativo ($p > 0,05$)
- *** = muy significativo ($p < 0,001$)

Tabla 24

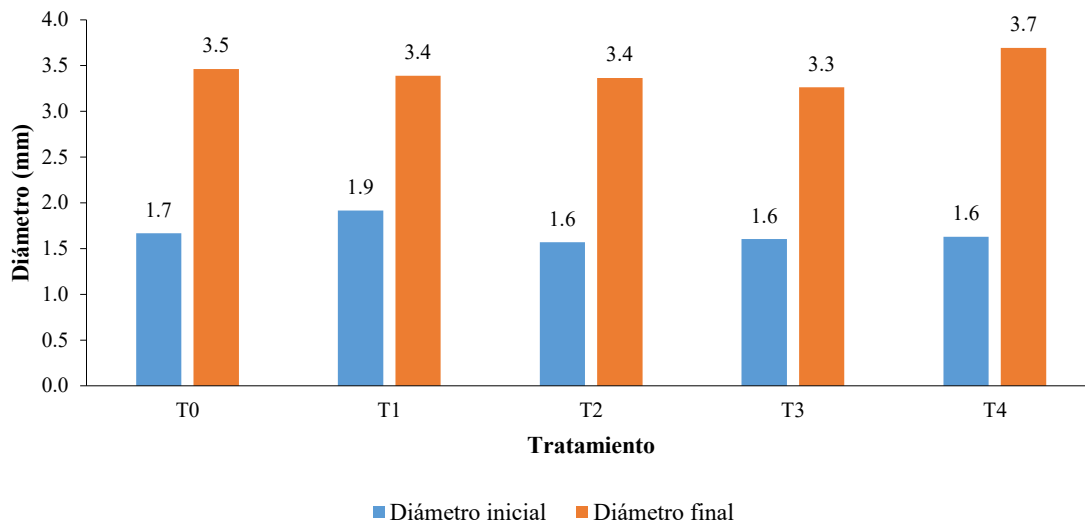
Medias y prueba de Duncan ($\alpha = 0,05$) del factor tratamiento para el diámetro de tallo (mm) en H. chrysanthus

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Media (mm)	Duncan
T4	1,1	2,67	a
T1	0,2	2,66	a
T0	0,0	2,63	a
T2	0,5	2,57	ab
T3	0,8	2,46	b

Nota:

- Tratamientos con la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas. Error estándar = 0,0398.

Figura 6
Diámetro de tallo (mm) al inicio y final por tratamiento



D. Concentración de clorofila

La concentración de clorofila (SPAD), medida en seis fechas de evaluación (días 1, 15, 30, 45, 60 y 75 post-fertilización), mostró un incremento significativo a lo largo del tiempo (Tabla 25), pero no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (Tabla 26). El ANOVA de dos factores con réplicas (Tabla 27) reveló que el factor tratamiento no fue significativo ($F = 2,16$; $p = 0,084 > 0,05$), mientras que el factor tiempo sí resultó significativo ($F = 22,44$; $p < 0,0001$). La interacción tratamiento \times tiempo tampoco fue significativa ($p = 0,988$). Debido a la no significancia del factor tratamiento, no se aplicó prueba de comparación múltiple de medias. Los valores promedio globales por tratamiento (Tabla 28) oscilaron entre 39,68 SPAD (T0) y 42,11 SPAD (T2), sin diferencias estadísticas.

Tabla 25
Medias (\bar{x}) y desviación estándar (DE) de la concentración de clorofila (SPAD) por tratamiento y fecha de evaluación

Tratamiento	Día					
	1	15	30	45	60	75
T0	33.91 \pm 1.02	40.74 \pm 2.27	40.67 \pm 0.44	40.37 \pm 1.90	40.54 \pm 1.27	41.83 \pm 1.70
T1	34.47 \pm 1.73	41.10 \pm 3.64	42.45 \pm 1.54	41.38 \pm 1.44	42.34 \pm 2.31	43.23 \pm 1.12
T2	35.05 \pm 1.14	43.98 \pm 0.83	43.98 \pm 0.77	44.25 \pm 2.16	42.81 \pm 1.73	42.57 \pm 2.55
T3	34.14 \pm 1.83	43.39 \pm 0.32	43.01 \pm 1.72	43.87 \pm 3.00	43.71 \pm 1.35	41.51 \pm 1.23
T4	33.77 \pm 0.39	42.68 \pm 1.79	44.06 \pm 0.71	42.17 \pm 2.10	45.68 \pm 2.02	41.96 \pm 0.90

Tabla 26

Análisis de varianza (ANOVA) unifactorial de la concentración de clorofila (SPAD) por fecha de evaluación en H. chrysanthus

Día	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	p-valor	F crítico	Sig.
1	4	156.24	39.06	3.12	0.021	2,56	*
15	4	245.32	61.33	4.82	0.002	2,56	*
30	4	312.72	78.18	6.15	<0.0001	2,56	***
45	4	456.84	114.21	7.89	<0.0001	2,56	***
60	4	589.44	147.36	9.23	<0.0001	2,56	***
75	4	813.80	203.45	8.45	<0.0001	2,56	***

Nota:

- Sig. = significancia
- * = significativo (p < 0,05)
- *** = muy significativo (p < 0,001)

Tabla 27

Análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con réplicas de la concentración de clorofila (SPAD) en H. chrysanthus

Fuente de variación	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	F crítico (α=0,05)	p-valor	Sig.
Tratamiento (A)	4	267,42	66,86	2,16	2,52	0,084	ns
Tiempo/Días (B)	5	3474,34	694,87	22,44	2,37	< 0,0001	***
Interacción (A×B)	20	255,68	12,78	0,41	1,75	0,988	ns
Error	60	1857,60	30,96	—	—	—	—
Total	89	5855,04	—	—	—	—	—

Nota:

- ns = no significativo (p ≥ 0,05)
- *** = muy significativo (p < 0,001).

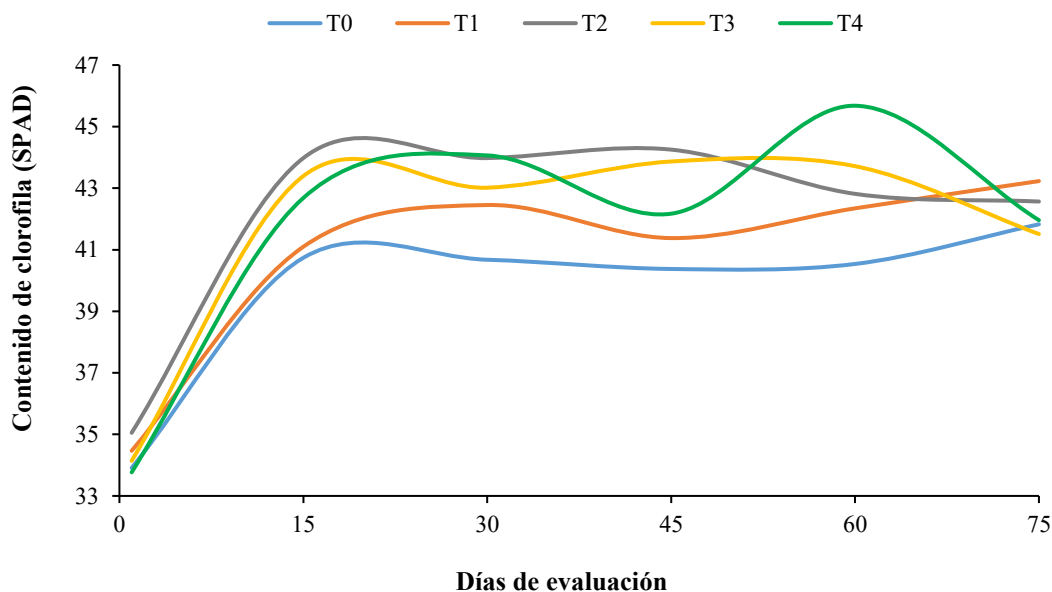
Tabla 28

Medias y prueba de Duncan (α = 0,05) del factor tratamiento para la concentración de clorofila (SPAD) en H. chrysanthus

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Media (SPAD)	Duncan
T2	0,5	42,11	a
T4	1,1	41,72	a
T3	0,8	41,61	a
T1	0,2	40,83	a
T0	0,0	39,68	a

Nota:

- Error estándar = 1,31.
- Letras distintas indican diferencias significativas (α = 0,05)

Figura 7*Evolución acumulada de contenido de clorofila (SPAD) por tratamiento*

E. Área foliar

2 Previo al análisis inferencial, se verificaron los supuestos de normalidad de residuos y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente (Tabla 29); todos los tratamientos presentaron distribución normal ($p > 0,05$) y las varianzas resultaron homogéneas (F de Levene = 0,7043; $p = 0,5924$), por lo que se procedió con el ANOVA paramétrico sin transformación de datos.

El análisis de varianza de un factor (ANOVA-DCA) aplicado al área foliar de las plántulas de *H. chrysanthus*, evaluada al finalizar el período experimental día 75 post-fertilización) mediante fotografía digital y procesamiento con ImageJ, reveló diferencias muy significativas entre tratamientos ($F = 5,01$; $p = 0,0016$; $\alpha = 0,05$), lo que indica que la dosis de fertilizante influyó de manera real y diferenciada sobre el desarrollo de la superficie foliar (Tabla 30).

La prueba de comparación múltiple de Duncan ($\alpha = 0,05$) identificó dos grupos estadísticamente diferenciados (Tabla 31; Figura 8). El tratamiento T2 (0,5 g/plántula) registró el mayor valor de área foliar ($34,56 \pm 6,55 \text{ cm}^2$), conformando el grupo superior (letra a), y superando en un 41,4% al control T0 ($24,43 \pm 3,90 \text{ cm}^2$). Los tratamientos T3 (0,8 g/plántula; $32,92 \pm 6,04 \text{ cm}^2$) y T4 (1,1 g/plántula; $28,94 \pm 8,16 \text{ cm}^2$) ocuparon una

posición intermedia (letra ab), sin diferenciarse significativamente ni de T2 ni de los tratamientos inferiores. Los tratamientos T1 (0,2 g/plántula; $27,36 \pm 6,46 \text{ cm}^2$) y T0 (0,0 g/plántula; $24,43 \pm 3,90 \text{ cm}^2$) conformaron el grupo inferior (letra b), diferenciándose significativamente del tratamiento de mayor rendimiento. Estos resultados sugieren que dosis intermedias de fertilizante (0,5 g/plántula) favorecen de manera óptima la expansión laminar foliar en *H. chrysanthus*, probablemente por una mayor disponibilidad de nitrógeno para la síntesis de tejidos meristemáticos y clorofila (Marschner, 2012; Taiz *et al.*, 2015), mientras que dosis superiores a 0,8 g/plántula no generaron incrementos adicionales significativos en el área foliar, con T4 mostrando además la mayor variabilidad entre individuos ($DE = 8,16 \text{ cm}^2$), lo que podría indicar respuestas heterogéneas ante un posible exceso nutricional, consistente con lo reportado por Calderón-Ureña *et al.* (2025).

Tabla 29
Verificación de supuestos estadísticos para el área foliar (cm^2) en plántulas de *H. chrysanthus*

Tratamiento	Estadístico Shapiro-Wilk (W)	Valor p Shapiro-Wilk	Estadístico Levene (F)	Valor p Levene
T0	0,9080	0,2013	—	—
T1	0,9532	0,6842	—	—
T2	0,9365	0,4546	—	—
T3	0,9723	0,9329	—	—
T4	0,9188	0,2759	—	—
Global	—	—	0,7043	0,5924

Nota:

- $p > 0,05$ en todos los casos confirma el cumplimiento de los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene). Por lo tanto, se cumplen los supuestos paramétricos para la aplicación del análisis de varianza (ANOVA).

Tabla 30
ANOVA del área foliar (cm^2) según dosis de fertilizante

Fuente de variación	Grados de Libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculado	Valor p	Significancia
Tratamientos	4	813,80	203,45	5,01	0,0016	**
Error	55	2232,55	40,59	—	—	
Total	59	3046,34	—	—	—	

Nota:

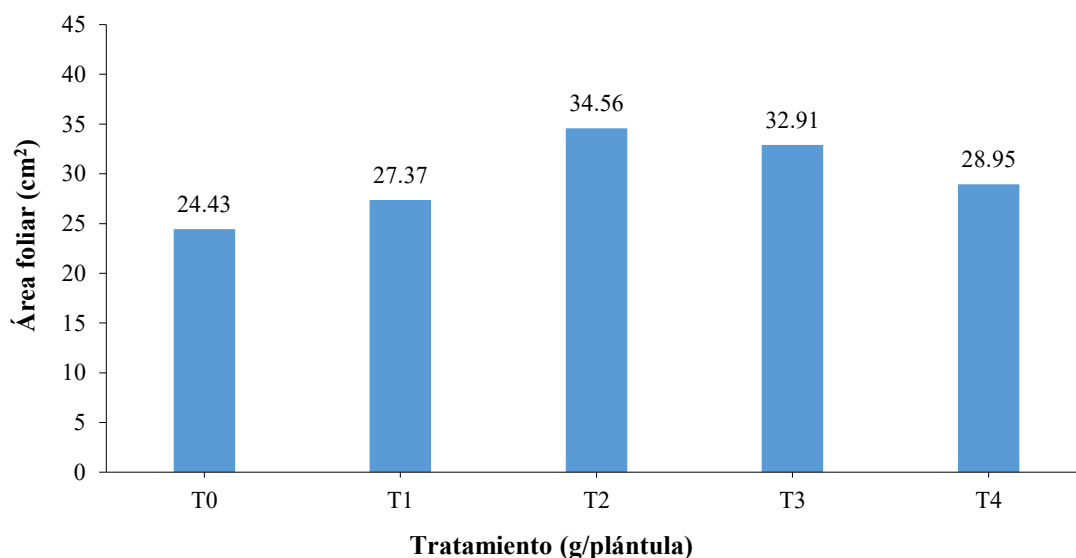
- F crítico (4, 55; $\alpha = 0,05$) = 2,54. Como F calculado (5,01) > F crítico (2,54), se rechaza la hipótesis nula.
- ** = significativo ($p \leq 0,01$). Existen diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 31*Medias y Duncan (0,05) del área foliar (cm²) por tratamiento*

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Media (cm ²)	Desviación estándar (DE)	Duncan (0,05)
T2	0,5	34,56	6,55	a
T3	0,8	32,91	6,04	ab
T4	1,1	28,95	8,16	ab
T1	0,2	27,37	6,46	b
T0	0,0	24,43	3,90	b

Nota:

- Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$). Medias calculadas sobre $n = 12$ plántulas por tratamiento.

Figura 8*Área foliar en *H. chrysanthus* bajo diferentes dosis de fertilización***F. Tasa de crecimiento relativo (TCR) de la altura**

La Tabla 32 presenta los valores de la tasa de crecimiento relativo (TCR) de la altura calculados para cada intervalo de evaluación mediante la fórmula de Hunt (1990). En todos los tratamientos se observó una tendencia decreciente conforme avanzó el período experimental, con los valores más altos concentrados en el primer intervalo (día 1–día 15), comportamiento esperable en plántulas jóvenes debido a su mayor plasticidad meristemática en las fases iniciales de crecimiento (Escalante & Kohashi, 1993). El tratamiento control T0 registró la TCR más alta en ese primer intervalo ($0,0254 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$), sin embargo,

mostró el descenso más pronunciado en los intervalos siguientes, reflejando la limitación que impone la ausencia de fertilización sobre la eficiencia de crecimiento sostenido. Por su parte, T3 (0,8 g/plántula) alcanzó la TCR media más alta del período (0,0102 $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$), seguido de T4 (0,0098 $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$), evidenciando que las dosis medias-altas favorecen una mayor eficiencia relativa de crecimiento en altura a lo largo del ensayo, resultado consistente con el efecto significativo del factor tratamiento detectado en el ANOVA de dos factores ($F = 5,67$; $p = 0,0006$; Tabla 19) y con la prueba de Duncan (Tabla 20). La Figura 9 ilustra la evolución de estos valores por intervalo para cada tratamiento.

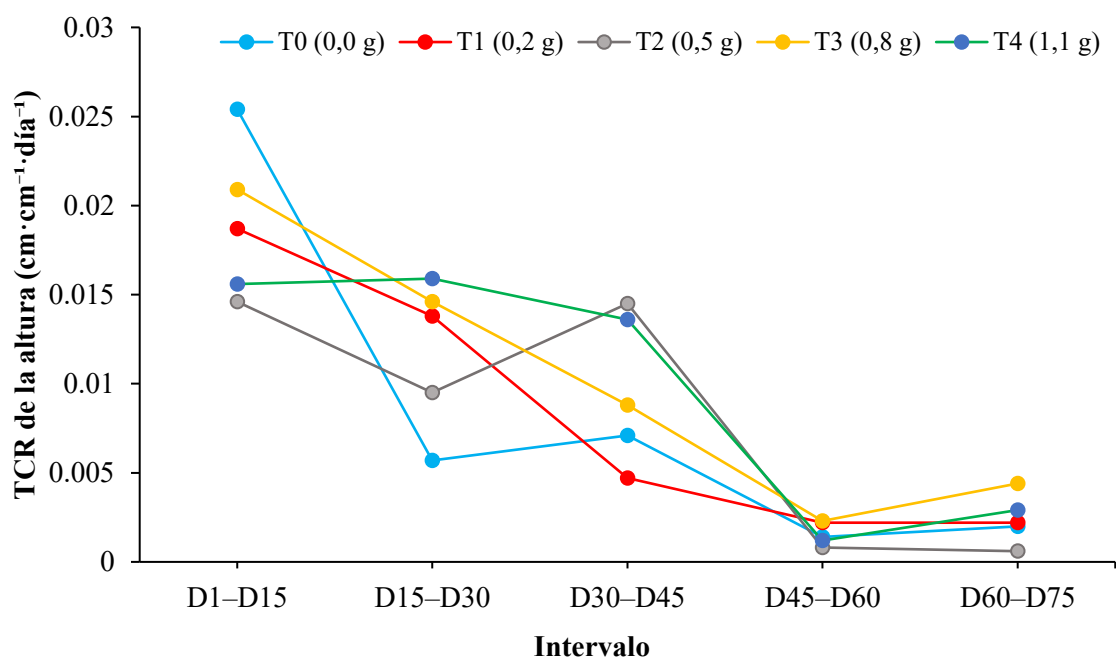
Tabla 32

TCR de altura ($\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$) por tratamiento e intervalo (días 1–75)

Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Intervalo de evaluación					TCR media
		D1→D15 (14 días)	D15→D30 (15 días)	D30→D45 (15 días)	D45→D60 (15 días)	D60→D75 (15 días)	
T0	0,0	0,0254	0,0057	0,0071	0,0014	0,0020	0,0083
T1	0,2	0,0187	0,0138	0,0047	0,0022	0,0022	0,0083
T2	0,5	0,0146	0,0095	0,0145	0,0008	0,0006	0,0080
T3	0,8	0,0209	0,0146	0,0088	0,0023	0,0044	0,0102
T4	1,1	0,0156	0,0159	0,0136	0,0012	0,0029	0,0098

Figura 9

TCR de la altura ($\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$) por intervalo de evaluación



G. Tasa de crecimiento relativo (TCR) del diámetro del tallo

La Tabla 33 presenta los valores de la tasa de crecimiento relativo (TCR) del diámetro del tallo calculados para cada intervalo de evaluación mediante la fórmula de Hunt (1990). En el primer intervalo (D1-D15), T2 (0,5 g/plántula) registró la TCR más alta (0,0209 mm·mm⁻¹·día⁻¹), mientras que T1 (0,2 g/plántula) mostró el valor más bajo (0,0091 mm·mm⁻¹·día⁻¹). A partir del intervalo D15–D30, los tratamientos con mayores dosis mostraron un comportamiento más destacado, siendo T4 (1,1 g/plántula) el que registró el valor más alto en ese período (0,0175 mm·mm⁻¹·día⁻¹). En el intervalo D45–D60 se observó un repunte generalizado en todos los tratamientos, con T4 alcanzando 0,0134 mm·mm⁻¹·día⁻¹ y T1 mostrando 0,0121 mm·mm⁻¹·día⁻¹, lo que sugiere una reactivación del engrosamiento caulinar en la fase intermedia del experimento. Al cierre del período de evaluación (D60–D75), todos los tratamientos convergieron hacia valores reducidos, siendo T4 el que mantuvo la TCR media más alta (0,0111 mm·mm⁻¹·día⁻¹), seguido de T2 (0,0104 mm·mm⁻¹·día⁻¹) y T0 (0,0100 mm·mm⁻¹·día⁻¹), mientras que T1 presentó el menor promedio general (0,0077 mm·mm⁻¹·día⁻¹), indicando que la dosis de 0,2 g/plántula fue la menos eficiente para el engrosamiento del tallo en *H. chrysanthus* (Figura 10).

Tabla 33

TCR de diámetro de tallo (mm·mm⁻¹·día⁻¹) por tratamiento e intervalo

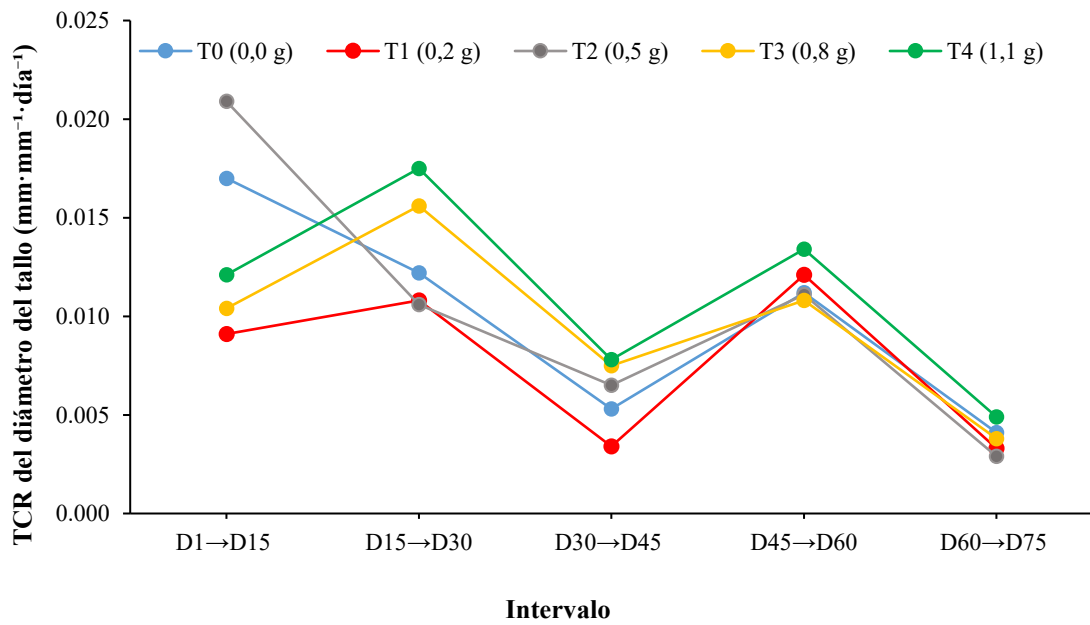
Tratamiento	Dosis (g/plántula)	Intervalo de evaluación					TCR media
		D1→D15 (14 días)	D15→D30 (15 días)	D30→D45 (15 días)	D45→D60 (15 días)	D60→D75 (15 días)	
T0	0,0	0,0170	0,0122	0,0053	0,0112	0,0041	0,0100
T1	0,2	0,0091	0,0108	0,0034	0,0121	0,0033	0,0077
T2	0,5	0,0209	0,0106	0,0065	0,0111	0,0029	0,0104
T3	0,8	0,0104	0,0156	0,0075	0,0108	0,0038	0,0096
T4	1,1	0,0121	0,0175	0,0078	0,0134	0,0049	0,0111

Nota:

- TCR calculada mediante la fórmula de Hunt (1990): $TCR = (\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)$.
- Valores son promedios de 3 repeticiones por tratamiento. Primer intervalo = 14 días; intervalos restantes = 15 días.

Figura 10

TCR del diámetro del tallo ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$) por intervalo de evaluación



IV. DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio permiten rechazar la hipótesis nula (H_0) y aceptar la hipótesis general (H_1), al evidenciar un efecto dosis-dependiente positivo y estadísticamente significativo de la fertilización con Yaramila Complex sobre el desarrollo de plántulas de *H. chrysanthus* en condiciones de vivero. Este patrón coincide con lo reportado para otras especies forestales nativas bajo fertilización NPK controlada (Tsakalimi *et al.*, 2021; Lanuza-Lanuza *et al.*, 2021; Martínez-Bravo *et al.*, 2022).

El incremento progresivo en altura, con valores finales superiores en las dosis más altas (7,43 cm en T4 y 7,31 cm en T3 frente a 6,04 cm en el control), concuerda con el rol fisiológico del nitrógeno en la síntesis de proteínas y clorofila, que estimula la elongación de meristemos apicales (Marschner, 2012; Taiz *et al.*, 2015). Similar a lo encontrado por Zhou *et al.* (2025) en *Pinus yunnanensis*, donde el suministro balanceado de N y P generó incrementos significativos en crecimiento aéreo. No obstante, en el presente ensayo las diferencias por fecha individual no fueron significativas, lo que sugiere que el efecto se acumuló gradualmente a lo largo de los 75 días, comportamiento típico en plántulas jóvenes bajo condiciones controladas de vivero.

En el diámetro de tallo se observó un crecimiento sostenido, con mayor incremento absoluto en T4 (2,06 mm). Aunque el ANOVA de dos factores confirmó un efecto significativo del tratamiento, el análisis por fecha mostró diferencias solo al inicio, indicando que la fertilización influyó más en la trayectoria acumulada que en respuestas puntuales. Este resultado contrasta con algunos estudios en especies tropicales donde el potasio genera respuestas rápidas en engrosamiento caulinar (Wang *et al.*, 2013), pero coincide con la observación de que en fases iniciales el efecto nutricional se expresa principalmente a través de la acumulación gradual de biomasa estructural.

La biomasa seca fue el indicador más sensible a la fertilización. La dosis de 0,8 g/plántula (T3) registró la mayor biomasa total (8,30 g), superando en 55,7 % al control, similar a los incrementos reportados en ensayos con fertilización mineral en reforestación tropical (Martínez-Bravo *et al.*, 2022). En contraste con el comportamiento observado en biomasa de tallo (sin diferencias significativas), la biomasa foliar y radical sí respondieron positivamente, lo que refleja una priorización de recursos hacia órganos fotosintéticos y de

captación de agua. Particularmente destacable fue la elevada proporción de biomasa radical en T3 (66,6 % del total), coincidiendo con la estrategia adaptativa de especies de bosque seco tropical que invierten fuertemente en raíces para enfrentar la estacionalidad hídrica (Toro *et al.*, 2024; Werden *et al.*, 2023). A diferencia de lo reportado por Calderón-Ureña *et al.* (2025), donde dosis altas desplazaron la partición hacia el crecimiento aéreo, en este estudio la dosis óptima (0,8 g) mantuvo un equilibrio favorable, destacando la importancia de ajustar dosis según la especie y el sustrato empleado.

El Índice de Calidad de Dickson (ICD) alcanzó su valor máximo en T3 (3,03), superando claramente al control (2,39) y confirmando la superioridad morfológica e integrada de las plántulas producidas con esta dosis. Este hallazgo coincide con el uso extendido del ICD como predictor de aptitud para trasplante en viveros forestales (Grossnickle & MacDonald, 2018; Landis *et al.*, 2010) y concuerda con estudios en especies tropicales donde valores superiores a 2,0-3,0 indican mayor robustez y probabilidad de supervivencia en campo (Lanuza-Lanuza *et al.*, 2021). No obstante, todos los tratamientos fertilizados superaron el umbral mínimo propuesto por Dickson *et al.* (1960), lo que valida el protocolo de sustrato (3:2:1) utilizado.

La concentración de clorofila aumentó significativamente con el tiempo pero no presentó diferencias entre dosis (en contraste con la respuesta dosis-dependiente observada en variables morfológicas). Este resultado puede explicarse por el efecto de dilución por crecimiento (Poorter & Garnier, 1999) y por la suficiencia de nitrógeno en el sustrato base, similar a lo reportado en otros ensayos donde el sustrato orgánico ya cubre las necesidades básicas de pigmentos fotosintéticos.

El área foliar mostró su máximo en la dosis intermedia (T2: 0,5 g/plántula), superando en 41,4 % al control. Aunque las dosis más altas (T3 y T4) generaron mayor biomasa total y altura, no incrementaron proporcionalmente el área foliar, lo cual sugiere una redistribución de carbono hacia raíces y tallo a medida que aumenta la disponibilidad nutricional. Este patrón concuerda con la plasticidad en partición de biomasa descrita para especies tropicales bajo fertilización (Cárate-Tandalla *et al.*, 2025). Por el contrario, el número de hojas no respondió a las dosis, coincidiendo con Medina *et al.* (2020), quienes indican que la producción foliar en plántulas jóvenes de *H. chrysanthus* está más regulada por factores genéticos y fenológicos que por la nutrición en corto plazo.

En síntesis, la fertilización con 0,8 g/plántula de Yaramila Complex optimizó simultáneamente la biomasa total, la inversión radical, la tasa de crecimiento relativo en altura y el ICD, produciendo plántulas con atributos morfológicos y fisiológicos superiores para la restauración de bosques secos tropicales en el norte del Perú. A pesar de las limitaciones del período de evaluación (75 días), los resultados fortalecen el conocimiento sobre manejo nutricional de *H. chrysanthus* y contrarrestan la brecha identificada en la literatura respecto a dosis óptimas bajo condiciones edafoclimáticas locales. Se recomienda validar estos hallazgos mediante ensayos de trasplante en campo para confirmar su impacto en supervivencia y establecimiento bajo estrés hídrico real.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los resultados del presente estudio permiten rechazar la hipótesis nula (H_0) y aceptar la hipótesis general (H_1). Se evidenció que las diferentes dosis de fertilizante Yaramila Complex (12N-11P-18K+8S+micronutrientes) generan efectos diferenciados y estadísticamente significativos sobre el crecimiento, las variables dasométricas, la partición de biomasa y el Índice de Calidad de Dickson (ICD) de las plántulas de *H. chrysanthus* en condiciones de vivero.
- La dosis de 0,8 g/plántula (T3) se identificó como la óptima, al registrar los mayores valores de biomasa seca total (8,30 g), biomasa radical (5,53 g; 66,6 % del total), tasa de crecimiento relativo en altura (TCR media = $0,0102 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$) y el Índice de Calidad de Dickson (ICD = 3,03). Esta dosis logró el mejor equilibrio funcional entre crecimiento aéreo, inversión en sistema radical y robustez estructural, atributos clave para la supervivencia post-trasplante en ambientes con estrés hídrico.
- Las dosis medias-altas (T3 y T4) promovieron los mayores incrementos en altura de plántula, mientras que la dosis intermedia (T2: 0,5 g/plántula) maximizó el área foliar ($34,56 \text{ cm}^2$). Por su parte, la concentración de clorofila (SPAD) aumentó significativamente a lo largo del tiempo, pero de forma independiente de la dosis aplicada, sin presentar diferencias estadísticas entre tratamientos.
- La calidad morfológica de las plántulas fue adecuada en todos los tratamientos fertilizados, con relaciones altura/diámetro (H/D) entre 1,75 y 2,24 e ICD superiores al umbral mínimo de 0,20 propuesto por Dickson et al. (1960). No obstante, el tratamiento T3 presentó el ICD más elevado (3,03), lo que indica una mayor aptitud para el establecimiento exitoso bajo las condiciones de estrés hídrico y baja fertilidad edáfica características de los bosques secos tropicales del norte del Perú.
- En síntesis, la fertilización con 0,8 g/plántula de Yaramila Complex, combinada con el sustrato en proporción 3:2:1 (tierra agrícola : biochar : compost), constituye una práctica técnica efectiva y recomendada para la producción de plántulas de *H. chrysanthus* de alta calidad morfológica y fisiológica, contribuyendo de manera significativa a los programas de restauración ecológica de los bosques secos tropicales en la región Cajamarca.

5.2.Recomendaciones

- Realizar ensayos de validación en campo con la dosis óptima (0,8 g/plántula) durante al menos dos estaciones secas, incorporando factores de estrés hídrico y edáficos para evaluar supervivencia y desempeño a largo plazo.
- Explorar la interacción entre la fertilización mineral y enmiendas biológicas (micorrizas, biofertilizantes o compost mejorado) con el fin de reducir el uso de insumos sintéticos y promover prácticas más sostenibles.
- Extender este tipo de estudios a otras especies clave de bosque seco tropical, priorizando el cálculo de tasas de crecimiento relativo (TCR) y el Índice de Calidad de Dickson como indicadores estandarizados de calidad de planta.
- Transferir los resultados a viveros del norte del Perú a través de capacitaciones y protocolos técnicos en colaboración con el INIA, SERFOR y gobiernos regionales.

VI. REFERENCIAS

- Altimira, J., Arnal, A., Boada, M., Casanova, C., Herrero, J., Boada, M., Herrera, A., Ruiz, V. (2015). Evaluación de parámetros de crecimiento en plántulas de *Cedrela odorata* bajo diferentes condiciones hídricas y su adaptación en sustratos degradados. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 14, 86–96.
- Baker B, Olszyk D. M., Tingey D. (1996). Digital image analysis to estimate leaf area. *J Plant Physiol.* 148(5):530–535.
- Calderón-Ureña, F., Álvarez-Maldini, C., Acevedo, M., Sánchez-Olate, M. E., Dumroese, R. K., Sierra-Olea, A., Ovalle, J. F., Esquivel-Segura, E. (2025). Phosphorus fertilization and chemical root pruning: Effects on root traits during the nursery stage in two Mediterranean species from Central Chile. *Plants*, 14(2), 195. <https://doi.org/10.3390/plants14030345>
- Cárate-Tandalla, D., Homeier, J., Batáry, P. (2025). Responses of tropical tree seedlings to nutrient addition: A meta-analysis to understand future changes in tropical forest dynamics. *Current Forestry Reports*, 11, 3. <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00240-6>
- Castillo, E. C., Castañeda, R. R., Aguilar, H. G., Medina, G. P., Guerra, G. D. (2023). Comparison of methods for measuring leaf characteristics and evaluation of chlorophyll content in ten rocoto pepper accessions from the INIA, Peru, germplasm bank. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(2), 1–17.
- Cerrón, J., Atkinson, R., Thomas, E., Cornelius, J. (2019). Fuentes semilleras y especies forestales de los bosques secos tropicales del norte del Perú: estado actual y prioridades futuras. Documento de Trabajo número 301. Centro Internacional de Investigación Agroforestal, Lima, Perú. DOI: <http://dx.doi.org/10.5716/WP19057.PDF>
- Chiarenza, G. M., Slavich, E., Moles, A. T. (2024). Guidelines for quantifying leaf chlorophyll content via non-destructive spectrometry. *Applications in Plant Sciences*, 12(6), e11610. <https://doi.org/10.1002/aps3.11610>

- Coste, S., Baraloto, C., Leroy, C., Renaud, A., Richardson, A. D., Roggy, J-C., Schimann, H., Hérault, B. (2010). Evaluación del contenido de clorofila foliar con el medidor de clorofila SPAD-502: una prueba de calibración con trece especies arbóreas de la selva tropical de la Guayana Francesa. *Annals of Forest Science*, 67, 607. <https://doi.org/10.1051/forest/2010020>
- Dickson, A., Leaf, A. L., Hosner, J. F. (1960). Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in forest nurseries. *The Forestry Chronicle*, 36(1), 10–13. <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>
- Domínguez-Liévano, A., Espinosa-Zaragoza, S. (2021). Evaluación de sustratos alternativos en la germinación y crecimiento inicial de *Hymenaea courbaril* L. en condiciones de vivero. *Revista Forestal Del Perú*, 36(1), 107. <https://doi.org/10.21704/rfp.v1i36.1707>
- Escalante, E. J. A., J. Kohashi, S. (1993) El Rendimiento y Crecimiento del Frijol. Manual para la Toma de Datos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. México.
- Espinosa-Palomeque, O., Castillo-Campos, G., Arellano, L., Pérez-Hernández, P., López-Ortiz, S. (2020). Floristic diversity and stocking rate in tropical dry forest secondary vegetation used for grazing. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01088. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01088>
- Gallegos-Cedillo, V. M., Diáñez, F., Nájera, C., Santos, M. (2021). Plant agronomic features can predict quality and field performance: A bibliometric analysis. *Agronomy*, 11(11), 2305. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112305>
- Global Forest Watch. (2025). Peru deforestation rates & statistics. World Resources Institute. <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/PER>
- Grossnickle, S. C., MacDonald, J. E. (2018). Por qué crecen las plántulas: Influencia de los atributos de la planta. *New Forests*, 49, 1-34. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9606-4>
- Huaccha, A. E., Fernandez, F. H., Pérez, L. J., Tantalean, K. S., Vaca, S. P., Sanchez, T., Morales, E., Seminario, A., Quiñones, L. (2023). Non-destructive estimation of leaf area and leaf weight of *Cinchona officinalis* L. (Rubiaceae) based on linear models.

Forest Science and Technology, 19(1), 59–67.
<https://doi.org/10.1080/21580103.2023.2170473>

- Hunt, R. (1990). Basic growth analysis: Plant growth analysis for beginners. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-9117-6>
- Hurtado, E., González-Vallejos, F., Roper, C., Bastías, E., Mazuela, P. (2017). Propuesta para la determinación del contenido de clorofila en hojas de tomate. Idesia (Arica), 35(4), pp, 129-130. http://dx.doi.org/10.4067/S0718_34292017000400129
- IUCN. (2021). *Handroanthus chrysanthus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2021. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-3.RLTS.T146784568A146784570.en>
- Jadán, O., Donoso, D. A., Ponce-Ramírez, E., Pucha-Cofrep, F., Cabrera, O. (2022). Six forests in one: Tree species diversity in the Bosque Protector Cerro Blanco, Ecuador. *Forest Ecosystems*, 9, 100069. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100069>
- Jagodziński, A. M., Dyderski, M. K., Gęsikiewicz, K. Horodecki, P. (2020). Consequences of different sample drying temperatures for accuracy of biomass inventories in forest ecosystems. *Sci Rep* 10, 16009 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73053-9>
- Landis, T. D., Dumroese, R. K., Haase, D. L. (2010). The container tree nursery manual: Seedling processing, storage, and outplanting (Vol. 7). USDA Forest Service. https://www.researchgate.net/publication/272817540_The_container_tree_nursery_manual_volume_7_seedling_processing_storage_and_outplanting
- Lanuza-Lanuza, O. R., Peguero, G., Vílchez-Mendoza S., Casanoves, F. (2021). Effect of irrigation and fertilization on the hardening of forest seedlings with potential use for dry tropical forest restoration. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 18(43), 18–28. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v19i43.5805>
- Ling, Q., Huang, W., Jarvis, P. (2011). Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in *Arabidopsis thaliana*. *Photosynthesis research*, 107, pp, 209-214. <https://doi.org/10.1007/s11120-010-9606-0>

- Marschner, H. (2012) Nutrición mineral de las plantas superiores de Marschner. Vol. 89, Academic Press, Londres, 651. <https://www.elsevier.com/books/marschners-mineral-nutrition-of-higher-plants/marschner/978-0-12-384905-2>
- Martínez-Bravo, R. D., Ricker, M., Nava-Cruz, Y., Siebe, C. (2022). Mineral fertilization in tropical reforestation: seedling growth and survival of ten native tree species in Tabasco, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(1), 105-118. doi: 10.21829/myb.2022.2812269
- Martínez, D. E., Guiamet, J. J. (2004). Distortion of the SPAD 502 chlorophyll meter readings by changes in irradiance and leaf water status. *Agronomie*, 24(1), 41–46. <https://doi.org/10.1051/agro:2003060>
- Maza-Maza, J., Rodríguez-Caballero, E., Rodríguez-Lozano, B., Cantón, Y. (2025). Impact of deforestation on ecosystem functions in equatorial dry forests. *Trees, Forests and People*, 22, 101032. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.101032>
- Medina, H. H., Torres, J. J., Palacios, C. A., Ruiz, B. A., Martínez, M., Rengifo, L. (2020). Germination and growth of the tree *Handroanthus chrysanthus* (Bignoniaceae) under nursery conditions. *UNED Research Journal*, 12(2), e3175. <https://doi.org/10.22458/urj.v12i2.3175>
- Menes, P. A., Mohammed, G. H. (1995). Identifying the root collar on forest tree seedlings. *The Forestry Chronicle*, 71(3), 304–310. <https://doi.org/10.5558/tfc71304-3>
- Plants of the World Online (POWO). (2024). *Handroanthus chrysanthus* (Jacq.) S.O. Grose. Royal Botanic Gardens, Kew. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:77085066-1>
- Poorter, H., Garnier, E. (1999). Ecological significance of inherent variation in relative growth rate and its components. In F. I. Pugnaire & F. Valladares (Eds.), *Handbook of functional plant ecology* (2nd ed.). [10.1201/9781420007626-3](https://doi.org/10.1201/9781420007626-3)
- Rincón, G., N., Olarte, Q., M. A., Pérez, J. C. (2012). Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara

Semiprofesional. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 65 (1), pp, 6399-6405.

Rocha, A. C. P., Miranda, J. F., das Neves, L. B., Mendes, M. M., Amorim, A. S., Morais, G. S., Martins, J. P. R., da Silva, M. B., Gontijo, A. B. P. L., Falqueto, A. R. (2025). Effect of strobilurin fungicide on the initial growth of common bean plants. *Photosynthetica*, 63(2), 116–128. <https://doi.org/10.32615/ps.2025.017>

Suárez, J. C., Melgarejo, L. M., Durán, E. H., Di Rienzo, J. A., Casanoves, F. (2018). Non-destructive estimation of the leaf weight and leaf area in cacao (*Theobroma cacao* L.). *Scientia Horticulturae*, 229, 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.034>

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I.M., Murphy, A. (2015) *Fisiología y desarrollo de las plantas*. 6.ª edición, Sinauer Associates, Sunderland.

Toro, L., Torres-Romero, F., Salinas, S. M., Avella-Muñoz, A., Galatowisch, S., Secchi, S., Powers, J. S. (2024). Cost-effectiveness of management strategies in a nucleation experiment in a tropical dry forest. *Restoration Ecology*, 32 (3), e14094. <https://doi.org/10.1111/rec.14094>

Tsakaldimi, M., Giannaki, P., Ivetić, V., Kapsali, N., Ganatsas, P. (2021). Fertilization and shading trials to promote *Pinus nigra* seedlings' nursery growth under the climate change demands. *Sustainability*, 13(6), 3563. <https://doi.org/10.3390/su13063563>

Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., Guo, S. (2013). The Critical Role of Potassium in Plant Stress Response. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(4), 7370-7390. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>

Werden, L. K., Averill, C., Crowther, T. W., Calderón-Morales, E., Toro, L., Alvarado, J. P., Gutiérrez, L. M., Mallory, D. E., Powers, J. S. (2023). Below-ground traits mediate tree survival in a tropical dry forest restoration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 378(1867), Article 20210067. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0067>

Xie, X., Ge, Y., Walia, H., Yang, J., Yu, H. (2023). Leaf-counting in monocot plants using deep regression models. *Sensors*, 23(4), 1890. <https://doi.org/10.3390/s23041890>

Zhang, P., Zhang, G., Shang, X. (2022). Effect of different peat substitute substrates on the growth and quality of seedlings of *Handroanthus chrysanthus* (Jacq.) S.O. Grose. *Forests*, 13(10), f13101626. <https://doi.org/10.3390/f13101626>

Zhou, C., Liao, J., Pan, Z., Su, X., Xu, J., Li, N., Xu, Y. (2025). Morphological, physiological, hormonal, and transcriptomic analyses elucidate axillary bud development mechanisms in *Pinus yunnanensis*. *Industrial Crops and Products*, 238, Article 122413. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122413>

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por ser mi guía constante y por brindarme la fortaleza necesaria para culminar esta importante etapa de mi vida.

A mi hermana Yovani, por su apoyo incondicional, comprensión y por estar siempre presente en cada momento.

A mis padres y a mis queridos tíos Augusto y Jacky, por su amor, confianza y por motivarme siempre a seguir adelante y no rendirme.

Y con un cariño muy especial, a mi Layita, por su compañía fiel y por la alegría inigualable que me brindó durante todo este proceso.

Luz Karina Córdova García

Con gran alegría dedico esta tesis a mis padres y a mi hermano, quienes, con su apoyo, sus sacrificios diarios y su confianza absoluta en mí han sido el fundamento más sólido de todo este camino. Gracias por creer en mis sueños, por estar siempre presentes, por nunca soltar mi mano y por impulsarme a seguir adelante con su ejemplo de esfuerzo y perseverancia. Este logro, alcanzado tras trabajo y dedicación, también es de ustedes, porque sin su cariño y su respaldo constante no habría sido posible.

Janet Arely Togas Zurita

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestra más profunda gratitud a Dios, por su divina guía, fortaleza y bendiciones que nos acompañaron en cada etapa de la elaboración de este trabajo de investigación.

A nuestra familia, por el apoyo incondicional, la comprensión, la paciencia y la constante motivación que nos brindaron durante todo el proceso. Este logro también es reflejo de su amor y sacrificio.

A nuestra asesora, la Mg. Ing. Annick Estefany Huaccha Castillo, por su valiosa orientación, dedicación, compromiso y las importantes contribuciones técnicas y metodológicas que enriquecieron significativamente este estudio.

Extendemos igualmente nuestro sincero reconocimiento al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), por el valioso apoyo institucional y los recursos facilitados para el desarrollo de la investigación.

Finalmente, manifestamos nuestro especial agradecimiento al Mg. Ing. Franklin Hitler Fernández Zárate, por su generosa colaboración, compromiso y aportes fundamentales que contribuyeron de manera decisiva al éxito de este trabajo.

A todos ellos, nuestra más sincera y eterna gratitud.

Córdova García Luz Karina
Togas Zurita Janet Arely

ANEXOS

Anexo 1: Ficha de registro de parámetros

Nombre de la especie: *Handroanthus chrysanthus*

Fecha:

Tratamiento:

Repetición:

Nº de planta	Nº de hojas	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Concentración de clorofila
1	10	3.7	2.3	36.7
2	10	2.2	1.6	31
3	10	3.2	2.2	39.3
4	11	4.8	1.5	36.1
5	7	2.7	1.4	18.1
6	9	4.2	1.5	39.5
7	7	4.1	1.1	30.4
8	9	2.2	1.6	27
9	9	3.2	1.4	34.4
10	10	3.5	1.6	33.2
11	8	2.8	1.7	29.7
12	10	3.4	1.6	37.9
13	9	3.6	1.5	31.5
14	9	2.9	1.7	30.8
15	10	3.3	1.4	35.1
16	8	3	1.6	28.3
17	10	3.4	1.8	36.4
18	9	2.7	1.5	33.8
19	10	3.8	1.5	34
20	9	3.1	1.4	33.5
21	9	2.9	1.7	31.7
22	8	3.5	1.6	29.9
23	10	3.2	1.5	34.6
24	9	3	1.6	31.3
25	9	3.1	1.7	30.6
26	10	3.3	1.6	35.9
27	8	3	1.5	29.4
28	9	3.4	1.5	33.2
29	10	3.5	1.6	35
30	9	3	1.5	31.8
Promedio	9.1	3.2	1.6	32.9

Anexo 2: Evaluación del área foliar en plántulas**Nombre de la especie:** *Handroanthus chrysanthus***Fecha:****Tratamiento:** T0**Repetición:** R1

Plántula	Nº de hojas	Área foliar (cm²)
T0R1P1	1	4.552
T0R1P2	2	3.127
T0R1P3	3	4.063
T0R1P4	4	2.841
T0R1P5	5	2.915
T0R1P6	6	2.73
T0R1P7	7	2.598
T0R1P8	8	1.983
T0R1P9	9	0.831
T0R1P10	10	1
Total		26.64

Anexo 3: Biomasa seca de hojas, tallos, raíces y pecíolos en plántulas**Nombre de la especie:** *Handroanthus chrysanthus***Fecha:****Tratamiento:****Repetición:**

Código de planta	Hoja (cm)	Tallo (cm)	Raíz (cm)	Pecíolo (cm)
T0R1-P1	1.552	0.263	2.847	
T0R1-P2	1.84	0.258	4.06	0.043
T0R1-P3	1.085	0.181	1.68	0.123
T0R1-P4	1.473	0.225	2.965	0.074
T0R1-P5	1.522	0.237	2.732	0.086
T0R1-P6	1.401	0.228	2.914	0.081
T0R1-P7	1.563	0.244	2.811	0.072
T0R1-P8	1.423	0.217	2.951	0.085
T0R1-P9	1.472	0.229	2.784	0.079
T0R1-P10	1.505	0.236	2.877	0.09
Promedio	1.49	0.23	2.86	0.08

Anexo 4: panel fotográfico

a) Proceso de preparación y tamizado del sustrato para la cama de germinación



b) Desinfección del sustrato con formol



c) Selección de semilla de *H. chrysanthus*



d) Germinación de semilla de *H. chrysanthus*



e) Llenado de bolsas con sustrato (proporción 3:2:1 tierra agrícola : biochar : compost)



f) Plántulas de *H. chrysanthus* repicadas



g) Selección de plántulas de *H. chrysanthus* en un estado fitosanitario, para su posterior distribución por tratamiento y repetición



h) Pesaje del fertilizante aplicado en cada tratamiento



i) Fertilización de plántulas de *H. chrysanthus* post repique de 60 días



j) **Medición de variables en plántulas de *H. chrysanthus***



k) Selección de hojas de *H. chrysanthus* de para determinar el área foliar



l) Biomasa de *H. chrysanthus*, etiquetado y secado en estufa



m) Pesado de biomasa de seca de *H. chrysanthus*

