



Estudio arquitectónico del sistema radical de la balsa (*Ochroma pyramidale*) en plantaciones forestales tropicales.

Aldás García, Luis Sebastian

Departamento de Ciencias de la Vida y la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Agropecuario

Msc. Ing. Jiménez Pozo, Lenin Patricio

31 de julio del 2026

REPORTE DE VERIFICACIÓN DE CONTENIDO



Certificado de análisis

Compilatio Magister+ | ESPE-ECU

Estudio arquitectónico del sistema radical de la balsa (Ochroma

ID : 7e31c7c8f765c93fadb09704120a62e93d2d2f02



9%

Textos sospechosos

Nombre del fichero : Estudio arquitectónico del sistema radical de la balsa (Ochroma.txt

Tamaño del archivo original : 4,92 MB

Número de palabras : 27.592

Depositante : SUNGEY NAYNEE SANCHEZ LLAGUNO

Fecha de depósito : 21 de agosto de 2026

Tipo de carga : Interface

fecha de fin de análisis : 21 de agosto de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :



Similitudes

1%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA

7%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.

Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



Firma

Msc. Ing. Jiménez Pozo, Lenin Patricio

Director



Departamento de Ciencias de la Vida y Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de integración curricular: "**Estudio arquitectónico del sistema radical de la balsa (*Ochroma pyramidale*) en plantaciones forestales tropicales**" fue realizado por **Aldás García, Luis Sebastián**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Santo Domingo de los Tsáchilas, 31 de julio del 2026

Firma

Ing. Lenin Patricio Jiménez Pozo. Msc.

CC: 0400725347



Departamento de Ciencias de la Vida y Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Aldás García, Luis Sebastián**, con cédula de ciudadanía N° **2350996704**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: "**Estudio arquitectónico del sistema radical de la balsa (*Ochroma pyramidale*) en plantaciones forestales tropicales**", es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando adecuadamente las citas bibliográficas correspondientes.

Santo Domingo de los Tsáchilas, 31 de julio del 2026

Firma

Aldás García Luis Sebastian

C.C: 2350996704



Departamento de Ciencias de la Vida y Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Aldás García, Luis Sebastián**, con cédula de ciudadanía N° **2350996704**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: "**Estudio arquitectónico del sistema radical de la balsa (*Ochroma pyramidale*) en plantaciones forestales tropicales**", en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Santo Domingo de los Tsáchilas, 31 de julio del 2026

Firma

Aldás García Luis Sebastian

C.C: 2350996704

Dedicatoria

Primeramente, a Dios, a mi madre y a mi padre por el regalo de la vida. A mi familia, especialmente a mis hermanas, por ser el pilar de mi esfuerzo y motivación durante todo este camino universitario, y por su amor y aliento en los momentos de mayor exigencia. De manera especial, a mi pareja, por su paciencia, apoyo y comprensión incondicional, y por ser una fuente constante de motivación para culminar esta etapa. A mis compañeros y amigos, Anthony Leiva, Paulo Cueva, Daniel Loor, Alan Alcívar, Erick Balladares, Jaider Guaycal y Jhon Sabando, por su apoyo y compañerismo a lo largo de esta etapa universitaria. A mi director de tesis, Ing. Patricio Jiménez, por su valiosa orientación académica y su disposición constante para compartir sus conocimientos, determinantes para el desarrollo de esta investigación. A la empresa Balsebot Corp Cía. Ltda., por brindarme las facilidades y el acceso a sus plantaciones para el desarrollo de esta investigación. Finalmente, a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Sede Santo Domingo, por brindarme una formación integral que me permitió formarme como Ingeniero Agropecuario con sólidos valores profesionales y humanos.

Aldás García Luis Sebastian

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	3
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA	4
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN	5
Dedicatoria	6
Resumen	22
Abstract	23
Capítulo I	24
Introducción	24
Planteamiento del problema	26
Formulación del problema	26
Preguntas de investigación:	27
Objetivos	27
Objetivo general	27
Objetivos específicos	27
Justificación	28
Capítulo II	29
Estado del arte	29
Marco teórico	30
Fertilización mineral en plantaciones forestales	30

Urea (46-0-0) como fuente de nitrógeno	31
Fertilizante compuesto 10-30-10 como fuente de fósforo.....	32
12-11-18 (12-11-18 + S + Mg + micronutrientes)	33
Arquitectura del sistema radicular.....	34
Biomasa radicular y razón raíz:parte aérea.....	35
Ochroma pyramidale y su importancia agroproductiva.....	36
Fertilización y su relación con la densidad de la madera	37
Evaluación del sistema radicular mediante excavación y cateo	38
Índice de Calidad de Dickson (IQD)	39
Marco conceptual.....	40
Capítulo III	41
Metodología	41
Enfoque de investigación	41
Tipo y diseño de investigación	42
Ubicación del área de investigación	42
Ubicación política	42
Ubicación geográfica.....	43
Ubicación ecológica	43
Materiales	43
Materiales de campo.....	44
Materiales y equipos de laboratorio.....	44

Software.....	45
Insumos	45
Diseño experimental	45
Tratamientos evaluados	45
Dosis y aplicación	46
Sustento de la dosificación.....	47
Tipo de diseño.....	47
Características de la unidad experimental.....	48
Croquis	48
Análisis estadístico.....	49
Delimitación de parcelas	51
Protocolo de muestreo	51
Delimitación del área de excavación	51
Extracción del monolito	52
Procesamiento de muestras.....	53
Lavado y clasificación de raíces.....	53
Pesaje de biomasa fresca	53
Conservación de las muestras	53
Etiquetado y documentación de las muestras	54
Empaque y envío al laboratorio.....	54
Procesamiento en laboratorio.....	54

Escaneo digital de las muestras.....	54
Procesamiento digital.....	55
Secado y pesaje de biomasa	56
Variables radicales evaluadas.....	56
Variables morfológicas primarias	57
Variables de biomasa.....	58
Índices derivados	58
Variables dasométricas y mortalidad.....	58
Evaluación de mortalidad	58
Evaluación de variables dasométricas	59
Variables edáficas.....	59
Densidad aparente.....	60
Densidad real.....	61
<i>Porosidad</i>	61
<i>pH y CE</i>	61
Técnica e instrumento	62
Validación y confiabilidad del instrumento	62
Consideraciones éticas	63
Capítulo IV	63
Análisis y discusión de resultados.....	64
Caracterización edáfica del sitio experimental.....	64

Caracterización del material vegetal en la Toma de datos 0	65
Caracterización del material vegetal en la Toma de datos 1	68
Caracterización del material vegetal en la Toma de datos 2	71
Evolución temporal de las variables morfofuncionales	75
Análisis de varianza bifactorial de las variables morfofuncionales	78
<i>Altura de planta</i>	78
<i>Diámetro basal</i>	81
<i>Biomasa seca de la parte aérea</i>	84
<i>Biomasa seca de raíz</i>	86
<i>Biomasa seca total</i>	89
<i>Relación raíz:parte aérea</i>	91
<i>Área total</i>	94
<i>Volumen total</i>	96
<i>Número de puntas</i>	99
<i>SRL</i>	102
<i>SRA</i>	104
<i>Índice de Dickson</i>	107
Limitaciones del estudio	109
Capítulo V	110
Conclusiones	110
Recomendaciones	111

Referencias 112

Índice de tablas

Tabla 1

Descripción de los tratamientos 46

Tabla 2

Características de la unidad experimental..... 48

Tabla 3

Modelo de análisis de varianza bifactorial..... 50

Tabla 4

*Dosis de insumos aplicados durante el establecimiento de la
plantación* 50

Tabla 5

*Variables radicales evaluadas, unidad de medida y
justificación.* 56

Tabla 6

Propiedades físicas y químicas del suelo del sitio experimental..... 64

Tabla 7

*Biomasa seca y fresca de plántulas de Ochroma pyramidale
previo al establecimiento de la plantación (Toma de datos 0)* 65

Tabla 8

*Promedios de biomasa y variables dasométricas de plántulas
de Ochroma pyramidale al momento de la plantación (Toma de
datos 0)*..... 65

Tabla 9

Variables morfológicas radicales por clase de diámetro de

<i>plántulas de Ochroma pyramidale previo al establecimiento de la plantación (Toma de datos 0).</i>	66
--	----

Tabla 10

<i>Índices morfofuncionales derivados — Toma de datos 0.</i>	67
--	----

Tabla 11

<i>Biomasa seca y fresca de plántulas de Ochroma pyramidale (Toma de datos 1).</i>	68
--	----

Tabla 12

<i>Variables morfológicas radiculares por clase de diámetro de plántulas de Ochroma pyramidale (Toma de datos 1).</i>	69
---	----

Tabla 13

<i>Índices morfofuncionales derivados — Toma de datos 1.</i>	70
--	----

Tabla 14

<i>Índice de Calidad de Dickson — Toma de datos 1.</i>	70
--	----

Tabla 15

<i>Biomasa seca y fresca de plántulas de Ochroma pyramidale (Toma de datos 2).</i>	71
--	----

Tabla 16

<i>Variables morfológicas radiculares por clase de diámetro de plántulas de Ochroma pyramidale (Toma de datos 2).</i>	72
---	----

Tabla 17

<i>Índices morfofuncionales derivados — Toma de datos 2.</i>	73
--	----

Tabla 18

<i>Índice de Calidad de Dickson — Toma de datos 2.</i>	74
--	----

Tabla 19

<i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la</i>	
--	--

<i>variable Altura de planta.....</i>	<i>79</i>
---------------------------------------	-----------

Tabla 20

<i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Altura de planta.....</i>	<i>79</i>
---	-----------

Tabla 21

<i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Altura de planta.....</i>	<i>80</i>
--	-----------

Tabla 22

<i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Diámetro basal.....</i>	<i>81</i>
---	-----------

Tabla 23

<i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Diámetro basal.....</i>	<i>82</i>
---	-----------

Tabla 24

<i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Diámetro basal.....</i>	<i>82</i>
--	-----------

Tabla 25

<i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Biomasa seca de la parte aérea.</i>	<i>84</i>
--	-----------

Tabla 26

<i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Biomasa seca de la parte aérea.</i>	<i>85</i>
--	-----------

Tabla 27

<i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Biomasa seca de la parte aérea.....</i>	<i>85</i>
--	-----------

Tabla 28

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Biomasa seca de raíz. 87

Tabla 29

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Biomasa seca de raíz. 87

Tabla 30

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Biomasa seca de raíz..... 87

Tabla 31

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Biomasa seca total. 89

Tabla 32

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Biomasa seca total. 90

Tabla 33

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Biomasa seca total. 90

Tabla 34

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Relación raíz/parte aérea..... 92

Tabla 35

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Relación raíz/parte aérea..... 92

Tabla 36

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción

Tratamiento×Toma de datos en la variable Relación raíz/parte

aérea..... 93

Tabla 37

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la

variable Área total. 94

Tabla 38

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la

variable Área total. 95

Tabla 39

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción

Tratamiento×Toma de datos en la variable Área total. 95

Tabla 40

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la

variable Volumen total..... 97

Tabla 41

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la

variable Volumen total..... 97

Tabla 42

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción

Tratamiento×Toma de datos en la variable Volumen total..... 98

Tabla 43

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la

variable Número de puntas. 99

Tabla 44

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la

<i>variable Número de puntas.</i>	<i>100</i>
--	------------

Tabla 45

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción

<i>Tratamiento×Toma de datos en la variable Número de puntas.</i>	<i>100</i>
--	------------

Tabla 46

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la

<i>variable SRL.</i>	<i>102</i>
---------------------------	------------

Tabla 47

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la

<i>variable SRL.</i>	<i>103</i>
---------------------------	------------

Tabla 48

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción

<i>Tratamiento×Toma de datos en la variable SRL.</i>	<i>103</i>
---	------------

Tabla 49

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la

<i>variable SRA.</i>	<i>105</i>
---------------------------	------------

Tabla 50

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la

<i>variable SRA.</i>	<i>105</i>
---------------------------	------------

Tabla 51

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción

<i>Tratamiento×Toma de datos en la variable SRA.</i>	<i>105</i>
---	------------

Tabla 52

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la

<i>variable Índice de Calidad de Dickson.</i>	<i>107</i>
--	------------

Tabla 53

<i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Índice de Calidad de Dickson.....</i>	<i>108</i>
---	------------

Tabla 54

<i>Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Índice de Calidad de Dickson.....</i>	<i>108</i>
--	------------

Índice de figuras

Figura 1

Localización Geográfica De La Investigación..... 43

Figura 2

Croquis de los tratamientos..... 48

Figura 3

Croquis del Área neta de la UE. 49

Figura 4

Evolución de la biomasa seca total y la relación raíz:parte aérea (R:A) por tratamiento entre la *Toma de datos 0*, la *Toma de datos 1* y la *Toma de datos 2* de plántulas de *Ochroma pyramidale*..... 75

Figura 5

Evolución de SRL y SRA por tratamiento (*Toma de datos 1* y *2*) en plántulas de *Ochroma pyramidale*..... 76

Figura 6

Perfil multivariable por tratamiento (*Toma de datos 1*) en plántulas de *Ochroma pyramidale*. ... 76

Figura 7

Perfil multivariable por tratamiento (*Toma de datos 2*) en plántulas de *Ochroma pyramidale*. ... 78

Figura 8

Altura de planta según Tratamiento y época de muestreo..... 81

Figura 9

Diámetro basal según Tratamiento y época de muestreo..... 83

Figura 10

Biomasa seca de la parte aérea de la planta según Tratamiento y época de muestreo..... 86

Figura 11. Biomasa seca de la raíz según Tratamiento y época de muestreo. 88

Figura 12

Biomasa seca total según Tratamiento y época de muestreo. 91

Figura 13

Relación R:A según Tratamiento y época de muestreo. 93

Figura 14

Área total según Tratamiento y época de muestreo..... 96

Figura 15

Volumen total según Tratamiento y época de muestreo. 98

Figura 16

Número de puntas según Tratamiento y época de muestreo. 101

Figura 17

SRL según Tratamiento y época de muestreo. 104

Figura 18

SRA según Tratamiento y época de muestreo. 106

Figura 19

Índice de Dickson según Tratamiento y época de muestreo. 109

Resumen

La presente investigación evaluó la arquitectura radicular de *Ochroma pyramidale* (balsa) en respuesta a la fertilización nitrogenada, fosfórica y balanceada durante la etapa de establecimiento de plantaciones forestales de Balsebot Corp Cía. Ltda., en la parroquia Luz de América, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con cuatro tratamientos (T0: testigo absoluto; T1: fertilizante fosfórico 10-30-10; T2: urea; T3: 12-11-18, manejo comercial vigente de la empresa) y dos repeticiones, con dos *Tomas* de datos destructivas realizadas durante el período experimental. El sistema radicular fue escaneado y analizado mediante el software IJ_Rhizo, evaluándose doce variables morfofuncionales, dasométricas y de calidad de plántula, entre ellas biomasa y longitud de raíces finas ($\leq 0,5$ mm), longitud radicular específica (SRL), área radicular específica (SRA), razón raíz:parte aérea, altura total, diámetro basal e Índice de Calidad de Dickson (IQD). Los resultados mostraron que la fertilización incrementó significativamente el área radicular total frente al testigo absoluto ($p < 0,05$), sin diferencias estadísticas entre las tres fuentes evaluadas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). En biomasa seca de raíz, los tratamientos fosfórico y balanceado superaron al testigo y a la urea, mientras que en longitud radicular la ventaja se desplazó en el tiempo: la urea dominó en la primera *Toma de datos* y el fósforo en la segunda. La urea generó la mayor altura de planta, pero el menor diámetro basal y el índice de calidad más bajo, mientras que el fósforo lideró ambos indicadores de calidad estructural. Se concluye que la arquitectura radicular de *Ochroma pyramidale* responde de forma diferenciada según la fuente nutricional aplicada, y que el fósforo constituye una alternativa con beneficios adicionales sobre la calidad de la plántula frente al manejo comercial actualmente empleado por la empresa.

Palabras clave: *Ochroma pyramidale*, fertilización fosfórica, arquitectura radicular, Índice de Calidad de Dickson, plantaciones forestales.

Abstract

The present research evaluated the root architecture of *Ochroma pyramidale* (balsa) in response to nitrogen, phosphorus, and balanced fertilization during the establishment stage of forest plantations at Balsebot Corp. Cía. Ltda., in the Luz de América parish, Santo Domingo de los Tsáchilas province. A completely randomized design (CRD) was used with four treatments (T0: absolute control; T1: phosphorus fertilizer 10-30-10; T2: urea; T3: 12-11-18, the company's current commercial management) and two replications, with two destructive data collections carried out during the experimental period. The root system was scanned and analyzed using IJ_Rhizo software, evaluating twelve morphofunctional, dasometric, and seedling quality variables, including biomass and length of fine roots (≤ 0.5 mm), specific root length (SRL), specific root area (SRA), root-to-shoot ratio, total height, basal diameter, and Dickson Quality Index (DQI). The results showed that fertilization significantly increased total root area compared to the absolute control ($p < 0.05$), with no statistically significant differences among the three fertilizer sources evaluated according to Tukey's test ($\alpha = 0.05$). In root dry biomass, the phosphorus and balanced treatments outperformed the control and urea, while in root length the advantage shifted over time: urea dominated at the first data collection and phosphorus at the second. Urea produced the greatest plant height but the lowest basal diameter and quality index, whereas phosphorus led both structural quality indicators. It is concluded that the root architecture of *Ochroma pyramidale* responds differently depending on the nutrient source applied, and that phosphorus constitutes an alternative with additional benefits for seedling quality compared to the commercial management currently employed by the company.

Keywords: *Ochroma pyramidale*, phosphorus fertilization, root architecture, Dickson Quality Index, forest plantations.

Capítulo I

Introducción

La balsa (*Ochroma pyramidale*) es hoy una de las especies forestales de mayor peso económico para Ecuador. Según la Asociación Ecuatoriana de Industriales de la Madera (AIMA), en 2020 sus exportaciones alcanzaron USD 570 millones de los USD 855 millones que exportó todo el sector forestal, un 66,66% del total, cifra que se duplicó entre 2019 y 2020 (Cadena, 2021). Para 2022, el país exportó USD 77,57 millones en balsa, el 89% con destino a China, principal demandante mundial gracias a su programa de construcción de aerogeneradores eólicos (Cadena, 2021).

La industria eólica consume cerca del 70% del volumen de balsa comercializado en el mundo, y Ecuador provee alrededor del 95% de esa oferta internacional. Entre 2020 y 2021 esta demanda impulsó el establecimiento de 7 500 hectáreas adicionales de cultivo en el país (WWF-Ecuador, 2022).

Pese a esta importancia productiva, se sabe poco sobre el sistema radicular de la balsa en plantaciones forestales. La mayoría de las investigaciones se ha concentrado en la parte aérea de los árboles, dejando de lado el crecimiento, la distribución y la función del sistema radicular como órgano de sostén, nutrición y reserva (Morales, s.f.). En *Ochroma pyramidale* no se conoce cómo se desarrolla la arquitectura radicular durante las primeras etapas de establecimiento en campo, el período en que la planta define los patrones de exploración del suelo que condicionan su desarrollo posterior.

Esta limitación no es exclusiva de la balsa: el estudio de raíces en general enfrenta dificultades metodológicas propias, como la dificultad de extraer sistemas radiculares completos sin pérdida de material, el tiempo que exige el trabajo y la alta variabilidad entre individuos (Morales, s.f.). Esto explica en parte por qué hay tan poca información sobre

especies forestales tropicales de rápido crecimiento.

La arquitectura del sistema radicular (RSA) define la forma y disposición de las raíces de una planta: dónde se ubican en el suelo y cómo se conectan entre sí (Freschet et al., 2021). Su función va más allá del simple sostén: interviene en el intercambio de agua y nutrientes entre suelo y planta, en el transporte de señales internas, y en el anclaje y la protección del suelo frente a la erosión (Freschet et al., 2021).

La absorción de nutrientes poco móviles, como el fósforo, depende de que las raíces se ramifiquen y se alarguen para colonizar zonas del suelo aún no explotadas (Freschet et al., 2021). Como las necesidades de la planta cambian con el tiempo y las condiciones del suelo varían en espacio y tiempo, la arquitectura radicular es altamente plástica y se adapta al entorno de crecimiento. Por eso entender su desarrollo en las etapas iniciales de establecimiento ayuda a interpretar cómo la planta organiza su exploración y absorción del subsuelo desde los primeros meses.

La disponibilidad de nitrógeno y fósforo es determinante para el crecimiento y la supervivencia de las plantas en sus primeras etapas: las plántulas son especialmente sensibles a cualquier cambio en estos recursos, lo que afecta directamente su reclutamiento, crecimiento y supervivencia (Cárate Tandalla et al., 2025). En plantaciones forestales tropicales es común fertilizar con urea como fuente de nitrógeno y con fertilizantes fosfóricos como el 10-30-10 durante el establecimiento, buscando acortar el período improductivo inicial y mejorar el anclaje temprano de las plantas.

Sin embargo, los estudios sobre fertilización en balsa se han centrado en plantas de 18 meses o más (Fernández, 2012) y no documentan la respuesta del sistema radicular en los primeros meses post-trasplante, justo cuando se define su arquitectura. Ese vacío limita optimizar la fertilización con base en evidencia real del comportamiento de las raíces durante el

establecimiento.

Planteamiento del problema

Ecuador es el principal proveedor mundial de madera de balsa (*Ochroma pyramidale*), con cerca del 95% de la oferta internacional y un abastecimiento equivalente al 70% de la demanda de la industria eólica global (Cadena, 2021). Esta posición impulsó una rápida expansión del cultivo: 7 500 hectáreas adicionales solo entre 2020 y 2021 (WWF-Ecuador, 2022). Pero ese crecimiento productivo no vino acompañado de un desarrollo similar en el conocimiento técnico sobre el sistema radicular de la especie. La investigación forestal nacional se ha centrado en la parte aérea de los árboles, dejando de lado el crecimiento, la distribución y la función del sistema radicular como órgano de sostén, nutrición y reserva (Morales, s.f.).

En Santo Domingo de los Tsáchilas, una de las siete provincias con mayor concentración de plantaciones de balsa del país (Cañadas-López et al., 2019), el manejo silvicultural de la especie carece de herramientas cuantitativas que respalden las decisiones de fertilización durante el establecimiento. Existen recomendaciones generales sobre fertilización nitrogenada y fosfórica en plantaciones forestales tropicales, pero los estudios específicos en *Ochroma pyramidale* se han enfocado en plantas de 18 meses o más (Fernández, 2012), sin documentar la respuesta radicular en los primeros meses post-trasplante, justo cuando se define la arquitectura de la especie (Freschet et al., 2021).

En las plantaciones de Balsebot Corp Cía. Ltda., en la parroquia Luz de América, la empresa fertiliza actualmente con un compuesto de liberación gradual (12-11-18), sin evidencia local de si esta práctica favorece el desarrollo radicular frente a otras fuentes como la urea o el 10-30-10, ni de si supera a la ausencia total de fertilización. Esta falta de información le impide optimizar sus prácticas de fertilización con base en el comportamiento real de las raíces, en vez de recomendaciones generales tomadas de plantas de mayor edad.

Formulación del problema

¿Cómo responde la arquitectura del sistema radicular de *Ochroma pyramidale* a la aplicación de fuentes de fertilización nitrogenada, fosfórica y balanceada durante la etapa de establecimiento en las plantaciones de Balsebot Corp Cía. Ltda., en la parroquia Luz de América, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas?

Preguntas de investigación:

- ¿Existen diferencias en la biomasa y área superficial de las raíces entre los tratamientos de fertilización evaluados?
- ¿Cómo influyen las distintas fuentes de fertilización sobre los índices morfofuncionales del sistema radicular (SRL, SRA y razón raíz:parte aérea)?
- ¿Las fuentes de fertilización evaluadas (10-30-10, 46-0-0 y 12-11-18) superan la ausencia total de fertilización (testigo absoluto) en el desarrollo del sistema radicular?

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la arquitectura del sistema radical de la balsa (*Ochroma pyramidale*) en plantaciones forestales tropicales.

Objetivos específicos

- Comparar la biomasa y área superficial de las raíces entre los tratamientos de fertilización evaluados.
- Determinar el efecto de los tratamientos de fertilización sobre los índices morfofuncionales (SRL, SRA, razón raíz:parte aérea) de *Ochroma pyramidale*.
- Evaluar el efecto de los tratamientos de fertilización sobre las variables dasométricas (altura total, diámetro basal) y el Índice de Calidad de Dickson (IQD) de las plántulas de *Ochroma pyramidale*.

Justificación

Esta investigación se justifica, desde el punto de vista teórico, porque ayuda a llenar un vacío de conocimiento tanto nacional como internacional: se sabe poco sobre el comportamiento del sistema radicular de *Ochroma pyramidale* en las primeras etapas de establecimiento en campo. La mayoría de los estudios forestales se han centrado en la parte aérea de la especie (Morales, s.f.), y los pocos estudios de fertilización en balsa se limitan a plantas de 18 meses o más (Fernández, 2012). Esta tesis aporta evidencia sobre la arquitectura radicular durante el período en que la planta define sus patrones de exploración del suelo, información útil tanto para la comunidad forestal como para futuras investigaciones sobre nutrición mineral en especies de rápido crecimiento.

Desde el aspecto práctico, tiene una aplicación directa para Balsebot Corp Cía. Ltda., empresa donde se desarrolló el estudio. Al comparar su manejo nutricional actual (12-11-18) frente a fuentes alternativas de nitrógeno y fósforo, y frente a un testigo sin fertilización, los resultados le permitirán tomar decisiones basadas en evidencia local, optimizar la inversión en fertilizantes durante el establecimiento y mejorar el anclaje y desarrollo temprano de sus plantas.

Desde el aspecto social, la investigación beneficia indirectamente al sector forestal de Santo Domingo de los Tsáchilas y de la región costera, donde la balsa es un cultivo de creciente peso económico. Generar información técnica sobre fertilización en etapas tempranas puede mejorar la productividad de las plantaciones de la zona, con beneficios para productores, técnicos agropecuarios y la cadena de valor de la madera de balsa, cuya demanda internacional sigue en expansión, en particular desde la industria eólica (Cadena, 2021).

Desde el punto de vista metodológico, la investigación propone un protocolo para evaluar la arquitectura radicular en etapas tempranas de establecimiento, mediante excavación

del monolito completo, procesamiento digital de imágenes con IJ_Rhizo y clasificación funcional por clase de diámetro. Este protocolo puede replicarse en investigaciones futuras sobre otras especies forestales tropicales de rápido crecimiento, y contribuye a estandarizar metodologías de bajo costo y accesibles para el estudio de sistemas radiculares en campo.

Capítulo II

Estado del arte

El estudio de raíces en plantaciones forestales ha quedado históricamente en segundo plano frente al análisis de la parte aérea, dejando vacíos sobre la morfología, distribución y función del sistema subterráneo. Morales (s.f.) señala que la dificultad de extracción, el tiempo que exige el trabajo y la alta variabilidad entre individuos han reducido el interés científico en este componente, sobre todo en las etapas iniciales de establecimiento de especies de rápido crecimiento como *Ochroma pyramidale*.

La arquitectura del sistema radicular (RSA) determina cómo se distribuyen las raíces en el suelo y su capacidad de absorber agua y nutrientes. Freschet et al. (2021) señalan que la RSA tiene alta plasticidad morfológica frente a las condiciones del suelo y la disponibilidad de recursos, por lo que intervenciones como la fertilización pueden modificar de forma significativa la distribución y biomasa radicular durante el establecimiento.

El nitrógeno regula cómo la planta reparte biomasa entre la parte aérea y la raíz. Yavitt et al. (2011) encontraron que la fertilización con urea en bosque húmedo tropical redujo la inversión en raíces finas al aliviarse la limitación nitrogenada, un patrón que también se observó en bosque afrotropical, donde la adición de nitrógeno redujo hasta un 36% la biomasa de raíces finas.

El fósforo, en cambio, se asocia con incrementos en la productividad radicular: en la Amazonía Central, su adición aumentó en un 23% la productividad de raíces finas. En plantaciones forestales en establecimiento, los fertilizantes fosfóricos como el 10-30-10 son de

uso común por su alta solubilidad y liberación rápida de fosfato.

Los estudios sobre fertilización en *Ochroma pyramidale* se limitan a plantas de 18 meses o más y no incluyen variables radicales (Fernández, 2012). Un estudio reciente en *Ochroma lagopus* con tratamientos N-P-K mostró que los nutrientes se redistribuyen entre órganos según el fertilizante aplicado, con cambios en la razón P/K en raíces. En conjunto, la literatura revisada confirma el vacío de información sobre el efecto de la fertilización mineral en la arquitectura radicular de la balsa durante el establecimiento, lo que justifica esta investigación.

Marco teórico

Fertilización mineral en plantaciones forestales

La fertilización mineral consiste en añadir nutrientes inorgánicos al suelo para mejorar su capacidad de sostener el crecimiento vegetal. En plantaciones forestales tropicales, aplicarla durante el establecimiento es especialmente importante porque más del 50% de los suelos tropicales están fuertemente meteorizados y son escasos en nitrógeno y fósforo disponibles (Cusack et al., 2021).

Según la teoría de limitación de recursos, cuando los nutrientes limitan el crecimiento más que los recursos aéreos, la planta destina más carbono a la biomasa radicular, lo que eleva la razón raíz:tallo. Por eso la fertilización con fuentes nitrogenadas o fosfóricas modifica tanto el crecimiento aéreo como la arquitectura subterránea, con efectos distintos según el nutriente aplicado (Cusack et al., 2021).

En plantaciones de *Ochroma pyramidale*, se recomienda fertilizar sobre todo durante el primer año de establecimiento. Las aplicaciones deben coincidir con el inicio de las lluvias, para asegurar la disponibilidad de nutrientes en el suelo, y hacerse una o dos veces al año para evitar intoxicar la planta por exceso (Fernández, 2012).

Urea (46-0-0) como fuente de nitrógeno

La urea (46-0-0) es el fertilizante nitrogenado sólido con mayor concentración de nitrógeno disponible en el mercado, con 46% de N en forma amídica. Al incorporarse al suelo, la enzima ureasa cataliza su hidrólisis y libera amonio (NH_4^+) y dióxido de carbono; este amonio luego se oxida a nitrato (NO_3^-), la forma más móvil y disponible para la planta, aunque el proceso también libera protones que acidifican el suelo poco a poco (Larios-González et al., 2021).

Aplicada directamente en el hoyo de plantación, en contacto con suelo húmedo, más del 90% de la urea se hidroliza en los primeros 2 a 5 días bajo temperaturas tropicales de 25 a 35 °C (Lasisi y Akinremi, 2021). Sin embargo, esta velocidad depende de la actividad ureasa del suelo, la temperatura y el contenido de agua, y se ralentiza en suelos secos o de pH extremo (Cabrera et al., 1991).

El amonio queda retenido temporalmente en los coloides del suelo y bacterias nitrificantes de los géneros *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* lo oxidan a nitrato; en condiciones tropicales con humedad adecuada, esto ocurre en 2 a 4 semanas (Fisher, 1958; Brady y Weil, 2008). El nitrato es la forma que la mayoría de las especies forestales prefiere absorber, mediante transportadores de alta afinidad que le cuestan energía a la planta (Torres y Portugal, 2018). Con nitrógeno disponible, la planta gana crecimiento y vigor; con déficit, pierde área foliar y capacidad fotosintética (Torres y Portugal, 2018).

En bosques tropicales húmedos, añadir nitrógeno como urea cambia la dinámica de las raíces finas: al aliviarse la limitación nitrogenada, la planta invierte menos en su red absorbente y redirige carbono hacia la parte aérea. Yavitt et al. (2011) documentaron esto en bosque húmedo tropical de Panamá, donde la biomasa de raíces finas fue significativamente menor en las parcelas con nitrógeno añadido.

El exceso de NH_4^+ inhibe la absorción de K^+ y Ca^{2+} por competencia en los transportadores de membrana, y la nitrificación asociada acidifica el suelo progresivamente,

pudiendo bajar el pH hasta una unidad con aplicaciones repetidas (Yavitt et al., 2011). Su mineralización o absorción se bloquea con pH del suelo menor a 5,0, anegamiento temporal, déficit hídrico severo, o temperaturas del suelo por debajo de 10 °C (Fisher, 1958).

Como el nitrógeno se pierde continuamente por lixiviación y volatilización, la refertilización con urea en plantaciones tropicales en establecimiento debería hacerse cada 60 a 90 días durante el período lluvioso, ajustando la frecuencia según el régimen hídrico del sitio.

Fertilizante compuesto 10-30-10 como fuente de fósforo

El 10-30-10 es una formulación compuesta que aporta 10% de nitrógeno, 30% de fósforo (como P_2O_5) y 10% de potasio (como K_2O). Su alta concentración fosfórica lo orienta principalmente al desarrollo radicular durante el establecimiento. En las formulaciones más distribuidas en Ecuador, el fósforo proviene de fosfato monoamónico (MAP) o superfosfato triple, ambos de alta solubilidad y liberación rápida de fosfato ($H_2PO_4^-$). Aplicado en el hoyo de plantación, el fosfato se libera en solución dentro de las primeras horas de contacto con la humedad del suelo. Pero, a diferencia del nitrógeno, esa liberación rápida no significa disponibilidad sostenida: el fósforo no se mineraliza desde una forma orgánica, sino que se libera de la sal y queda disponible en solución o se fija según las condiciones del suelo.

El fósforo es poco móvil y se adsorbe con facilidad a los óxidos de hierro y aluminio de los suelos tropicales intemperizados, así que las raíces deben crecer activamente hacia nuevas zonas del suelo para acceder a él (Cusack et al., 2021). En Oxisoles y Ultisoles, que predominan en buena parte de Santo Domingo de los Tsáchilas, la fijación fosfórica puede ser muy alta y reducir drásticamente la disponibilidad del P aplicado en pocas semanas (Sánchez y Salinas, 1981). La ventana de máxima disponibilidad está entre pH 6,0 y 7,0: por debajo de 5,5 predominan fosfatos de hierro y aluminio insolubles, y por encima de 7,5 se forman fosfatos cálcicos poco solubles (Brady y Weil, 2008).

Como el fósforo es inmóvil, su absorción depende de que las raíces absorbentes crezcan hacia zonas del suelo aún no agotadas, tomando el fosfato como $H_2PO_4^-$ o HPO_4^{2-}

mediante transportadores de alta afinidad concentrados en las raíces más finas (Marschner, 2012). Cusack et al. (2021) reportaron que la adición de fósforo aumentó un 23% la productividad de raíces finas en la Amazonía Central.

Los antagonismos más relevantes del 10-30-10 vienen de tener tres macronutrientes a la vez: el exceso de NH_4^+ puede inhibir la absorción de K^+ por competencia en los transportadores de membrana (Marschner, 2012), y el fósforo en concentraciones altas puede inducir deficiencias de zinc al precipitarlo como fosfato de zinc insoluble (Tisdale et al., 1993). Las condiciones que bloquean su disponibilidad son las mismas del fósforo en general: pH extremo, alta proporción de arcillas oxídicas, déficit hídrico y anegamiento temporal.

Por la alta capacidad de fijación de los suelos tropicales, la refertilización fosfórica no debería hacerse antes de los 90 a 120 días tras la aplicación inicial, tiempo mínimo para evaluar la respuesta de la planta sin saturar los sitios de adsorción del suelo sin beneficio agronómico adicional.

12-11-18 (12-11-18 + S + Mg + micronutrientes)

12-11-18 es un fertilizante compuesto en prills que aporta 12% de nitrógeno total, 11% de P_2O_5 , 18% de K_2O , 8% de azufre, 2,7% de magnesio y micronutrientes (Fe, Mn, Zn, B, Cu) en concentraciones traza (Yara International, 2024). Su rasgo distintivo es que el nitrógeno viene en dos formas, nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), lo que genera una liberación gradual: el nitrato queda disponible apenas se disuelve el prill en el hoyo de plantación, mientras que el amonio actúa como reserva de liberación más lenta, ya que necesita nitrificarse primero, un proceso de 2 a 4 semanas en condiciones tropicales (Yara International, 2024; Fisher, 1958). Parte del fósforo se formula como polifosfatos, lo que según el fabricante reduce algo las pérdidas por fijación frente a fuentes de fosfato simple (Yara International, 2024), aunque su disponibilidad real sigue dependiendo del pH y la capacidad de adsorción del suelo, con el mismo intervalo de refertilización de 90 a 120 días que otras fuentes fosfóricas.

El potasio (18% K_2O) se libera como K^+ en solución rápidamente tras la aplicación; su

disponibilidad suele ser alta, aunque en suelos con baja capacidad de intercambio catiónico puede lixiviarse con lluvias intensas. Entre los antagonismos iónicos más relevantes está la competencia entre K^+ en alta concentración y Ca^{2+} o Mg^{2+} por los sitios de absorción radicular, mitigada en parte por el Mg de la propia formulación, además de la competencia entre NH_4^+ y K^+ en los transportadores de membrana (Marschner, 2012). Se recomienda refertilizar cada 60 a 90 días para el componente nitrogenado y cada 90 a 120 días para el fosfórico, aunque la disponibilidad inmediata del NO_3^- hace que la respuesta inicial de la planta pueda ser más rápida que con fuentes cuyo nitrógeno necesita hidrolizarse y nitrificarse antes, como la urea o el 10-30-10.

Arquitectura del sistema radicular

La arquitectura del sistema radicular (RSA) define la forma y estructura tridimensional de las raíces de una planta: dónde se ubican en el suelo y cómo se conectan entre sí. Interviene en el intercambio de agua y nutrientes entre suelo y planta, en el transporte de señales internas, y en el anclaje y la protección del suelo contra la erosión (Freschet et al., 2021). La absorción de nutrientes poco móviles, como el fósforo, depende de que las raíces se ramifiquen y se alarguen para colonizar zonas del suelo aún no agotadas.

En este estudio se usó una clasificación funcional de tres grupos según el diámetro, configurable en el software IJ_Rhizo: raíces absorbentes ($\leq 0,5$ mm), responsables de la mayor parte de la absorción de agua y nutrientes, y las más sensibles a cambios en la disponibilidad de fósforo; raíces de transporte (0,5–2,0 mm), que conducen los solutos hacia los órganos aéreos; y raíces estructurales ($> 2,0$ mm), encargadas del soporte mecánico, el almacenamiento de reservas y la conducción a larga distancia. Esta clasificación tripartita refina el criterio binario tradicional de raíces finas/gruesas (umbral único de 2 mm), muy usado en campo por su practicidad (Freschet et al., 2021), y permite distinguir con mayor precisión la fracción realmente responsable de la absorción activa —las raíces absorbentes— de la fracción de transporte, ambas agrupadas bajo el umbral tradicional de raíz fina.

Un rasgo clave de la RSA es su alta plasticidad morfológica: la planta modifica activamente la distribución, longitud y biomasa de sus raíces según las condiciones del suelo y la disponibilidad de recursos. Cuando el agua o los nutrientes son limitantes, la planta destina más carbono al sistema radicular y aumenta su razón raíz:parte aérea para explorar más volumen de suelo; cuando los recursos abundan, esta inversión baja y el carbono se redirige a la parte aérea (Cusack et al., 2021). Por esta plasticidad, la fertilización con las tres fuentes evaluadas en este estudio puede modificar de forma distinta la densidad, distribución y composición funcional de las raíces durante el establecimiento.

Para saber si un tratamiento favorece más la formación de raíces absorbentes que otro, la variable adecuada es la longitud y el área superficial de la clase $\leq 0,5$ mm, no un conteo de unidades discretas, ya que el método de esqueletización de IJ_Rhizo cuantifica la red radicular como un continuo de longitud por clase de diámetro y no identifica raíces individuales con inicio y fin definidos (Pierret et al., 2013).

Biomasa radicular y razón raíz:parte aérea

La biomasa radicular es la masa seca acumulada en el sistema de raíces, y su medición permite estimar cuánta energía invierte la planta en explorar y captar recursos del suelo. La razón raíz:parte aérea (R:A) relaciona la biomasa seca subterránea total con la biomasa seca aérea total, y funciona como indicador de cómo la planta reparte carbono entre dos órganos con funciones opuestas: la raíz, que capta agua y nutrientes, y la parte aérea, que capta luz y realiza la fotosíntesis. Esta razón no es fija, sino plástica: cambia según la disponibilidad de recursos del suelo, la edad de la planta y las condiciones del sitio, lo que la convierte en un rasgo muy sensible para diagnosticar estudios de fertilización. La fracción de masa radicular se calcula dividiendo la biomasa subterránea entre la biomasa total de la planta, y la R:A se obtiene dividiendo la biomasa de la raíz entre la de la parte aérea, en g g^{-1} (Freschet et al., 2021).

En plántulas de árboles tropicales, el reparto de biomasa entre raíz y la parte aérea

responde de forma distinta según haya nitrógeno, fósforo o potasio disponibles en el suelo. En un experimento factorial de fertilización N-P-K a largo plazo en bosque tropical húmedo de Panamá, la adición de potasio redujo significativamente la razón raíz:parte aérea en plántulas de cinco especies tropicales, mientras que el nitrógeno y el fósforo por separado no la modificaron de forma significativa. Esto coincide con la hipótesis de partición óptima: la planta invierte menos en raíces cuando el recurso limitante se vuelve más disponible, y redirige los fotosintatos hacia el crecimiento aéreo. La combinación de N y P sí aumentó de forma significativa la tasa de crecimiento en altura, lo que sugiere que la biomasa total responde más a la interacción entre nutrientes que a un solo elemento limitante (Santiago et al., 2012).

A escala global, los metaanálisis confirman que añadir nutrientes altera de forma consistente cómo las plántulas tropicales distribuyen su biomasa entre la parte aérea y la subterránea. La fertilización fosfórica fue el único tratamiento individual que aumentó de forma significativa la biomasa radicular, en un 17%, mientras que el nitrógeno no tuvo efectos significativos o incluso se asoció negativamente con la biomasa subterránea. Esto refleja que, ante más nutrientes disponibles, las plántulas priorizan el crecimiento de la parte aérea sobre el de la raíz, y reducen su razón R:A porque necesitan explorar menos el suelo. Para especies de rápido crecimiento como *Ochroma pyramidale* en etapa de establecimiento, medir la biomasa radicular y la razón R:A bajo distintos regímenes de fertilización nitrogenada y fosfórica es clave para entender cómo la fertilización cambia la estrategia de adquisición de recursos en los primeros meses de desarrollo en campo (Cárate Tandalla et al., 2025).

***Ochroma pyramidale* y su importancia agroproductiva**

Ochroma pyramidale (Cav. ex Lam.) Urb., conocida como balsa, pertenece a la familia Bombacaceae. Es un árbol heliófilo de tamaño mediano a grande, nativo de los bosques neotropicales, con distribución natural desde el sur de México hasta Bolivia y las Antillas. Tiene un fuste recto y cilíndrico de entre 25 y 30 m de altura y 70 a 100 cm de diámetro, copa amplia

y aparasolada, raíces tablares en individuos maduros y corteza lisa grisácea. Su madera tiene una densidad excepcionalmente baja ($0,05$ a $0,14 \text{ g cm}^{-3}$), lo que le da alta flotabilidad y baja conductividad térmica, atributos que explican su valor industrial. Es una especie pionera de rápido crecimiento: sus plántulas alcanzan entre $1,8$ y $4,5 \text{ m}$ al final del primer año y hasta 11 m al segundo, y pueden llegar a un DAP (diámetro a la altura del pecho) de 40 cm en solo 5 a 6 años bajo condiciones favorables: suelo aluvial profundo y fértil, precipitación entre $1\,500$ y $3\,000 \text{ mm}$ anuales y temperaturas medias de 22 a 27 °C (Fernández, 2012).

Ecuador es el principal proveedor mundial de madera de balsa: abasteció el 80% de la demanda global en 2001 y el 89% en 2008, año en que exportó $137\,956 \text{ m}^3$, sobre todo a Estados Unidos, Europa y China. La industria eólica es hoy su principal demandante, porque la balsa es el material de núcleo más usado para fabricar palas de aerogeneradores, gracias a su relación resistencia-peso. En 2016, el Programa de Incentivos Forestales PROFORESTAL registró $8\,518 \text{ ha}$ de plantaciones de balsa en la región costera, distribuidas en siete provincias, entre ellas Santo Domingo de los Tsáchilas, donde la especie alcanza incrementos medios anuales de hasta $33,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y edades de aprovechamiento de 3 a 5 años según el sitio. Pese a esta importancia económica, el manejo silvicultural de *O. pyramidale* en Ecuador ha carecido de herramientas cuantitativas para tomar decisiones; los modelos de crecimiento y rendimiento desarrollados para la región costera son un avance reciente e indispensable para optimizar la productividad de las plantaciones (Cañadas-López et al., 2019).

Fertilización y su relación con la densidad de la madera

En el manejo silvicultural de *Ochroma pyramidale* hay que considerar que la fertilización nitrogenada y fosfórica, aunque favorece el crecimiento inicial y la supervivencia de las plántulas, puede afectar la calidad de la madera más adelante. La densidad básica de la madera de balsa es naturalmente baja, y aumenta con la edad del árbol, lo que le hace perder valor comercial a partir de los 10 años. Estudios sobre supresión de nutrientes en plántulas de

Ochroma pyramidale muestran que el fósforo, en particular, tiene un efecto determinante sobre los rasgos funcionales y de calidad de la planta: es el nutriente cuya ausencia afecta más negativamente el desarrollo, en comparación con la falta de otros macro y micronutrientes (Arteaga-Crespo et al., 2022).

Esto sugiere que una fertilización que acelere el crecimiento en altura y diámetro podría, en teoría, formar tejido leñoso con características distintas a las de un árbol de crecimiento más lento, aunque hay poca literatura sobre el efecto directo de la fertilización mineral en la densidad final de la madera de balsa. La especie debe cosecharse preferentemente entre los 3 y 6 años para conservar su valor comercial como madera de baja densidad (Forestal Maderero, s.f.; Cañadas-López et al., 2019), así que cualquier fertilización orientada a maximizar el crecimiento debe pensarse en función de ese aprovechamiento temprano. Esta investigación se limita a la etapa de establecimiento, por lo que no se esperan efectos sobre la densidad de la madera madura; sin embargo, esta relación es una línea de investigación relevante para estudios de seguimiento a mediano plazo en las plantaciones de Balsebot Corp. Cía. Ltda.

Evaluación del sistema radicular mediante excavación y cateo

El estudio del sistema radicular en plantaciones forestales ha recurrido históricamente a métodos destructivos, y la excavación manual es el más usado por su capacidad de recuperar el sistema radicular completo de un individuo y caracterizar su distribución en el perfil de suelo. Un enfoque frecuente es la extracción del monolito completo: se delimita un área circular de excavación según el radio de exploración esperado, y desde el borde más externo de ese círculo se cava progresivamente hacia el centro, con palas o palillas, retirando el suelo hasta una profundidad de 45 cm y hasta exponer la totalidad de las raíces. A diferencia de la excavación por capas horizontales, este método no busca describir la distribución vertical de la biomasa, sino recuperar el sistema radicular completo de una sola vez.

Una vez expuestas, las raíces se clasifican por diámetro, con el umbral de 2 mm como

criterio entre raíces finas (≤ 2 mm, asociadas a la absorción activa de agua y nutrientes) y raíces gruesas o de anclaje (> 2 mm, con mayor lignificación y desarrollo secundario). Este umbral, aunque de origen operacional, está bien respaldado en la literatura y permite comparar estudios y especies. Las raíces recuperadas se lavan con agua corriente sobre tamices de malla fina para quitar el suelo adherido, y se preservan en etanol al 60–95% en recipientes de vidrio bien sellados si el análisis se pospone, o en agua refrigerada a 4°C si se procesan dentro de las primeras 48 horas (Freschet et al., 2021).

Pese a su utilidad, la excavación manual tiene limitaciones que hay que reconocer al interpretar los resultados. La pérdida de material radicular durante la extracción es casi inevitable, sobre todo en las raíces finas, más frágiles y propensas a romperse o quedar retenidas en el suelo. Esta subestimación de la biomasa de raíces finas es una fuente de sesgo que no se puede eliminar del todo, aunque sí atenuarse con una excavación cuidadosa y suelos que favorezcan la cohesión del material. El método además exige bastante trabajo físico y tiempo por individuo, lo que limita el tamaño de muestra viable en campo. En plantaciones tropicales jóvenes como las de *Ochroma pyramidale*, donde el sistema radicular aún no alcanza su máxima extensión lateral ni profundidad, la extracción del monolito completo es una alternativa coherente para recuperar la totalidad de la biomasa radicular, sin los costos logísticos de métodos como las columnas de suelo o los minirizotrones, que exigen equipamiento especializado y más tiempo en campo tropical (Freschet et al., 2021).

Índice de Calidad de Dickson (IQD)

El Índice de Calidad de Dickson es un indicador compuesto que evalúa el equilibrio estructural de una plántula combinando tres variables en una sola fórmula: la relación altura/diámetro (H/D), la relación entre la biomasa seca aérea y la biomasa seca radicular (BSv/BSr), y la biomasa seca total de la planta. Se calcula dividiendo la biomasa seca total entre la suma de esas dos relaciones (Dickson et al., 1960, citado en Freschet et al., 2021). A

diferencia de medir altura, diámetro o biomasa por separado, el IQD penaliza a las plantas con crecimiento desproporcionado, ya sea muy altas y delgadas, o con muy poca raíz respecto a la parte aérea, y premia a las que logran un desarrollo equilibrado entre ambos órganos. Un valor de IQD igual o mayor a 0,2 se considera indicativo de una plántula estructuralmente aceptable para su establecimiento en campo (Dickson et al., 1960, citado en Freschet et al., 2021).

Marco conceptual

Raíces absorbentes: raíces con diámetro $\leq 0,5$ mm, responsables principalmente de la absorción activa de agua y nutrientes, y las más sensibles a cambios en la disponibilidad de fósforo (Freschet et al., 2021).

Raíces de transporte: raíces con diámetro entre 0,5 y 2,0 mm, encargadas de conducir los solutos absorbidos hacia los órganos aéreos de la planta.

Raíces estructurales: raíces con diámetro superior a 2,0 mm, que cumplen funciones de soporte mecánico, almacenamiento de reservas y conducción a larga distancia. Estas tres clases funcionales constituyen la base de clasificación empleada para todas las variables morfológicas evaluadas en el estudio.

Fertilización mineral: adición de nutrientes inorgánicos al suelo con el fin de mejorar su capacidad de sostener el crecimiento vegetal, particularmente relevante en suelos tropicales fuertemente meteorizados y de baja disponibilidad natural de nitrógeno y fósforo (Cusack et al., 2021). Constituye el factor experimental evaluado en el estudio, a través de las fuentes nitrogenada, fosfórica y balanceada aplicadas.

Densidad de longitud específica (SRL): cociente entre la longitud total de raíz y su biomasa seca correspondiente (cm g^{-1}), que expresa la eficiencia con la que la planta convierte carbono invertido en longitud de exploración del suelo (Freschet et al., 2021).

Área superficial específica (SRA): cociente entre el área superficial radicular y la biomasa seca ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), que complementa al SRL expresando la superficie de absorción

generada por unidad de biomasa (Freschet et al., 2021).

Razón raíz:parte aérea (R:A): relación entre la biomasa seca subterránea total y la biomasa seca aérea total de la planta, expresada en g g^{-1} ; es un indicador de la estrategia de partición de carbono entre órganos con funciones antagónicas (Freschet et al., 2021; Santiago et al., 2012).

Índice de Calidad de Dickson (IQD): indicador compuesto que integra la relación altura/diámetro y la relación entre biomasa aérea y radicular sobre la biomasa seca total de la planta; permite evaluar el equilibrio estructural y la calidad global de la plántula, considerándose valores $\geq 0,2$ como indicativos de una planta estructuralmente aceptable (Dickson et al., 1960, citado en Freschet et al., 2021).

Capítulo III

Metodología

Enfoque de investigación

Esta investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, orientado a recolectar, medir y analizar estadísticamente datos numéricos sobre la arquitectura del sistema radicular de *Ochroma pyramidale* en respuesta a la fertilización mineral. Este enfoque permitió cuantificar variables morfológicas (longitud, área superficial y volumen radicular por clase de diámetro), variables de biomasa (biomasa seca y fresca de raíz, y la parte aérea) e índices morfofuncionales derivados (SRL, SRA y razón raíz:parte aérea), usando instrumentos estandarizados como la balanza analítica, el escáner de alta resolución y el software IJ_Rhizo. También se midieron variables edáficas (densidad aparente, densidad real y porosidad). El enfoque cuantitativo es pertinente porque permite comparar objetivamente los tratamientos de fertilización mediante análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey, para determinar con rigor si existen diferencias significativas en la respuesta radicular ante las distintas fuentes nutricionales.

Tipo y diseño de investigación

Por su alcance, esta investigación es explicativa: no se limita a describir la arquitectura radicular de *Ochroma pyramidale*, sino que busca explicar las causas y efectos de la fertilización mineral (nitrogenada, fosfórica y balanceada) sobre el desarrollo del sistema radicular durante el establecimiento, contrastando los resultados con los mecanismos fisiológicos descritos en la literatura.

El diseño es experimental, ya que las fuentes de fertilización se manipularon deliberadamente, asignando los tratamientos al azar a las unidades experimentales bajo un diseño completamente al azar (DCA), para observar su efecto sobre las variables de respuesta radicular, dasométrica y edáfica.

Por su temporalidad, el estudio tiene un corte longitudinal: los datos se recolectaron en distintos momentos (*Toma de datos 0*, previa al establecimiento; *Toma de datos 1* y *Toma de datos 2*, a los 30 y 60 días del trasplante), lo que permitió evaluar cómo evolucionó la respuesta radicular durante el período experimental.

Por su fuente de información, es una investigación de campo: los datos se recolectaron directamente en las plantaciones de Balsebot Corp Cía. Ltda., mediante excavación y muestreo destructivo de plantas, complementado con el procesamiento de muestras en laboratorio especializado.

Ubicación del área de investigación

Ubicación política

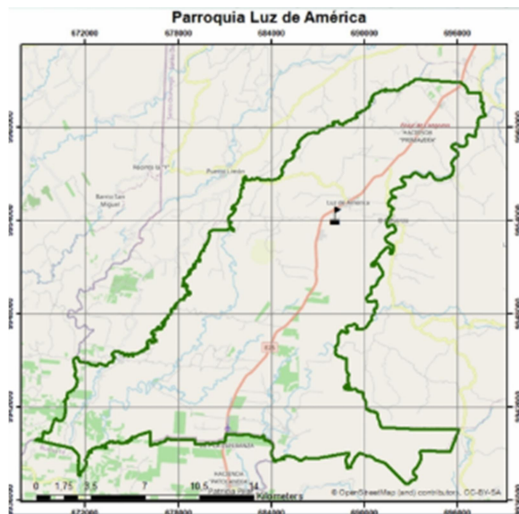
País	: Ecuador
Provincia	: Santo Domingo de los Tsáchilas
Cantón	: Santo Domingo
Parroquia	: Luz de América
Sector	: Vía Santo Domingo - Vía Quevedo Km. 24

Ubicación geográfica

La presente investigación se realizó en la parroquia Luz de América, en el Km 24 de la vía Quevedo, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, en una de las plantaciones de Balsebot Corp. Cía. Ltda. El sitio experimental se ubica en las coordenadas geográficas 0°23'59,49" S, 79°16'20,40" W (Sistema de Coordenadas Geográficas WGS84), equivalentes a las coordenadas UTM X: 686 800 m, Y: 9 953 200 m (Zona 17S) (Google Earth, 2026).

Figura 1

Localización Geográfica De La Investigación.



Nota: Figura realizado por el autor

Ubicación ecológica

- **Zona de vida:** Bosque Húmedo tropical (bh – T) (Cañadas-López et al., 2019).
- **Altitud:** Bosque Húmedo tropical (bh – T) (INAMHI, 2024)
- **Precipitación (msnm):** 2785 mm/año (INAMHI, 2024).
- **Suelos:** Franco arenoso – Franco arcilloso (Cañadas-López et al., 2019).

Materiales

Materiales de campo

- Tubos y combo para muestreo de suelo
- Palilla
- Tamiz de malla fina (lavado de raíces en campo)
- Tanque de agua
- Fundas Ziploc (almacenamiento de raíces gruesas)
- Fundas plásticas para muestras de suelo
- Materiales de oficina (libreta de campo, esferos, lápiz, cinta adhesiva)
- Cámara fotográfica

Materiales y equipos de laboratorio

- Estufa de secado (65°C para biomasa radicular, 48 horas)
- Balanza analítica (precisión $\geq 0,001$ g)
- Bandejas de aluminio (secado de muestras)
- Guantes térmicos
- Vasos de precipitación
- Tamices de laboratorio (separación y limpieza de raíces)
- Computador con software IJ_Rhizo (escaneo y análisis de arquitectura radicular)
- Escáner de alta resolución (2000 dpi, para imágenes de raíces)

- Etanol al 70% (preservación de raíces finas)

- Gramera analítica

Software

- IJ_Rhizo (análisis de imágenes de raíces: longitud, diámetro, área superficial)
- InfoStat (análisis estadístico: ANOVA, prueba de Tukey)
- RStudio (elaboración de gráficos)
- Microsoft Excel (organización y sistematización de datos de campo)

Insumos

- 10-30-10 — fuente principal de fósforo para tratamiento T1
- Urea (46-0-0) — fuente principal de nitrógeno para tratamiento T2
- 12 – 11 – 18 (+2.7 MgO + 20 SO₃) para tratamiento T3

Diseño experimental

Tratamientos evaluados

Se evaluaron tres fuentes de fertilización mineral más un testigo absoluto sin fertilización (T0), que permite determinar si el efecto observado en los demás tratamientos se debe a la fertilización en sí o a la fuente nutricional aplicada. Como T3 se incluyó la fertilización base que usa actualmente Balsebot Corp Cía. Ltda. en sus plantaciones: 12-11-18, un fertilizante complejo de liberación gradual con fórmula NPK equilibrada. Incluir T3 como testigo comercial, junto al testigo absoluto T0, permite una doble comparación: si las nuevas fuentes (T1 y T2) superan o difieren de la ausencia total de fertilización, y si superan o difieren del manejo que ya aplica la empresa, algo directamente útil para sus decisiones de manejo (Fernández, 2012).

Tabla 1*Descripción de los tratamientos*

Tratamiento	Descripción	Fuente nutricional
T0	Sin fertilización	Ninguna
T1	10-30-10	Fósforo
T2	Urea	Nitrógeno
T3	12-11-18	Fórmula completa (N-P-K + S + Mg + micronutrientes)

Dosis y aplicación

Las dosis fueron iguales para los tres tratamientos fertilizados (T1, T2 y T3): 50 g por planta, en una única aplicación en el hoyo de plantación durante el establecimiento del cultivo. El T0 no recibió ninguna aplicación, y se mantuvo como referencia sin intervención nutricional durante todo el período experimental.

Aplicar el fertilizante directamente en el hoyo responde a la necesidad de ubicarlo cerca del sistema radicular inicial, para minimizar las pérdidas por fijación o lixiviación que ocurrirían si se aplicara en superficie antes de que la planta desarrolle raíces capaces de explorar un mayor volumen de suelo (Fernández, 2012). Al ser una fertilización única, se optó por el hoyo de plantación en lugar de banda o corona, porque en esta etapa el sistema radicular aún se concentra cerca del cepellón de trasplante, y colocar el fertilizante ahí maximiza su aprovechamiento durante la fase más temprana y crítica del establecimiento.

Sustento de la dosificación

La dosis de 50 g por planta se basa en las recomendaciones agronómicas para el establecimiento de *Ochroma pyramidale*, que sugieren fertilizaciones moderadas en los primeros meses para evitar efectos fitotóxicos por exceso de sales en el sustrato radicular recién plantado (Fernández, 2012). Además, es la cantidad estándar que Balsebot Corp Cía. Ltda. usa actualmente en su manejo comercial, por lo que se mantuvo constante en los tres tratamientos fertilizados. Esto permite aislar el efecto propio de cada fuente nutricional (fósforo, nitrógeno o fórmula balanceada) sobre la arquitectura radicular, sin que las diferencias entre tratamientos se deban a la cantidad de fertilizante aplicado en vez de a su naturaleza, y hace que los resultados sean comparables con las condiciones reales de manejo de la empresa.

No se usaron dosis menores (25 g) porque no logran diferenciar la respuesta de crecimiento entre tratamientos en etapas tempranas de establecimiento (Fernández, 2012), y tampoco dosis mayores a 50 g en una sola aplicación, ya que aumentan el riesgo de quemaduras radiculares por exceso de sales en el suelo inmediato a la raíz, sobre todo en suelos de textura franco-arenosa con baja capacidad de amortiguamiento (Brady y Weil, 2008).

Tipo de diseño

Se usó un diseño completamente al azar (DCA) bifactorial, con el factor tratamiento (T0, T1, T2 y T3) y el factor época de muestreo (*Toma de datos 1* y *Toma de datos 2*), distribuido en 4 tratamientos con 2 repeticiones cada uno, lo que dio 8 unidades experimentales por época. Al evaluar 2 épocas, el total fue de 16 unidades experimentales. El modelo empleado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + M_j + (TM)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

μ : efecto de la media general

T_i : efecto del i-ésimo tratamiento (T0, T1, T2, T3)

M_j : efecto de la j-ésima época de muestreo

(TM)_{ij}: efecto de la interacción entre tratamiento y época

ϵ_{ijk} : error aleatorio

Características de la unidad experimental

Tabla 2

Características de la unidad experimental

Distanciamiento del cultivo	3m x 4m
Número de unidades experimentales	16
Área neta de la unidad experimental	72 m ²
Forma de la UE	Rectangular
Área total del ensayo	2376 m ²
Área neta del ensayo	8800 m ²
Forma del ensayo	Rectangular
Población total	160

Croquis

Figura 2

Croquis de los tratamientos.

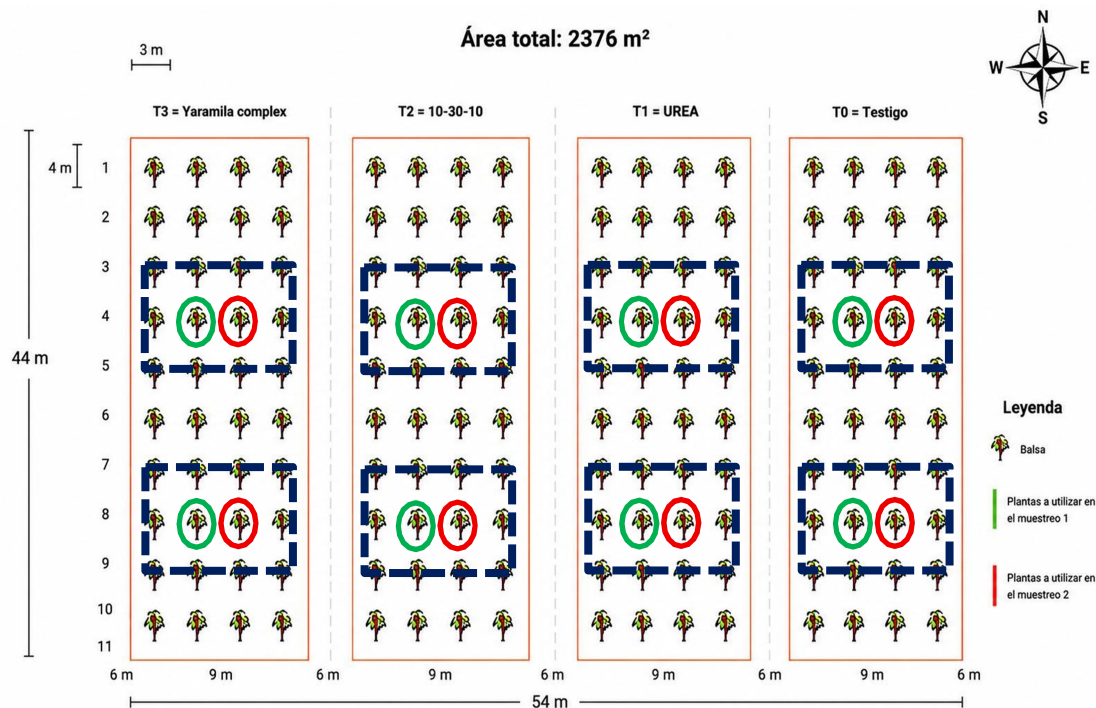
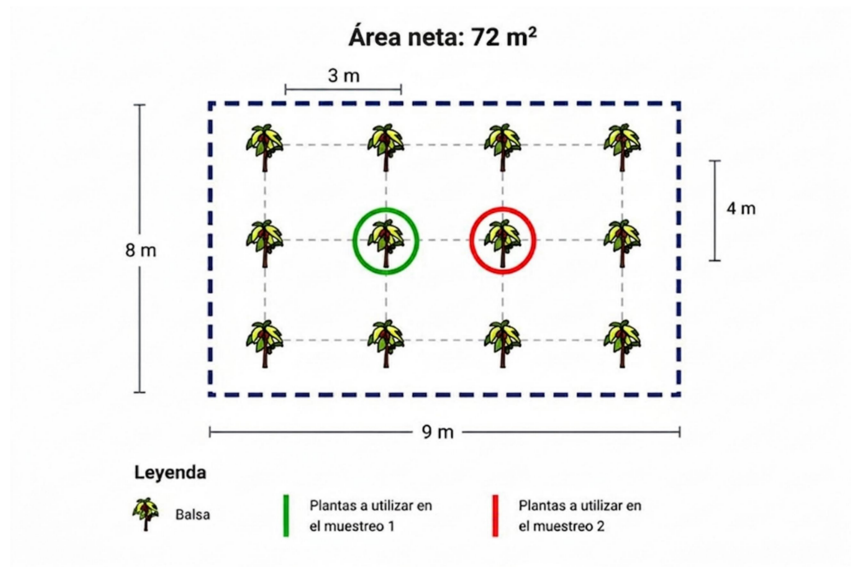


Figura 3

Croquis del Área neta de la UE.



Análisis estadístico

La investigación se desarrolló con cuatro tratamientos (T0, T1, T2 y T3) y dos

repeticiones por época de muestreo, bajo un diseño completamente al azar (DCA). En cada época se extrajeron dos plantas por tratamiento, generando ocho unidades experimentales por época; al integrar las dos épocas, se obtuvieron dieciséis unidades experimentales en total. El análisis de varianza se estructuró como un modelo bifactorial con los factores tratamiento (T) y época de muestreo (M), lo que permitió evaluar tanto los efectos principales de cada factor como su interacción $T \times M$. Para comparar medias se usó la prueba de Tukey al 5% de probabilidad. El procesamiento de datos y la elaboración de gráficos se realizaron en RStudio.

Tabla 3

Modelo de análisis de varianza bifactorial

Fuente de variación	Modelo matemático	Grados de libertad
Tratamientos (T)	$t-1$	$4-1=3$
Época de muestreo (M)	$m-1$	$2-1=1$
Interacción T x M	$(t-1)(m-1)$	$3 \times 1 = 3$
Error	$t \times m \times (r-1)$	$4 \times 2 \times 1 = 8$
TOTAL	$(r \times t \times m) - 1$	$16 - 1 = 15$

Nota. $r = 2$ repeticiones; $t = 4$ tratamientos; $m = 2$ épocas de muestreo. La interacción $T \times M$

indica si el efecto diferencial entre tratamientos varía entre épocas de muestreo

Tabla 4

Dosis de insumos aplicados durante el establecimiento de la plantación

Insumo	Ingrediente activo	Dosis
Glufosinato de amonio	Glufosinato de amonio 200 g/L	750 ml/ha
Razormin	Aminoácidos, polisacáridos, NPK y micronutrientes	50-100 mL por cada 100 L de agua

Matababosas	Metaldehído 5%	5 g por cada m ²
-------------	----------------	-----------------------------

Atakill	Sulfluramida 3 g/	35 g por cada m ²
---------	-------------------	------------------------------

Nota: las dosis presentadas corresponden a los rangos indicados en las fichas técnicas de los fabricantes de cada producto (Syngenta, s.f.; Atlántica Agrícola, s.f.; Ecuaquímica, s.f.)

Delimitación de parcelas

El área experimental se organizó en cuatro bloques, uno por tratamiento (T0, T1, T2 y T3). Dentro de cada bloque se seleccionaron 4 individuos de *Ochroma pyramidale* como unidades experimentales, distribuidos de forma sistemática y en el centro de la parcela para evitar el efecto borde. Cada planta se identificó con un rótulo de campo con el código de tratamiento y repetición, como se indica en el croquis de la Figura 2.

Protocolo de muestreo

El muestreo radicular se estructuró en tres momentos: *Toma de datos 0*, *Toma de datos 1* y *Toma de datos 2*.

La *Toma de datos 0* se hizo el día del establecimiento de la plantación, con una evaluación descriptiva del sistema radicular inicial de tres plantas representativas seleccionadas antes del experimento, para caracterizar el estado basal de la arquitectura radicular previo a los tratamientos. Ese mismo día se aplicó la única fertilización a todas las unidades experimentales, según el tratamiento asignado. La *Toma de datos 1* se hizo 30 días después del trasplante, y la *Toma de datos 2*, 30 días después de la *Toma de datos 1*. En cada *Toma de datos* destructiva se extrajeron dos plantas por tratamiento, una por repetición, para un total de 8 plantas por *Toma de datos*, y 16 a lo largo de todo el ensayo (Morales, s.f.).

Delimitación del área de excavación

El área de excavación se delimitó de forma individual para cada planta, tomando como referencia la extensión de su parte aérea. Como en especies forestales en etapa de

establecimiento el sistema radicular puede extenderse hasta 1,5 veces la extensión de la parte aérea, se trazó un perímetro proporcional alrededor del tallo como área de cateo (Morales, s.f.). Para las dos plantas seleccionadas por tratamiento en cada *Toma de datos*, se extrajo el monolito completo de suelo hasta una profundidad de 45 cm, que se trasladó intacto para su lavado posterior con tanque de agua y malla de escurrido. Esto permitió recuperar la totalidad del material radicular de cada individuo, sin distinguir por capas de profundidad. Esta extracción única, aplicada de la misma forma a todas las unidades experimentales, simplifica la logística de campo y laboratorio frente a una excavación diferenciada por capas, sin comprometer la cuantificación de las variables de respuesta radicular definidas para el estudio, ya que la distribución vertical de la biomasa no es un objetivo específico de este diseño (Freschet et al., 2021).

Extracción del monolito

Una vez delimitada el área de excavación alrededor de cada planta seleccionada, se extrajo el monolito radicular completo mediante excavación manual con pala y barreno, evitando cortar o fragmentar las raíces principales. Para definir el área de excavación se tomó la extensión máxima de la copa de cada planta como referencia mínima, ampliando el radio de excavación 1,5 veces el de la copa. Esta decisión se basa en evidencia de que el radio del sistema radicular de un árbol es aproximadamente equivalente a su altura, magnitud que suele superar el radio definido por la proyección de la copa (drip line) (Watson et al., 2014). La extracción se hizo de forma progresiva, retirando el suelo desde la periferia hacia el centro del cepellón hasta liberar el sistema radicular por completo, incluyendo las raíces finas adheridas a los agregados de suelo. Como el momento de muestreo y las condiciones del entorno influyen en las mediciones de rasgos radiculares, la extracción se hizo dentro de un margen horario constante, para minimizar la variabilidad asociada a los procesos fisiológicos diarios. Las plantas extraídas correspondieron a los individuos ya marcados para cada unidad experimental, según el código de tratamiento y repetición (T0R1, T1R1, etc.), preservando la trazabilidad de

cada muestra desde el campo hasta el laboratorio.

Procesamiento de muestras

Lavado y clasificación de raíces

Inmediatamente después de la extracción, el monolito radicular de cada planta se trasladó al laboratorio de la ESPE para su lavado, bajo un chorro de agua de baja presión sobre un tamiz de malla fina, para remover por completo las partículas de suelo adheridas sin romper las raíces finas. No se hizo separación física por clase de diámetro, ya que el sistema radicular se procesó como una unidad completa por planta; esa clasificación ($\leq 0,5$ mm; 0,5–2 mm; >2 mm) se hizo después, de forma digital, mediante el procesamiento de imagen en el laboratorio especializado.

Pesaje de biomasa fresca

Una vez lavado el sistema radicular, se pesó la biomasa fresca en balanza analítica, registrando por separado el peso fresco de la fracción radicular completa y el de la parte aérea de cada planta. Este registro se hizo antes de cualquier preservación, porque la biomasa fresca debe medirse sobre tejido recién extraído para evitar pérdidas de masa por deshidratación. Estos valores sirven como referencia para verificar la integridad de la muestra y para calcular después las relaciones hídricas entre tejidos.

Conservación de las muestras

Tras registrar la biomasa fresca, las raíces de cada planta se preservaron en una solución de etanol al 70%, en cantidad suficiente para que el sistema radicular flotara libremente en el recipiente, sin compresión mecánica que deformara su arquitectura. Preservar bien el material vegetal es clave para mantener la integridad estructural de los tejidos y garantizar que las mediciones morfológicas posteriores reflejen las condiciones reales del sistema al momento de la cosecha. Se usaron recipientes plásticos de cierre hermético tipo rosca, de un tamaño proporcional al volumen del sistema radicular de cada planta, evitando

forzar la introducción del material vegetal.

Etiquetado y documentación de las muestras

Cada recipiente se identificó con el código de tratamiento y repetición (por ejemplo, T0R1), escrito con marcador indeleble en la tapa y en el cuerpo del frasco. Además, se incluyó dentro del recipiente una etiqueta de papel con el mismo código, escrita con lápiz de grafito para garantizar su legibilidad ante el contacto prolongado con el etanol. La fecha de colecta y fijación se registró en cada frasco (día/mes/año), y las etiquetas externas se protegieron con cinta adhesiva transparente para evitar que se desprendieran o deterioraran durante el transporte. Los frascos se sellaron además con cinta o Parafilm® para prevenir fugas de la solución conservante.

Empaque y envío al laboratorio

Las muestras se embalaron individualmente en bolsas plásticas selladas con cierre hermético, cada una con un etiquetado adicional de respaldo, y se colocaron dentro de una caja de cartón rígido. Los espacios entre frascos se rellenaron con plástico de burbujas para evitar el contacto directo entre recipientes y prevenir volcamientos o roturas durante el transporte desde Santo Domingo de los Tsáchilas hasta el laboratorio especializado en Sangolquí. Junto con el paquete físico se envió, por correo electrónico, una descripción detallada con el listado de códigos de muestra, los tratamientos evaluados, la hipótesis de la investigación y los parámetros a evaluar.

Procesamiento en laboratorio

Escaneo digital de las muestras

Tras el período de preservación en etanol, las raíces de cada unidad experimental se retiraron de la solución conservante, se enjuagaron suavemente con agua destilada para quitar residuos de etanol, y se dispusieron manualmente sobre la superficie del escáner, evitando que los segmentos radiculares se superpusieran y generaran errores de conteo o medición de

longitud. Cada muestra se escaneó en color (RGB) a 2000 dpi sobre fondo de contraste uniforme, resolución que permite diferenciar bien las raíces de la clase más fina ($\leq 0,5$ mm) del fondo de la imagen, requisito necesario para segmentar correctamente el sistema radicular completo (Bouma et al., 2000). Las imágenes se guardaron en formato TIFF (sin pérdida de calidad), identificadas con el mismo código de tratamiento y repetición asignado en campo, para preservar la trazabilidad de cada muestra en todo el proceso analítico.

Procesamiento digital

Las imágenes escaneadas se procesaron con IJ_Rhizo, una macro de código abierto sobre la plataforma ImageJ, diseñada para medir imágenes escaneadas de muestras radiculares lavadas. IJ_Rhizo autoriza las mediciones de longitud y radio de raíz a partir de imágenes procesadas por lotes, con una interfaz que permite ajustar la resolución de la imagen, el borde excluido del análisis, la limpieza de partículas de fondo y la corrección de longitud mediante el estimador de Kimura, además de elegir entre umbralización automática o definida por el usuario.

En este estudio, cada imagen se segmentó mediante umbral de color (RGB), separando el material radicular del fondo, y luego se aplicó la herramienta "Analyze Particles", que identifica y delimita cada objeto segmentado, generando las mediciones de área y perímetro de cada segmento radicular detectado. Antes del procesamiento por lotes se configuraron tres clases de diámetro: raíces absorbentes ($\leq 0,5$ mm), raíces de transporte (0,5-2 mm) y raíces estructurales (> 2 mm), sobre las cuales el software desagregó automáticamente longitud, área superficial y volumen, ya que IJ_Rhizo clasifica el esqueleto continuo del sistema radicular por tramos de diámetro y no como unidades discretas (Freschet et al., 2021). Se eligió IJ_Rhizo frente a alternativas comerciales como WinRHIZO por ser de código abierto y porque sus estimaciones de longitud radicular guardan una correlación lineal sólida con las del software comercial, lo que valida su uso en estudios académicos sin comprometer la precisión de las

mediciones obtenidas.

Secado y pesaje de biomasa

La biomasa seca radicular se determinó por clase de diámetro, separando antes las raíces $\leq 0,5$ mm, 0,5–2 mm y > 2 mm, y secando las muestras en estufa a 65 °C durante 48 horas para luego pesarlas en balanza analítica con precisión de 0,001 g. El mismo procedimiento se aplicó a la biomasa aérea de cada individuo, dato necesario para calcular la razón raíz:parte aérea (Cusack et al., 2021).

Variables radiculares evaluadas

Sobre el material radicular procesado en laboratorio se evaluaron variables morfológicas mediante análisis de imagen, junto con la biomasa seca y la razón raíz:parte aérea. La cuantificación morfológica se hizo escaneando las raíces lavadas a 2000 dpi y analizándolas con IJ_Rhizo, configurando antes tres clases de diámetro (raíces absorbentes $\leq 0,5$ mm, de transporte 0,5–2 mm y estructurales > 2 mm), sobre las cuales el software desagrega automáticamente longitud, área superficial y volumen, ya que clasifica el esqueleto continuo del sistema radicular por tramos de diámetro y no como unidades discretas (Freschet et al., 2021).

Las variables registradas, su nivel de desagregación y su justificación funcional se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5

Variables radiculares evaluadas, unidad de medida y justificación.

Variable	Unidad	Justificación
Longitud total de raíz	cm; total y por clase de diámetro ($\leq 0,5$ mm; 0,5–2 mm; > 2 mm)	Indicador directo de la inversión de carbono en exploración del suelo; la longitud en la clase fina refleja la capacidad de absorción de agua y nutrientes (Freschet et al., 2021).
Área superficial radicular	cm ² ; total y por clase de diámetro	Determina la superficie de contacto disponible entre la raíz y la solución del suelo; junto con la longitud permite calcular el área superficial específica (Freschet et al., 2021).
Volumen radicular	cm ³ ; total y por clase de diámetro	Complementa la interpretación de la inversión de carbono por grupo funcional y permite estimar la densidad de tejido radicular (Freschet et al., 2021).

Número de puntas	Conteo total por muestra	Proxy de la actividad de ramificación y exploración activa del sistema radicular (Pierret et al., 2013).
SRL (densidad de longitud específica)	cm g ⁻¹	Expresa cuánta longitud de exploración genera la planta por unidad de carbono invertido; útil para comparar eficiencia de construcción radicular entre tratamientos (Freschet et al., 2021).
SRA (área superficial específica)	cm ² g ⁻¹	Complementa el SRL expresando la superficie de absorción generada por unidad de biomasa seca (Freschet et al., 2021).
Razón Raíz:parte aérea (R:A)	g g ⁻¹	Indicador integrador de la estrategia de partición de carbono entre órganos; sensible a cambios en disponibilidad de nutrientes (Freschet et al., 2021; Santiago et al., 2012).

A partir de estas variables se calcularon dos índices derivados de uso estándar en estudios de arquitectura radicular: la densidad de longitud específica (SRL, cm g⁻¹), obtenida dividiendo la longitud total de raíz entre su biomasa seca, y el área superficial específica (SRA, cm² g⁻¹), obtenida dividiendo el área superficial entre la biomasa seca. Ambos expresan cuánta longitud o superficie de exploración genera la planta por unidad de carbono invertido, útiles para comparar la eficiencia de construcción del sistema radicular entre tratamientos, sin importar el tamaño absoluto de cada individuo (Freschet et al., 2021).

Variables morfológicas primarias

Las variables morfológicas primarias (longitud total de raíz, área superficial radicular y Número de puntas) se obtuvieron directamente del procesamiento digital de las imágenes escaneadas en ImageJ, mediante segmentación por umbral RGB y la herramienta "Analyze Particles". La longitud y el área superficial se midieron total y por clase de diámetro ($\leq 0,5$ mm; 0,5–2 mm; > 2 mm), lo que permite diferenciar la respuesta de las raíces finas, encargadas sobre todo de la absorción de agua y nutrientes, de la respuesta de las raíces más gruesas, ligadas al anclaje y transporte. El Número de puntas se registró como conteo total por muestra, sin desagregar por clase, ya que es un indicador global de la actividad de ramificación del sistema completo. Estas tres variables constituyen la respuesta primaria de la arquitectura

radicular a los tratamientos de fertilización, por lo que se sometieron a análisis de varianza y prueba de comparación de medias.

Variables de biomasa

La biomasa seca radicular y aérea se determinó secando las muestras en estufa a 65 °C durante 48 horas. Ambas variables cumplen doble función: son variables de respuesta que permiten ver si el efecto de la fertilización se concentra en la raíz, en la parte aérea, o en ambos por igual, y a la vez son el insumo numérico para calcular los índices morfofuncionales derivados. Por ser un procedimiento estandarizado en estudios de ecología y nutrición vegetal, ambas variables se sometieron a análisis de varianza y prueba de comparación de medias entre tratamientos.

Índices derivados

A diferencia de las variables anteriores, los índices morfofuncionales (SRL, SRA y razón raíz:parte aérea) no se midieron directamente, sino que se calcularon a partir de las variables primarias y de biomasa ya obtenidas. El SRL se determinó dividiendo la longitud total de raíz entre la biomasa seca radicular (cm g^{-1}), y el SRA dividiendo el área superficial radicular entre la biomasa seca radicular ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$); ambos expresan la eficiencia con la que la planta convierte carbono invertido en capacidad de exploración del suelo. Estos índices permiten comparar entre tratamientos no solo cuánta raíz produce la planta, sino qué tan eficientemente la produce.

Variables dasométricas y mortalidad

Evaluación de mortalidad

La mortalidad se evaluó cada 15 días, en concordancia con el período crítico de establecimiento post-trasplante. La literatura silvícola documenta que el estrés por trasplante, es decir, la reducción de la capacidad de absorción de agua y nutrientes tras el trasplante, es más intenso en las primeras semanas, antes de que la plántula regenere raíces y se acople al

ciclo hídrico del sitio (Grossnickle, 2005). Como en este período la mortalidad puede ocurrir en ventanas de pocos días, un muestreo mensual sería insuficiente para identificar el momento de mayor pérdida entre tratamientos (Grossnickle, 2012).

Evaluación de variables dasométricas

La altura total y el diámetro a la base del tallo (DBC, medido sobre el cuello de la raíz) se midieron con cinta métrica y pie de rey, respectivamente. Se usó DBC en lugar del diámetro a la altura del pecho (DAP) convencional porque las plantas evaluadas están en etapa de establecimiento, con alturas menores al 1,30 m de referencia estándar para medir el DAP en árboles adultos. El DBC es, por tanto, la variable de diámetro funcionalmente equivalente y apropiada para plántulas en fase inicial (González et al., 2010). Medir altura y diámetro basal juntos permite describir cómo la planta reparte biomasa entre crecer en longitud y en grosor del tallo, relación que en plantaciones jóvenes puede modificarse según la disponibilidad de nitrógeno y fósforo entre tratamientos (González et al., 2010).

El monitoreo dasométrico se hizo cada 15 días, coincidiendo con la periodicidad de la evaluación de mortalidad (sección 3.12.1), por dos razones. Primero, *Ochroma pyramidale* es de las especies de más rápido crecimiento del trópico americano, con incrementos en altura que pueden superar los 6 m en el primer año (González et al., 2010), así que un intervalo más amplio diluiría estos cambios y dificultaría asociar la fertilización con la respuesta de crecimiento observada. Segundo, la fase post-trasplante es el período de mayor inestabilidad fisiológica de la plántula, por el estrés de trasplante ya descrito (Grossnickle, 2005). Registrar altura y diámetro con la misma periodicidad que la mortalidad permite vincular directamente cualquier desaceleración del crecimiento con los eventos de mortalidad o estrés visibles esa semana.

Variables edáficas

El análisis de propiedades físicas y químicas del suelo tuvo un doble propósito: caracterizar las condiciones edáficas del sitio como línea base, y detectar posibles cambios en el suelo atribuibles a los tratamientos de fertilización. La fertilidad física del suelo (densidad aparente, densidad real y porosidad) condiciona el volumen que exploran las raíces y la disponibilidad de agua y aire, y por tanto el crecimiento y la arquitectura radicular (Intagri, 2025). Conocer estas propiedades ayuda a entender el impacto de las prácticas agrícolas y forestales sobre el funcionamiento del suelo.

Densidad aparente

La densidad aparente se expresa en gr/cm³. Para la obtención de las muestras se utilizó un cilindro con medidas que varían entre los mismo (véase tabla x). En el suelo se introdujo el cilindro y la muestra obtenida se almacenó en una funda ziploc para posteriormente llevar al laboratorio. Las muestras se pusieron en una estufa por 48 horas a una temperatura de 105 °C para obtener las muestras secas (MS).

Para calcular la densidad aparente (Da) se utilizó mediante la siguiente fórmula:

$$Da = \frac{MS}{Vol}$$

En donde:

Da=Densidad aparente

MS= Masa de la muestra seca (g)

Vol= Volumen del cilindro (cm³)

Y para determinar el volumen del cilindro se utilizó la siguiente fórmula:

$$Vol = \frac{\pi * d^2}{4} * h$$

En donde:

d= Diámetro interno del cilindro (cm)

h = Altura del cilindro (cm)

π = Constante universal (3,1416....)

Vol = Volumen del cilindro (cm³)

Densidad real

La gravedad específica o densidad real del suelo considera solo la masa de los componentes sólidos. Se calcula como la proporción entre la masa de partículas secadas en estufa y el volumen de agua que estas desplazan, en g/cm³. El volumen total de poros o el tamaño de las partículas no influyen en este cálculo. En suelos minerales, el peso específico suele oscilar entre 2,6 y 2,7; en suelos con alta materia orgánica, puede bajar hasta 2,0 g/cm³.

Porosidad

La porosidad se expresa en porcentaje (%). El cálculo de la porosidad se utilizó la siguiente fórmula:

$$P(\%) = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

En donde:

P = Porosidad (%)

Da = Densidad aparente (g/cm³)

Dr = Densidad real (g/cm³)

pH y CE

En un vaso de precipitación se mezclaron 100 mL de agua destilada con 50 g de suelo seco, y se filtró la solución en papel filtro. Sobre el filtrado se midió el pH con un peachímetro y la conductividad eléctrica con un conductímetro, ambos calibrados (Yavitt et al., 2011).

Técnica e instrumento

Para recolectar la información se usó la excavación radicular por monolito, que permite recuperar el sistema radicular completo de cada planta y caracterizar su respuesta ante los tratamientos, sin los costos logísticos de métodos como los minirizotrones (Freschet et al., 2021). Esta técnica se complementó con el escaneo digital de alta resolución de las raíces lavadas y su procesamiento mediante análisis de imagen, lo que permitió obtener mediciones objetivas y reproducibles.

Como instrumento principal se usó IJ_Rhizo, software de código abierto sobre ImageJ, que *au Toma de datos* tiza las mediciones de longitud, área superficial y volumen a partir de imágenes escaneadas, clasificando el sistema radicular en tres clases funcionales (absorbentes $\leq 0,5$ mm, transporte 0,5–2,0 mm y estructurales $>2,0$ mm). Las imágenes se capturaron con escáner de alta resolución (2000 dpi) en formato TIFF, para garantizar la calidad necesaria en la clase de diámetro más fina.

Como instrumentos complementarios se usaron una balanza analítica (precisión de 0,001 g) para la biomasa fresca y seca de raíz, y la parte aérea; una estufa de secado calibrada a 65 °C; y un peachímetro y conductímetros calibrados para pH y conductividad eléctrica del suelo.

Validación y confiabilidad del instrumento

Como esta investigación no usó cuestionarios, la validación de las mediciones se basó en la calibración de los equipos y en la validez metodológica del software empleado. La balanza analítica se calibró antes de su uso, con precisión de 0,001 g. La estufa de secado, el peachímetro y el conductímetro se verificaron y calibraron según los procedimientos estándar del laboratorio antes de usarse.

Se eligió IJ_Rhizo frente a alternativas comerciales como WinRHIZO por ser de código abierto y porque sus estimaciones de longitud radicular se correlacionan de forma sólida con las del software comercial, lo que valida su uso académico sin comprometer la precisión (Freschet et al., 2021). La resolución de escaneo (2000 dpi) se eligió por su capacidad para diferenciar las raíces más finas ($\leq 0,5$ mm) del fondo de la imagen. El etiquetado por código de tratamiento y repetición, desde el campo hasta el laboratorio, fue un control de calidad adicional que garantizó la confiabilidad de los datos.

Consideraciones éticas

Esta investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica y experimental. Contó con la autorización expresa de Balsebot Corp Cía. Ltda., propietaria de las plantaciones donde se estableció el experimento, se aplicaron los tratamientos y se extrajeron las unidades experimentales, garantizando el uso responsable del predio, del material vegetal y de la información de la empresa.

El manejo del material vegetal minimizó la pérdida y el daño de las plantas no seleccionadas, respetando los protocolos de bioseguridad y manejo fitosanitario de la empresa. La información obtenida, incluyendo datos de manejo agronómico y productivo de Balsebot Corp Cía. Ltda., se usó exclusivamente con fines académicos, evitando cualquier uso indebido o divulgación sin autorización previa.

Se garantizó también la trazabilidad y el manejo responsable de las muestras biológicas en todas las etapas, desde la extracción en campo hasta su procesamiento y disposición final en el laboratorio, respetando la honestidad científica, la transparencia metodológica y los derechos de propiedad intelectual e institucional, conforme a lo establecido por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Capítulo IV

Análisis y discusión de resultados

Caracterización edáfica del sitio experimental

Tabla 6

Propiedades físicas y químicas del suelo del sitio experimental

Parámetro	Valor	Unidad
pH	6.7	—
Densidad aparente (Da)	0.86	g/cm ³
Densidad real (Dr)	2.65	g/cm ³
Porosidad total	67.5	%
Materia orgánica (MO)	3.6	%
Conductividad eléctrica (CE)	0,16	dS/m

El sitio experimental presentó un pH de 6.7, valor casi neutro favorable para la disponibilidad de nutrientes. La densidad aparente (0.86 g/cm³) resultó baja respecto a suelos minerales típicos (2.6–2.7 g/cm³), posiblemente por influencia de cenizas volcánicas y por el aflojamiento del perfil tras el cultivo previo de yuca. La porosidad total calculada (67.5%) resultó favorable para el desarrollo radicular, dado que la fertilidad física del suelo condiciona el volumen explorado por las raíces (Intagri, 2025). El contenido de materia orgánica (3.6%) fue relativamente alto para la profundidad muestreada. En conjunto, las condiciones edáficas

basales no presentaron limitaciones evidentes para el establecimiento de *Ochroma pyramidale*.

Caracterización del material vegetal en la Toma de datos 0

Tabla 7

Biomasa seca y fresca de plántulas de Ochroma pyramidale previo al establecimiento de la plantación (Toma de datos 0)

Planta	Biomasa seca (g)			Biomasa fresca (g)			R:A (seca)
	Parte aérea	Raíz	Total	Parte aérea	Raíz	Total	
R01	0.24	0.07	0.31	2.14	1.69	3.83	0.29
R02	0.37	0.09	0.46	2.32	1.75	4.07	0.24
R03	0.20	0.14	0.34	2.26	2.20	4.46	0.70
PROMEDIO	0.27	0.10	0.37	2.24	1.88	4.12	0.41

Nota: Biomasa fresca/seca neta = peso bruto – tara papel (4.12 g).

Las tres plántulas muestreadas en la *Toma de datos 0* mostraron variabilidad individual en su partición de biomasa: R03 presentó la mayor inversión relativa en raíz (R:A = 0.70), seguida de R01 (0.29) y R02 (0.24), lo que sugiere diferencias de vigor radicular ya presentes al momento del trasplante, previas a la aplicación de cualquier tratamiento.

Tabla 8

Promedios de biomasa y variables dasométricas de plántulas de Ochroma pyramidale al momento de la plantación (Toma de datos 0)

Variable	Promedio	Unidad
Altura total	4.8	cm
Diámetro basal (DBC)	0.2	g
Biomasa fresca parte aérea	2.24	g
Biomasa fresca raíz	1.88	g
Biomasa seca parte aérea	0.27	g

Biomasa seca raíz	0.1	g
Razón raíz:parte aérea	0.37	g^*g^{-1}

Las plántulas de *Ochroma pyramidale* presentaron al momento del trasplante una altura promedio de 4.8 cm y un diámetro basal de 0.2 cm. La biomasa seca promedio fue de 0.27 g para la parte aérea y 0.10 g para la raíz, con una razón raíz:parte aérea de 0.37 g g^{-1} , indicando que en condiciones de vivero la planta priorizó la inversión de biomasa en la fracción aérea. La biomasa fresca promedio fue de 2.24 g (parte aérea) y 1.88 g (raíz), con un contenido hídrico notoriamente superior al de la fracción seca, lo cual es característico de tejido vegetal joven en activo crecimiento.

Tabla 9

Variables morfológicas radiculares por clase de diámetro de plántulas de Ochroma pyramidale previo al establecimiento de la plantación (Toma de datos 0).

Planta	Clase diámetro	Diám. prom. (mm)	Longitud (cm)	Área sup. (cm ²)	Volumen (cm ³)	Número de puntas
R01	<0.5 mm	0.147	621.41	286.58	13.82	490
	0.5–2 mm	0.930	12.46	36.40	10.20	5
	≥ 2 mm	2.440	0.73	5.57	3.45	0
R01 Total		—	634.60	328.55	27.47	495
R02	<0.5 mm	0.194	1411.64	861.30	54.27	679
	0.5–2 mm	0.817	107.51	276.01	66.41	16
	≥ 2 mm	2.928	13.01	119.71	92.41	0
R02 Total		—	1532.16	1257.02	213.09	695
R03	<0.5 mm	0.189	1194.90	711.13	42.44	761
	0.5–2 mm	0.734	46.88	108.15	23.22	23

Planta	Clase diámetro	Diám. prom. (mm)	Longitud (cm)	Área sup. (cm ²)	Volumen (cm ³)	Número de puntas
	$\geq 2 \text{ mm}$	2.358	0.97	7.21	4.29	0
R03 Total		—	1242.75	826.49	69.95	784

En las tres plántulas, la fracción absorbente ($\leq 0.5 \text{ mm}$) concentró el 94.7% de la longitud radicular total (1075.98 cm en promedio) y prácticamente la totalidad de los puntos de ramificación (643.33 en promedio), sin puntas registradas en la clase $\geq 2 \text{ mm}$. Este predominio es consistente con la clasificación funcional adoptada en este estudio, según la cual las raíces absorbentes concentran la mayor parte de la actividad de captación de agua y nutrientes, mientras que las clases de mayor diámetro cumplen funciones de transporte y soporte estructural (Freschet et al., 2021). El número de puntas, al reflejar la actividad de ramificación activa del sistema (Pierret et al., 2013), confirma que en esta etapa previa al trasplante la plántula concentró su desarrollo radicular en la exploración fina del sustrato de vivero, más que en la formación de raíces de anclaje.

Tabla 10

Índices morfofuncionales derivados — Toma de datos 0.

Planta	Long. total (cm)	Área total (cm ²)	BS raíz (g)	SRL (cm g ⁻¹)	SRA (cm ² g ⁻¹)	R:A (g g ⁻¹)
R01	634.60	328.55	0.07	9065.7	4693.6	0.29
R02	1532.16	1257.02	0.09	17024.0	13966.9	0.24
R03	1242.75	826.49	0.14	8876.8	5903.5	0.70
Promedio	1136.50	804.02	0.10	11655.5	8188.0	0.37

El sistema radicular presentó una longitud total promedio de 1136.50 cm y un área superficial promedio de 804.02 cm², concentrada principalmente en la fracción absorbente ($< 0.5 \text{ mm}$). La biomasa seca radicular promedio fue de 0.10 g, a partir de la cual se derivaron los índices SRL (11655.5 cm g⁻¹) y SRA (8188.0 cm² g⁻¹) — indicadores de la longitud y área de exploración que la planta genera por unidad de biomasa invertida (Freschet et al., 2021) — que constituyen la línea base de referencia para la interpretación de los tratamientos en la

Toma de datos 1 y la *Toma de datos 2*. La razón R:A promedio fue de 0.37 g g^{-1} , reflejando que en condiciones de vivero, sin limitación nutricional impuesta por tratamiento, la plántula priorizó la inversión de biomasa hacia la fracción aérea.

Caracterización del material vegetal en la Toma de datos 1

Tabla 11

*Biomasa seca y fresca de plántulas de *Ochroma pyramidale* (Toma de datos 1).*

Planta	Biomasa seca (g)			Biomasa fresca (g)			R:A (seca)
	Parte aérea	Raíz	Total	Parte aérea	Raíz	Total	
T0R1	4.29	2.00	6.29	66.34	14.82	81.16	0.47
T0R2	7.43	2.11	9.53	73.00	18.42	91.42	0.28
T0 Promedio	5.86	2.05	7.91	69.67	16.62	86.29	0.35
T1R1	12.61	5.54	18.15	96.88	44.02	140.90	0.44
T1R2	9.49	5.40	14.90	95.53	40.74	136.27	0.57
T1 Promedio	11.05	5.47	16.52	96.21	42.38	138.58	0.49
T2R1	16.65	2.10	18.75	149.59	16.64	166.23	0.13
T2R2	11.22	2.01	13.22	115.90	18.51	134.41	0.18
T2 Promedio	13.94	2.05	15.99	132.75	17.57	150.32	0.15
T3R1	15.93	2.69	18.63	112.34	21.18	133.52	0.17
T3R2	15.54	3.01	18.55	109.20	27.53	136.73	0.19
T3 Promedio	15.74	2.85	18.59	110.77	24.35	135.12	0.18

Nota: Biomasa seca neta = peso bruto – tara papel (4.12 g).

En la *Toma de datos 1*, T3 registró la mayor biomasa seca total (18.59 g), seguido de T1 (16.52 g) y T2 (15.99 g), mientras que T0 presentó el valor más bajo (7.91 g), confirmando el efecto positivo de la fertilización sobre la acumulación de biomasa independientemente de la fuente aplicada. En biomasa fresca total, T2 obtuvo el valor más alto (150.32 g) y T0 el más bajo (86.29 g). La razón R:A fue mayor en T1 (0.49), intermedia en T0 (0.35) y menor en T2 y T3 (0.15 y 0.18, respectivamente), un patrón consistente con la teoría de partición óptima: bajo

fertilización fosfórica (T1), la inmovilidad del fósforo en el suelo obliga a una mayor inversión relativa en tejido radicular para su captación, mientras que bajo fertilización nitrogenada (T2) la mayor movilidad del nitrato permite redirigir carbono hacia el crecimiento aéreo (Cusack et al., 2021).

Tabla 12

Variables morfológicas radiculares por clase de diámetro de plántulas de Ochroma pyramidale (Toma de datos 1).

Planta	Clase diámetro	Diám. prom. (mm)	Longitud (cm)	Área sup. (cm ²)	Volumen (cm ³)	Número de puntas
T0	<0.5 mm	0,264	590.25	48,90	0.393	1406
	0.5–2 mm	1,064	606.05	202.62	6.169	46
	≥ 2 mm	2,705	103.00	87.52	9.297	0
T0 Total		—	1 299,30	339,04	15,859	1452
T1	<0.5 mm	0,224	1184.28	83.30	0.604	2324
	0.5–2 mm	1,003	575.17	181.21	5.143	32
	≥ 2 mm	4,060	75.43	96.21	15.678	0
T1 Total		—	1 834,88	360,72	21,425	2356
T2	<0.5 mm	0,256	1476.70	118.72	0.947	2532
	0.5–2 mm	0,941	1096.20	324.18	8.870	44
	≥ 2 mm	3,136	195.57	192.69	19,189	0
T2 Total		—	2 768,47	635,59	30,006	2576
T3	<0.5 mm	0,260	975.52	79.60	0.639	1554
	0.5–2 mm	0,951	687.24	205.26	5.655	27
	≥ 2 mm	3,626	116.57	132.80	17.211	1
T3 Total		—	1 779,33	417,66	23,505	1582

El tratamiento T2 (urea) registró los valores más altos en longitud total (2768.47 cm), área superficial (635.59 cm²), volumen (25.495 cm³) y número de puntas (2576), consistente con el estímulo del nitrógeno sobre la proliferación de raíces finas absorbentes durante esta

etapa temprana de establecimiento (Freschet et al., 2021). T0 presentó los valores más bajos en longitud total (1299.30 cm), área superficial (339.04 cm²) y volumen (15.859 cm³), reflejando la ausencia de estímulo nutricional por fertilización. Entre los tratamientos fertilizados, T3 registró el menor número de puntas (1582), por debajo incluso de T1 (2356), lo que sugiere que en esta primera *Toma de datos* la fertilización balanceada aún no se había traducido en una mayor actividad de ramificación comparable a la generada por las fuentes individuales de nitrógeno y fósforo.

Tabla 13

Índices morfofuncionales derivados — Toma de datos 1.

Planta	Long. total (cm)	Área total (cm ²)	BS raíz (g)	SRL (cm g ⁻¹)	SRA (cm ² g ⁻¹)	R:A (g g ⁻¹)
T0	1299.30	339.04	2.05	633.80	165.39	0.35
T1	1834.88	360.72	5.47	335.44	65.95	0.49
T2	2768.47	635.59	2.05	1350.47	310.04	0.15
T3	1779.33	417.66	2.85	624.32	146.55	0.18
Promedio	1920.50	438.26	3.11	736.01	171.98	0.27

T2 (urea) presentó el mayor SRL (1350.47 cm g⁻¹) y SRA (310.04 cm² g⁻¹) entre los tratamientos, pese a registrar una biomasa seca radicular de solo 2.05 g, lo que indica un sistema radicular proporcionalmente más fino y eficiente por unidad de biomasa invertida, consistente con el efecto conocido del nitrógeno sobre la proliferación de raíces absorbentes (Freschet et al., 2021). T1 (fosfórico), con la mayor biomasa seca radicular (5.47 g), mostró los valores más bajos de ambos índices, sugiriendo raíces más gruesas y de menor eficiencia exploratoria por gramo, aunque con mayor inversión absoluta de biomasa. La razón R:A varió entre 0.15 (T2) y 0.49 (T1), con T0 y T3 en valores intermedios (0.35 y 0.18), reforzando que el fósforo estimuló proporcionalmente más el desarrollo radicular frente al aéreo en esta etapa.

Tabla 14

Índice de Calidad de Dickson — Toma de datos 1.

Rep	H/D	BSv/BSr	Suma	IQD
T0R1	31.04	2.15	33.19	0.190
T0R2	43.44	3.52	46.96	0.203
T1R1	40.46	2.28	42.74	0.425
T1R2	42.24	1.76	43.99	0.339
T2R1	63.85	7.93	71.78	0.261
T2R2	88.85	5.58	94.43	0.140
T3R1	48.55	5.92	54.47	0.342
T3R2	53.89	5.16	59.05	0.314

Nota. Rep = repetición; H/D = relación Altura/Diámetro; BSv/BSr = relación Biomasa seca de la parte aérea/Biomasa seca de raíz; IQD = Índice de Calidad de Dickson.

T1 presentó el promedio de IQD más alto (0.382), mientras que T0 registró el promedio más bajo (0.196). T3 obtuvo un IQD promedio de 0.328 y T2 de 0.201. Considerando el umbral de referencia general de $\text{IQD} \geq 0.2$ como indicador de una planta estructuralmente aceptable (Dickson et al., 1960, citado en Freschet et al., 2021), T1, T2 y T3 se ubicaron en o por encima de este valor, mientras que T0 quedó ligeramente por debajo (0.196), sugiriendo que la ausencia de fertilización, además de reducir la biomasa acumulada, comprometió también el equilibrio estructural de la plántula durante esta etapa temprana de establecimiento.

Caracterización del material vegetal en la Toma de datos 2

Tabla 15

*Biomasa seca y fresca de plántulas de *Ochroma pyramidale* (Toma de datos 2).*

Planta	Biomasa seca (g)			Biomasa fresca (g)			R:A (seca)
	Parte aérea	Raíz	Total	Parte aérea	Raíz	Total	
T0R1	44.04	5.18	49.21	167.03	53.84	220.87	0.12
T0R2	43.42	5.69	49.11	207.73	60.06	267.79	0.13
T0 Promedio	43.73	5.44	49.16	187.38	56.95	244.33	0.12
T1R1	54.56	9.41	63.97	284.72	93.96	378.68	0.17
T1R2	56.13	8.19	64.32	270.48	79.99	350.47	0.15
T1 Promedio	55.34	8.80	64.14	277.60	86.97	364.57	0.16
T2R1	58.78	6.01	64.79	295.20	50.84	346.04	0.10

T2R2	62.81	6.86	69.67	285.61	63.10	348.70	0.11
T2 Promedio	60.80	6.43	67.23	290.41	56.97	347.37	0.11
T3R1	65.28	11.49	76.77	296.54	111.37	407.90	0.18
T3R2	63.74	9.55	73.29	291.94	89.94	381.88	0.15
T3 Promedio	64.51	10.52	75.03	294.24	100.65	394.89	0.16

Nota. Biomasa seca neta = peso bruto – tara papel (4.12 g).

En la *Toma de datos 2* se registró un incremento sustancial de biomasa en los cuatro tratamientos, encabezado por T3 (75.03 g) y T2 (67.23 g), mientras que T0 mantuvo el valor más bajo (49.16 g), confirmando el efecto sostenido de la fertilización observado desde la *Toma de datos 1*. T3 y T1 concentraron la mayor biomasa radicular absoluta (10.52 g y 8.80 g) y los R:A más altos (0.16 ambos), mientras que T2 mostró la menor inversión en raíz (6.43 g) y el R:A más bajo (0.11), similar al de T0 (0.12). El R:A disminuyó de forma generalizada respecto a la *Toma de datos 1* en los cuatro tratamientos, consistente con el patrón fisiológico esperado en que la partición de biomasa se orienta hacia la parte aérea conforme el sistema radicular alcanza un desarrollo funcional suficiente para sostener el crecimiento de la parte aérea (Santiago et al., 2012).

Tabla 16

Variables morfológicas radiculares por clase de diámetro de plántulas de Ochroma pyramidale (Toma de datos 2).

Planta	Clase diámetro	Diám. prom. (mm)	Longitud (cm)	Área sup. (cm ²)	Volumen (cm ³)	Número de puntas
T0	<0.5 mm	0.240	624.52	47.07	0.374	1628
	0.5–2 mm	1,068	666.17	223.41	6.919	30
	≥ 2 mm	3,630	381.40	434.99	55.621	7
T0 Total		—	1672.10	705.48	62.913	1665
T1	<0.5 mm	0,251	727.36	57.40	0.472	2152
	0.5–2 mm	1,082	1001.58	340.43	10.570	34

Planta	Clase diámetro	Diám. prom. (mm)	Longitud (cm)	Área sup. (cm ²)	Volumen (cm ³)	Número de puntas
	$\geq 2 \text{ mm}$	4,386	615.95	848.64	335.374	3
T1 Total		—	2344.89	1246.47	346.416	2189
	$<0.5 \text{ mm}$	0,242	410.14	31.24	0.255	1042
T2	$0.5\text{--}2 \text{ mm}$	1,110	715.21	249.46	7.942	37
	$\geq 2 \text{ mm}$	3,847	497.02	600.70	88.089	7
T2 Total		—	1622.37	881.40	96.286	1086
	$<0.5 \text{ mm}$	0,245	523.90	40.26	0.330	1691
T3	$0.5\text{--}2 \text{ mm}$	1,118	1009.07	354.30	11.170	87
	$\geq 2 \text{ mm}$	4,086	518.28	664.57	99.578	2
T3 Total		—	2051.26	1059.13	111.078	1780

En la *Toma de datos 2*, T1 presentó el valor más favorable en longitud total (2344.89 cm), área superficial (1246.47 cm²) y número de puntas (2189), indicando un sistema radicular con mayor exploración del suelo y mayor capacidad potencial de absorción, consistente con el efecto sostenido del fósforo sobre la productividad de raíces finas documentado en suelos tropicales (Cusack et al., 2021). T2 registró el valor más bajo en longitud total (1622.37 cm), mientras que T0 presentó el valor más bajo en área superficial (705.48 cm²), ambos reflejando una menor exploración radicular respecto a T1 y T3 en esta etapa

Tabla 17

Índices morfofuncionales derivados — Toma de datos 2.

Planta	Long. total (cm)	Área total (cm ²)	BS raíz (g)	SRL (cm g ⁻¹)	SRA (cm ² g ⁻¹)	R:A (g g ⁻¹)
T0	1672.10	705.48	5.44	307.37	129.68	0.12
T1	2344.89	1246.47	8.80	266.47	141.64	0.16
T2	1622.37	881.40	6.43	252.31	137.08	0.11

Planta	Long. total (cm)	Área total (cm ²)	BS raíz (g)	SRL (cm g ⁻¹)	SRA (cm ² g ⁻¹)	R:A (g g ⁻¹)
T3	2051.26	1059.13	10.52	194.99	100.68	0.16
Promedio	1922.66	973.12	7.80	255.29	127.27	0.14

En la *Toma de datos 2*, T1 presentó los valores más altos de SRL y SRA (266.47 cm g⁻¹ y 141.64 cm² g⁻¹), lo que indica un sistema radicular más eficiente en longitud y superficie de exploración por unidad de biomasa invertida, coherente con el rol del fósforo en la proliferación de raíces finas señalado por Cusack et al. (2021). T3 mostró los valores más bajos en ambos índices (194.99 cm g⁻¹ y 100.68 cm² g⁻¹), lo que sugiere una mayor proporción de tejido estructural frente a tejido absorbente, es decir, una construcción radicular menos eficiente por gramo de carbono asignado (Freschet et al., 2021). En la razón raíz:parte aérea, T1 y T3 registraron el valor más alto (0.16) y T2 el más bajo (0.11), lo que apunta a una menor inversión relativa en raíz bajo fertilización nitrogenada, en línea con lo reportado por Yavitt et al. (2011) sobre la reducción de la inversión radicular al aliviarse la limitación de nitrógeno.

Tabla 18

Índice de Calidad de Dickson — Toma de datos 2.

Rep	H/D	BSv/BSr	Suma	IQD
T0R1	40.43	8.50	48.93	1.006
T0R2	41.58	7.63	49.21	0.998
T1R1	45.50	5.80	51.29	1.247
T1R2	46.64	6.85	53.49	1.203
T2R1	82.77	9.78	92.55	0.700
T2R2	76.16	9.16	85.32	0.817
T3R1	54.14	5.68	59.83	1.283
T3R2	62.16	6.67	68.83	1.065

Nota. Rep = repetición; H/D = relación Altura/Diámetro; BSv/BSr = relación Biomasa seca de la parte aérea/Biomasa seca de raíz; IQD = Índice de Calidad de Dickson.

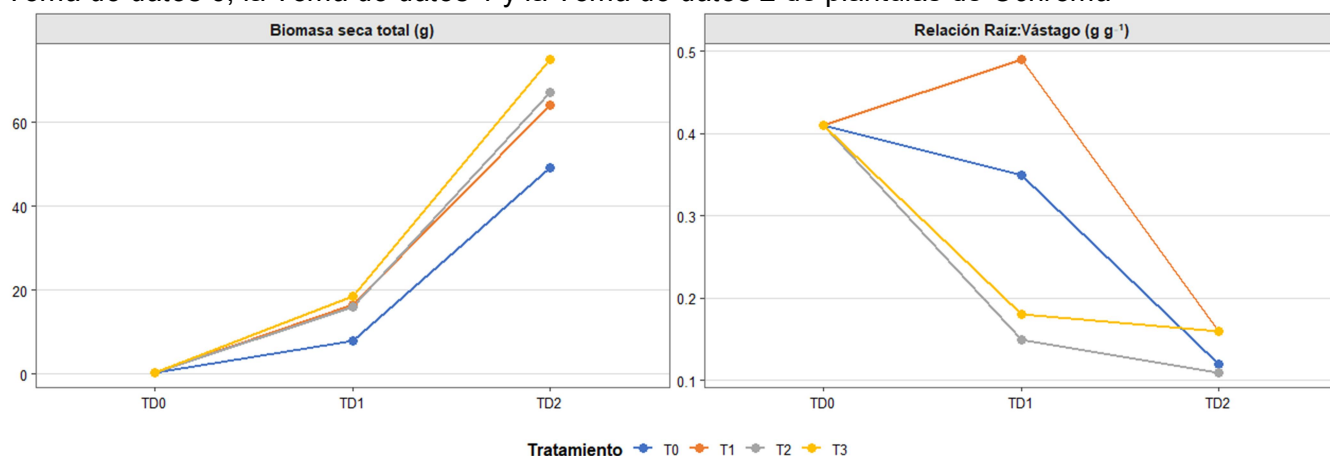
En la *Toma de datos 2*, T1 presentó nuevamente el valor más favorable de IQD, con un promedio de 1.225, seguido de T3 (1.174). T2 registró el valor menos favorable (0.759), y T0

alcanzó un promedio de 1.002. La menor calidad relativa de T2 es consistente con su mayor relación B_{Sa}/B_{Sr}, reflejo de una asignación de biomasa priorizada hacia la parte aérea en detrimento de la raíz bajo fertilización nitrogenada (Yavitt et al., 2011). Todos los tratamientos superaron ampliamente el umbral de referencia general de IQD ≥ 0.2 , lo que indica una calidad estructural adecuada de las plántulas en esta etapa.

Evolución temporal de las variables morfofuncionales

Figura 4

Evolución de la biomasa seca total y la relación raíz:parte aérea (R:A) por tratamiento entre la *Toma de datos 0*, la *Toma de datos 1* y la *Toma de datos 2* de plántulas de *Ochroma*



pyramidale.

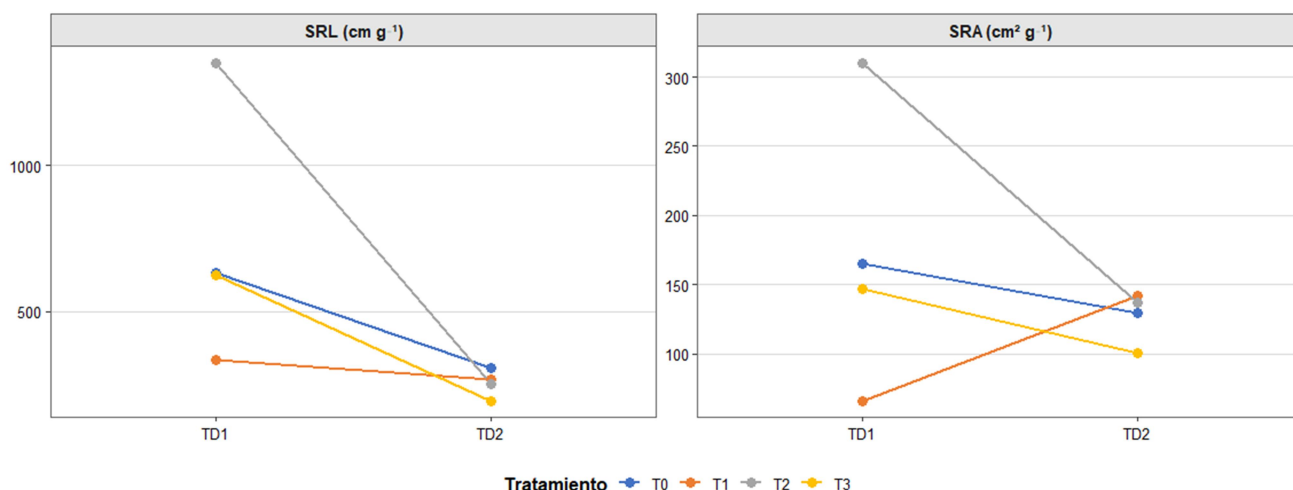
Nota. Nota: TD0 = *Toma de datos 0*; TD1 = *Toma de datos 1*; TD2 = *Toma de datos 2*.

En la evolución temporal, T3 presentó el valor más favorable de biomasa seca total en las tres *Tomas de datos*, alcanzando 75.03 g en la *Toma de datos 2*, el mayor incremento acumulado entre los cuatro tratamientos. T0 registró el valor menos favorable en todas las *Tomas*, con 49.16 g en la *Toma de datos 2*, reflejando la menor acumulación de biomasa en ausencia de fertilización. Respecto a la relación raíz:parte aérea, T1 mostró el valor más alto en la *Toma de datos 1* (0.49), descendiendo a 0.16 en la *Toma de datos 2*, mientras que T2 presentó el valor más bajo en ambas *Tomas* (0.15 y 0.11, respectivamente), evidenciando una

menor proporción relativa de biomasa destinada a la raíz a lo largo del tiempo en este tratamiento.

Figura 5

Evolución de SRL y SRA por tratamiento (*Toma de datos 1 y 2*) en plántulas de *Ochroma pyramidale*.

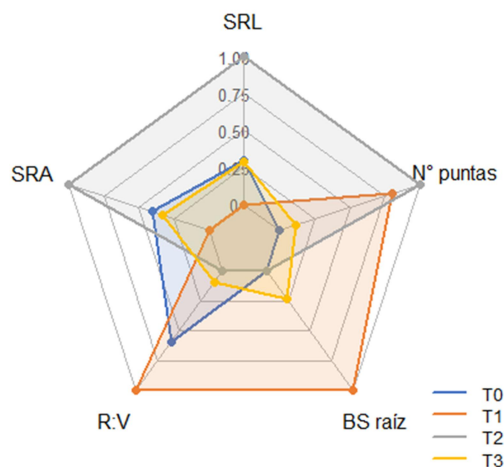


Nota. TD1 = *Toma de datos 1*; TD2 = *Toma de datos 2*. Se excluyó la *Toma de datos 0* por corresponder a plántulas de vivero de tamaño mínimo, previas a la aplicación de tratamientos.

En la *Toma de datos 1*, T2 presentó el valor más favorable de SRL y SRA (1350.47 cm g⁻¹ y 310.04 cm² g⁻¹), mientras que T1 registró el valor menos favorable en ambos índices (335.44 cm g⁻¹ y 65.95 cm² g⁻¹). En la *Toma de datos 2*, esta relación se invirtió: T1 pasó a presentar el valor más favorable (266.47 cm g⁻¹ y 141.64 cm² g⁻¹), mientras que T3 registró el valor menos favorable (194.99 cm g⁻¹ y 100.68 cm² g⁻¹). En términos generales, los cuatro tratamientos mostraron una disminución de SRL y SRA entre la *Toma de datos 1* y la *Toma de datos 2*, reflejando el engrosamiento progresivo del sistema radicular con el desarrollo de las plántulas.

Figura 6

Perfil multivariable por tratamiento (*Toma de datos 1*) en plántulas de *Ochroma pyramidale*.

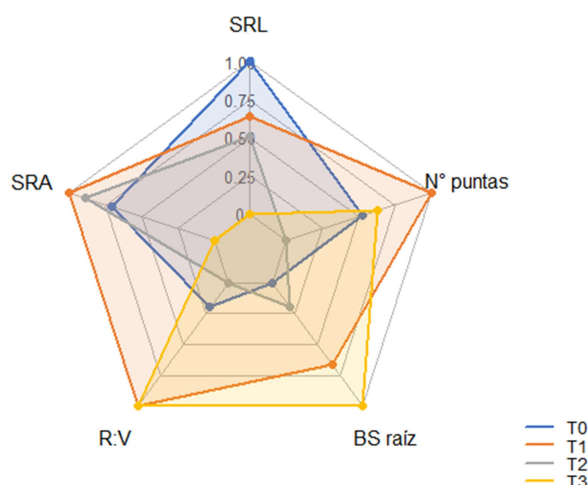


Nota. Valores normalizados de 0 a 1 por variable. SRL = longitud radicular específica; SRA = área radicular específica; R:A = relación raíz:parte aérea; BS raíz = biomasa seca de raíz.

En el perfil multivariable de la *Toma de datos 1*, T2 presentó los valores más favorables en SRL y SRA (posición más externa en esos dos ejes), mientras que T1 mostró los valores más favorables en R:A, BS raíz y Número de puntas, ubicándose en la posición más externa en esos tres ejes. En contraste, T1 registró el valor menos favorable en SRL y SRA, y T2 mostró el valor menos favorable en R:A, evidenciando que ningún tratamiento se posicionó como el más externo en todas las variables simultáneamente. T0 y T3 se ubicaron en posiciones intermedias en la mayoría de los ejes, sin destacar como el valor más alto ni más bajo en ninguna variable.

Figura 7

Perfil multivariable por tratamiento (*Toma de datos 2*) en plántulas de *Ochroma pyramidale*.



Nota. Valores normalizados de 0 a 1 por variable. SRL = longitud radicular específica; SRA = área radicular específica; R:A = relación raíz:parte aérea; BS raíz = biomasa seca de raíz.

En el perfil multivariable de la *Toma de datos 2*, T1 presentó los valores más favorables en SRL, SRA y Número de puntas, mientras que T3 mostró los valores más favorables en R:A y BS raíz. Por su parte, T3 registró el valor menos favorable en SRL y SRA, y T2 presentó el valor menos favorable en R:A y BS raíz. A diferencia de la *Toma de datos 1*, donde T2 lideraba en SRL/SRA, en esta *Toma de datos* dicho liderazgo pasó a T1, mientras que T3 concentró los valores más altos en las variables asociadas a inversión estructural de biomasa radicular (R:A y BS raíz).

Análisis de varianza bifactorial de las variables morfofuncionales

Altura de planta

El análisis de varianza bifactorial mostró efectos significativos de Tratamiento ($F = 33,72$; $p = 0,0001$), *Toma de datos* ($F = 880,69$; $p < 0,0001$) y su interacción ($F = 5,11$; $p = 0,0290$) (ver Apéndice, Tabla A1). La significancia de los tres factores (Tratamiento: $F = 33,72$; *Toma de datos* : $F = 880,69$; Interacción: $F = 5,11$; $p < 0,05$ en los tres casos) indica que la

fuerza de fertilización determinó diferencias reales en el crecimiento en altura, y que ese efecto no fue estático, sino que se intensificó conforme avanzó el desarrollo de la plántula. Esto es coherente con el papel del nitrógeno como principal regulador del crecimiento apical: su disponibilidad no solo determina cuánto crece la planta, sino que dicho estímulo se acentúa con el tiempo (Torres y Portugal, 2018). El coeficiente de variación ($CV = 6,73 \%$), bajo para una variable dasométrica, respalda la confiabilidad de esta interpretación.

Tabla 19

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Altura de planta.

Tratamiento	Medias	n	E.E.	Rango
T0	52,70	4	2,31	A
T1	66,33	4	2,31	B
T3	69,93	4	2,31	B
T2	85,30	4	2,31	C

Nota. DMS = 10,44974; Error = 21,2963; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La prueba de Tukey ubicó a T2 (urea) con la altura promedio más alta (85,30 cm), significativamente superior a T3 (69,93 cm) y T1 (66,33 cm) —estadísticamente iguales entre sí— y estos, a su vez, por encima del testigo absoluto T0 (52,70 cm). Este resultado es coherente con el papel del nitrógeno como principal regulador del crecimiento en altura y del vigor vegetativo, dado que su disponibilidad adecuada favorece la expansión foliar y el crecimiento apical (Torres y Portugal, 2018).

Tabla 20

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Altura de planta.

Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
Toma de datos 1	34,33	8	1,63	A
Toma de datos 2	102,80	8	1,63	B

Nota. DMS = 5,32086; Error = 21,2963; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

Respecto al factor *Toma de datos*, la altura promedio se incrementó de 34,33 cm en la *Toma de datos 1* a 102,80 cm en la *Toma de datos 2*, diferencia altamente significativa que confirma el carácter de especie pionera de rápido crecimiento de *Ochroma pyramidale*, capaz de superar los 6 m de altura durante el primer año bajo condiciones favorables de establecimiento (González et al., 2010).

Tabla 21

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Altura de planta.

Tratamiento	Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
T0	Toma de datos 1	23,65	2	3,26	A
T1	Toma de datos 1	33,65	2	3,26	AB
T3	Toma de datos 1	36,15	2	3,26	AB
T2	Toma de datos 1	43,85	2	3,26	B
T0	Toma de datos 2	81,75	2	3,26	C
T1	Toma de datos 2	99,00	2	3,26	CD
T3	Toma de datos 2	103,70	2	3,26	D
T2	Toma de datos 2	126,75	2	3,26	E

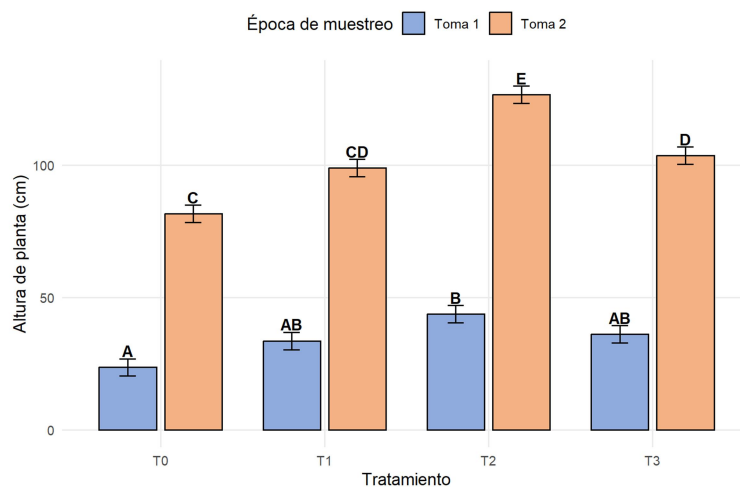
Nota. DMS = 18,26116; Error = 21,2963; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La interacción tratamiento×*Toma de datos* muestra que la ventaja de T2 no fue constante en el tiempo, sino que se amplió conforme avanzó el establecimiento: mientras en la *Toma de datos 1* la diferencia con T0 fue de apenas 20,2 cm (43,85 frente a 23,65 cm), en la *Toma de datos 2* alcanzó 45 cm (126,75 frente a 81,75 cm), lo que indica un efecto acumulativo y creciente de la disponibilidad de nitrógeno sobre el crecimiento en altura durante el período

experimental.

Figura 8

Altura de planta según Tratamiento y época de muestreo.



Diámetro basal

El análisis de varianza mostró efectos significativos de Tratamiento ($F = 11,25$; $p = 0,0031$) y *Toma de datos* ($F = 613,43$; $p < 0,0001$); la interacción no fue significativa ($F = 3,24$; $p = 0,0814$) (ver Apéndice, Tabla A2). La significancia del tratamiento ($F = 11,25$) y de la *Toma de datos* ($F = 613,43$), junto con la no significancia de la interacción ($F = 3,24$; $p = 0,0814$), indican que la fuente nutricional generó diferencias reales en el crecimiento radial del tallo, pero que dicho efecto se mantuvo estable a lo largo del tiempo, sin acentuarse ni atenuarse entre la *Toma de datos* 1 y la *Toma de datos* 2. Esto sugiere que, a diferencia de la altura, la asignación de carbono hacia el engrosamiento del tallo responde de forma más constante a la fuente aplicada, sin depender tanto del momento de desarrollo en que se mida (González et al., 2010). El coeficiente de variación ($CV = 7,52\%$) confirma una precisión similar a la obtenida para altura de planta.

Tabla 22

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Diámetro basal.

Tratamiento	Medias	N	E.E.	Rango
T2	1,09	4	0,05	A
T3	1,25	4	0,05	AB
T0	1,32	4	0,05	BC
T1	1,48	4	0,05	C

Nota

DMS = 0,21874; Error = 0,0093; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La prueba de Tukey ubicó a T1 (10-30-10) con el mayor diámetro basal promedio (1,48 cm), superior a T0 (1,32 cm) y T3 (1,25 cm), mientras que T2 (urea) registró el valor más bajo (1,09 cm). Este patrón es opuesto al observado para altura de planta (sección 4.6.1), donde T2 fue superior: la fuente fosfórica favoreció el engrosamiento del tallo, mientras que la nitrogenada favoreció su elongación, lo que sugiere una asignación diferencial de carbono entre crecimiento en longitud y en grosor según la fuente nutricional aplicada (González et al., 2010).

Tabla 23

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Diámetro basal.

Toma de datos	Medias	N	E.E.	Rango
Toma de datos 1	0,69	8	0,03	A
Toma de datos 2	1,88	8	0,03	B

Nota

DMS = 0,11138; Error = 0,0093; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

El factor *Toma de datos* mostró un incremento del diámetro basal de 0,69 cm en la *Toma de datos 1* a 1,88 cm en la *Toma de datos 2*, consistente con el rápido desarrollo característico de la especie durante la fase de establecimiento.

Tabla 24

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Diámetro basal.

Tratamiento	Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
T2	Toma de datos 1	0,59	2	0,07	A
T0	Toma de datos 1	0,64	2	0,07	A
T3	Toma de datos 1	0,71	2	0,07	A
T1	Toma de datos 1	0,82	2	0,07	A
T2	Toma de datos 2	1,60	2	0,07	B
T3	Toma de datos 2	1,79	2	0,07	BC
T0	Toma de datos 2	2,00	2	0,07	C
T1	Toma de datos 2	2,15	2	0,07	C

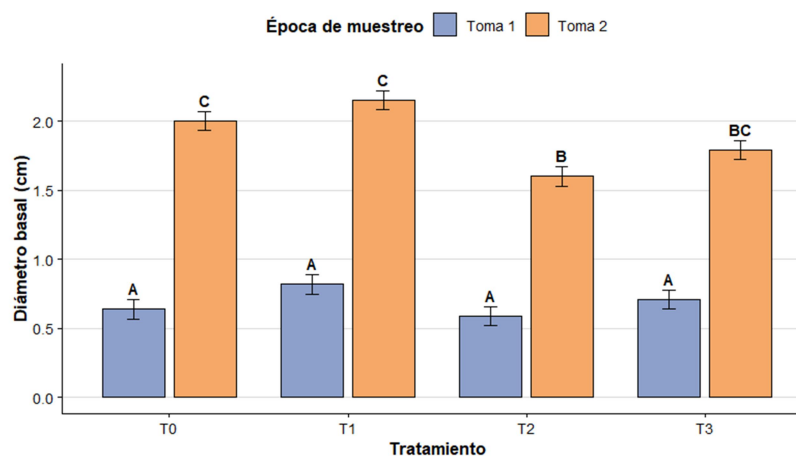
Nota

DMS = 0,38225; Error = 0,0093; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La interacción confirma que la jerarquía entre tratamientos se mantuvo relativamente estable en el tiempo: T1 encabezó el diámetro basal en ambas *Tomas* (0,82 y 2,15 cm), mientras que T2 se mantuvo como el valor más bajo (0,59 y 1,60 cm), reforzando la interpretación de una respuesta diferencial y sostenida entre fuentes nutricionales sobre el crecimiento radial del tallo.

Figura 9

Diámetro basal según Tratamiento y época de muestreo.



Biomasa seca de la parte aérea

El análisis de varianza mostró efectos significativos de Tratamiento ($F = 40,47$; $p < 0,0001$), *Toma de datos* ($F = 1788,74$; $p < 0,0001$) y su interacción ($F = 5,12$; $p = 0,0289$) (ver Apéndice, Tabla A3). La significancia de los tres factores muestra que la fuente de fertilización determinó diferencias reales en la acumulación de biomasa aérea, y que ese efecto se hizo más marcado con el avance del establecimiento. Esto es coherente con la teoría de partición de carbono: la disponibilidad combinada de nutrientes no solo estimula el crecimiento aéreo, sino que su efecto relativo entre fuentes se amplifica conforme la planta acumula biomasa (Santiago et al., 2012). El coeficiente de variación ($CV = 6,21 \%$) respalda la precisión de este análisis.

Tabla 25

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Biomasa seca de la parte aérea.

Tratamiento	Medias	N	E.E.	Rango
T0	24,80	4	1,05	A
T1	33,20	4	1,05	B
T2	37,37	4	1,05	BC
T3	40,12	4	1,05	C

Nota

DMS = 4,75972; Error = 4,4183; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

Según Tukey, T3 (12-11-18) presentó la mayor biomasa seca de la parte aérea (40,12 g), superior a T0 (24,80 g), con T1 (33,20 g) y T2 (37,37 g) en una posición intermedia parcialmente solapada con T3. Que la fuente balanceada haya superado a las fuentes individuales de N y P es coherente con lo reportado por Santiago et al. (2012), quienes encontraron que la coadición de nitrógeno y fósforo generó incrementos significativos en la tasa de crecimiento, lo que sugiere que la respuesta de la biomasa aérea depende de la interacción entre nutrientes más que de un único elemento limitante.

Tabla 26

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Biomasa seca de la parte aérea.

Toma de datos	Medias	N	E.E.	Rango
<i>Toma de datos 1</i>	11,65	8	0,74	A
<i>Toma de datos 2</i>	56,10	8	0,74	B

Nota

DMS = 2,42358; Error = 4,4183; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

El factor *Toma de datos* mostró un incremento marcado de la biomasa de la parte aérea, de 11,65 g en la *Toma de datos 1* a 56,10 g en la *Toma de datos 2*, reflejo del rápido crecimiento aéreo típico de la especie durante el establecimiento.

Tabla 27

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Biomasa seca de la parte aérea.

Tratamiento	Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
T0	<i>Toma de datos 1</i>	5,86	2	1,49	A
T1	<i>Toma de datos 1</i>	11,05	2	1,49	AB
T2	<i>Toma de datos 1</i>	13,94	2	1,49	AB
T3	<i>Toma de datos 1</i>	15,74	2	1,49	B
T0	<i>Toma de datos 2</i>	43,73	2	1,49	C
T1	<i>Toma de datos 2</i>	55,35	2	1,49	D
T2	<i>Toma de datos 2</i>	60,80	2	1,49	DE
T3	<i>Toma de datos 2</i>	64,51	2	1,49	E

Nota

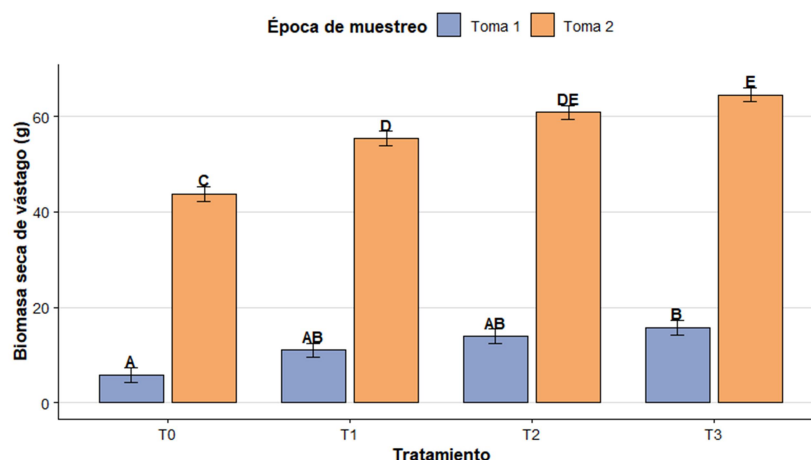
DMS = 8,31772; Error = 4,4183; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La interacción evidencia que la ventaja de T3 se acentuó en la *Toma de datos 2* (64,51

g frente a 43,73 g de T0), lo que indica un efecto acumulativo del suministro simultáneo de N, P, S, Mg y micronutrientes sobre la acumulación de biomasa aérea a lo largo del período experimental.

Figura 10

Biomasa seca de la parte aérea de la planta según Tratamiento y época de muestreo.



Biomasa seca de raíz

El análisis de varianza mostró efectos significativos de Tratamiento ($F = 29,18$; $p = 0,0001$), *Toma de datos* ($F = 220,76$; $p < 0,0001$) y su interacción ($F = 10,49$; $p = 0,0038$) (ver Apéndice, Tabla A4). La significancia de los tres factores indica que la fuente de fertilización determinó diferencias reales en la inversión de carbono hacia el sistema radicular, y que ese efecto no fue estático, sino que se acentuó conforme avanzó el desarrollo de la planta. Esto es coherente con la teoría de asignación diferencial de carbono descrita en el marco teórico: la disponibilidad de nutrientes no solo determina cuánta raíz produce la planta, sino cuándo y cómo intensifica esa inversión a lo largo del tiempo (Cusack et al., 2021). El coeficiente de variación ($CV = 11,58\%$), más alto que el de las variables aéreas, es esperable en una variable obtenida por excavación destructiva, donde la pérdida de material fino introduce mayor variabilidad (Freschet et al., 2021).

Tabla 28

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Biomasa seca de raíz.

Tratamiento	Medias	N	E.E.	Rango
T0	3,75	4	0,32	A
T2	4,25	4	0,32	A
T3	6,69	4	0,32	B
T1	7,14	4	0,32	B

Nota

DMS = 1,42954; Error = 0,3985; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La prueba de Tukey agrupó a T1 (7,14 g) y T3 (6,69 g) con la mayor biomasa radicular, significativamente superiores a T0 (3,75 g) y T2 (4,25 g), que no difirieron entre sí. El mejor desempeño de T1, la fuente fosfórica, concuerda con lo documentado por Cusack et al. (2021), quienes reportaron que la adición de fósforo incrementó la productividad de raíces finas en un 23 % en la Amazonía Central, y con los meta-análisis a escala global que identifican a la fertilización fosfórica como el único tratamiento individual que incrementa significativamente la biomasa radicular, a diferencia del nitrógeno, cuyo efecto sobre la raíz suele ser no significativo o incluso negativo.

Tabla 29

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Biomasa seca de raíz.

Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
Toma de datos 1	3,11	8	0,22	A
Toma de datos 2	7,80	8	0,22	B

Nota

DMS = 0,72790; Error = 0,3985; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

El factor *Toma de datos* mostró un incremento de 3,11 g en la *Toma de datos 1* a 7,80 g en la *Toma de datos 2*, consistente con el desarrollo progresivo del sistema radicular durante el establecimiento.

Tabla 30

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Biomasa seca de raíz.

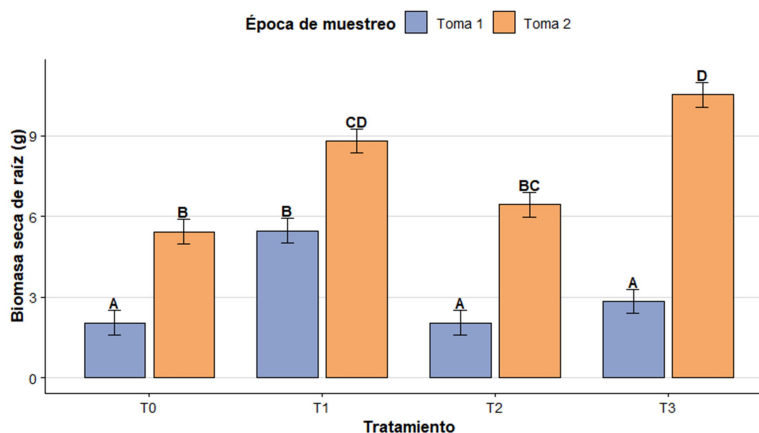
Tratamiento	Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
T0	Toma de datos 1	2,06	2	0,45	A
T2	Toma de datos 1	2,06	2	0,45	A
T3	Toma de datos 1	2,85	2	0,45	A
T0	Toma de datos 2	5,44	2	0,45	B
T1	Toma de datos 1	5,47	2	0,45	B
T2	Toma de datos 2	6,44	2	0,45	BC
T1	Toma de datos 2	8,80	2	0,45	CD
T3	Toma de datos 2	10,52	2	0,45	D

Nota

DMS = 2,49815; Error = 0,3985; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La interacción muestra que la diferencia entre tratamientos se acentuó en la *Toma de datos 2*, cuando T1 y T3 concentraron la mayor inversión absoluta de biomasa radicular (8,80 y 10,52 g, respectivamente), mientras que T0 y T2 se mantuvieron rezagados, lo que sugiere un efecto del fósforo que se consolida con el tiempo más que uno inmediato.

Figura 11. Biomasa seca de la raíz según Tratamiento y época de muestreo.



Biomasa seca total

El análisis de varianza mostró efectos significativos de Tratamiento ($F = 29,18$; $p = 0,0001$), *Toma de datos* ($F = 220,76$; $p < 0,0001$) y su interacción ($F = 10,49$; $p = 0,0038$) (ver Apéndice, Tabla A4). La significancia de los tres factores confirma que la fuente de fertilización determinó diferencias reales en la producción total de biomasa, y que ese efecto no fue constante sino acumulativo: la ventaja de un tratamiento sobre otro se hizo más evidente conforme transcurrió el período experimental. Esto refleja que la disponibilidad de nutrientes no solo define cuánta biomasa produce la planta en un momento dado, sino que condiciona la trayectoria de crecimiento durante todo el establecimiento (Cusack et al., 2021). El coeficiente de variación ($CV = 5,95\%$), el más bajo entre las variables de biomasa, respalda la solidez de esta interpretación.

Tabla 31

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Biomasa seca total.

Tratamiento	Medias	n	E.E.	Rango
T0	28,54	4	1,17	A
T1	40,33	4	1,17	B
T2	41,61	4	1,17	BC
T3	46,81	4	1,17	C

Nota

DMS = 5,30219; Error = 5,4828; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

Tukey ubicó a T3 con la mayor biomasa seca total (46,81 g), significativamente superior a T0 (28,54 g), con T1 (40,33 g) y T2 (41,61 g) en una posición intermedia. Al integrar la respuesta de la parte aérea y raíz, este resultado refuerza lo discutido en las secciones 4.6.3 y 4.6.4: la fuente balanceada favoreció la acumulación de biomasa en ambos órganos de forma

simultánea, mientras que las fuentes individuales privilegiaron un órgano sobre otro (T1 hacia la raíz, T2 hacia la parte aérea), patrón consistente con la teoría de partición óptima de carbono entre órganos con funciones antagónicas (Cusack et al., 2021).

Tabla 32

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Biomasa seca total.

Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
<i>Toma de datos 1</i>	14,75	8	0,83	A
<i>Toma de datos 2</i>	63,89	8	0,83	B

Nota

DMS = 2,69980; Error = 5,4828; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

El factor *Toma de datos* mostró un incremento de 14,75 g en la *Toma de datos 1* a 63,89 g en la *Toma de datos 2*, confirmando la rápida acumulación de biomasa característica del establecimiento de la especie.

Tabla 33

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Biomasa seca total.

Tratamiento	Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
T0	<i>Toma de datos 1</i>	7,92	2	1,66	A
T2	<i>Toma de datos 1</i>	15,99	2	1,66	AB
T1	<i>Toma de datos 1</i>	16,52	2	1,66	AB
T3	<i>Toma de datos 1</i>	18,59	2	1,66	B
T0	<i>Toma de datos 2</i>	49,17	2	1,66	C
T1	<i>Toma de datos 2</i>	64,15	2	1,66	D
T2	<i>Toma de datos 2</i>	67,23	2	1,66	DE
T3	<i>Toma de datos 2</i>	75,03	2	1,66	E

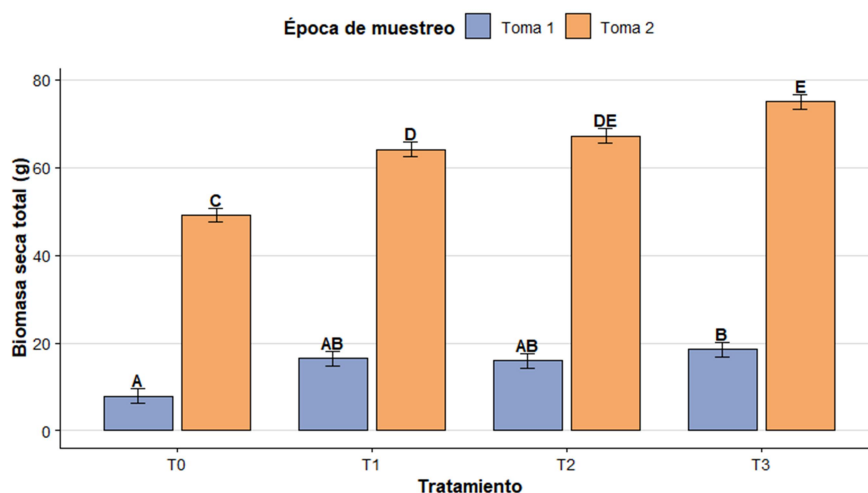
Nota

DMS = 9,26569; Error = 5,4828; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La interacción muestra que T3 mantuvo el valor más alto en ambas *Tomas* (18,59 y 75,03 g), mientras que T0 se mantuvo como el más bajo (7,92 y 49,17 g), evidenciando que la ventaja del tratamiento balanceado se estableció desde etapas tempranas y se sostuvo en el tiempo.

Figura 12

Biomasa seca total según Tratamiento y época de muestreo.



Relación raíz:parte aérea

El análisis de varianza mostró efectos significativos de Tratamiento ($F = 9,26$; $p = 0,0056$), *Toma de datos* ($F = 31,76$; $p = 0,0005$) y su interacción ($F = 7,28$; $p = 0,0113$) (ver Apéndice, Tabla A6). La significancia de los tres factores indica que la fuente de fertilización determinó diferencias reales en la forma en que la planta reparte el carbono entre raíz y la parte aérea, y que esa partición no fue fija, sino que se modificó conforme avanzó el desarrollo. Esto es precisamente lo que predice la teoría de partición óptima: la disponibilidad de un nutriente inmóvil como el fósforo obliga a mantener una mayor inversión relativa en raíz, mientras que la

disponibilidad de un nutriente móvil como el nitrato permite redirigir progresivamente el carbono hacia la parte aérea (Cusack et al., 2021; Yavitt et al., 2011). El coeficiente de variación (CV = 26,58 %), más alto que el de las demás variables, es un rasgo propio de los índices calculados como cociente entre variables con variabilidad independiente, y no un indicador de baja calidad del dato.

Tabla 34

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Relación raíz/parte aérea.

Tratamiento	Medias	n	E.E.	Rango
T2	0,13	4	0,03	A
T3	0,17	4	0,03	A
T0	0,25	4	0,03	AB
T1	0,33	4	0,03	B

Nota

DMS = 0,13280; Error = 0,0034; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

T1 presentó la mayor razón R:A promedio (0,33), significativamente superior a T2 (0,13) y T3 (0,17), con T0 en una posición intermedia (0,25). Este patrón es consistente con la hipótesis de partición óptima: al ser el fósforo un nutriente inmóvil en el suelo, su adquisición depende de una mayor inversión relativa en tejido radicular para explorar continuamente nuevas zonas del suelo, mientras que la mayor movilidad del nitrato permite a la planta redirigir carbono hacia el crecimiento aéreo una vez aliviada la limitación nitrogenada (Yavitt et al., 2011; Cusack et al., 2021).

Tabla 35

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Relación raíz/parte aérea.

Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
Toma de datos 2	0,14	8	0,02	A
Toma de datos 1	0,30	8	0,02	B

Nota

DMS = 0,06762; Error = 0,0034; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

El factor *Toma de datos* mostró una disminución de la razón R:A de 0,30 en la *Toma de datos 1* a 0,14 en la *Toma de datos 2*, lo que refleja que, conforme el sistema radicular alcanzó un desarrollo funcional suficiente para sostener el crecimiento de la parte aérea, la planta redirigió su inversión de carbono hacia la parte aérea (Santiago et al., 2012).

Tabla 36

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Relación raíz/parte aérea.

Tratamiento	Toma de datos	Medias	N	E.E.	Rango
T2	Toma de datos 2	0,11	2	0,04	A
T0	Toma de datos 2	0,12	2	0,04	A
T2	Toma de datos 1	0,15	2	0,04	AB
T1	Toma de datos 2	0,16	2	0,04	AB
T3	Toma de datos 2	0,16	2	0,04	AB
T3	Toma de datos 1	0,18	2	0,04	AB
T0	Toma de datos 1	0,38	2	0,04	BC
T1	Toma de datos 1	0,50	2	0,04	C

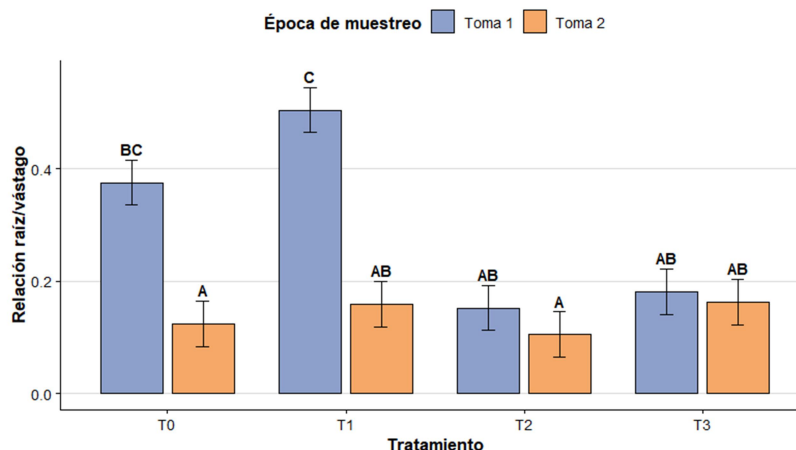
Nota

DMS = 0,23206; Error = 0,0034; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La interacción muestra que la diferencia entre tratamientos fue más marcada en la *Toma de datos 1* ($T1 = 0,50$ frente a $T2 = 0,15$) y se atenuó hacia la *Toma de datos 2* (0,16 frente a 0,11), lo que indica que el efecto diferencial del fósforo sobre la partición de biomasa fue más pronunciado en las etapas tempranas del establecimiento.

Figura 13

Relación R:A según Tratamiento y época de muestreo.



Área total

El análisis de varianza mostró efectos significativos de Tratamiento ($F = 9,67$; $p = 0,0049$), *Toma de datos* ($F = 176,29$; $p < 0,0001$) y su interacción ($F = 12,65$; $p = 0,0021$) (ver Apéndice, Tabla A7). La significancia de los tres factores muestra que la fuente de fertilización determinó diferencias reales en la superficie de exploración radicular, y que la magnitud de esas diferencias no fue constante en el tiempo, sino que se reconfiguró entre tratamientos conforme avanzó el establecimiento. Esto es coherente con la plasticidad morfológica de la arquitectura radicular ante cambios en la disponibilidad de recursos, que permite a la planta ajustar dinámicamente la distribución de su superficie absorbente según el nutriente limitante corregido (Freschet et al., 2021). El coeficiente de variación ($CV = 11,42\%$) es coherente con lo esperado para variables morfológicas obtenidas por procesamiento digital de imágenes.

Tabla 37

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Área total.

Tratamiento	Medias	N	E.E.	Rango
T0	522,26	4	40,28	A
T3	738,39	4	40,28	B
T2	758,50	4	40,28	B
T1	803,60	4	40,28	B

Nota

DMS = 182,43667; Error = 6491,0676; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

Tukey agrupó a los tres tratamientos fertilizados (T1 = 803,60; T2 = 758,50; T3 = 738,39 cm²) con áreas superficiales significativamente mayores que el testigo T0 (522,26 cm²), sin diferencias significativas entre ellos. Esto indica que el efecto principal de la fertilización sobre esta variable fue superar la ausencia de fertilización, más que diferenciarse marcadamente por fuente nutricional.

Tabla 38

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Área total.

Toma de datos	Medias	N	E.E.	Rango
<i>Toma de datos 1</i>	438,25	8	28,48	A
<i>Toma de datos 2</i>	973,12	8	28,48	B

Nota

DMS = 92,89410; Error = 6491,0676; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

El factor *Toma de datos* mostró un incremento de 438,25 cm² en la *Toma de datos 1* a 973,12 cm² en la *Toma de datos 2*, consistente con la expansión progresiva del sistema radicular durante el establecimiento.

Tabla 39

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Área total.

Tratamiento	Toma de datos	Medias	N	E.E.	Rango
T0	<i>Toma de datos 1</i>	339,04	2	56,97	A
T1	<i>Toma de datos 1</i>	360,73	2	56,97	A
T3	<i>Toma de datos 1</i>	417,66	2	56,97	AB
T2	<i>Toma de datos 1</i>	635,59	2	56,97	ABC
T0	<i>Toma de</i>	705,48	2	56,97	BC

Tratamiento	<i>Toma de datos</i>	Medias	N	E.E.	Rango
	<i>datos 2</i>				
T2	<i>Toma de datos 2</i>	881,41	2	56,97	CD
T3	<i>Toma de datos 2</i>	1059,13	2	56,97	DE
T1	<i>Toma de datos 2</i>	1246,47	2	56,97	E

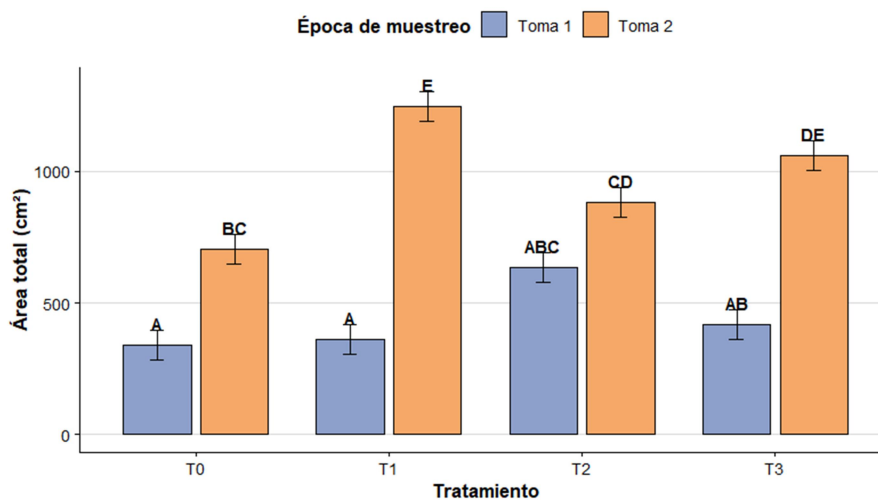
Nota

DMS = 318,81208; Error = 6491,0676; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La interacción revela que en la *Toma de datos 2* fue T1 quien alcanzó el mayor valor (1246,47 cm²), seguido de T3 (1059,13 cm²) y T2 (881,41 cm²), patrón que coincide con el efecto documentado del fósforo sobre la productividad de raíces finas y su superficie de absorción en suelos tropicales (Cusack et al., 2021).

Figura 14

Área total según Tratamiento y época de muestreo.



Volumen total

El análisis de varianza mostró efectos significativos de Tratamiento ($F = 65,29$; $p < 0,0001$), *Toma de datos* ($F = 268,98$; $p < 0,0001$) y su interacción ($F = 65,40$; $p < 0,0001$) (ver

Apéndice, Tabla A8). La significancia de los tres factores, con valores de F particularmente altos en *Toma de datos* e interacción, indica que la fuente de fertilización no solo determinó diferencias reales en el volumen radicular, sino que dichas diferencias se amplificaron marcadamente con el tiempo en lugar de atenuarse. Esto sugiere que el efecto del fósforo sobre el engrosamiento del sistema radicular no es inmediato, sino acumulativo, consistente con la lenta disponibilidad de este nutriente inmóvil y la necesidad de un desarrollo estructural sostenido para su aprovechamiento (Cusack et al., 2021). El coeficiente de variación (CV = 18,19 %) refleja la elevada variabilidad propia de esta acumulación diferencial.

Tabla 40

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Volumen total.

Tratamiento	Medias	N	E.E.	Rango
T0	39,39	4	8,03	A
T2	62,65	4	8,03	A
T3	67,29	4	8,03	A
T1	183,92	4	8,03	B

Nota

DMS = 36,37407; Error = 258,0332; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La prueba de Tukey mostró que T1 presentó un volumen radicular marcadamente superior (183,92 cm³) al de T0 (39,39 cm³), T2 (62,65 cm³) y T3 (67,29 cm³), que no difirieron entre sí. Este resultado es coherente con lo discutido en la sección 4.6.4: T1 no solo acumuló mayor biomasa radicular, sino que lo hizo mediante raíces de mayor diámetro, dado que un volumen desproporcionadamente alto respecto a la longitud es indicativo de tejido radicular más grueso y de naturaleza más estructural que absorbente (Freschet et al., 2021).

Tabla 41

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Volumen total.

Toma de datos	Medias	N	E.E.	Rango
Toma de datos 1	22,45	8	5,68	A
Toma de datos 2	154,17	8	5,68	B

Nota

DMS = 18,52115; Error = 258,0332; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

El factor *Toma de datos* mostró un incremento de 22,45 cm³ en la *Toma de datos 1* a 154,17 cm³ en la *Toma de datos 2*, reflejo del engrosamiento progresivo del sistema radicular con el desarrollo de las plántulas.

Tabla 42

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Volumen total.

Tratamiento	Toma de datos	Medias	N	E.E.	Rango
T0	Toma de datos 1	15,86	2	11,36	A
T1	Toma de datos 1	21,43	2	11,36	A
T3	Toma de datos 1	23,51	2	11,36	A
T2	Toma de datos 1	29,01	2	11,36	A
T0	Toma de datos 2	62,91	2	11,36	AB
T2	Toma de datos 2	96,29	2	11,36	B
T3	Toma de datos 2	111,08	2	11,36	B
T1	Toma de datos 2	346,42	2	11,36	C

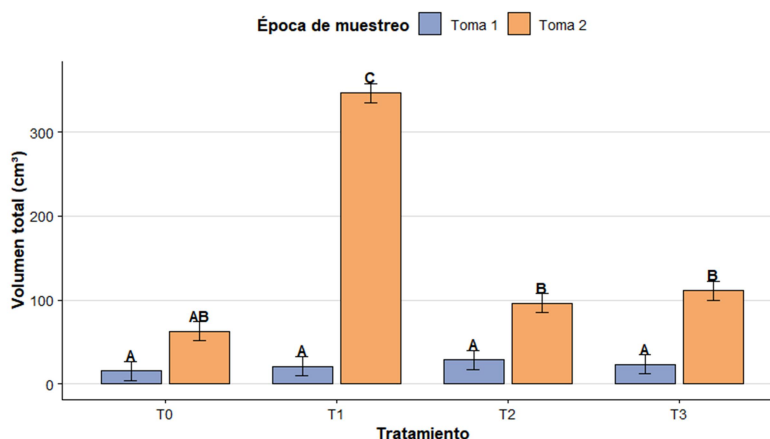
Nota

DMS = 63,56448; Error = 258,0332; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La interacción muestra que la diferencia de T1 se concentró casi por completo en la *Toma de datos 2* (346,42 cm³ frente a valores entre 62,91 y 111,08 cm³ en los demás tratamientos), lo que sugiere que el efecto del fósforo sobre el engrosamiento radicular se acumuló progresivamente durante el período de establecimiento.

Figura 15

Volumen total según Tratamiento y época de muestreo.



Número de puntas

El análisis de varianza mostró efectos significativos de Tratamiento ($F = 10,50$; $p = 0,0038$), *Toma de datos* ($F = 10,48$; $p = 0,0119$) y su interacción ($F = 17,51$; $p = 0,0007$) (ver Apéndice, Tabla A9). La significancia de los tres factores revela algo más que una simple diferencia de magnitud entre tratamientos: indica que el efecto de la fuente de fertilización sobre la actividad de ramificación cambió de dirección en el tiempo, y no solo de intensidad. Esto es coherente con la dinámica temporal de las raíces finas bajo nitrógeno descrita por Yavitt et al. (2011): el estímulo inicial que el nitrato genera sobre la proliferación de puntas de raíz se revierte una vez que la limitación nitrogenada se alivia, momento en el cual la planta deja de invertir en nueva ramificación y redirige el carbono hacia la parte aérea. El coeficiente de variación ($CV = 10,48 \%$) es adecuado para una variable de conteo obtenida por procesamiento digital.

Tabla 43

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Número de puntas.

Tratamiento	Medias	N	E.E.	Rango
T0	1558,50	4	96,20	A

Tratamiento	Medias	N	E.E.	Rango
T3	1681,00	4	96,20	A
T2	1831,00	4	96,20	A
T1	2272,50	4	96,20	B

Nota

DMS = 435,68173; Error = 37019,5000; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

Tukey ubicó a T1 con el mayor número de puntas promedio (2272,50), significativamente superior a T0 (1558,50), T3 (1681,00) y T2 (1831,00), que no difirieron entre sí.

Tabla 44

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Número de puntas.

Toma de datos	Medias	N	E.E.	Rango
Toma de datos 2	1680,00	8	68,03	A
Toma de datos 1	1991,50	8	68,03	B

Nota

DMS = 221,84281; Error = 37019,5000; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

El factor *Toma de datos* mostró, en cambio, un valor promedio mayor en la *Toma de datos 1* (1991,50) que en la *Toma de datos 2* (1680,00), una disminución que resulta atípica frente al resto de variables morfológicas y que se explica mejor al observar la interacción.

Tabla 45

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Número de puntas.

Tratamiento	Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
T2	Toma de datos 2	1086,00	2	136,05	A
T0	Toma de datos 1	1452,00	2	136,05	AB
T3	Toma de datos 1	1582,00	2	136,05	AB
T0	Toma de datos 2	1665,00	2	136,05	ABC

Tratamiento	Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
T3	Toma de datos 2	1780,00	2	136,05	ABC
T1	Toma de datos 2	2189,00	2	136,05	BCD
T1	Toma de datos 1	2356,00	2	136,05	CD
T2	Toma de datos 1	2576,00	2	136,05	D

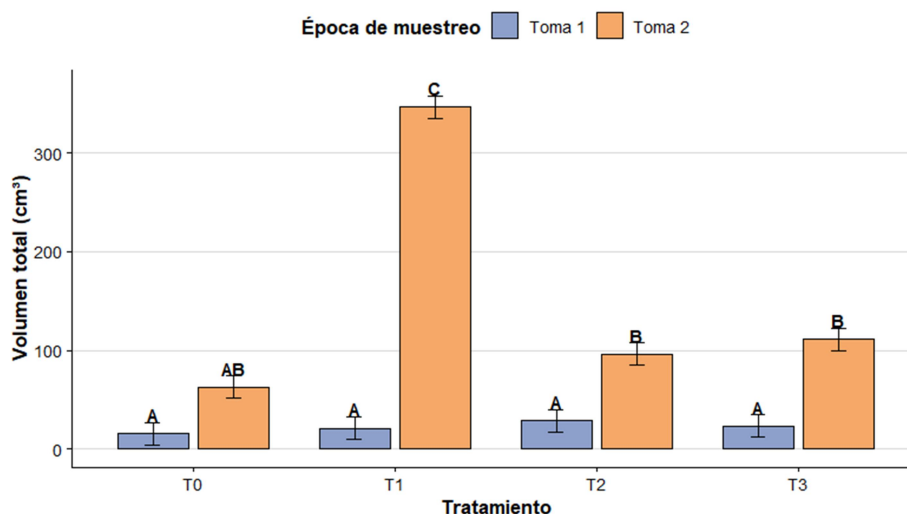
Nota

DMS = 761,36336; Error = 37019,5000; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La interacción revela el hallazgo más relevante de esta variable: en la *Toma de datos 1*, T2 (urea) presentó el mayor número de puntas (2576), mientras que en la *Toma de datos 2* pasó a ser el valor más bajo de todos los tratamientos (1086). Esta reversión es consistente con el efecto del nitrógeno sobre la dinámica temporal de raíces finas descrito por Yavitt et al. (2011): una vez aliviada la limitación nitrogenada, la planta reduce su inversión en la red absorbente y redirige el carbono hacia la biomasa aérea. En contraste, T1 mantuvo un número de puntas comparativamente estable en el tiempo (2356 a 2189), una reducción mucho más moderada que la de T2, congruente con la necesidad sostenida de explorar nuevas zonas del suelo para acceder al fósforo, nutriente inmóvil (Cusack et al., 2021).

Figura 16

Número de puntas según Tratamiento y época de muestreo.



SRL

El análisis de varianza mostró efectos significativos de Tratamiento ($F = 41,43$; $p < 0,0001$), *Toma de datos* ($F = 207,05$; $p < 0,0001$) y su interacción ($F = 42,68$; $p < 0,0001$) (ver Apéndice, Tabla A10). La significancia de los tres factores indica que la fuente de fertilización determinó diferencias reales en la eficiencia con que la planta construye longitud de exploración por unidad de biomasa invertida, y que esa eficiencia no se mantuvo constante, sino que se concentró en una etapa específica del establecimiento. Esto es coherente con el estímulo temprano y transitorio que el nitrógeno ejerce sobre la finura del sistema radicular, un efecto que se diluye conforme las raíces se engrosan con el desarrollo de la plántula (Freschet et al., 2021). El coeficiente de variación ($CV = 13,44 \%$) es moderado y consistente con el de otros índices morfofuncionales derivados de biomasa.

Tabla 46

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable SRL.

Tratamiento	Medias	N	E.E.	Rango
T1	300,89	4	33,34	A
T3	412,39	4	33,34	AB
T0	471,50	4	33,34	B
T2	800,13	4	33,34	C

Nota

DMS = 150,99269; Error = 4446,3504; $gl = 8$. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

Tukey mostró que T2 (urea) presentó el SRL más alto ($800,13 \text{ cm g}^{-1}$), significativamente superior a T0 ($471,50$), T3 ($412,39$) y T1, este último con el valor más bajo ($300,89 \text{ cm g}^{-1}$). Un SRL elevado —mayor longitud de exploración generada por unidad de biomasa invertida— es característico de sistemas radiculares más finos, mientras que un SRL bajo refleja raíces proporcionalmente más gruesas (Freschet et al., 2021); esto es consistente

con que T1 concentró la mayor biomasa y volumen radicular absolutos (secciones 4.6.4 y 4.6.8), pero con menor eficiencia de exploración por gramo invertido.

Tabla 47

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable SRL.

Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
<i>Toma de datos 2</i>	256,36	8	23,58	A
<i>Toma de datos 1</i>	736,10	8	23,58	B

Nota

DMS = 76,88328; Error = 4446,3504; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

El factor *Toma de datos* mostró una disminución del SRL de 736,10 cm g^{-1} en la *Toma de datos 1* a 256,36 cm g^{-1} en la *Toma de datos 2*, reflejo del engrosamiento progresivo del sistema radicular conforme avanzó el establecimiento.

Tabla 48

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable SRL.

Tratamiento	Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
T3	<i>Toma de datos 2</i>	195,45	2	47,15	A
T2	<i>Toma de datos 2</i>	254,37	2	47,15	A
T1	<i>Toma de datos 2</i>	266,54	2	47,15	A
T0	<i>Toma de datos 2</i>	309,07	2	47,15	A
T1	<i>Toma de datos 1</i>	335,24	2	47,15	A
T3	<i>Toma de datos 1</i>	629,33	2	47,15	B
T0	<i>Toma de datos 1</i>	633,94	2	47,15	B
T2	<i>Toma de datos 1</i>	1345,88	2	47,15	C

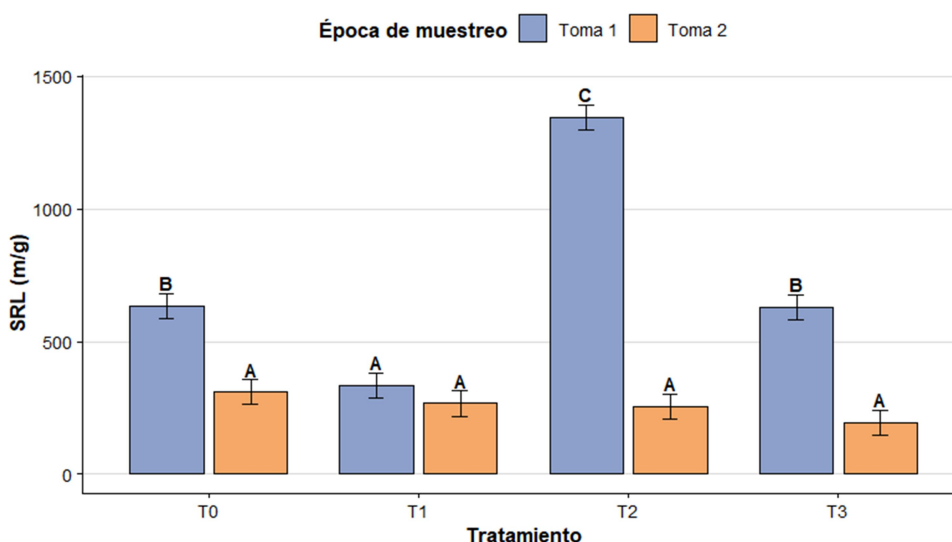
Nota

DMS = 263,86303; Error = 4446,3504; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La interacción confirma que la ventaja de T2 se concentró casi exclusivamente en la *Toma de datos 1* ($1345,88 \text{ cm g}^{-1}$), diluyéndose hacia la *Toma de datos 2* ($254,37 \text{ cm g}^{-1}$) hasta ubicarse en un rango similar al de los demás tratamientos, lo que indica que el estímulo del nitrógeno sobre la finura del sistema radicular fue un efecto temprano y no sostenido en el tiempo.

Figura 17

SRL según Tratamiento y época de muestreo.



SRA

El análisis de varianza mostró efectos significativos de Tratamiento ($F = 23,25$; $p = 0,0003$), *Toma de datos* ($F = 16,55$; $p = 0,0036$) y su interacción ($F = 21,60$; $p = 0,0003$) (ver Apéndice, Tabla A11). La significancia de los tres factores confirma el mismo patrón descrito para SRL: la fuente de fertilización determinó diferencias reales en la superficie de absorción generada por unidad de biomasa, y ese efecto se concentró en una ventana temporal específica más que mantenerse constante durante todo el establecimiento. Al ser SRA un índice complementario a SRL, ambos responden de forma conjunta a la finura y eficiencia del

sistema radicular ante la disponibilidad de nitrógeno (Freschet et al., 2021). El coeficiente de variación (CV = 14,47 %) es similar al de SRL, coherente con la naturaleza derivada de ambos índices.

Tabla 49

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable SRA.

Tratamiento	Medias	N	E.E.	Rango
T1	103,81	4	10,85	A
T3	124,19	4	10,85	A
T0	148,13	4	10,85	A
T2	223,51	4	10,85	B

Nota

DMS = 49,12445; Error = 470,6382; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

Tukey ubicó nuevamente a T2 con el valor más alto (223,51 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), significativamente superior a T0 (148,13), T3 (124,19) y T1 (103,81 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), replicando el patrón descrito para SRL, dado que ambos índices son complementarios y responden de forma similar a la eficiencia de construcción del sistema radicular por unidad de biomasa (Freschet et al., 2021).

Tabla 50

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable SRA.

Toma de datos	Medias	N	E.E.	Rango
Toma de datos 2	127,85	8	7,67	A
Toma de datos 1	171,98	8	7,67	B

Nota

DMS = 25,01345; Error = 470,6382; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

El factor *Toma de datos* mostró una disminución de 171,98 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ en la *Toma de datos* 1 a 127,85 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ en la *Toma de datos* 2, consistente con el engrosamiento general del sistema radicular en el tiempo.

Tabla 51

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable SRA.

Tratamiento	Toma de datos	Medias	N	E.E.	Rango
T1	Toma de datos 1	65,91	2	15,34	A
T3	Toma de datos 2	100,83	2	15,34	AB
T0	Toma de datos 2	130,69	2	15,34	AB
T2	Toma de datos 2	138,16	2	15,34	AB
T1	Toma de datos 2	141,72	2	15,34	AB
T3	Toma de datos 1	147,56	2	15,34	AB
T0	Toma de datos 1	165,57	2	15,34	B
T2	Toma de datos 1	308,87	2	15,34	C

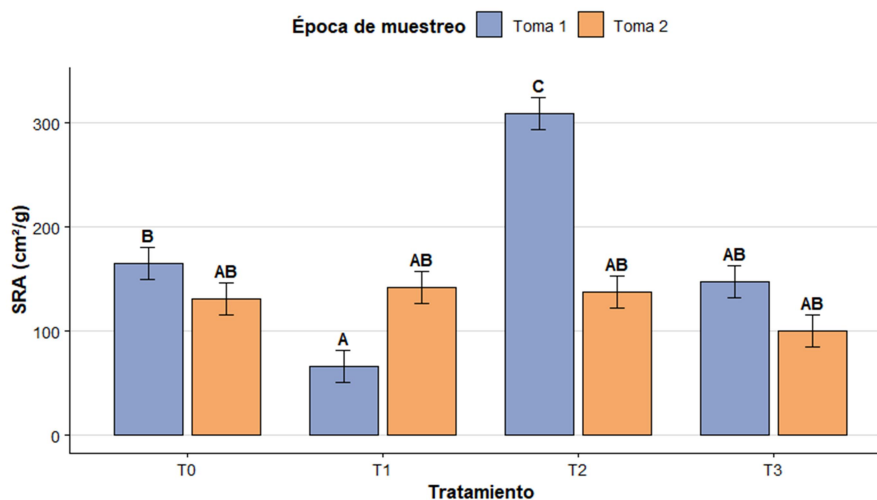
Nota

DMS = 85,84604; Error = 470,6382; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

La interacción evidencia que esta diferencia se concentró en la *Toma de datos 1* ($T2 = 308,87 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, frente a valores entre 65,91 y 165,57 $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ en los demás tratamientos), lo que refuerza la interpretación de que el estímulo del nitrógeno sobre la proliferación de raíces absorbentes finas es un efecto temprano y no necesariamente sostenido durante todo el período de establecimiento.

Figura 18

SRA según Tratamiento y época de muestreo.



Índice de Dickson

El análisis de varianza mostró efectos significativos de Tratamiento ($F = 16,07$; $p = 0,0010$) y *Toma de datos* ($F = 431,64$; $p < 0,0001$); la interacción no fue significativa ($F = 3,53$; $p = 0,0682$) (ver Apéndice, Tabla A12). Esto indica que la fuente de fertilización determinó diferencias reales en la calidad estructural global de la plántula, pero que dicha jerarquía entre tratamientos se definió tempranamente y se mantuvo estable en el tiempo, sin que ningún tratamiento cambiara su posición relativa conforme avanzó el establecimiento. Esto es coherente con que el IQD integra rasgos (relación altura/diámetro y relación biomasa aérea/radicular) cuya respuesta a la fuente nutricional, según lo discutido en las secciones anteriores, tiende a consolidarse de forma consistente antes que a revertirse con el desarrollo. El coeficiente de variación ($CV = 11,16 \%$) es moderado, coherente con el de un índice compuesto por múltiples variables.

Tabla 52

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Tratamiento en la variable Índice de Calidad de Dickson.

Tratamiento	Medias	N	E.E.	Rango
T2	0,48	4	0,04	A
T0	0,60	4	0,04	AB
T3	0,75	4	0,04	BC
T1	0,80	4	0,04	C

Nota

DMS = 0,16638; Error = 0,0054; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

Tukey mostró que T1 obtuvo el IQD promedio más alto (0,80), seguido de T3 (0,75), mientras que T2 presentó el valor más bajo (0,48), con T0 en una posición intermedia (0,60). Que T2, el tratamiento con mayor altura de planta (sección 4.6.1), registre el IQD más bajo no es contradictorio, sino que refleja precisamente el propósito de este índice: al incorporar la relación altura/diámetro y la relación entre biomasa aérea y radicular, penaliza a las plantas con

crecimiento desproporcionadamente aéreo y escaso desarrollo radicular relativo. En contraste, el mejor desempeño de T1 es consistente con el papel determinante del fósforo sobre los rasgos funcionales y de calidad de la plántula documentado para esta especie, en la cual la disponibilidad de este nutriente genera el efecto más marcado sobre el desarrollo y equilibrio estructural en comparación con otros macro y micronutrientes (Arteaga-Crespo et al., 2022).

Tabla 53

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para el factor Toma de datos en la variable Índice de Calidad de Dickson.

Toma de datos	Medias	n	E.E.	Rango
<i>Toma de datos 1</i>	0,28	8	0,03	A
<i>Toma de datos 2</i>	1,04	8	0,03	B

Nota

DMS = 0,08472; Error = 0,0054; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

El factor *Toma de datos* mostró un incremento marcado del IQD, de 0,28 en la *Toma de datos 1* a 1,04 en la *Toma de datos 2*, reflejo de la maduración estructural progresiva de las plántulas durante el período experimental.

Tabla 54

Prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la interacción Tratamiento×Toma de datos en la variable Índice de Calidad de Dickson.

Tratamiento	Toma de datos	Medias	N	E.E.	Rango
T0	<i>Toma de datos 1</i>	0,20	2	0,05	A
T2	<i>Toma de datos 1</i>	0,20	2	0,05	A
T3	<i>Toma de datos 1</i>	0,33	2	0,05	A
T1	<i>Toma de datos 1</i>	0,38	2	0,05	A
T2	<i>Toma de datos 2</i>	0,76	2	0,05	B
T0	<i>Toma de</i>	1,00	2	0,05	BC

Tratamiento	Toma de datos	Medias	N	E.E.	Rango
	datos 2				
T3	Toma de datos 2	1,17	2	0,05	C
T1	Toma de datos 2	1,23	2	0,05	C

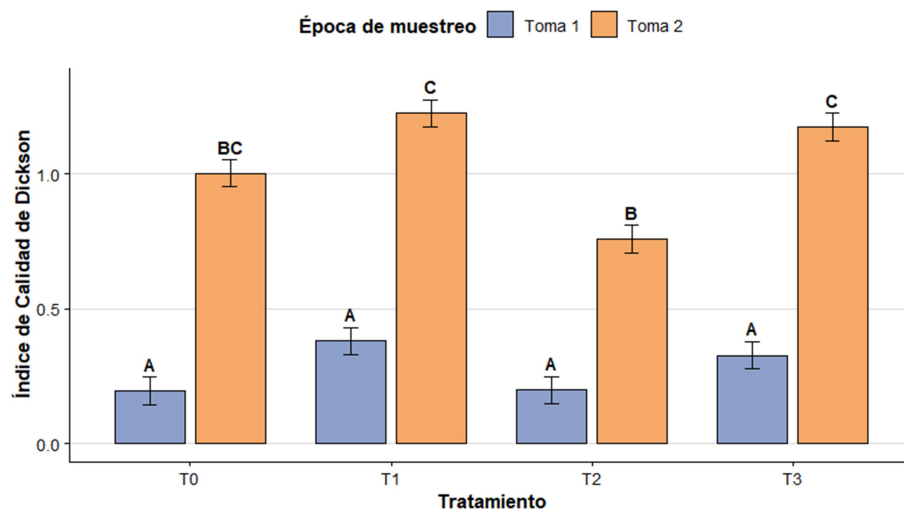
Nota

DMS = 0,29075; Error = 0,0054; gl = 8. Medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$).

Dado que la interacción tratamiento $\times$ *Toma de datos* no fue significativa, la Tabla 64 y la Figura 17 muestran que la jerarquía entre tratamientos descrita en el punto anterior se mantuvo relativamente estable entre ambas *Toma de datos*, sin que ningún tratamiento invirtiera su posición relativa en el tiempo.

Figura 19

Índice de Dickson según Tratamiento y época de muestreo.



Limitaciones del estudio

Los resultados de esta investigación deben interpretarse considerando ciertas limitaciones metodológicas. En primer lugar, el diseño experimental contempló dos repeticiones

por tratamiento en cada *Toma de datos*, un tamaño muestral reducido que, si bien es común en estudios destructivos de arquitectura radicular por la intensidad de trabajo que demandan (Freschet et al., 2021), limita la potencia estadística para detectar diferencias significativas entre tratamientos, particularmente en la interacción tratamiento $\times$ época. En segundo lugar, la extracción del sistema radicular mediante excavación manual conlleva un riesgo inherente de pérdida de material, especialmente en la fracción de raíces finas ($\leq 0,5$ mm), lo que puede subestimar sistemáticamente la longitud y biomasa de esta clase funcional (Freschet et al., 2021).

Capítulo V

Conclusiones

- La fertilización, independientemente de la fuente, incrementó significativamente el área radicular total frente al testigo absoluto, sin diferencias entre las tres fuentes evaluadas. En biomasa seca de raíz, T1 (fósforo) y T3 (12-11-18) superaron a T0 y T2. En longitud radicular, mientras que el del fósforo se consolida en la Toma de datos 2, donde T1 alcanzó el mayor SRL y SRA ($266,47 \text{ cm g}^{-1}$ y $141,64 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$) adelante.
- T2 generó la mayor altura de planta, seguido de T3 y T1, y estos por encima de T0. Sin embargo, T2 presentó el menor diámetro basal y el IQD más bajo, mientras que T1 lideró tanto el diámetro basal como el IQD, seguido de T3. Esto confirma que el fósforo tiene el mayor efecto sobre el equilibrio estructural y la calidad general de la plántula.
- La arquitectura radicular de *Ochroma pyramidale* en etapa de establecimiento respondió de forma diferenciada según la fuente de fertilización aplicada. El nitrógeno favoreció el crecimiento aéreo y la finura temprana del sistema radicular, el fósforo favoreció la biomasa radicular, el diámetro basal y la calidad de la plántula, y T3 (fuente balanceada, 12-11-18) favoreció la acumulación simultánea de biomasa en ambos órganos sin destacar en ningún índice específico

- Las tres fuentes de fertilización superaron al testigo absoluto en la mayoría de las variables analizadas, pero el manejo actual de la empresa (T3) no resultó superior en todos los aspectos frente a las alternativas evaluadas. El tratamiento fosfórico (T1) mostró mejor desempeño en biomasa radicular, razón raíz:parte aérea, diámetro basal e IQD, lo que sugiere que una fuente fosfórica podría ser una alternativa nutricional con beneficios adicionales sobre la calidad radicular de las plántulas frente al manejo comercial vigente.

Recomendaciones

- Reducir la dosis de fertilización aplicada al establecimiento de la plantación, considerando que los 50 g por planta utilizados actualmente equivalen a cerca de 12 veces el peso fresco total registrado en la Toma de datos 0 (4.12 g por plántula, resultado de 2.24 g de parte aérea y 1.88 g de raíz), proporción que representa un uso de fertilizante muy por encima de lo que la plántula puede aprovechar en esta etapa y que se traduce en un gasto innecesario de insumos para la empresa sin un beneficio proporcional en el desarrollo de la planta.

- Evaluar en campo, a escala operativa y con mayor número de repeticiones, el desempeño de un esquema de fertilización complementario que combine fósforo (10-30-10) con la fuente balanceada actualmente utilizada por la empresa (12-11-18), dado que T1 (fósforo) superó a T3 (fuente balanceada, tratamiento actualmente usado por la empresa) en diámetro basal e IQD, los dos indicadores de calidad estructural de la plántula.

- Ampliar el diseño experimental a un mayor número de repeticiones por tratamiento y época de muestreo, con el fin de incrementar la potencia estadística para detectar diferencias en la interacción tratamiento × Toma de datos, y permitir además el uso de correlaciones de Pearson entre variables radicales, dasométricas y edáficas con mayor robustez estadística.

- Extender el período de monitoreo más allá de los 60 días evaluados, para determinar si los patrones identificados, en especial la reversión temporal del efecto del

nitrógeno sobre la ramificación radicular y el IQD, se mantienen o se revierten en etapas posteriores del establecimiento.

- Caracterizar las propiedades físicas del suelo (densidad aparente, porosidad, estabilidad de agregados y capacidad de retención de humedad, entre otras) al inicio y al final del ensayo, con el fin de determinar en qué medida el desarrollo del sistema radicular bajo cada tratamiento de fertilización modifica la estructura física del suelo en el corto plazo.

- Explorar la relación entre la biomasa radicular obtenida y la capacidad de captura de carbono de la especie, mediante la aplicación de ecuaciones alométricas específicas para *Ochroma pyramidale*, con el fin de estimar el aporte del sistema radicular al almacenamiento de carbono bajo cada esquema de fertilización.

Referencias

- Arteaga-Crespo, Y., García-Quintana, Y., Bravo-Medina, C., & Ureta-Leones, D. (2022). Respuesta morfofisiológica de *Ochroma pyramidale* producida en viveros mediante tecnología biopot a la fertilización con N, P, K utilizando un diseño óptimo personalizado. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 10(1), 31–43. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2310-34692022000100031&script=sci_abstract
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils* (14.^a ed.). Pearson Prentice Hall.
- Bouma, T. J., Nielsen, K. L., & Koutstaal, B. (2000). Sample preparation and scanning protocol for computerised analysis of root length and diameter. *Plant and Soil*, 218, 185–196. <https://doi.org/10.1023/A:1014905104017>
- Cabrera, M. L., Kissel, D. E., & Bock, B. R. (1991). Urea hydrolysis in soil: Effects of urea concentration and soil pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 23(12), 1121–1124. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(91\)90023-D](https://doi.org/10.1016/0038-0717(91)90023-D)

Cadena, D. (2021, 26 de abril). *Energía eólica impulsa el mercado negro de la balsa en Ecuador*.

Gestión. <https://gestion.pe/economia/mercados/energia-eolica-impulsa-el-mercado-negro-de-la-balsa-en-ecuador-noticia/>

Cañadas-López, Á., Rade-Loor, D., Siegmund-Schultze, M., Moreira-Muñoz, G., Vargas-Hernández, J., & Wehenkel, C. (2019). Growth and yield models for balsa wood plantations in the coastal lowlands of Ecuador. *Forests*, 10(9), Article 733. <https://doi.org/10.3390/f10090733>

Cárate Tandalla, D., Homeier, J., & Batáry, P. (2025). Respuestas de las plántulas de árboles tropicales a la adición de nutrientes: Un metaanálisis para comprender los cambios futuros en la dinámica de los bosques tropicales. *Current Forestry Reports*, 11, Article 3. <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00240-6>

Cusack, D. F., Addo-Danso, S. D., Agee, E. A., Andersen, K. M., Arnaud, M., Batterman, S. A., Brearley, F. Q., Ciochina, M. I., Cordeiro, A. L., Dallstream, C., Diaz-Toribio, M. H., Dietterich, L. H., Fisher, J. B., Fleischer, K., Fortunel, C., Fuchslueger, L., Guerrero-Ramírez, N. R., Kotowska, M. M., Lugli, L. F., ... Yaffar, D. (2021). Tradeoffs and synergies in tropical forest root traits and dynamics for nutrient and water acquisition: Field and modeling advances. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, Article 704469. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.704469>

Fernández, L. (2012). Efecto de la fertilización sobre el crecimiento de la balsa *Ochroma pyramidale* Cav. en la Hacienda Mira, cantón Buena Fe, provincia Los Ríos [Tesis de grado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. Repositorio Institucional UTEQ. <https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/3d8d0724-6041-47c3-9288-17cc11ecb02a/content>

Fisher, W. B., & Parks, W. L. (1958). Influence of soil temperature on urea hydrolysis and subsequent nitrification. *Soil Science Society of America Proceedings*, 22(3), 247–248.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200030008x>

- Freschet, G. T., Pagès, L., Iversen, C. M., Comas, L. H., Rewald, B., Roumet, C., Klimešová, J., Zadworny, M., Poorter, H., Postma, J. A., Adams, T. S., Bagniewska-Zadworna, A., Bengough, A. G., Blancaflor, E. B., Brunner, I., Cornelissen, J. H. C., Garnier, E., Gessler, A., Hobbie, S. E., ... McCormack, M. L. (2021). A starting guide to root ecology: Strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements. *New Phytologist*, 232(3), 973–1122. <https://doi.org/10.1111/nph.17572>
- Forestal Maderero. (s.f.). *Balso*. <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/balso.html>
- González, B., Cervantes, X., Torres, E., Sánchez, C., & Simba, L. (2010). Caracterización del cultivo de balsa (*Ochroma pyramidale*) en la provincia de Los Ríos-Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 3(2), 7–11. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4130032>
- Google. (2026). *[Ubicación de la parroquia Luz de América, Santo Domingo, Ecuador]* [Mapa]. Google Earth. <https://earth.google.com>
- Grossnickle, S. C. (2005). Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forests*, 30(2–3), 273–294. <https://doi.org/10.1007/s11056-004-8303-2>
- Grossnickle, S. C. (2012). Why seedlings survive: Influence of plant attributes. *New Forests*, 43(5–6), 711–738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI]. (2024). *Anuario meteorológico*. <https://servicios.inamhi.gob.ec/anuarios-metereologicos/>
- Intagri. (s.f.). *Propiedades físicas del suelo y el crecimiento de las plantas*. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/propiedades-fisicas-del-suelo-y-el-crecimiento-de-las-plantas>
- Larios-González, R. C., Centeno, L. G., Ríos, M. J., del Socorro Avalos Espinoza, C., & Salazar, J.

- R. C. (2021). Pérdidas de nitrógeno por volatilización a partir de dos fuentes nitrogenadas y dos métodos de aplicación. *Siembra*, 8(1), Article e2475.
- Lasisi, A. A., & Akinremi, O. O. (2021). Kinetics and thermodynamics of urea hydrolysis in the presence of urease and nitrification inhibitors. *Canadian Journal of Soil Science*, 101(2), 192–202. <https://doi.org/10.1139/cjss-2020-0044>
- Marschner, P. (Ed.). (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3.^a ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
- Morales, E. (s. f.). Apuntes metodológicos para el estudio de raíces en plantaciones forestales y bosques naturales. ¿Por qué estudiar raíces en plantaciones forestales y bosques naturales? En Simposio Internacional "Posibilidades de manejo forestal sostenible en América Tropical". CATIE.
- Pierret, A., Gonkhamdee, S., Jourdan, C., & Maeght, J.-L. (2013). IJ_Rhizo: An open-source software to measure scanned images of root samples. *Plant and Soil*, 373(1–2), 531–539. <https://doi.org/10.1007/s11014-013-1795-9>
- Sanchez, P. A., & Salinas, J. G. (1981). Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. *Advances in Agronomy*, 34, 279–406. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60889-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60889-5)
- Santiago, L. S., Wright, S. J., Harms, K. E., Yavitt, J. B., Korine, C., Garcia, M. N., & Turner, B. L. (2012). Tropical tree seedling growth responses to nitrogen, phosphorus and potassium addition. *Journal of Ecology*, 100(2), 309–316. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01904.x>
- Tisdale, S. L., Nelson, W. L., Beaton, J. D., & Havlin, J. L. (1993). *Soil fertility and fertilizers* (5.^a ed.). Macmillan Publishing Co.
- Torres, F., & Portugal, J. (2018). Evaluación de la eficiencia de fertilización nitrogenada con la

aplicación de inhibidor de la ureasa (NBPT) sobre el rendimiento en grano de maíz.

Universidad Nacional de La Plata.

https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/67924/Documento_completo_PDF.pdf-PDFA1b.pdf?sequence=1

Watson, G. W., Hewitt, A. M., Custic, M., & Lo, M. (2014). The management of tree root systems in urban and suburban settings II: A review of strategies to mitigate human impacts.

Arboriculture & Urban Forestry, 40(5), 249–271. <https://doi.org/10.48044/jauf.2014.025>

WWF-Ecuador. (2022). Análisis del sistema de explotación de la balsa y sus impactos socio económicos y ambientales en territorios indígenas de Amazonía (Autores principales: J. Illanes, T. Kwarim, C. Samaniego, & R. Sierra; Proyecto: Aumento de la Capacidad de Ejecución y Cooperación para Combatir el Tráfico Ilegal de Fauna Silvestre y de Madera en la Región Andes-Amazonía).

https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/analisis_explotacion_balsa.pdf

Yara International. (s.f.). YaraMila Complex [Ficha técnica]. <https://www.yara.es/nutricion-vegetal/productos/yaramila/yaramila-complex/>

Yavitt, J. B., Harms, K. E., Garcia, M. N., Mirabello, M. J., & Wright, S. J. (2011). Soil fertility and fine root dynamics in response to 4 years of nutrient (N, P, K) fertilization in a lowland tropical moist forest, Panama. *Austral Ecology*, 36(4), 433–445. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2010.02157.x>

Apéndice

Tabla A1

Análisis de varianza bifactorial para la variable Altura de planta

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	2154,50	3	718,17	33,72	0,0001

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
<i>Toma de datos</i>	18755,30	1	18755,30	880,69	<0,0001
Tratamiento* <i>Toma de datos</i>	326,34	3	108,78	5,11	0,0290
Error	170,37	8	21,30		
Total	21406,52	15			

Nota. SC = suma de cuadrados tipo III; gl = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F = estadístico F. N = 16; R² = 0,9920; R² Aj = 0,9851; CV = 6,73 %. Tratamiento, *Toma de datos* y su interacción (Tratamiento**Toma de datos*) resultaron estadísticamente significativos (p < 0,05).

Tabla A2

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la variable Diámetro basal

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	0,31	3	0,10	11,25	0,0031
<i>Toma de datos</i>	5,72	1	5,72	613,43	<0,0001
Tratamiento* <i>Toma de datos</i>	0,09	3	0,03	3,24	0,0814
Error	0,07	8	0,01		
Total	6,20	15			

Nota

R² = 0,9880; R² Aj = 0,9774; CV = 7,52 %. Modelo con efectos de Tratamiento, *Toma de datos* e interacción Tratamiento**Toma de datos*.

Tabla A3

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la variable Biomasa seca de la parte aérea

F.V.	SC	GI	CM	F	p-valor
Tratamiento	536,47	3	178,82	40,47	<0,0001
<i>Toma de datos</i>	7903,21	1	7903,21	1788,74	<0,0001
Tratamiento* <i>Toma de datos</i>	67,83	3	22,61	5,12	0,0289
Error	35,35	8	4,42		
Total	8542,86	15			

Nota

R² = 0,9959; R² Aj = 0,9922; CV = 6,21 %. Modelo con efectos de Tratamiento, *Toma de datos* e interacción Tratamiento**Toma de datos*.

Tabla A4

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la variable Biomasa seca de raíz

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
------	----	----	----	---	---------

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	34,89	3	11,63	29,18	0,0001
<i>Toma de datos</i>	87,98	1	87,98	220,76	<0,0001
Tratamiento× <i>Toma de datos</i>	12,54	3	4,18	10,49	0,0038
Error	3,19	8	0,40		
Total	138,61	15			

Nota

$R^2 = 0,9770$; $R^2 \text{ Aj} = 0,9569$; CV = 11,58 %. Modelo con efectos de Tratamiento, *Toma de datos* e interacción Tratamiento×*Toma de datos*.

Tabla A5

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la variable Biomasa seca total

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	714,16	3	238,05	43,42	<0,0001
<i>Toma de datos</i>	9658,96	1	9658,96	1761,68	<0,0001
Tratamiento× <i>Toma de datos</i>	122,32	3	40,77	7,44	0,0106
Error	43,86	8	5,48		
Total	10539,30	15			

Nota

$R^2 = 0,9958$; $R^2 \text{ Aj} = 0,9922$; CV = 5,95 %. Modelo con efectos de Tratamiento, *Toma de datos* e interacción Tratamiento×*Toma de datos*.

Tabla A6

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la variable Relación raíz/parte aérea

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	0,0955	3	0,0318	9,26	0,0056
<i>Toma de datos</i>	0,1092	1	0,1092	31,76	0,0005
Tratamiento× <i>Toma de datos</i>	0,0751	3	0,0250	7,28	0,0113
Error	0,0275	8	0,0034		
Total	0,3073	15			

Nota

$R^2 = 0,9105$; $R^2 \text{ Aj} = 0,8321$; CV = 26,58 %. Modelo con efectos de Tratamiento, *Toma de datos* e interacción Tratamiento×*Toma de datos*.

Tabla A7

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la variable Área total

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	188360,16	3	62786,72	9,67	0,0049
<i>Toma de datos</i>	1144332,97	1	1144332,97	176,29	<0,0001
Tratamiento× <i>Toma de datos</i>	246395,84	3	82131,95	12,65	0,0021
Error	51928,54	8	6491,07		
Total	1631017,51	15			

Nota

$R^2 = 0,9682$; $R^2 \text{ Aj} = 0,9403$; CV = 11,42 %. Modelo con efectos de Tratamiento, *Toma de datos* e interacción Tratamiento×*Toma de datos* .

Tabla A8

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la variable Volumen total

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	50541,61	3	16847,20	65,29	<0,0001
<i>Toma de datos</i>	69404,85	1	69404,85	268,98	<0,0001
Tratamiento× <i>Toma de datos</i>	50623,16	3	16874,39	65,40	<0,0001
Error	2064,27	8	258,03		
Total	172633,89	15			

Nota

$R^2 = 0,9880$; $R^2 \text{ Aj} = 0,9776$; CV = 18,19 %. Modelo con efectos de Tratamiento, *Toma de datos* e interacción Tratamiento×*Toma de datos* .

Tabla A9

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la variable Número de puntas

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	1166353,00	3	388784,33	10,50	0,0038
<i>Toma de datos</i>	388129,00	1	388129,00	10,48	0,0119
Tratamiento× <i>Toma de datos</i>	1944433,00	3	648144,33	17,51	0,0007
Error	296156,00	8	37019,50		
Total	3795071,00	15			

Nota

$R^2 = 0,9220$; $R^2 \text{ Aj} = 0,8537$; CV = 10,48 %. Modelo con efectos de Tratamiento, *Toma de datos* e interacción Tratamiento×*Toma de datos* .

Tabla A10

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la variable SRL

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	552605,77	3	184201,92	41,43	<0,0001
<i>Toma de datos</i>	920601,87	1	920601,87	207,05	<0,0001
Tratamiento× <i>Toma de datos</i>	569304,27	3	189768,09	42,68	<0,0001
Error	35570,80	8	4446,35		
Total	2078082,72	15			

Nota

$R^2 = 0,9829$; $R^2 \text{ Aj} = 0,9679$; $CV = 13,44 \%$. Modelo con efectos de Tratamiento, *Toma de datos* e interacción Tratamiento×*Toma de datos* .