



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES**

**CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR,  
MODALIDAD PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**TEMA:**

**“Análisis del efecto de sustratos en el desarrollo vegetativo de *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze en Ibarra - Ecuador”**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Forestal**

**Línea de investigación: Desarrollo agropecuario y forestal sostenible**

**Autor: Rogger Ricardo Cardenas Quintero**

**Director: Ing. José Gabriel Carvajal Benavides Mgs.**

Ibarra - noviembre – 2025



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

**IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	0803753953	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Cardenas Quintero Rogger Ricardo	
<b>DIRECCIÓN:</b>	Ibarra	
<b>EMAIL:</b>	rrcardenasq@utn.edu.ec	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>		<b>TELF. MOVIL</b> 0969258599

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	Análisis del efecto de sustratos en el desarrollo vegetativo de <i>Caesalpinia spinosa</i> (Molina) Kuntze en Ibarra - Ecuador
<b>AUTOR:</b>	Cardenas Quintero Rogger Ricardo
<b>FECHA: AAAAMMDD</b>	2025/11/24
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
<b>CARRERA/PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>GRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero Forestal
<b>DIRECTOR:</b>	Ing. José Gabriel Carvajal Benavides Mgs.

## **AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD**

Yo, Rogger Ricardo Cardenas Quintero, con cédula de identidad Nro. 0803753953, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 24 días del mes de noviembre de 2025

**EL AUTOR:**

Firma:

Nombre: Rogger Ricardo Cardenas Quintero

## **CONSTANCIAS**

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 24 días, del mes de noviembre de 2025

### **EL AUTOR:**

Firma:

Nombre: Rogger Ricardo Cardenas Quintero

# **CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR**

Ibarra, 24 de noviembre de 2025

Ing. Gabriel Carvajal Mgs.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f) .....  
*Ing. Gabriel Carvajal Mgs.*  
*C.C.:1002412052*

## APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “**Análisis del efecto de sustratos en el desarrollo vegetativo de *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze en Ibarra - Ecuador**” elaborado por Rogger Ricardo Cardenas Quintero, previo a la obtención del título de Ingeniero Forestal, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f):.....  
Ing. Gabriel Carvajal Mgs.  
C.C.:1002412052

(f):.....  
Ing. Manolo Carrión Mgs.  
C.C.1001695129

## **DEDICATORIA**

*La presente investigación está dedicada a un grupo en particular de personas y son aquellas que han decidido salir adelante solas y a las que la vida les ha puesto más obstáculos que oportunidades. Me veo reflejado y me siento parte de las personas que han vivido momentos en la vida donde todo se desmorona y sientes que ya no hay forma de avanzar, han sido años complicados al no contar con un apoyo total por parte de casi nadie y poder asegurar que todo lo que he logrado ha sido principalmente por esfuerzo propio, en un mundo tan competitivo y lleno de injusticias he sobrevivido para poder escribir y cerrar este capítulo por ello a ti que tienes que trabajar y estudiar al mismo tiempo, nunca te olvides que la verdadera fuerza de voluntad viene de ti y eres la única persona responsable de tu estado emocional, físico y mental así que continua e intenta siempre mejorar, redimirte y cambiar cualquier aspecto tuyo que no te permita progresar ya que “La vida es demasiado corta para frustrarse con cosas insignificantes”.*

## AGRADECIMIENTO

*No existe un orden específico para agradecer a las pocas personas que formaron parte de este proyecto de investigación, normalmente existen muchas personas involucradas detrás de algo tan significativo como la creación de ciencia en su máxima expresión.*

*Por ello quiero hacer mención y agradecer a mis padres por haberme apoyado mis primeros meses en una ciudad donde no conocía a nadie y poder pagar un arriendo y sobrevivir con lo poco que me pudieron ayudar inicialmente.*

*A mi prima que ha sido un pilar fundamental en mi vida al ser como mi hermana y brindarme su ayuda de todas las formas que le fue posible y que sin duda alguna ella es una de las principales razones por las que pude concluir con este proyecto gracias, muchas gracias Michu.*

*A mis amigas que siempre estuvieron para mí, con todo su apoyo y ánimos para ayudarme a seguir adelante sin importar lo que pase, gracias por estar ahí Gaby, Danny y Male.*

*A los ingenieros Gabriel Carvajal, Manolo Carrión y Guillermo Varela que me guiaron adecuadamente por cada punto de la investigación en la parte técnica y siempre pendientes de mis avances.*

*A la Universidad Técnica del Norte que con sus docentes y personal administrativo lograron formar a una persona con valores y conocimiento suficiente capaz de elaborar un trabajo de investigación de este nivel.*

*Finalmente, y de manera irónica quiero agradecer a todas las personas que me pusieron trabas, que no confiaron en mí, que hicieron todo lo que estuvo a su alcance para hundirme y menospreciarme. Sin ustedes estando ahí y aunque sea de capricho, no me hubiera esforzado tanto para demostrar lo equivocados que estaban y todo gracias a cada uno de ustedes.*

## RESUMEN EJECUTIVO

Este estudio evaluó cinco mezclas de sustratos para determinar cuál de ellas favorece mejor el crecimiento y la calidad general de las plántulas de *Caesalpinia spinosa*, con el propósito de mejorar las prácticas de vivero y reducir el uso de insumos a nivel local. Se midieron el pH, la humedad y la temperatura de los sustratos, y se registró el crecimiento de las plántulas (longitud de tallo y raíz, diámetro del cuello y peso fresco y seco) en un ensayo controlado con tres repeticiones por tratamiento. Los resultados se analizaron mediante ANOVA con comparaciones posteriores, y el vigor de las plántulas se resumió utilizando el Índice de Calidad de Dickson (DQI); los resultados indicaron diferencias significativas del efecto de los sustratos en la longitud radicular, engrosamiento del cuello y relaciones de biomasa de las plántulas, destacando las mezclas que incluyen fibra de coco y perlita por generar plántulas con mejor equilibrio raíz–parte aérea y mayor ICD; se concluye que la formulación del sustrato condiciona de manera determinante la calidad de las plántulas y que las mezclas con fibra de coco y silicato aluminico vítreo de origen volcánico (perlita expandida) constituyen una alternativa recomendada para protocolos de producción en vivero.

**Palabras clave:** *Caesalpinia spinosa*, sustratos, fibra de coco, perlita, Índice de Calidad de Dickson, plántulas

## ABSTRACT

This study tested five substrate mixes to see which one best supports the growth and overall quality of *Caesalpinia spinosa* seedlings, a step aimed at improving nursery routines and lowering input needs locally. We measured substrate pH, moisture and temperature, and tracked seedling growth (shoot/root length, stem-collar diameter, and fresh/dry weight) in a controlled trial with three replicates per treatment. Results were analyzed by ANOVA with follow-up comparisons, and seedling vigor was summarized using the Dickson Quality Index. Results revealed significant effects of substrate formulation on root length, stem-collar thickening and biomass relationships, highlighting mixes containing coconut fiber and perlite as producing seedlings with a better root-to-shoot balance and higher DQI. It is concluded that substrate formulation is a decisive factor for seedling quality and that mixes containing coconut fiber and expanded perlite (a vitreous volcanic aluminum-silicate) constitute a recommended alternative for nursery production protocols.

**Keywords:** *Caesalpinia spinosa*, substrates, coconut fiber, perlite, Dickson Quality Index (DQI), seedlings.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	1
6	
<b>Problema de investigación.....</b>	<b>16</b>
<i>Problemática.....</i>	<i>16</i>
<i>Formulación del problema de investigación.....</i>	<i>16</i>
<b>Justificación.....</b>	<b>17</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>17</b>
<i>Objetivo general.....</i>	<i>17</i>
<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>17</i>
<b>Hipótesis.....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>19</b>
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>19</b>
<b>1.1 Fundamentos teórico - históricos.....</b>	<b>19</b>
<i>1.1.2 Método científico.....</i>	<i>19</i>
<i>1.1.3 Experimentos pioneros.....</i>	<i>20</i>
<i>1.1.4 Actualidad.....</i>	<i>20</i>
<b>1.2. Vivero.....</b>	<b>20</b>
<i>1.2.1 Clasificación de viveros.....</i>	<i>21</i>
<b>1.3. Sustrato.....</b>	<b>22</b>
<i>1.3.1 Definición.....</i>	<i>22</i>
<i>1.3.2 Clasificación de sustratos.....</i>	<i>22</i>
<i>1.3.3 Propiedades de los sustratos.....</i>	<i>23</i>
<b>1.4 Guarango (<i>Caesalpinia spinosa</i> (Molina) Kuntze).....</b>	<b>26</b>
<i>1.4.1 Descripción.....</i>	<i>27</i>
<i>1.4.2 Distribución geográfica.....</i>	<i>27</i>
<i>1.4.3 Taxonomía.....</i>	<i>27</i>
<i>1.4.4. Condiciones edafoclimáticas.....</i>	<i>27</i>
<i>1.4.5. Importancia ecológica y socioeconómica de <i>Caesalpinia spinosa</i>.....</i>	<i>28</i>
<b>1.5 Desarrollo vegetativo de las plantas.....</b>	<b>28</b>
<i>1.5.1 Definición.....</i>	<i>28</i>
<i>1.5.2 Fases del desarrollo vegetativo.....</i>	<i>29</i>
<i>1.5.3 Factores que influyen en el desarrollo vegetativo.....</i>	<i>30</i>
<i>1.5.4 Parámetros para evaluar el desarrollo vegetativo.....</i>	<i>31</i>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>34</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>34</b>

<b>2.1 Tipo de investigación</b> .....	34
<b>2.2 Ubicación del lugar</b> .....	34
<b>2.2.1 Política</b> .....	34
<b>2.2.2 Geográfica</b> .....	35
<b>2.2.3 Límites</b> .....	35
<b>2.3 Caracterización edafoclimática del lugar</b> .....	35
<b>2.3.1 Suelo</b> .....	35
<b>2.3.2 Clima</b> .....	36
<b>2.4 Materiales, equipos y software</b> .....	36
<b>2.5 Métodos, técnicas e instrumentos</b> .....	36
<b>2.5.1 Diseño experimental</b> .....	36
<b>2.5.2 Instalación del experimento</b> .....	38
<b>2.5.2 Control de temperatura y humedad</b> .....	41
<b>2.5.3 Variables</b> .....	43
<b>CAPÍTULO III</b> .....	48
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	48
<b>3.1 Comportamiento de los sustratos en función de sus características básicas</b> .....	48
<b>3.1.2 Potencial de hidrógeno del sustrato</b> .....	48
<b>3.1.2 Humedad del sustrato</b> .....	53
<b>3.1.3 Temperatura del sustrato</b> .....	57
<b>3.2 Características morfológicas de la parte aérea y radicular de las plántulas de <i>Caesalpinia spinosa</i></b> .....	62
<b>3.2.1 Altura del tallo</b> .....	62
<b>3.2.2 Diámetro del cuello de la plántula</b> .....	64
<b>3.2.3 Número de hojas de la plántula</b> .....	65
<b>3.2.4 Longitud de la radícula de la plántula</b> .....	67
<b>3.2.5 Relación biomasa peso seco/peso verde de la plántula</b> .....	69
<b>3.2.6 Relación longitud tallo/raíz de la plántula</b> .....	70
<b>3.2.7 Relación peso seco tallo/raíz de la plántula</b> .....	71
<b>3.3 Características fisiológicas de la parte aérea y radicular de las plántulas de <i>Caesalpinia spinosa</i></b> .....	73
<b>3.3.1 Velocidad de crecimiento longitudinal del tallo</b> .....	73
<b>3.3.2 Velocidad de crecimiento diametral de cuello</b> .....	75
<b>3.3.3 Tasa de supervivencia de plántulas</b> .....	76
<b>3.3.4 Índice de calidad de dickson de las plántulas</b> .....	77
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	80

<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	80
<b>4.1 Conclusiones</b> .....	80
<b>4.2 Recomendaciones</b> .....	80
<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	82
<b>Anexos</b> .....	94

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Materiales, equipos y software empleados en la investigación.</i> .....	36
Tabla 2. <i>Composición estructural de los sustratos empleados con sus respectivas proporciones</i> .....	37
Tabla 3.....	38
Tabla 4. <i>Escala de clasificación de árboles con fines comerciales y ecológicos</i> .....	40
Tabla 5. <i>Cuadro de los espacios ocupados en el diseño experimental con su respectiva área.</i> .....	41
Tabla 6. <i>Tabla resumen de los componentes del diseño experimental</i> .....	42
Tabla 7. <i>Cuadro de Análisis de la varianza del potencial de hidrógeno en cada tratamiento de las 14 semanas evaluadas</i> .....	48
Tabla 8. <i>Cuadro de prueba de Tukey del potencial de hidrógeno en cada tratamiento de las 14 semanas evaluadas</i> .....	49
Tabla 9. <i>Cuadro de rangos del potencial de hidrógeno de cada tratamiento en base a las 14 semanas evaluadas</i> .....	51
Tabla 10. <i>Cuadro de Análisis de la varianza de la humedad en cada tratamiento de las 14 semanas evaluadas</i> .....	54
Tabla 11. <i>Cuadro de prueba de Tukey de la humedad en cada tratamiento de las 14 semanas evaluadas</i> .....	54
Tabla 12. <i>Cuadro de rangos de la humedad de cada tratamiento en base a las 14 semanas evaluadas</i> .....	56
Tabla 13. <i>Cuadro de Análisis de la varianza del Gradiente térmico en cada tratamiento de las 14 semanas evaluadas</i> .....	57
Tabla 14. <i>Cuadro de prueba de Tukey del Gradiente térmico en cada tratamiento de las 14 semanas evaluadas</i> .....	58
Tabla 15. <i>Cuadro de rangos del Gradiente térmico de cada tratamiento en base a las 14 semanas evaluadas</i> .....	60
Tabla 16. <i>Cuadro de Análisis de la varianza de la altura del tallo de la plántula a las 14 semanas</i> ...	62
Tabla 17. <i>Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey de la altura del tallo de la plántula a las 14 semanas</i> .....	62
Tabla 18. <i>Cuadro de Análisis de la varianza de la altura del tallo de la plántula a las 14 semanas</i> ...	64
Tabla 19. <i>Cuadro de prueba de comparaciones múltiples de Dunn del diámetro de cuello de la plántula a las 14 semanas</i> .....	64
Tabla 20. <i>Cuadro de Análisis de la varianza del número de hojas de la plántula a las 14 semanas</i> ...	66
Tabla 21. <i>Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey del número de hojas de la plántula a las 14 semanas</i> .....	66
Tabla 22. <i>Cuadro de Análisis de la varianza de longitud de la radícula de la plántula a las 14 semanas</i> .....	68
Tabla 23. <i>Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey de longitud de la radícula de la plántula a las 14 semanas</i> .....	68

Tabla 24. Cuadro de prueba de Kruskal-Wallis de longitud de la relación biomasa peso seco/peso verde de la plántula a las 14 semanas .....	69
Tabla 25. Cuadro de la prueba de comparación múltiple de Dunn, con ajuste de Bonferroni de la relación biomasa peso seco/peso verde de la plántula a las 14 semanas .....	69
Tabla 26. Cuadro de Análisis de la varianza de la relación longitud tallo/raíz de la plántula a las 14 semanas .....	70
Tabla 27. Cuadro de Análisis de la varianza de la relación peso seco tallo/raíz de la plántula a las 14 semanas .....	72
Tabla 28. Cuadro de Análisis de la varianza de la velocidad de crecimiento longitudinal del tallo de la plántula a las 14 semanas .....	73
Tabla 29. Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey de la velocidad de crecimiento longitudinal del tallo de la plántula a las 14 semanas.....	73
Tabla 30. Cuadro de Análisis de la varianza de la velocidad de crecimiento diametral del tallo de la plántula a las 14 semanas .....	75
Tabla 31. Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey de la velocidad de crecimiento diametral del tallo de la plántula a las 14 semanas.....	75
Tabla 32. Cuadro de Análisis de la varianza de la tasa de supervivencia de plántulas a las 14 semanas .....	76
Tabla 33. Cuadro de Análisis de la varianza del índice de calidad de dickson de las plántulas a las 14 semanas .....	77
Tabla 34. Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey del índice de calidad de dickson de las plántulas a las 14 semanas .....	78
Tabla 35.....	94
Tabla 36. Cuadro de la prueba de Levene (modificado) de la variable pH en las semanas de cada tratamiento .....	94
Tabla 37. Cuadro de la prueba de evaluación del modelo de la variable pH en las semanas de cada tratamiento .....	94
Tabla 38. Cuadro de la prueba de Shapiro-Wilks (modificado) de la variable humedad en las semanas de cada tratamiento.....	94
Tabla 39. Cuadro de la prueba de Levene (modificado) de la variable humedad en las semanas de cada tratamiento .....	95
Tabla 40. Cuadro de la prueba de evaluación del modelo de la variable humedad en las semanas de cada tratamiento .....	95
Tabla 41. Cuadro de la prueba de Shapiro-Wilks (modificado) de la variable gradiente térmico en las semanas de cada tratamiento.....	95
Tabla 42. Cuadro de la prueba de Levene (modificado) de la variable gradiente térmico en Las semanas de cada tratamiento.....	95
Tabla 43. Cuadro de la prueba de evaluación del modelo de la variable gradiente térmico en Las semanas de cada tratamiento.....	96
Tabla 44. Cuadro de la prueba de Shapiro-Wilks (modificado) de las variables del objetivo dos a las 14 semanas .....	96
Tabla 45. Cuadro de la prueba de Levene (modificado) de las variables del objetivo dos a las 14 semanas .....	96
Tabla 46. Cuadro de la prueba de evaluación del modelo de las variables del objetivo dos a las 14 semanas .....	96
Tabla 47. Cuadro de la prueba de Shapiro-Wilks (modificado) de las variables del objetivo tres a las 14 semanas .....	97

Tabla 48. Cuadro de la prueba de Levene (modificado) de las variables del objetivo tres a las 14 semanas .....	97
Tabla 49. Cuadro de la prueba de evaluación del modelo de las variables del objetivo tres a las 14 semanas .....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del área de las camas de germinación en el Campus Forestal Yuyucocha.....	35
Figura 2. Estructura del diseño experimental irrestricto al azar .....	41
Figura 3. Gráfica de la variación del potencial de hidrógeno en cada tratamiento en el transcurso de las semanas .....	51
Figura 4. Gráfica de la variación de la humedad en cada tratamiento en el transcurso de las semanas .....	55
Ilustración 5. Gráfica de la variación del Gradiente térmico en cada tratamiento en el transcurso de las semanas .....	59
Figura 6. Identificación de frutos de <i>Caesalpinia spinosa</i> en árboles en la ciudad de Ibarra	97
Figura 7. Instalación de la cama de germinación .....	98
Figura 8. Proceso de siembra de las semillas de <i>Caesalpinia spinosa</i> con el respectivo tratamiento pregerminativo .....	98
Figura 9. Instalación de estructura para mantener la temperatura y humedad controlada en la germinación y la emergencia de plántulas .....	98
Figura 10. Preparación del sustrato y llenado de las fundas .....	99
Figura 11. Repique de las plántulas en las fundas con los diferentes sustratos conformando el diseño experimental .....	99
Figura 12. Toma de datos del objetivo 1 con el soil tester (YIERYI 3 in 1) mediante el método de fast in situ y el higrómetro digital (PROMEX HT607). .....	99
Figura 13. Toma de datos de altura del tallo, diámetro y longitud de la radícula con el calibrador digital.....	99
Figura 14. Preparación y toma de datos de las muestras de cada unidad experimental para determinar la biomasa fresca y seca. ....	100

# INTRODUCCIÓN

## **Problema de investigación**

### ***Problemática***

Las especies nativas desempeñan un papel crucial en los ecosistemas debido a los servicios ambientales que proveen. En particular, en las zonas de bosque seco, como las presentes en Ecuador, estas especies son fundamentales para la conservación de la biodiversidad, la regulación climática y la mejora de la calidad del aire mediante la captura de carbono y la reducción de contaminantes atmosféricos (Derkzen *et al.*, 2015; Du *et al.*, 2017; Torres *et al.*, 2024). Además de sus funciones reguladoras y de soporte, estos bosques prestan servicios culturales importantes, como la recreación, el ecoturismo y el disfrute estético del paisaje (Chang *et al.*, 2017). Sin embargo, los bosques secos están entre los ecosistemas más amenazados a escala mundial, presentando tasas de deforestación y degradación superiores al promedio global (FAO, 2020).

Estas presiones limitan la regeneración natural de especies clave como *Caesalpinia spinosa*, la cual posee un valor ambiental, social y económico significativo. No obstante, la recuperación de la especie se ve dificultada por factores como el cambio de uso del suelo, la explotación insostenible y la carencia de conocimientos técnicos sobre las condiciones óptimas de cultivo en distintos sustratos. Estudios recientes señalan que la calidad del sustrato, principalmente variables como pH, retención de humedad y temperatura, inciden de manera determinante en la supervivencia y el desarrollo vegetativo de las plántulas (González, 2021; Gutiérrez *et al.*, 2023). En la ciudad de Ibarra, donde coexisten remanentes de bosque seco y prácticas agrícolas intensivas, las tasas de reforestación con especies nativas son bajas, en parte por la falta de investigaciones locales que orienten la selección de sustratos adecuados. Con frecuencia se emplean mezclas genéricas que no consideran las particularidades ecológicas y fisiológicas de la especie, lo que conduce a elevadas mortalidades de plántulas y a una recuperación limitada de las áreas degradadas. Por tanto, resulta prioritario identificar y evaluar las condiciones óptimas de sustratos para el desarrollo vegetativo de *C. spinosa*, dado que dicho conocimiento es esencial para mejorar el éxito de los programas locales de reforestación y restauración ecológica y para aumentar la resiliencia de estos ecosistemas frente a las amenazas actuales.

### ***Formulación del problema de investigación***

¿Cuáles son los sustratos más efectivos en el desarrollo vegetativo de *Caesalpinia spinosa* en la ciudad de Ibarra?

## **Justificación**

La investigación sobre el desarrollo vegetativo de *Caesalpinia spinosa* en diferentes sustratos reviste gran importancia debido a su potencial para fomentar el desarrollo sostenible en la ciudad de Ibarra y la provincia de Imbabura. Además de su valor comercial como fuente de taninos y gomas naturales, esta especie desempeña un papel esencial en la rehabilitación de suelos degradados y la mejora de ecosistemas forestales. En un contexto de creciente demanda de soluciones sostenibles para sistemas agroforestales y programas de reforestación, este estudio busca generar conocimiento aplicado que permita identificar el sustrato más adecuado para el desarrollo óptimo de *Caesalpinia spinosa* bajo condiciones locales (González, 2021; Álvarez y Muñoz, 2023; Garrido et al., 2023; Carvajal et al., 2025).

Este enfoque no solo presenta implicaciones ambientales y económicas relevantes, sino que también contribuye a cerrar vacíos de información sobre el cultivo de la especie en Ecuador. Los resultados beneficiarán de forma directa a silvicultores y gestores de viveros, quienes podrán aplicar las recomendaciones para diversificar la producción y mejorar el rendimiento de la especie. Del mismo modo, entidades encargadas de la gestión ambiental y de la silvicultura urbana podrán utilizar estos hallazgos para diseñar estrategias de reforestación y conservación de suelos más efectivas. De manera indirecta, el sector industrial contará con una fuente sostenible de materia prima de calidad, lo que puede favorecer la innovación y la elaboración de productos con menor impacto ambiental.

Además, la comunidad académica se beneficiará al disponer de datos experimentales que sirvan de base para investigaciones futuras sobre especies forestales y cultivos alternativos. La relevancia del proyecto reside en su capacidad para articular objetivos de sostenibilidad ambiental y viabilidad económica, generando impactos positivos en varios sectores. En términos de factibilidad, el estudio cuenta con personal capacitado, infraestructura disponible en la Universidad Técnica del Norte y los insumos necesarios para llevar a cabo el experimento, lo que asegura su viabilidad técnica y operativa en la región.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Evaluar la incidencia de los diferentes sustratos sobre el desarrollo vegetativo de *Caesalpinia spinosa* en la ciudad de Ibarra.

### ***Objetivos específicos***

- Analizar el comportamiento de los sustratos en función de sus características básicas.

- Examinar las características morfológicas de la parte aérea y radicular de las plántulas de *Caesalpinia spinosa*.
- Determinar las características fisiológicas de la parte aérea y radicular de las plántulas de *Caesalpinia spinosa*.

### **Hipótesis**

Hipótesis nula (H0): Los sustratos empleados no presentan diferencias significativas en el desarrollo vegetativo de las plántulas de *Caesalpinia spinosa*.

Hipótesis alterna (H1): Al menos uno de los sustratos empleados presenta diferencias significativas en el desarrollo vegetativo de las plántulas de *Caesalpinia spinosa*.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Fundamentos teórico - históricos

Desde los orígenes de la humanidad, la práctica del cultivo en vivero ha transitado desde el empleo de suelos locales y mezclas en base al conocimiento empírico (tierra + arena + materia orgánica) hacia fórmulas controladas denominadas «sustratos», diseñados para separar la función de soporte físico de la función nutritiva y optimizar la aireación, retención hídrica y suministro de nutrientes en las plantas. A partir de la segunda mitad del siglo XX, la disponibilidad comercial de materiales inertes (perlita, vermiculita) y de materiales orgánicos estandarizados (turba, fibra de coco) permitió elaborar mezclas reproducibles que facilitan el manejo del riego y la fertilización a escala comercial. Paralelamente, la investigación contribuyó al desarrollo de indicadores de calidad de plántulas como el Índice de Calidad de Dickson y a metodologías de caracterización de sustratos (propiedades físicas, químicas y biológicas), que permiten relacionar la formulación del sustrato con el desempeño postrasplante.

En las últimas dos décadas se incorporaron técnicas de monitoreo in situ (sensores de pH, capacitancia para VWC, termistores) que permiten seguimiento temporal de la rizosfera y una interpretación dinámica de procesos de disponibilidad hídrica, intercambio iónico y gradientes térmicos. Este recorrido histórico y metodológico contextualiza la elección de variables y el diseño experimental de la presente investigación que compara mezclas con fibra de coco, perlita, viruta de madera y cascarilla de arroz con fracciones orgánicas (champiñonaza) y las medidas y análisis del pH, humedad y gradiente térmico responde directamente a la evolución conceptual y técnica del manejo de sustratos en viveros modernos (Marschner, 2012; Raviv y Lieth, 2019).

#### *1.1.2 Método científico*

A pesar de los avances empíricos de las civilizaciones antiguas, la aplicación del método científico a través de figuras como Galileo, Descartes y Newton permitió resultados más confiables y replicables. Este enfoque experimental, basado en contrastes y validación de resultados, revolucionó la investigación científica (Gower, 1996). En el ámbito de la silvicultura, definida como la ciencia de manejar y cultivar bosques de manera sostenible para satisfacer necesidades humanas sin agotar los recursos forestales (Carlowitz, 1713). El uso de

diferentes sustratos se ha convertido en una técnica clave para optimizar el crecimiento de especies vegetales en viveros forestales.

### **1.1.3 Experimentos pioneros**

Entre los primeros en investigar sustratos y su influencia en el desarrollo vegetativo se encuentra Jan Baptista van Helmont. En su obra *Ortus Medicinæ*, realizó un experimento plantando un sauce en una cantidad específica de tierra que pesó previamente, regándolo únicamente con agua durante cinco años. Aunque el investigador interpretó que el incremento en la masa del árbol provenía únicamente del agua, su experimento representó un avance crucial en la comprensión de los procesos vegetativos (Van Helmont, 1648). Posteriormente, John Woodward (1699) cuestionó esa interpretación en un artículo publicado en *Philosophical Transactions of the Royal Society*, demostrando que el crecimiento vegetal también depende de los nutrientes disueltos en el agua. Más adelante, el botánico Julius von Sachs (1868) aportó pruebas decisivas al mostrar que las plantas pueden desarrollarse en soluciones nutritivas sin necesidad de suelo, lo que subrayó el potencial de los sustratos y las soluciones de cultivo en la investigación fisiológica.

### **1.1.4 Actualidad**

La acepción de silvicultura en el siglo XXI se denomina a la manipulación de la estructura de los bosques para producir determinados bienes y servicios (Espinosa *et al.*, 2017). Es considerada ecología forestal aplicada que sustenta el manejo y la conservación del bosque, debido a la relevancia global y la demanda por sus bienes y servicios ecosistémicos como la producción de madera, captura de carbono, medidas para conservar y mejorar la cantidad y calidad de agua en cuencas hidrográficas. Sin embargo, no intervenir un bosque es una medida en aquellos que se están desarrollando adecuadamente o está cumpliendo los objetivos deseados por su propietario (Salas, 2023).

## **1.2. Vivero**

Un vivero se define como una instalación técnica destinada a la producción de plantas jóvenes con las condiciones necesarias para su establecimiento en campo. En estos espacios se garantiza la calidad fisiológica y genética de las especies cultivadas, constituyendo un componente esencial para la producción frutal, hortícola, forestal y ornamental. Su diseño combina infraestructura (protecciones, camas de germinación, contenedores, etc.), manejo del microclima (sombra, riego, ventilación) y decisiones sobre insumos (semilla, sustrato, fertilización) (Espinosa *et al.*, 2017; Krishnan *et al.*, 2014; Quiñones, 2015).

### **1.2.1 Clasificación de viveros**

Los viveros poseen diferentes enfoques y clasificaciones y cada una impone restricciones y oportunidades para el manejo de sustratos: por ejemplo, en viveros forestales al aire libre la intervención en el sustrato se limita a la mezcla inicial y fertilización, mientras que en invernaderos se puede manejar riego y temperatura con mayor precisión, lo que influye en la estabilidad de pH y humedad del medio. Para estudios experimentales, especificar el tipo de vivero (en este caso la estructura inicial fue una cobertura con sarán y plástico, riego programado y repique en fundas) permite justificar la extrapolación de resultados y las recomendaciones prácticas.

#### **1.2.1.1 Según el lugar.**

Viveros de exterior, las plantas están al aire libre sin sombreadores ni otras instalaciones protectoras de los rayos solares, debido a ello se adaptan al medio y clima del lugar que se están desarrollando, es uno de los viveros más empleados. Viveros de interior, las plantas se cultivan bajo ambiente controlado, sombreadores e instalaciones específicas según los requerimientos de la especie (Krishnan *et al.*, 2014).

#### **1.2.1.2 Según el propietario.**

Públicos, pertenecen al Gobierno Central, Ministerios o Gobiernos Autónomos, su producción es destinada al uso común, no se comercializan. Comunales, pertenecen generalmente a agrupaciones y el beneficio de su comercialización va a la comunidad. Privados, pertenecen a empresas privadas u ONG, manejan su producción bajo contrato o demanda del mercado (Espinosa *et al.*, 2017).

#### **1.2.1.3 Según su destino.**

Comerciales, producción destinada a la comercialización local o de exportación. No comerciales, son llevados por entidades públicas o privadas, tienen como fin la producción de plántulas para plantaciones propias (Quiñones, 2015).

#### **1.2.1.4 Según la especie.**

Viveros forestales producen especies de árboles para aprovechamiento maderable o de productos forestales no maderables. Viveros hortícolas producen especies de interés agrícola. Viveros frutales producen especies frutales mediante técnicas de injertos o siembra directa. Viveros ornamentales producen especies de interés decorativo o de regalos como flores (Krishnan *et al.*, 2014).

### **1.2.1.5 Según el tiempo.**

Los viveros permanentes se establecen de forma indefinida y requieren una infraestructura básica: invernaderos, camas de germinación, sistema de riego, almacén, áreas de servicio para el personal, equipos y un plan de producción y manejo. Por el contrario, los viveros temporales se montan por periodos cortos, generalmente próximos al lugar destinado a la plantación de la especie de interés; suelen tener estructuras más sencillas y menores costos de instalación y mantenimiento (Espinosa et al., 2017).

## **1.3. Sustrato**

Radica en la naturaleza de los materiales empleados en vivero, su clasificación, propiedades y efectos sobre el desarrollo de plántulas, donde el orden sistemático determina: (a) definición y clasificación de sustratos, (b) propiedades físicas (textura, porosidad, densidad aparente), (c) propiedades químicas (pH, CIC, CE, contenido de nutrientes) y (d) propiedades biológicas (actividad microbiana, presencia de simbiontes). Esta organización facilita vincular cada propiedad con una variable respuesta de la planta (altura, biomasa, índice de Dickson) y con las mediciones instrumentales (sensores in situ).

### ***1.3.1 Definición***

Es una concepción que desde una perspectiva productiva ha ido evolucionando a partir del concepto de suelo como un sistema complejo que proporciona soporte físico, nutrientes esenciales y agua a las plantas y que favorece la interacción entre las partículas minerales y la materia orgánica formando un medio adecuado para el desarrollo vegetal (Gregory y Nortcliff, 2013). Sin embargo, en el contexto de producción de plántulas en vivero un sustrato es cualquier material colocado en un contenedor, permite el anclaje del sistema radicular de las plantas y se considera adecuado si posee alta porosidad, capacidad de retención de agua, buen drenaje y aireación (Ansorena, 1994; Salazar y Añazco, 2022).

### ***1.3.2 Clasificación de sustratos***

La clasificación general se limita en sustratos: (i) inertes (perlita, arena, piedra pómez) que aportan estructura y drenaje, pero no nutrientes ni CIC; (ii) orgánicos (turba, fibra de coco, compost, champiñonaza) que aportan retención hídrica, CIC y materia orgánica; y (iii) mixtos o compuestos (formulaciones comerciales o mezclas artesanales) que buscan balancear aireación y retención. Cada clase tiene ventajas y limitaciones: los inertes facilitan la aireación y reducen riesgo de salinidad, los orgánicos aumentan agua disponible y CIC, pero pueden presentar fluctuaciones de pH durante mineralización.

### **1.3.2.1 Según su influencia.**

Los inertes que poseen una capacidad de adsorción catiónica baja o nula, al no retener nutrientes ni interferir con las soluciones nutritivas que se añaden al sistema (Bunt, 2012). Por otro lado, los activos están conformados por materiales que retienen una cantidad considerable de cationes y modifican significativamente la solución nutritiva del sistema (Sonneveld y Voogt, 2009).

### **1.3.2.2 Según el origen de los materiales.**

Orgánicos donde sus materiales provienen de la descomposición biológica de materia orgánica como turbas, la fibra de coco, corteza de pino, etc. (Bunt, 2012). Por otra parte, los inorgánicos se conforman por materiales que se encuentran en la naturaleza como arena, grava, piedra pómez, roca volcánica, etc. También se pueden procesar mediante tratamientos físicos o térmicos para modificar sus características o mezclarlos para mejorar sus propiedades como perlita, vermiculita, biotita, etc. (Sonneveld y Voogt, 2009). Y los mixtos que son combinaciones de componentes orgánicos e inorgánicos, con la finalidad de aprovechar las ventajas de ambos materiales y equilibrar los beneficios como retención de agua, porosidad y la disponibilidad de nutrientes, adaptándose a las necesidades específicas de diferentes cultivos (Bunt, 2012).

## ***1.3.3 Propiedades de los sustratos***

Se agrupan en físicas, químicas y biológicas, y cada grupo condiciona procesos vitales en la rizosfera. Las propiedades físicas de un sustrato, como la textura, la porosidad y la densidad aparente, influyen directamente en el movimiento y la retención del agua y del aire. Las propiedades químicas, entre ellas el pH, la conductividad eléctrica (CE) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), determinan la disponibilidad de nutrientes y el riesgo de toxicidad iónica. A su vez, las propiedades biológicas, como la actividad microbiana y la presencia de micorrizas, participan en la mineralización de compuestos y en la estabilidad estructural del medio. En los ensayos experimentales, resulta fundamental evaluar de manera conjunta estos atributos, ya que su interacción (por ejemplo, entre humedad, pH y temperatura) condiciona tanto la respuesta de las plantas durante la producción como la fiabilidad de las mediciones in situ.

### **1.3.3.1 Físicas.**

Entre las principales propiedades físicas del sustrato se incluyen la textura proporción entre partículas gruesas y finas, la estructura formación de agregados y distribución de poros,

la porosidad total, la densidad aparente ( $\rho_b$ ) y la capacidad de retención de agua. Estas características determinan el equilibrio entre aire y humedad en el medio: un mayor contenido de macroporos favorece el drenaje y la aireación, mientras que una mayor proporción de microporos retiene agua aprovechable, aunque puede disminuir la oxigenación radicular. En condiciones de vivero, dichas propiedades explican, por ejemplo, por qué las mezclas que contienen fibra de coco o compost presentan una mayor capacidad de retención hídrica, mientras que aquellas con perlita exhiben mejor drenaje y menor contenido volumétrico de agua (VWC). Esta dinámica influye directamente en las mediciones de pH en campo y en el gradiente térmico del sustrato, debido a los efectos combinados de la capacidad calorífica y la evaporación. Por lo tanto, las propiedades físicas principales se resumen en:

Textura que es la proporción relativa de arena, limo y arcilla que determina la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes (Shukla, 2023, p. 34);

Estructura se refiere a la disposición y organización de las partículas primarias (arena, limo y arcilla) en agregados o unidades estructurales. Esta organización determina la porosidad, la permeabilidad, y la facilidad con que el aire, el agua y las raíces se mueven a través del perfil del suelo (Shukla, 2023, p. 88).

Porosidad que es el porcentaje de volumen del suelo que no está ocupado por sólidos y que corresponde a espacios o poros, los cuales permiten el almacenamiento y movimiento de aire y agua. La porosidad es clave para la aireación radicular y la actividad microbiana (Shukla, 2023, p. 72).

Densidad aparente que representa la masa del suelo seco dividida por su volumen total (sólidos + poros). Este indicador se utiliza para evaluar el grado de compactación y la facilidad de penetración de raíces. (Shukla, 2023, p. 49).

Consistencia que se refiere a la resistencia que ofrece el suelo frente a fuerzas externas, como el laboreo o la presión radicular. Depende en gran medida del contenido de humedad y textura (Shukla, 2023, p. 53).

Color que es una propiedad indicadora del contenido de materia orgánica, minerales (como óxidos de hierro) y humedad. Su análisis proporciona pistas sobre las condiciones químicas y físicas del suelo (Gómez y Delgado, 2024, p. 28).

Humedad definida como la cantidad de agua presente en el suelo en un momento dado, fundamental para los procesos fisiológicos de las plantas y para la actividad microbiana (Shukla, 2023, p. 60).

Temperatura que controla la velocidad de las reacciones químicas y biológicas en el suelo. Influye directamente en la germinación, el crecimiento de raíces y la descomposición de la materia orgánica (Gómez y Delgado, 2024, p. 42).

### **1.3.3.2 Químicas.**

Las propiedades químicas del sustrato incluyen parámetros como el pH, la conductividad eléctrica (CE), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la fracción de nutrientes asimilables. El pH condiciona la solubilidad del fósforo, el hierro y otros micronutrientes; la CE cuantifica la salinidad y el riesgo osmótico; y la CIC indica la capacidad del medio para retener cationes básicos y regular su disponibilidad. En ensayos con mediciones in situ es imprescindible registrar el pH y la CE junto con el contenido volumétrico de agua (VWC) y la temperatura, porque estas variables interactúan: la humedad altera la actividad iónica y la temperatura modifica constantes de equilibrio. Por ello, la interpretación agronómica de diferencias estadísticas requiere conocer el contexto químico completo del sustrato antes de sacar conclusiones. Por lo tanto, las propiedades químicas principales se resumen en:

Potencial de hidrógeno que se define como la actividad del ion hidrógeno, se expresa mediante el logaritmo negativo de la concentración de dicho ion. Esta propiedad determina la acidez o alcalinidad relativa de un material. Si el pH está en el rango de 5.0 a 6.0, la mayoría de los nutrientes serán fácilmente asimilados por la planta, aunque la sensibilidad a un ambiente ácido o alcalino va a variar según la especie vegetal (Schafer y Lerner, 2022; Paul y Frey, 2023, p. 121; Zambrano *et al.*, 2024).

Capacidad de intercambio catiónico que es una propiedad de las partículas sólidas del sustrato para adsorber e intercambiar cationes, y cuanto mayor sea la carga, mayor será la afinidad de las partículas, lo que hace que esta propiedad sea importante para regular la nutrición que se añade al sustrato de cultivo (Schafer y Lerner, 2022; Paul y Frey, 2023, p. 128).

Saturación de bases se refiere a la proporción de cationes básicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ) respecto a la CIC total del suelo. Un nivel alto indica suelos fértiles y con baja acidez (Paul y Frey, 2023, p. 131).

Contenido de nutrientes es la concentración de elementos esenciales para el desarrollo vegetal, como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), entre otros (Schafer y Lerner, 2022; Gómez & Delgado, 2024, p. 37).

Salinidad se refiere a la presencia y concentración de sales solubles (iones disueltos) en el medio de cultivo, las cuales se pueden medir indirectamente a través de la conductividad eléctrica (CE). Esta propiedad indica cuántas sales están disueltas en el agua del sustrato, ya

que los iones conducen electricidad en proporción directa a su concentración (excepto la urea) (Schafer y Lerner, 2022; Paul y Frey, 2023, p. 121; Zambrano *et al.*, 2024).

Materia orgánica es la presencia de residuos vegetales y animales en distintos grados de descomposición y mejoran la estructura del suelo, incrementa la CIC y actúa como fuente de nutrientes (Paul y Frey, 2023, p. 118; Zambrano *et al.*, 2024).

### **1.3.3.3 Biológicas.**

La actividad biológica del sustrato (microbiota, hongos, potencial de mineralización) influye en liberación de nutrientes y en la estabilidad del pH a lo largo del ensayo. Por ejemplo, compost o champiñonaza mal estabilizada puede acidificar temporalmente el medio por producción de ácidos orgánicos y demanda de oxígeno. Evaluar la posible actividad microbiana (mediante indicadores sencillos como respiración basal o contenido de materia orgánica) ayuda a explicar fluctuaciones temporales en pH y en la respuesta de crecimiento de las plántulas.

La biodiversidad del suelo comprende el conjunto de organismos que habitan en él bacterias, hongos, protozoos y macrofauna como lombrices e insectos y resulta esencial para la estabilidad ecológica y el funcionamiento de los ciclos de nutrientes (Paul y Frey, 2023, p. 90).

La actividad microbiana refleja el metabolismo colectivo de la microbiota y condiciona procesos clave, entre ellos la mineralización de nutrientes y la formación de agregados estables (Paul y Frey, 2023, p. 105).

Los ciclos biogeoquímicos los flujos y las transformaciones de elementos como carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P) mediadas por los organismos del suelo, son determinantes para la sostenibilidad de los agroecosistemas y la productividad a largo plazo (Gómez y Delgado, 2024, p. 48).

## **1.4 Guarango (*Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze)**

Es una especie leguminosa nativa de zonas andinas y semiáridas de Sudamérica, valorada por su adaptación a suelos pobres y por su importancia ecológica y económica (estabilización de suelos, producción de frutos ricos en taninos). Como especie leñosa para reforestación y sistemas agroforestales, su manejo en vivero requiere atención a estrés hídrico y a características del sustrato que favorezcan un buen equilibrio raíz-tallo para asegurar supervivencia post-trasplante. En la literatura técnica se ha documentado variabilidad en respuesta a sustratos, por lo que evaluar sus requerimientos específicos (pH, humedad y temperatura radicular) es pertinente para definir protocolos de producción y maximizar tasa de establecimiento.

### **1.4.1 Descripción**

*Caesalpinia spinosa*, comúnmente conocido como guarango o tara, es un árbol leguminoso nativo de los Andes sudamericanos, que puede alcanzar alturas de entre 3 a 8 metros. Presenta hojas bipinnadas, flores amarillas agrupadas en racimos y vainas leñosas cuando secan que contienen semillas ricas en taninos. Su longevidad y rusticidad le permiten desarrollarse en ecosistemas áridos y semiáridos, siendo una especie característica de bosques secos y zonas degradadas o erosionadas (Paredes *et al.*, 2023; Murga *et al.*, 2023a).

### **1.4.2 Distribución geográfica**

En Ecuador, *Caesalpinia spinosa* se distribuye principalmente en los valles interandinos y bosques secos andinos, dentro de un rango altitudinal que varía entre 1500 y 3200 msnm, aunque existen registros en condiciones más extremas. La especie presenta una amplia adaptabilidad edafoclimática que le permite establecerse en suelos áridos, en áreas erosionadas y sobre pendientes pronunciadas. Por esta razón, se ha incorporado a estrategias de reforestación ecológica y a sistemas agroforestales en provincias como Chimborazo, Cotopaxi e Imbabura. Su rusticidad y tolerancia a suelos de baja fertilidad la convierten en una alternativa adecuada para programas de conservación de suelos y restauración de ecosistemas altoandinos (Llunitasig *et al.*, 2024).

### **1.4.3 Taxonomía**

La clasificación taxonómica de *Caesalpinia spinosa* es: Reino: Plantae; División: Magnoliophyta; Clase: Magnoliopsida; Orden: Fabales; Familia: Fabaceae; Subfamilia: Caesalpinioideae; Género: *Caesalpinia*; Especie: *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze. Esta especie fue originalmente descrita como *Poinciana spinosa* por Molina y posteriormente reclasificada al género *Caesalpinia* por Kuntze, debido a afinidades morfológicas y genéticas con otras especies del mismo género (Sprague, 1931).

### **1.4.4. Condiciones edafoclimáticas**

Esta especie se adapta a una amplia gama de condiciones edafoclimáticas. Prefiere suelos franco-arenosos, bien drenados, con pH entre 6.0 y 7.5, pero puede tolerar suelos moderadamente salinos y pobres en nutrientes. Climáticamente, prospera en regiones con precipitaciones anuales entre 250 y 900 mm y temperaturas promedio entre 10 y 24 °C. Se ha documentado que las condiciones óptimas para su crecimiento y productividad se encuentran en altitudes medias (1800–2600 msnm), donde la disponibilidad de agua y temperatura moderada favorecen el desarrollo de vainas ricas en taninos (Murga *et al.*, 2023a).

#### ***1.4.5. Importancia ecológica y socioeconómica de *Caesalpinia spinosa*.***

La especie aporta un claro valor ecológico contribuye a la recuperación de suelos y al sostén de la biodiversidad y un valor socioeconómico importante, vinculado al uso industrial de sus taninos y semillas y a su potencial como recurso forrajero. Su producción comercial en vivero puede abastecer programas de reforestación y fomentar cadenas productivas locales; por ello, optimizar los protocolos de cultivo como la formulación de sustratos, el manejo del riego y el control térmico incide directamente en la viabilidad económica y en el éxito ecológico de los proyectos de restauración.

##### **1.4.5.1 Valor ecológico.**

Posee un rol ecológico importante en la restauración de ecosistemas degradados, debido a su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico, mejorar la fertilidad del suelo y controlar la erosión. Su copa densa y su sistema radicular profundo facilitan la retención de humedad y promueven la biodiversidad del sotobosque. Además, sirve como hábitat y fuente de alimento para insectos polinizadores y aves andinas (Murga *et al.*, 2023a).

##### **1.4.5.2 Valor socioeconómico.**

Desde un punto de vista económico, las vainas del guarango son altamente valoradas por su contenido de taninos (hasta 50% en peso seco), los cuales se usan en curtido de cuero, farmacéutica y cosmética. Las semillas también se aprovechan en la elaboración de harinas ricas en galactomananos con aplicaciones industriales. En zonas rurales andinas, la tara representa una fuente clave de ingresos mediante la recolección y comercialización de sus productos, además de utilizarse en sistemas silvopastoriles y de sombra para sistemas agroforestales con café (Carvajal *et al.*, 2023; Murga *et al.*, 2023b).

### **1.5 Desarrollo vegetativo de las plantas**

El desarrollo vegetativo comprende fases desde germinación, emergencia, crecimiento inicial hasta maduración vegetativa (pre-reproductiva). Cada fase tiene requerimientos específicos de agua, temperatura y nutrientes; en vivero la manipulación de esas variables mediante sustratos y manejo (riegos, fertilización, temperatura) determina la calidad final de la plántula.

#### ***1.5.1 Definición***

La percepción de que crecimiento y desarrollo son lo mismo, realmente difieren en su concepto fundamental donde el primero se refiere al aumento cuantitativo de tamaño, masa o volumen en estructuras no reproductivas de la planta, como tallos, raíces y hojas, siendo medido

generalmente mediante parámetros morfológicos (Ali *et al.*, 2021; Maarooof *et al.*, 2022). En cambio, el desarrollo vegetativo es un proceso complejo y cualitativo que incluye al crecimiento en sus parámetros de evaluación además la diferenciación de tejidos, la progresión de fases fenológicas y la eficiencia funcional de la planta, reflejada en indicadores como las relaciones biométricas, tasas de crecimiento y adaptaciones fisiológicas al entorno (Campos *et al.*, 2023; Calderón *et al.*, 2025).

### **1.5.2 Fases del desarrollo vegetativo**

El crecimiento inicial, la expansión foliar y la lignificación son etapas en las que la interacción sustrato-planta se manifiesta en las tasas de crecimiento, la relación tallo-raíz y la acumulación de biomasa seca. Para su evaluación experimental se combinan mediciones temporales, por ejemplo, incrementos de altura, diámetro y longitud radicular registrados en intervalos definidos, con medidas integradoras como la biomasa seca, la relación de biomasa seca/verde y el Índice de Calidad de Dickson (DQI). Este conjunto de variables permite comparar de forma rigurosa la calidad y el vigor de las plántulas entre tratamientos.

#### **1.5.2.1 Germinación.**

La germinación es la fase inicial del ciclo de vida de las plantas, donde la semilla tiene una serie de cambios hormonales y se despierta de su estado de latencia. Este proceso comienza con la imbibición de agua por la semilla seca y culmina cuando la radícula del embrión atraviesa la cubierta seminal (Peng *et al.*, 2023). Durante la germinación se activan intensamente los metabolismos celulares del embrión, interrumpiendo la dormancia e iniciando el crecimiento del nuevo organismo. Es una etapa sensible a las condiciones ambientales (agua, temperatura, oxígeno y luz), por lo que es crítica para la supervivencia de la planta (Xiao *et al.*, 2019).

#### **1.5.2.2 Emergencia de la planta.**

En esta fase al momento en que el brote atraviesa el sustrato y se hace visible sobre la superficie, exhibiendo sus cotiledones o primeras hojas (Cao *et al.*, 2022). Esta transición marca el inicio de la alimentación autotrófica de la planta debido a que los primeros cotiledones comienzan a fotosintetizar y la proveen de energía para los primeros días hasta que desarrolla las hojas verdaderas (Tyagi *et al.*, 2024).

#### **1.5.2.3 Crecimiento vegetativo inicial.**

Es el período inmediatamente posterior a la emergencia, donde la planta desarrolla sus primeras hojas verdaderas y establece su sistema radicular principal. En esta etapa predomina el crecimiento horizontal, vertical y en área, a la par que las raíces se extienden en busca de

agua y nutrientes. La rapidez y eficiencia de esta fase depende del número y la fortaleza de las plántulas en crecimiento inicial, incluyendo su biomasa y rendimiento final (Bukan *et al.*, 2024).

#### **1.5.2.4 Expansión foliar y ramificación.**

Es el momento en el que la planta crece aceleradamente, caracterizado por el despliegue de nuevas hojas y la formación de ramas laterales. Las hojas que se desarrollan aumentan significativamente la superficie fotosintética de la planta y se activan yemas axilares que dan origen a ramas o brotes laterales, particularmente en especies arbustivas y arbóreas, además contribuye a una arquitectura compleja, que permite aumentar la captación de luz y optimizar el uso de recursos (Liu *et al.*, 2024)

#### **1.5.2.5 Maduración vegetativa.**

Es la parte final del desarrollo estructural y funcional antes de iniciar la fase reproductiva y la velocidad de crecimiento decrece y la planta establece la altura, follaje y ramificación necesarios para reproducirse por lo que redirige gradualmente los recursos hacia los órganos sexuales (Poethig y Fouracre, 2024). Precede inmediatamente a la aparición de los primeros botones florales, evento que marca el fin de la fase vegetativa (Lépiz *et al.*, 2018).

### ***1.5.3 Factores que influyen en el desarrollo vegetativo***

Los factores que regulan el desarrollo vegetativo se agrupan en internos (genética, fisiología, regulación hormonal) y externos (luz, temperatura, agua, nutrientes, propiedades del sustrato). En la práctica experimental interesa priorizar aquellos factores que son manejables en vivero: sustrato (composición y propiedades), riego (frecuencia y volumen), microclima (sombra, ventilación) y manejo nutricional. Entender estos factores y su mecanismo de acción ayuda a interpretar las respuestas biométricas que refleja la planta.

#### **1.5.3.1 Internos.**

Influyen en la capacidad de crecer y desarrollarse y dictan cómo la planta responde o se ajusta a las condiciones externas. Por lo tanto, los factores internos principales son:

Genética está determinada por lo que se denomina potencial genético y define rasgos como la tasa de elongación del tallo, la proporción de asignación de biomasa a raíz vs. parte aérea, la tolerancia a ciertas condiciones adversas (López, 2023).

Fisiología celular son los procesos que ocurren al nivel celular determinan la capacidad para dividirse y diferenciarse en nuevos tejidos por lo que es el motor del crecimiento entre los factores que interfieren en estos procesos son: el estado nutricional interno, la eficiencia en la respiración celular y la integridad estructural de las células (Trugman y Anderegg, 2025).

Regulación hormonal se realiza mediante las fitohormonas que son compuestos orgánicos producidos en pequeñas cantidades dentro de la planta, que actúan como señales químicas regulando el crecimiento, desarrollo y respuestas al estrés de manera integral, además constituyen un eje central de los factores internos porque median entre la genética y la respuesta fenotípica observable (Lorrai *et al.*, 2018; Chhaya *et al.*, 2021).

#### **1.5.3.2 Externos.**

Determinan principalmente la capacidad de una planta para realizar sus funciones fisiológicas básicas, afectando procesos como la fotosíntesis, transpiración, respiración y absorción de nutrientes, condicionando el ritmo de crecimiento y la supervivencia de las plantas jóvenes. Por lo tanto, los factores externos principales son:

Luz que es la radiación solar y es aquella que regula la fotosíntesis y la morfología de las plántulas dependiendo de las condiciones y la especie en función de su preferencia a la luz promueve la producción de biomasa o adaptar su arquitectura foliar y asignación de recursos (Zhou *et al.*, 2023).

Temperatura la cual afecta a procesos metabólicos como fotosíntesis, respiración y división celular, además inducen estrés térmico lo cual afecta la integridad de membranas y disminuyen el crecimiento, por el contrario, temperaturas bajas reducen la actividad enzimática y pueden causar latencia (Li *et al.*, 2021).

Agua, sin embargo es necesario recalcar que existen diferentes formas en las que el agua se presenta disponible para las plantas, como la humedad del ambiente, el agua en el suelo en estado líquido y gaseoso además del agua en forma molecular cada forma se puede manifestar el déficit hídrico con indicadores como cierre de estomas, reducción de fotosíntesis, estrés oxidativo y reducción de la tasa de crecimiento, por ello las plantas desarrollan estrategias para reducirlas como acumulación de osmoprotectores y cambios en la relación raíz/tallo (Gondal *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2025).

Nutrientes que son los requerimientos de las plantas y en exceso o déficit impactan en la tasa fotosintética, el contenido de clorofila y la síntesis de proteínas, limitar el crecimiento, la división celular y el control estomático. Por lo tanto, es crucial comprender el contenido de micro y macronutrientes esenciales en el medio donde se desarrollan las plantas (Zhao *et al.*, 2005; Cun *et al.*, 2022).

#### **1.5.4 Parámetros para evaluar el desarrollo vegetativo**

Los parámetros morfológicos (altura, número de hojas, diámetro), los biométricos (relaciones de biomasa seca/verde, relación de longitud tallo/raíz) y los fisiológicos (velocidad

de crecimiento, tasa de supervivencia y el Índice de Calidad de Dickson) son complementarios y deben analizarse en conjunto con las características del sustrato. En la práctica experimental es imprescindible definir con precisión los protocolos de medición, por ejemplo, altura medida desde el cuello hasta el ápice, diámetro registrado a una posición fija sobre el cuello, y secado de la biomasa a 65 °C hasta obtener peso constante, y establecer una frecuencia de muestreo y un número de réplicas claros. Estas normas metodológicas garantizan que los resultados sean comparables, reproducibles y adecuados para contrastes estadísticos entre tratamientos.

#### **1.5.4.1 Morfológicos.**

Las características morfológicas observables durante la fase de establecimiento comprenden la altura del tallo, el número de hojas, el diámetro del cuello y la longitud radicular. Estas variables permiten inferir el grado de adaptación de las plántulas a las condiciones ambientales y su vigor general, por lo que constituyen indicadores esenciales en estudios sobre desarrollo vegetal temprano (Campos et al., 2023).

La altura del tallo refleja el crecimiento vertical y la capacidad competitiva por luz; el número de hojas se asocia con la superficie fotosintética disponible; y la longitud radicular permite evaluar la eficiencia potencial en la absorción de agua y nutrientes. En conjunto, estos atributos morfológicos facilitan la selección de plantas para programas de reforestación y restauración ecológica y ayudan a predecir el rendimiento en campo y la capacidad adaptativa en ambientes adversos (Gómez y de Souza, 2022).

#### **1.5.4.2 Biométricos.**

Las métricas biométricas cuantifican el crecimiento vegetal, con énfasis en la biomasa y las relaciones entre órganos. Estas mediciones permiten evaluar cómo la planta distribuye sus recursos y son fundamentales para entender sus estrategias de adaptación frente a condiciones ambientales adversas (Campos et al., 2023). Por ejemplo, relaciones como raíz/tallo o raíz/parte aérea, calculadas en base a biomasa seca, sirven para valorar la asignación de materia: una mayor proporción radicular revela una inversión preferente en el sistema de absorción, lo que suele aumentar la probabilidad de supervivencia bajo estrés hídrico. En paralelo, la relación peso seco/peso fresco es un índice confiable para determinar el contenido de agua en los tejidos vegetales. Este valor permite inferir el estado hídrico de la plántula y su nivel de lignificación, lo que es esencial en la etapa de endurecimiento previo al trasplante (Calderón *et al.*, 2025).

### **1.5.4.3 Fisiológicos.**

Son procesos funcionales como la tasa de crecimiento, supervivencia y eficiencia en la utilización de recursos. Estas características reflejan la salud metabólica de la plántula y su capacidad para mantener el crecimiento en diferentes condiciones edafoclimáticas (Shukla, 2023; Campos et al., 2023). La tasa de supervivencia constituye un indicador crítico, pues resume la aptitud de las plántulas para adaptarse al trasplante y a las condiciones de campo; resulta especialmente útil bajo escenarios de estrés hídrico o deficiencias nutricionales. Para una evaluación completa del vigor se recomienda complementar la tasa de supervivencia con mediciones de crecimiento (velocidad de crecimiento, biomasa seca acumulada) y relaciones biométricas (por ejemplo, raíz/tallo), lo que permite caracterizar mejor la resiliencia y el desempeño potencial en campo. Paralelamente, la velocidad de crecimiento longitudinal y diametral permite anticipar el comportamiento silvícola futuro de la especie, y es usada comúnmente en ensayos comparativos de vivero y selección genética (Villanueva *et al.*, 2023).

## CAPÍTULO II

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1 Tipo de investigación

La investigación tiene un enfoque cuantitativo debido a que se midió y evaluó variables cualitativas asociadas con el comportamiento de los sustratos en el desarrollo vegetativo de *Caesalpinia spinosa*.

Es de tipo aplicada, puesto que se determinó el efecto de los sustratos en el desarrollo vegetativo de plántulas de *Caesalpinia spinosa*. Con un alcance explicativo, al comprender los sustratos que influyeron significativamente en el crecimiento inicial de la plántula y estableció relaciones de causalidad entre las características morfológicas de la plántula.

Adopta un diseño experimental al manipular y controlar los factores con la finalidad de reducir al mínimo la incidencia de agentes externos a los sustratos para observar su efecto en variables específicas. El diseño seleccionado permitió establecer relaciones de causa y efecto entre los sustratos y los resultados de desarrollo vegetativo.

Los sustratos se evaluaron a lo largo de un período de tiempo, por lo tanto, la investigación implica un enfoque longitudinal. Se llevó a cabo en un entorno de campo, específicamente en las instalaciones del Campus forestal Yuyucocha que pertenece a la Universidad Técnica del Norte, donde se estableció el experimento en una platabanda, donde se recopilaron los datos y se experimentó en un entorno natural en el que ocurrieron los fenómenos estudiados.

#### 2.2 Ubicación del lugar

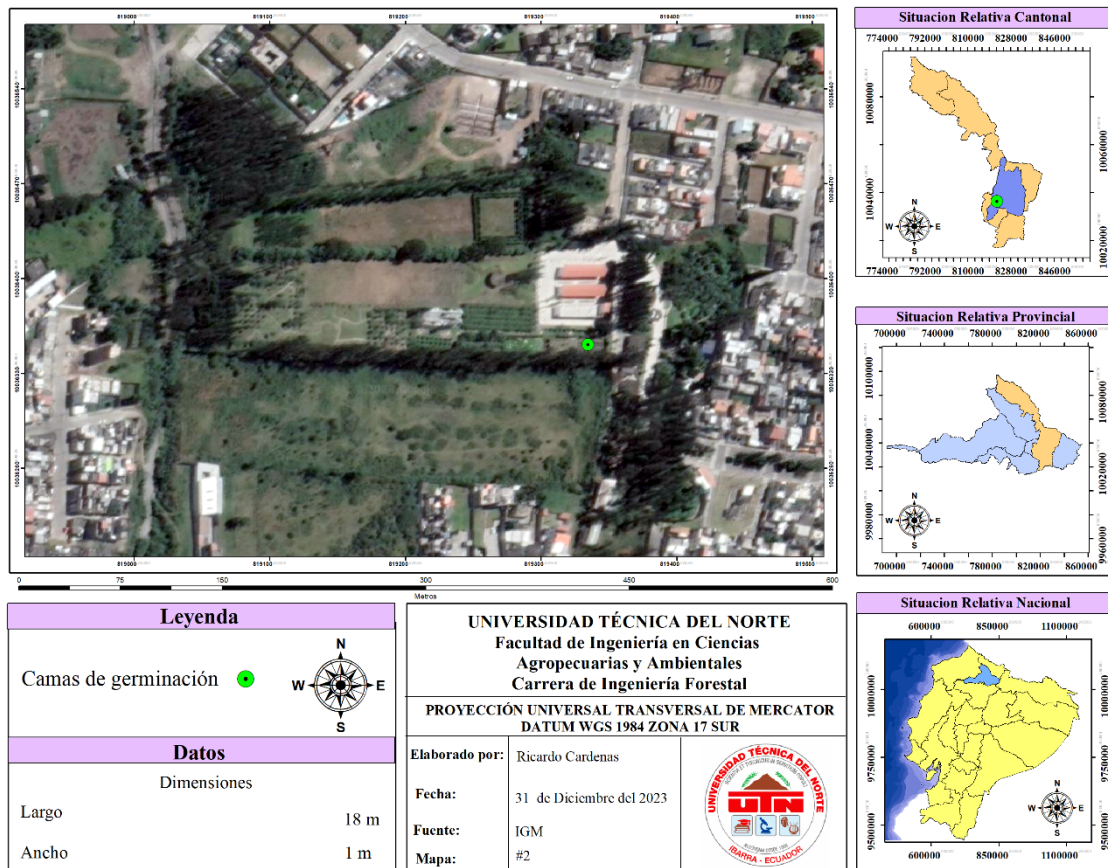
##### 2.2.1 Política

El área de estudio está ubicada en la provincia de Imbabura, en el cantón Ibarra, parroquia Caranqui.

## 2.2.2 Geográfica

**Figura 1.**

*Mapa de ubicación del área de las camas de germinación en el Campus Forestal Yuyucocha*



**Nota:** La escala del mapa es 1:1500 en base a la ubicación local del área de estudio, las escalas de los mapas de ubicación a nivel nacional, provincial y cantonal solo es referencial.

### 2.2.3 Límites

El Campus Forestal de Yuyucocha limita: Al norte con la calle Abelardo Páez Torres, al sur con la calle Marco Tulio Hidrovo, al este con la calle Peaje F y al oeste con la quebrada de Caranqui.

## 2.3 Caracterización edafoclimática del lugar

### 2.3.1 Suelo

En el predio universitario existen suelos del orden Inceptisol, franco-arenosos, porosos de pH neutro y de topografía plana (Enríquez, 2015; Cadena, 2013).

### 2.3.2 Clima

En el Campus Forestal Yuyucocha, posee una temperatura promedio de 17,70 °C, con una precipitación promedio anual de 745,40 mm y un 72% de humedad relativa (Vélez, 2016).

### 2.4 Materiales, equipos y software

Los materiales equipos y software empleados en la presente investigación son los que se observan en la tabla 1 que se detalla a continuación.

**Tabla 1.**

*Materiales, equipos y software empleados en la investigación.*

<b>Materiales de campo</b>	<b>Equipos</b>	<b>Software</b>
Hoja de campo	Ordenador	Microsoft 365
Etiquetas	Cámara fotográfica	(Office)
Tijera podadora	GPS	
Fundas plásticas de invernadero	Balanza electrónica	
Brújula de mano	Calculadora científica	ArcGIS 10.7 – Número de autorización:
Tierra de sitio	Horno secador eléctrico	EFL209674136:
Humus	Higrómetro digital (PROMEX HT607)	Licencia de educación:
Perlita	Smartphone	Teaching Lab
Viruta de madera	Soil Tester YIERYI 3 in 1 (model SGS07)	Park -Geomática
Arena	Calibrador digital	UTN – Autorizado por:
Cascarilla de arroz		E Sri
Fibra de coco		
Vitavax 200		
Utensilios de vivero		
Tubo PVC		InfoStat
Plástico de invernadero		Oruxmaps

### 2.5 Métodos, técnicas e instrumentos

#### 2.5.1 Diseño experimental

Se empleó un diseño irrestricto al azar, para determinar el mejor tratamiento con diferentes sustratos tabla 2, en las mismas proporciones y poder reducir la variación que pueda generar. Se aplicaron cinco sustratos diferentes, con cuatro repeticiones en cada uno, con un total de 20 unidades experimentales. Cada repetición constó de un total de 20 plántulas de *Caesalpinia spinosa*, con un total de 400 plántulas en todo el diseño.

##### 2.5.1.1 Tratamientos.

**Tabla 2.***Composición estructural de los sustratos empleados con sus respectivas proporciones*

<b>Tratamientos</b>	<b>Composición</b>	<b>Proporción</b>
T1 (sustrato base)	Suelo agrícola	60%
	Arena	30%
	Champiñonaza	10%
T2	Suelo agrícola	40%
	Cascarilla de arroz	30%
	Arena	20%
	Champiñonaza	10%
T3	Suelo agrícola	40%
	Fibra de coco	30%
	Arena	20%
	Champiñonaza	10%
T4	Suelo agrícola	40%
	Viruta de madera	30%
	Arena	20%
	Champiñonaza	10%
T5	Suelo agrícola	40%
	Perlita	30%
	Arena	20%
	Champiñonaza	10%

**2.5.1.2 Distribución de tratamientos.**

Los tratamientos se asignaron a las unidades experimentales de acuerdo con la estructura de un diseño irrestricto al azar. La aleatorización se llevó a cabo empleando los números aleatorios en el software de Microsoft Excel al asignar los tratamientos dentro del diseño.

**2.5.1.3 Análisis estadístico.**

Para un análisis estadístico adecuado para el primer objetivo se tomó en cuenta que las variables de dicho objetivo son dinámicas debido a que aumentan o disminuyen en función del tiempo, por lo tanto, se evaluó el comportamiento de cada tratamiento en función de las semanas de forma independiente, sin embargo, no se evaluó la interacción entre sustratos y semanas debido a que el comportamiento dinámico de las variables presentó resultados sesgados. Para realizar el análisis de la varianza se comprobaron los supuestos paramétricos como lo son la normalidad con una prueba de Shapiro–Wilks y la homogeneidad con una prueba de Levene modificada, en las variables que lo lograron cumplir con al menos uno de los supuestos se procedió a realizar transformaciones empleando Box-cox, sin embargo en el momento en el que el valor de lambda se dispara la transformación pierde efecto, por lo tanto para aquellas variables que presentaron estas circunstancias se aplicó una prueba no paramétrica de Kruskall-

Wallis para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos y posteriormente realizar una prueba de comparaciones múltiples de Dunn, con ajuste de Bonferroni, por otro lado con las variables que cumplieron con los supuestos paramétricos, se aplicó un análisis de la varianza (ADEVA) para identificar si existieron diferencias significativas entre los tratamientos empleados. Posteriormente con aquellas variables que se aceptó la hipótesis nula, no se realizaron más análisis, por otra parte, en las que se aceptó la hipótesis alterna, se empleó una prueba *post hoc* de Tukey que permitió determinar cuáles fueron las diferencias entre tratamientos.

#### 2.5.1.6 Modelo estadístico.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$  es la observación de la variable respuesta para la  $i$ -ésima unidad experimental bajo el  $j$ -ésimo sustrato.

$\mu$  es la media general de todas las observaciones.

$\tau_i$  representa el efecto del  $i$ -ésimo sustrato.

$\epsilon_{ij}$  es el error aleatorio asociado con la  $i$ -ésima unidad experimental bajo el  $j$ -ésimo sustrato.

### 2.5.2 Instalación del experimento

#### 2.5.2.1 Obtención de semillas.

Se recolectaron semillas de árboles ubicados en la ciudad de Ibarra figura 6, seleccionando aquellos individuos que cumplieron con los requerimientos de calidad de árbol tabla 4, según la metodología de Ordoñez *et al.*, (2001) que mediante una tabla de evaluación se determinó el individuo ideal para recolección de sus semillas tabla 5 (Fonseca *et al.*, 2023).

**Tabla 3.**

Matriz de evaluación fenotípica de árboles con fines comerciales y ecológicos

Parámetros	Característica fenotípica	Puntaje
Forma de fuste	Recto	6
	Ligeramente torcido	4
	Torcido	2

	Muy torcido	1
	No bifurcado	6
Altura de bifurcación	Bifurcado en el 1/3 superior	4
	Bifurcado en el 1/3 medio	2
	Bifurcado en el 1/3 inferior	1
Dominancia del eje principal	Dominancia completa en el eje principal	2
	Dominancia parcial del eje inicial sobre las ramas laterales	1
	Dominancia completa sobre las ramas laterales	0
Ángulo de inserción de ramas	De 60° - 90°	3
	De 30° - 60°	2
	De 0° - 30°	1
Forma de la copa	Circular	6
	Circular irregular	5
	Medio círculo	4
	Menos de medio círculo	3
Diámetro de la copa	Pocas ramas	2
	Principales rebrotes	1
	Copa vigorosa > 10m	7
	Copa promedio 5 - 10m	3
	Copa pequeña < 5m	1

---

Fuente: Ordoñez *et al.*, (2001)

**Tabla 4.***Escala de clasificación de árboles con fines comerciales y ecológicos*

<b>Clase</b>	<b>Veredicto</b>	<b>Puntuación</b>
1	Árbol semillero óptimo	22 - 30
2	Árbol semillero regular	16 - 21
3	Árbol semillero precario	< 16

Fuente: Ordoñez *et al.*, (2001)

#### **2.5.2.2 Instalación de la cama de germinación.**

Para establecer el espacio de la siembra, se limpió la maleza y todas las impurezas presentes en la cama de germinación, posteriormente se niveló y rellenó con tres capas consecutivamente de grava gruesa, grava fina, y sustrato conformado por suelo agrícola de la misma platabanda, arena y viruta de madera en proporción 5:1:3 consecutivamente figura 7 (Erazo y Añazco, 2022). El espacio que se ocupó para el ensayo de germinación contó con un área total de 8 m<sup>2</sup>, donde el espacio entre cada semilla fue de 5cm y se sembraron aproximadamente 1000 semillas con la finalidad de obtener el número adecuado de plántulas.

#### **2.5.2.3 Preparación del sustrato para la cama de germinación.**

Con toda la capa de tierra removida al momento que se limpió y niveló la cama de germinación hasta llegar a una profundidad de 60cm, se colocó una capa de grava gruesa de 20 cm, con la finalidad de evitar la retención de humedad, posteriormente se agregó una capa, 10 cm de arena y por último una capa de 30 cm de sustrato. Además, entre cada capa se realizó una desinfección con vitavax.

#### **2.5.2.4 Siembra.**

Con el espacio de la cama de germinación completamente estructurado se procedió a la siembra, para ello previamente se aplicó un tratamiento pregerminativo a las semillas que consistió en sumergirlas en agua a 90°C y dejando reposar hasta que el agua se enfríe durante 8 horas, realizando tres veces el procedimiento para que todas las semillas se encuentren en un estado de imbibición, todas fueron sembradas simultáneamente en el día 14 de marzo, con la finalidad de evitar variaciones y sesgos en los resultados figura 8.

Cada semilla estuvo ubicada a 5 cm de distanciamiento entre hileras y columnas, para obtener una densidad de siembra adecuada y que permita el desarrollo de la semilla sin

complicaciones, esta técnica de siembra es conocida comúnmente como almácigo y es adecuada debido a que aprovecha las interacciones entre las semillas cercanas entre sí para poder germinar al mismo tiempo.

#### **2.5.2.5 Control de temperatura y humedad**

Para adecuar las condiciones necesarias para la germinación se colocó un cobertor plástico transparente sobre una estructura previamente construida conformada por tubos de policloruro de vinilo (PVC) de ½ pulgada y alambre #16 para mantener la estabilidad del miniinvernadero, con el objetivo de aumentar la temperatura en el espacio de siembra y controlar la humedad que pueda reducirse debido a la insolación figura 9.

#### **2.5.2.6 Riego.**

El riego se realizó cada cinco días, esto debido a la temporada de lluvia que ocurrió durante la producción de las plántulas, antes de regar se verificó con un medidor de humedad del suelo para saber si era necesario, siempre y cuando los valores de humedad caían por debajo de los 75 puntos.

#### **2.5.2.7 Implementación del espacio para colocar las fundas con cada sustrato.**

Con la cantidad de plántulas necesarias obtenidas se procedió a repicar, por ello se estableció el espacio para ubicar las fundas, con las dimensiones de 5x8 (12,7cm x 20,32cm), donde cada unidad experimental constó de 20 fundas, cada tratamiento de 80 fundas llenadas con diferentes sustratos, el área que ocupó el diseño se observa en la tabla 6.

**Tabla 5.**

*Cuadro de los espacios ocupados en el diseño experimental con su respectiva área.*

<b>Espacio</b>	<b>Área</b>
Unidad experimental	0,25 m
Tratamiento	1 m
Diseño completo	5 m

**Figura 2.**

*Estructura del diseño experimental irrestricto al azar*



### **2.5.3 Variables**

#### **2.5.3.1 Características básicas del sustrato.**

##### **2.5.3.1.1 Potencial de hidrógeno del sustrato.**

El pH es una medida del nivel de acidez o alcalinidad del sustrato en el que las plantas se desarrollan, expresado en una escala que varía de 0 (muy ácido) a 14 (muy alcalino), con 7 considerado como neutro. Para obtener el dato de esta magnitud se midió directamente mediante un soil tester, que posee sensores internos diseñados para determinar el potencial de hidrógeno en una solución delgada en contacto con los electrodos mediante la capacitancia. El error del dato varía en  $0,2 \pm$  puntos (Vogel *et al.*, 2023; Langenfeld *et al.*, 2024).

##### **2.5.3.1.2 Humedad del sustrato.**

La humedad se denomina a la cantidad de agua contenida en el suelo, para ello se empleó un soil tester, el cual emplea dos electrodos metálicos para estimar la humedad relativa del suelo en porcentaje (%) mediante conducción eléctrica básica. Este dispositivo mide la humedad del suelo de forma instantánea, basada en la conductividad eléctrica entre los electrodos, lo que permite detectar principalmente el agua en estado líquido retenida en la fracción capilar del suelo, considerada generalmente como agua disponible para las plantas. El error del porcentaje de humedad varía en  $10\% \pm$  debido a la naturaleza del dispositivo empleado (Yáñez *et al.*, 2021; Kormanek *et al.*, 2023; Vogel *et al.*, 2023).

##### **2.5.3.1.3 Temperatura del sustrato.**

La temperatura se define como el grado de frío o calor presente en el sustrato donde las plantas se desarrollan. Para obtener los datos primarios de esta variable, se utiliza una técnica de medición denominada *fast in situ* que permite coleccionar el dato en el instante y directamente del objeto. Se empleó un termistor (NTC) interno ubicado en la punta de uno de los electrodos del soil tester que tiene dos electrodos, el cual proporciona valores en tiempo real, además se midió la temperatura ambiente en cada medición con la finalidad de determinar mediante el gradiente térmico la diferencia significativa entre tratamientos y el tiempo con un higrómetro digital. Esta variable es importante para interpretar posibles variaciones en la actividad microbiana y en la dinámica del agua y nutrientes en el suelo, se expresó en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), el error del dato varía en  $1^{\circ}\text{C} \pm$  (Kormanek *et al.*, 2023; Bonelli *et al.*, 2024).

Debido a que se empleó el mismo instrumento para tomar los datos de las tres variables, de igual manera se aplicó la misma técnica *fast in situ* en las tres variables, para evidenciar diferencias significativas se tomaron datos cada siete días entre las 11:00am y 13:00 pm, momento en el que se estima ocurre el mayor estrés térmico sobre el sustrato. El procedimiento consiste en tomar el dispositivo e introducirlo a una distancia de cuatro centímetros de la

plántula y a una profundidad de 10 cm en el sustrato, se enciende el dispositivo estando en la posición definida y después de cinco segundos el dispositivo captura el dato y se procede a registrarlo, posteriormente se limpian con un pañuelo los electrodos y se procede a tomar la siguiente medida figura 12.

### **2.5.3.2 Características morfológicas de la parte aérea y radicular de las plántulas.**

#### **2.5.3.2.1 Longitud del tallo de la plántula.**

Para obtener los datos se utilizó una técnica de medición directa mediante un calibrador digital, para registrar la distancia desde la base del tallo hasta el ápice de la planta figura 13. Se ajustó la sensibilidad del calibrador previamente a tomar el dato, posteriormente se registró en una matriz los valores con dos decimales de precisión. El valor obtenido se expresó en milímetros (mm) con una variación de  $0,01\text{mm} \pm$  (Maarroof *et al.*, 2022).

#### **2.5.3.2.2 Diámetro del cuello de la plántula.**

Es medida del grosor del tallo de la planta en la base, justo por encima de las raíces figura 13. Para obtener los datos primarios con precisión, se empleó una técnica de medición directa utilizando un calibrador digital para registrar el grosor en milímetros (mm) con un margen de error del  $0,01\text{mm} \pm$  (Maarroof *et al.*, 2022).

#### **2.5.3.2.3 Número de hojas de la plántula.**

Es la cantidad de hojas presentes en cada planta joven, para obtener datos primarios se emplea una técnica de conteo directo, que se realizó de manera manual con ayuda de una lupa para facilitar la identificación y conteo de las hojas y registrar el valor en la matriz que corresponda. Esta variable es contable por lo que se expresó en números enteros, se identificaron adecuadamente los nomofilos (hojas verdaderas) y no fueron contadas las hojas embrionarias ya que se forman por las reservas de la semilla (Attri *et al.*, 2023).

Las tres variables mencionadas se midieron con un intervalo de siete días con 15 mediciones en total hasta llegar a los 105 días.

#### **2.5.3.2.4 Longitud de la radícula de la plántula.**

La distancia lineal desde el cuello de la raíz hasta la punta de la raíz principal o la más larga figura 13. Mediante una técnica de medición directa invasiva que consistió en extraer cuidadosamente las raíces del sustrato, limpiarlas para eliminar los restos de sustrato y colocarlas sobre una superficie plana y que haga contraste de preferencia color blanco para posteriormente con un calibrador digital se realizó la medición manual y se tomó el dato para registrarlo en la matriz correspondiente, el valor se expresó en milímetros (mm) (Maarroof *et al.*, 2022).

#### **2.5.3.2.5 Relación biomasa peso seco/peso verde de la plántula.**

Es la proporción entre la biomasa fresca y la biomasa seca de una plántula. Para determinar esta variable, se empleó una técnica de medición indirecta que consistió en obtener la plántula completa, limpiarla y reducir las impurezas de sustrato que contenga en raíces para pesarlas mientras están frescas utilizando una balanza analítica de precisión. Posteriormente, las muestras se secaron en un horno a 65–70 °C hasta alcanzar un peso constante figura 14, donde se pesaron nuevamente y se aplicó la fórmula para obtener el valor de relación. El valor de esta variable se expresa como una unidad adimensional, representando la proporción entre el peso seco y el peso verde de la biomasa. La fórmula utilizada es:

$$\text{Relación peso seco/peso verde} = \frac{\text{Peso seco (g)}}{\text{Peso verde (g)}}$$

(Go *et al.*, 2025).

#### **2.5.3.2.6 Relación longitud tallo/raíz de la plántula.**

Se define como la relación entre la longitud total del tallo y la longitud total de la raíz principal. La técnica para obtenerla implicó una medición indirecta que radicó en calcularla a partir de los datos de longitud del tallo del último día que se midió y la variable longitud de la radícula de la plántula. Esta relación se calcula utilizando la fórmula:

$$\text{Relación longitud tallo/raíz} = \frac{\text{Longitud del tallo(mm)}}{\text{Longitud de la raíz (mm)}}$$

(Shi *et al.*, 2024).

#### **2.5.3.2.7 Relación peso seco tallo/raíz de la plántula.**

La variable se obtuvo mediante una medición indirecta al calcular la relación entre el peso seco del tallo y el peso seco de las raíces. La relación se expresa como un valor adimensional, la fórmula para calcularla es la siguiente:

$$\text{Relación peso tallo/raíz} = \frac{\text{Peso seco del tallo(g)}}{\text{Peso seco de la raíz (g)}}$$

Este índice es relevante porque evalúa la proporción de biomasa asignada a la parte aérea frente a la radicular, reflejando el equilibrio funcional y estructural de las plántulas (Maarroof *et al.*, 2022).

Las últimas cuatro variables requieren el sacrificio de la plántula para poder ser determinadas, por ello una vez concluya el tiempo establecido de 105 días para la evaluación de las primeras variables, se procedió a seleccionar las 11 plantas que fueron muestreadas y de

las que se han tomado todos los datos de las otras variables. Debido a la naturaleza de los datos estas últimas variables solo pueden tomarse una sola vez.

### **2.5.3.3 Características fisiológicas de la parte aérea y radicular de las plántulas.**

#### **2.5.3.3.1 Velocidad de crecimiento longitudinal del tallo.**

Es el aumento en la longitud del tallo de las plántulas en un periodo de tiempo. Para obtener los datos primarios, se utilizó una técnica de medición indirecta mediante el cálculo de los incrementos de longitud de las plántulas desde el primer día y el último día en el que se midieron. El valor se expresó en milímetros por día (mm/día), la fórmula para calcular la velocidad de crecimiento longitudinal es:

$$Va = \frac{Af - Ai}{T}$$

Donde:

Va es la velocidad de crecimiento longitudinal de la planta expresada en milímetros por día (mm/día)

Af es la longitud de la planta al final del período de medición.

Ai es la longitud de la planta al inicio del período de medición.

T son los días transcurrido es decir la duración del período de medición.

(Ali *et al.*, 2021).

#### **2.5.3.3.2 Velocidad de crecimiento diametral de cuello.**

Es la tasa de incremento en el diámetro del cuello de las plántulas en un periodo de tiempo. Para obtener los datos primarios, se utilizó una técnica de medición indirecta empleando la fórmula establecida para calcularla con los datos de diámetro del primer día y el último día en el que se midió el diámetro de las plántulas. El valor se expresó en milímetros por día (mm/día), la fórmula para calcular la velocidad de crecimiento longitudinal es:

$$Vd = \frac{Df - Di}{T}$$

Donde:

Vd es la velocidad de crecimiento diametral de la planta expresada en milímetros por día (mm/día)

Df es el diámetro de la planta al final del período de medición.

Di es el diámetro de la planta al inicio del período de medición.

T son los días transcurrido es decir la duración del período de medición.

(Maarroof *et al.*, 2022).

#### **2.5.3.3.3 Tasa de supervivencia de plántulas.**

Se refiere a la proporción de plantas que permanecen vivas en un determinado periodo de tiempo. Los datos se obtuvieron mediante observación directa, registrando el número de plantas que sobreviven en relación con el total de plantas repicadas, en el primer día de repique se contaron el número de plántulas totales y el último día del tiempo establecido para el experimento se realizó un nuevo conteo y se determinó el porcentaje de supervivencia de plántulas que obtuvo cada sustrato, para su cálculo se empleó la fórmula:

$$(\%)Supervivencia = \left( \frac{\text{Número de plantas vivas}}{\text{Total de plantas germinadas}} \right) * 100$$

(Siqueira *et al.*, 2025).

#### **2.5.3.3.4 Índice de calidad de Dickson de las plántulas.**

Fue determinado mediante la integración de características morfológicas y fisiológicas relevantes para evaluar la calidad general de las plántulas de *Caesalpinia spinosa*. Los datos primarios incluyeron la biomasa total seca (g), la altura del tallo (cm), el diámetro del cuello del tallo (mm), el peso seco de la biomasa aérea (g) y el peso seco de la biomasa radicular (g). Este índice se realizó al final del ensayo para poder contar con los valores necesarios para calcularla mediante la siguiente fórmula que expresa un valor adimensional:

$$ICD = \frac{\text{Biomasa total seca (g)}}{\frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Diámetro (mm)}} + \frac{\text{Peso aéreo seco (g)}}{\text{Peso radicular seco (g)}}}$$

(Dickson *et al.*, 1960, citado en Maarroof *et al.*, 2022).

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Comportamiento de los sustratos en función de sus características básicas

##### 3.1.2 Potencial de hidrógeno del sustrato

El comportamiento del pH en cada tratamiento cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 35) y homocedasticidad (Tabla 36). El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 7) evidenció diferencias significativas entre semanas dentro de cada uno de los tratamientos evaluados. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron superiores a 60 % y 50 %, respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que indica que el modelo se ajusta en los tratamientos analizados. El coeficiente de variación (CV) no superó 1,7 % en los tratamientos, por lo que los resultados presentan un elevado grado de confiabilidad (Tabla 37).

**Tabla 7.**

*Cuadro de Análisis de la varianza del potencial de hidrógeno en cada tratamiento de las 14 semanas evaluadas*

Variable	SC	gl	CM	F	p-valor
Semanas-T1	1,39	14,00	0,10	6,49	<0,0001
Error	0,69	45,00	0,02		
Total	2,07	59,00			
Semana-T2	0,86	14	0,06	8,38	<0,0001
Error	0,33	45	0,01		
Total	1,19	59			
Semana-T3	0,98	14	0,07	5,05	<0,0001
Error	0,62	45	0,01		
Total	1,60	59			
Semana-T4	1,87	14	0,13	8,45	<0,0001
Error	0,71	45	0,02		
Total	2,59	59			
Semana-T5	1,79	14	0,13	13,84	<0,0001
Error	0,41	45	0,01		
Total	2,20	59			

La prueba *post hoc* de Tukey mostró las diferencias entre semanas en cada tratamiento tabla 8, donde las diferencias de pH en el T1 en el transcurso de las semanas fueron las menos significativas, lo cual indica que fue uno de los más estables, por otro lado, el resto de los tratamientos mostraron una variabilidad en el pH más elevada en el transcurso de las semanas con hasta seis clases diferenciadas. Por otro lado, el tratamiento T3 y T1 fueron los más alcalinos en promedio y los otros tres se ubicaban ligeramente en el rango del pH neutro, el

comportamiento del pH en cada tratamiento en el transcurso de las semanas figura 3 permite observar la estabilidad de esta variable en cada uno, finalmente se determinó el rango de pH en el que se comportó cada tratamiento en función de las semanas evaluadas tabla 9.

**Tabla 8.**

*Cuadro de prueba de Tukey del potencial de hidrógeno en cada tratamiento de las 14 semanas evaluadas*

<b>Semana</b>	<b>Medias</b>	<b>E.E.</b>						
T1 - DMS = 0,313								
S10	7,91	0,06	A					
S14	7,88	0,06	A					
S11	7,87	0,06	A					
S12	7,86	0,06	A					
S13	7,83	0,06	A					
S8	7,83	0,06	A					
S5	7,82	0,06	A					
S6	7,80	0,06	A					
S9	7,79	0,06	A	B				
S7	7,72	0,06	A	B				
S2	7,69	0,06	A	B				
S3	7,69	0,06	A	B				
S4	7,65	0,06	A	B				
S1	7,48	0,06		B	C			
S0	7,34	0,06			C			
T2 - DMS = 0,217								
S14	7,68	0,04	A					
S12	7,67	0,04	A	B				
S13	7,63	0,04	A	B	C			
S5	7,62	0,04	A	B	C			
S11	7,58	0,04	A	B	C	D		
S10	7,56	0,04	A	B	C	D	E	
S6	7,53	0,04	A	B	C	D	E	
S8	7,51	0,04	A	B	C	D	E	
S3	7,48	0,04	A	B	C	D	E	
S0	7,47	0,04	A	B	C	D	E	
S2	7,46	0,04		B	C	D	E	F
S4	7,45	0,04			C	D	E	F
S1	7,37	0,04				D	E	F
S7	7,34	0,04					E	F
S9	7,25	0,04						F
T3 - DMS = 0,298								
S14	8,04	0,06	A					
S13	8,03	0,06	A	B				

S11	7,94	0,06	A	B	C		
S12	7,92	0,06	A	B	C		
S6	7,90	0,06	A	B	C		
S5	7,88	0,06	A	B	C		
S10	7,88	0,06	A	B	C		
S9	7,87	0,06	A	B	C	D	
S8	7,87	0,06	A	B	C	D	
S2	7,83	0,06	A	B	C	D	
S7	7,73	0,06		B	C	D	
S4	7,73	0,06			C	D	
S1	7,72	0,06			C	D	
S3	7,64	0,06			C	D	
S0	7,58	0,06				D	

---

T4 - DMS = 0,319

---

S12	7,81	0,06	A					
S11	7,75	0,06	A	B				
S13	7,66	0,06	A	B				
S14	7,64	0,06	A	B	C			
S10	7,61	0,06	A	B	C	D		
S5	7,60	0,06	A	B	C	D		
S6	7,55	0,06	A	B	C	D	E	
S8	7,54	0,06	A	B	C	D	E	
S3	7,52	0,06	A	B	C	D	E	
S4	7,47	0,06		B	C	D	E	F
S7	7,46	0,06		B	C	D	E	F
S2	7,34	0,06			C	D	E	F
S9	7,32	0,06				D	E	F
S1	7,26	0,06					E	F
S0	7,15	0,06						F

---

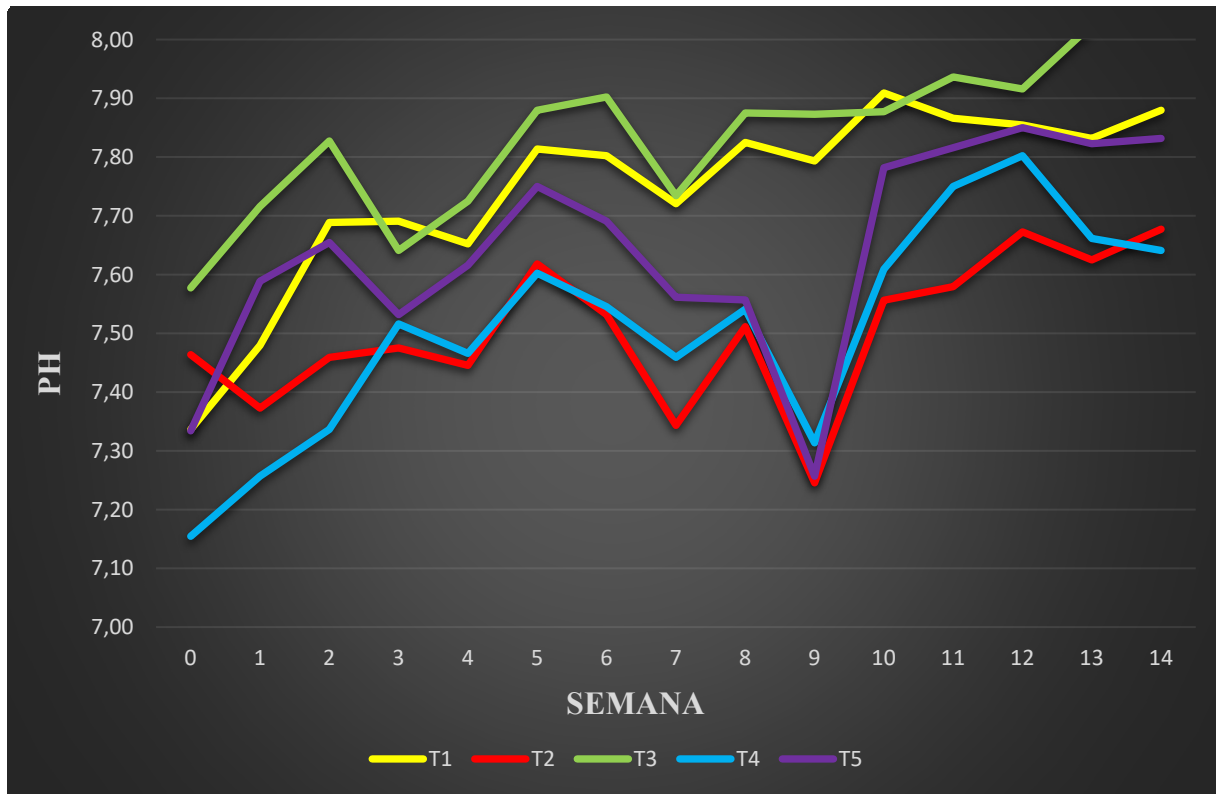
T5 - DMS = 0,243

---

S12	7,85	0,05	A					
S14	7,83	0,05	A	B				
S13	7,82	0,05	A	B				
S11	7,82	0,05	A	B				
S10	7,78	0,05	A	B	C			
S5	7,75	0,05	A	B	C	D		
S6	7,69	0,05	A	B	C	D		
S2	7,66	0,05	A	B	C	D		
S4	7,62	0,05	A	B	C	D		
S1	7,59	0,05		B	C	D		
S7	7,56	0,05			C	D	E	
S8	7,56	0,05			C	D	E	
S3	7,53	0,05				D	E	
S0	7,34	0,05					E	F

**Figura 3.**

*Gráfica de la variación del potencial de hidrógeno en cada tratamiento en el transcurso de las semanas*

**Tabla 9.**

*Cuadro de rangos del potencial de hidrógeno de cada tratamiento en base a las 14 semanas evaluadas*

Tratamiento	Máximo	Mínimo	Promedio
T1	8,04	7,21	7,74
T2	7,81	7,18	7,51
T3	8,18	7,46	7,84
T4	7,86	7,05	7,51
T5	7,95	7,13	7,64

A pesar de que la estadística muestra diferencias significativas entre los tratamientos estudiados en función de su pH, en campo una diferencia de pH no mayor a 0,5 puntos en el rango del 1 al 14, no influye en gran medida en el comportamiento de la planta, sin embargo, se destaca el hecho que en los sustratos que mejor se desarrolló la planta fue en aquellos con un pH ligeramente alcalino.

La respuesta positiva de las plántulas e *Caesalpinia spinosa* en los tratamientos con pH ligeramente alcalinos se explica por los principios de la química del suelo y de la rizosfera, debido a que el pH controla la actividad de  $H^+$  y, por tanto, la solubilidad y disponibilidad de macro y micronutrientes y la toxicidad de elementos como  $Al^{3+}$  en pH bajos; asimismo, pequeñas variaciones de pH en la rizosfera pueden provocar cambios significativos en la forma química y movilidad de nutrientes (Marschner, 2012; Barrow y Hartemink, 2023). Además, cuando la medición se hace in situ, es esperable que se registren valores más ácidos respecto a métodos que diluyen la muestra como en pasta saturada, debido a que éstos últimos diluyen la actividad iónica y elevan el pH aparente, este fenómeno ha sido cuantificado en estudios controlados donde la medición in situ fue menor en 0.4 a 0.6 unidades que la pasta saturada o el pour-through, por tanto, es evidente que las diferencias obtenidas en los resultados estudiados son del orden de décimas de unidad al ser consistente con la física-química esperada y con la menor capacidad tampón de muchos sustratos (Langenfeld *et al.*, 2024). Finalmente, la influencia conjunta de humedad y textura del sustrato sobre la lectura de pH es relevante, ya que, los electrodos in situ muestran dependencia con el contenido hídrico (SMC/VWC), y un aumento de humedad puede elevar la lectura de pH hasta en 1 a 1.5 unidades en condiciones extremas; esto explica las fluctuaciones semanales en los resultados obtenidos en el ensayo (Vogel *et al.*, 2024). Por ende, los valores de pH obtenidos explican porque *Caesalpinia spinosa* en sustratos con pH ligeramente alcalino se desarrolló mejor y porque existió una variabilidad semanal en cada sustrato de forma independiente, lo que implica que son fisiológicamente coherentes (por efecto sobre disponibilidad de P y cationes) y técnicamente esperables por la metodología in situ y la interacción humedad–textura.

En un ensayo de invernadero realizado en Utah (EE. UU.) se evaluó un electrodo de punta para mediciones in situ en distintos medios hortícolas como turba (peat moss), fibra de coco y corteza de pino, y se contrastaron esas lecturas con métodos de laboratorio (método de pasta saturada y método pour-through). Los resultados mostraron un sesgo sistemático: las lecturas por pasta saturada fueron, en promedio,  $\approx +0,59 \pm 0,30$  unidades de pH respecto a la medición in situ en la parte superior del contenedor, mientras que el método pour-through presentó  $\approx +0,38 \pm 0,24$  unidades de pH respecto a la medición in situ en la base. Asimismo, se registró mayor variabilidad y fallos de contacto del electrodo en medios muy porosos, como aquellos con alta proporción de corteza de pino o perlita. Los rangos obtenidos en el ensayo muestran  $\Delta_{\text{máx}} (\text{max} - \text{min})$  de 0,63–0,83 u.pH (T1  $\Delta=0,83$ ; T2  $\Delta=0,63$ ; T3  $\Delta=0,72$ ; T4  $\Delta=0,81$ ; T5  $\Delta=0,82$ ) y medias de pH por tratamiento entre 7,51–7,84 (Tabla 10), en contraste el sesgo

metodológico cuantificado en el artículo ( $\approx 0,4-0,6$  u.pH) es del mismo orden de magnitud que la variabilidad observada en los tratamientos estudiados, sin embargo, la variación temporal (semana a semana) produjo rangos que en varios tratamientos igualan o superan el sesgo de dilución reportados en el artículo. Esto generó que los procedimientos del método *fast in situ* y las buenas métricas de ajuste ( $R^2$  ajustado y CV por tratamientos) respalden que la variación observada es mayormente real (Langenfeld *et al.*, 2024).

En un ensayo de laboratorio y campo sobre texturas diversas en Potsdam, Alemani estudiaron mediciones *fast in situ* con electrodos robustos (Sb/epoxi) a lo largo de un gradiente amplio de texturas y contenidos hídricos; encontraron que la humedad puede alterar el pH hasta  $\sim 1-1,5$  u.pH y establecieron un umbral mínimo de humedad  $\approx 11$  % para obtener lecturas rápidas fiables, además la respuesta humedad-pH depende fuertemente de la textura (arenas  $\approx$  lineal; suelos finos  $\approx$  respuesta con meseta) (Vogel *et al.*, 2024).

Los promedios de humedad por tratamiento del presente estudio están muy por encima del umbral mínimo, por ende, la magnitud máxima de la variación de pH que se observó por tratamiento fue ( $\approx 0,63-0,83$  u.pH) menor que el efecto extremo humedad  $\rightarrow$  pH reportado en el artículo, esto se debe a que en el ensayo la humedad permaneció en un rango estable y elevado; además, refuerza que en el presente ensayo la variación de pH está determinada por procesos de sustrato, dinámica del suelo y manejo. Por lo tanto, el protocolo *fast in situ* aplicado en el estudio se encontró dentro del rango de fiabilidad señalado por el artículo, lo que aumenta la confianza en las lecturas in situ registradas.

### **3.1.2 Humedad del sustrato**

El comportamiento de la humedad del sustrato cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 38) solo en los tratamientos T1, T4 y T5 y homocedasticidad (Tabla 39) en los tratamientos T1 y T5. El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 10) evidenció diferencias significativas entre semanas dentro de cada uno de los tratamientos que cumplieron con los supuestos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron superiores a 90 % y 85 %, respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que indica que el modelo se ajusta en los tratamientos analizados. El coeficiente de variación (CV) no superó 2,75 % en los tratamientos, por lo que los resultados presentan un elevado grado de confiabilidad (Tabla 40).

**Tabla 10.**

*Cuadro de Análisis de la varianza de la humedad en cada tratamiento de las 14 semanas evaluadas*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Semana-T1	3062,05	14	218,72	56,76	<0,0001
Error	173,39	45	3,85		
Total	3235,44	59			
Semana-T5	1679,63	14	119,97	27,74	<0,0001
Error	194,63	45	4,33		
Total	1874,26	59			

La prueba *post hoc* de Tukey mostró las diferencias entre semanas en cada tratamiento tabla 11, donde las diferencias de humedad se observaron cada dos semanas generalmente y con una tendencia descendente en la humedad en los dos tratamientos a pesar de que el riego se realizó entre 7 a 10 días en función de la pluviosidad local, siendo en los tratamientos, el comportamiento de la humedad en cada tratamiento en el transcurso de las semanas figura 4 permite observar la estabilidad de esta variable en cada uno, finalmente se determinó el rango de humedad en el que se comportó cada tratamiento en función de las semanas evaluadas tabla 12.

**Tabla 11.**

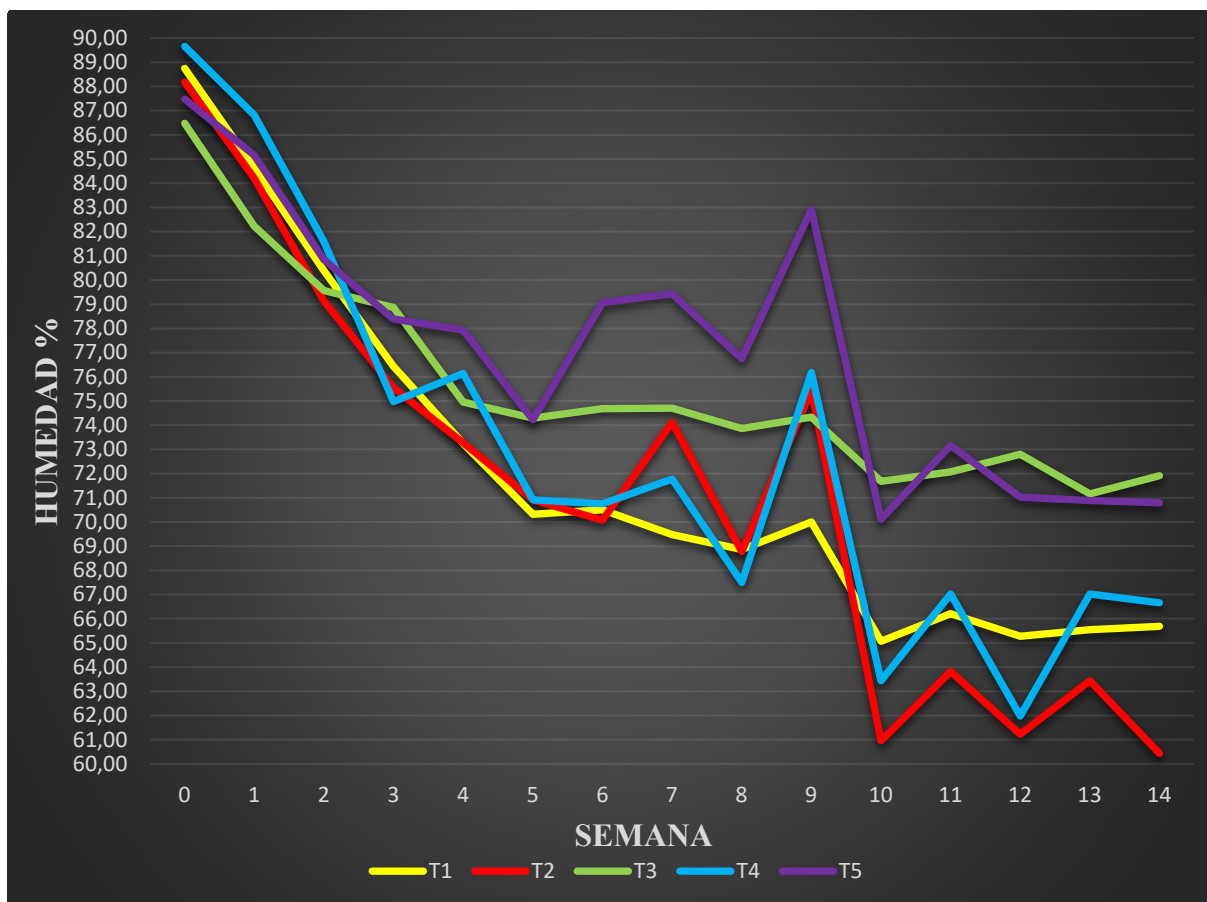
*Cuadro de prueba de Tukey de la humedad en cada tratamiento de las 14 semanas evaluadas*

<b>Semana</b>	<b>Medias</b>	<b>E.E.</b>				
			T1 - DMS = 4,98			
S0	88,75	0,98	A			
S1	84,64	0,98	A	B		
S2	80,39	0,98		B	C	
S3	76,43	0,98			C	D
S4	73,25	0,98			D	E
S6	70,50	0,98				E
S5	70,32	0,98				E
S9	70	0,98				E
S7	69,48	0,98				E
S8	68,87	0,98				E
S11	66,2	0,98				F
S14	65,68	0,98				F
S13	65,55	0,98				F
S12	65,27	0,98				F
S10	65,07	0,98				F

T5 - DMS = 5,27									
S0	87,48	1,04	A						
S1	85,16	1,04	A	B					
S9	82,91	1,04	A	B	C				
S2	80,84	1,04		B	C	D			
S7	79,43	1,04			C	D	E		
S6	79,07	1,04			C	D	E		
S3	78,39	1,04			C	D	E	F	
S4	77,94	1,04			C	D	E	F	
S8	76,75	1,04				D	E	F	
S5	74,23	1,04					E	F	G
S11	73,16	1,04						F	G
S12	71,02	1,04							G
S13	70,89	1,04							G
S14	70,8	1,04							G
S10	70,12	1,04							G

**Figura 4.**

*Gráfica de la variación de la humedad en cada tratamiento en el transcurso de las semanas*



**Tabla 12.**

*Cuadro de rangos de la humedad de cada tratamiento en base a las 14 semanas evaluadas*

<b>Tratamiento</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Promedio</b>
T1	89,27	61,91	72,03
T2	89,18	56,00	71,30
T3	86,82	68,42	75,57
T4	90,00	57,82	72,83
T5	87,82	67,36	77,21

Los datos de la presente investigación muestran que el contenido volumétrico de agua (VWC) de los sustratos osciló entre 56 % y 90 % a lo largo de las 14 semanas, con promedios por tratamiento que varían entre 71,30 % (T2) y 77,21 % (T5), lo cual permitió establecer una relación clara entre la humedad efectiva y el desarrollo vegetativo de *Caesalpinia spinosa*. Los sustratos con mayor proporción de poros finos y una alta capacidad de campo incrementan la fracción de agua fácilmente disponible (EAW), lo que facilita una absorción continua por parte de las raíces y reduce el estrés hídrico intermitente. Consecuentemente, un régimen de humedad elevado y relativamente estable atenúa las oscilaciones bruscas de la concentración iónica en la rizosfera y contribuye a mantener el pH del medio dentro de un intervalo favorable para la asimilación de nutrientes. La evidencia sugiere que la estabilidad de la humedad observada en T3 y T5 se explica esencialmente por la mayor disponibilidad hídrica efectiva y no por desplazamientos extremos en la reacción del sustrato. Asimismo, el manejo de riego y el volumen del contenedor (1000cc por funda) funcionan como moduladores operativos que, combinados con la composición física de las mezclas, determinan la VWC real que finalmente condiciona tanto el crecimiento como la estabilidad química del medio (Marschner, 2012; Nemali et al., 2007; Rhie y Kim, 2017).

En un ensayo se evaluaron la capacidad de contenedor (container capacity, CC) y la fracción de agua fácilmente disponible (EAW) en mezclas de fibra de coco y perlita (v/v): 1:0, 8:2, 6:4, 4:6, 2:8 y 0:1. Los valores de CC obtenidos fueron: 100 % fibra de coco = 64,3 %; 8:2 = 60,6 %; 6:4 = 58,0 %; 4:6 = 53,5 %; 2:8 = 38,4 %; y 100 % perlita = 24,5 % (v/v). La EAW registrada fue  $\approx 29,6$  % para 100 % fibra de coco y  $\approx 4,1$  % para 100 % perlita; además, la EAW de las mezclas disminuyó de forma aproximada y lineal al aumentar la proporción de perlita. Comparación: los promedios de VWC observados en la presente investigación (T3 = 75.6 %, T5 = 77.2 %) se encuentran por encima de las CC de muchas mezclas medidas en el ensayo, lo que sugiere dos posibles explicaciones, por un lado, diferencias en la definición/escala del “%”

reportado ( es decir algunos sensores informan % relativo de su rango vs. VWC volumétrico absoluto), por otro lado, las condiciones prácticas del ensayo (estado inmediatamente post-riego, compaction/llenado de fundas) que producen valores de VWC próximos o superiores a la CC teórica (Rhie y Kim, 2017).

En un estudio desarrollado en instalaciones académicas del Department of Horticultural Science de la North Carolina State University se evaluó el comportamiento de hidratación de componentes habituales en sustratos. La corteza de pino procesada empleada en el ensayo presentó una capacidad de contenedor (CC) de aproximadamente 55 % (VWC). Además, los autores trabajaron con un contenido de humedad inicial (IMC) cercano al 70 % en turba y fibra de coco durante los ensayos de captura de agua, y observaron que la fibra de coco mantiene valores de contenido volumétrico de agua (VWC) más elevados y se rehumecta con mayor facilidad que la turba o la corteza, especialmente cuando el IMC inicial es  $\geq 50-70$  %. Los VWC medios observados en la presente investigación ( $\approx 71-77$  %) son coherentes con los IMC y CC usados en el Department of Horticultural Science en el que respaldan que, bajo manejo de riego típico de vivero (llenados que dejan VWC cercanos al CC o al IMC), coir y mezclas coir-containing mantienen humedad alta durante más tiempo que bark o sustratos más gruesos (Schulker et al., 2021).

### 3.1.3 Temperatura del sustrato

El comportamiento de la temperatura del sustrato cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 41) y homocedasticidad (Tabla 42) en los tratamientos T1 y T4. El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 13) evidenció diferencias significativas entre semanas dentro de cada uno de los tratamientos que cumplieron con los supuestos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron superiores a 80% y 75 %, respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que indica que el modelo se ajusta en los tratamientos analizados. El coeficiente de variación (CV) fue de 21,14% y 15,41% en los tratamientos T1 y T4 respectivamente, por lo que los resultados presentan un grado de confiabilidad bajo (Tabla 43).

**Tabla 13.**

*Cuadro de Análisis de la varianza del Gradiente térmico en cada tratamiento de las 14 semanas evaluadas*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Semana-T1	127,34	14	9,10	14,06	<0,0001
Error	29,10	45	0,65		
Total	156,45	59			

Semana-T4	251,55	14	17,97	32,59	<0,0001
Error	24,81	45	0,55		
Total	276,36	59			

La prueba *post hoc* de Tukey mostró las diferencias entre semanas en cada tratamiento tabla 14, donde las diferencias de la temperatura del sustrato se observaron cada tres a cuatro semanas generalmente y con una tendencia ascendente en el aumento de la gradiente térmico en los dos tratamientos evaluados, siendo en los tratamientos T3 donde se observó una diferenciación más homogénea en la diferencia de la temperatura, el comportamiento de la gradiente térmico en cada tratamiento en el transcurso de las semanas figura 5 permite observar la estabilidad de esta variable en cada uno, finalmente se determinó el rango de gradiente térmico en el que se comportó cada tratamiento en función de las semanas evaluadas tabla 15.

**Tabla 14.**

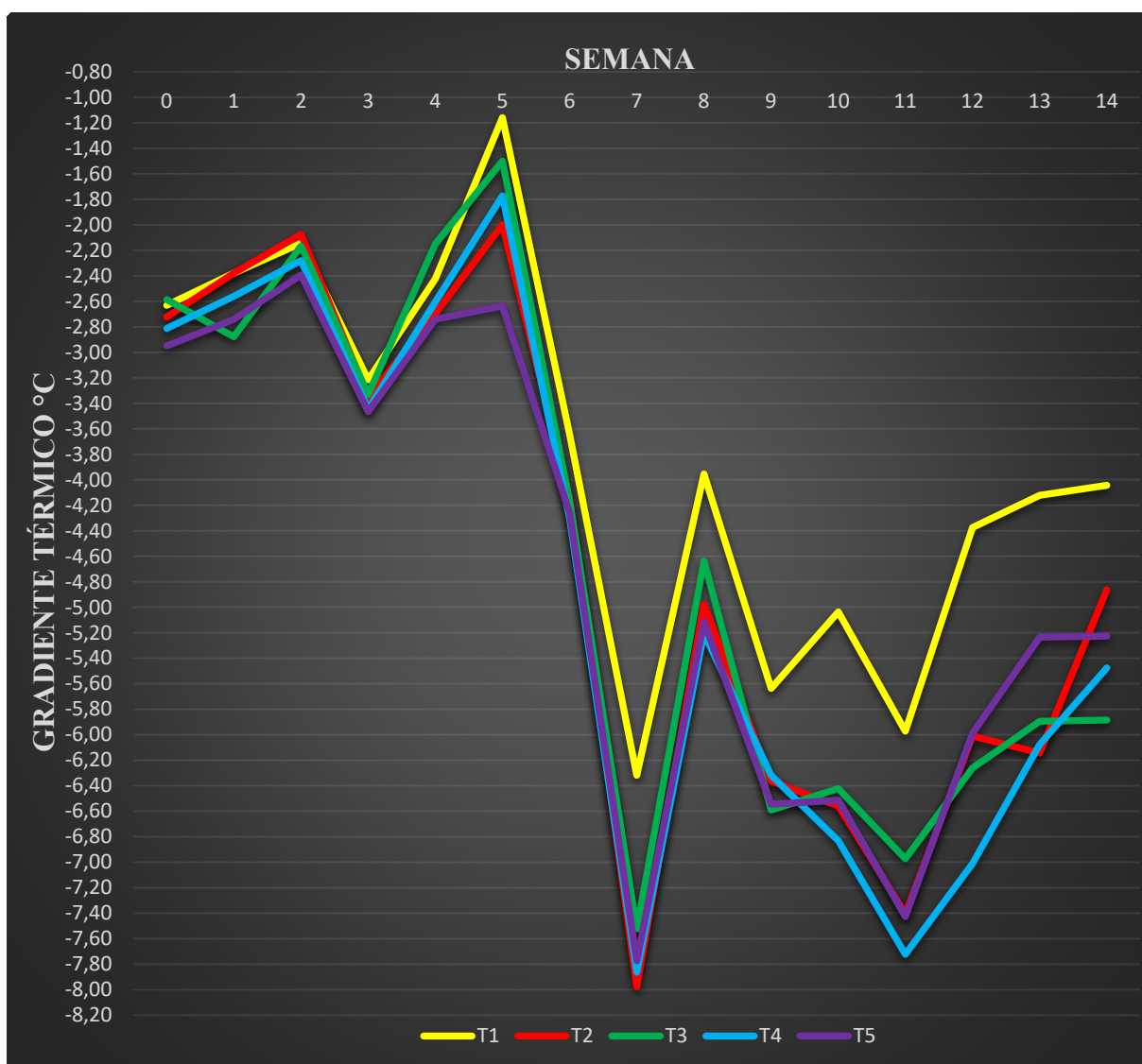
*Cuadro de prueba de Tukey del Gradiente térmico en cada tratamiento de las 14 semanas evaluadas*

Semana	Medias	E.E.				
T1 - DMS = 2,04						
S5	-1,16	0,4	A			
S2	-2,14	0,4	A	B		
S1	-2,38	0,4	A	B	C	
S4	-2,42	0,4	A	B	C	
S0	-2,63	0,4	A	B	C	
S3	-3,22	0,4		B	C	D
S6	-3,64	0,4		B	C	D E
S8	-3,96	0,4		B	C	D E F
S14	-4,04	0,4		B	C	D E F
S13	-4,12	0,4		B	C	D E F
S12	-4,37	0,4			C	D E F G
S10	-5,04	0,4			D	E F G
S9	-5,64	0,4				E F G
S11	-5,97	0,4				F G
S7	-6,32	0,4				G
T4 - DMS = 2,41						
S5	-1,77	0,37	A			
S2	-2,28	0,37	A			
S1	-2,56	0,37	A	B		
S4	-2,61	0,37	A	B		
S0	-2,81	0,37	A	B		
S3	-3,45	0,37	A	B	C	
S6	-4,3	0,37		B	C	D

S8	-5,21	0,37	C	D	E	
S14	-5,47	0,37		D	E	
S13	-6,08	0,37		D	E	F
S9	-6,32	0,37			E	F
S10	-6,83	0,37			E	F
S12	-7,01	0,37			E	F
S11	-7,73	0,37				F
S7	-7,86	0,37				F

**Figura 5.**

*Gráfica de la variación del Gradiente térmico en cada tratamiento en el transcurso de las semanas*



**Tabla 15.**

*Cuadro de rangos del Gradiente térmico de cada tratamiento en base a las 14 semanas evaluadas*

<b>Tratamiento</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Promedio</b>
T1	-0,36	-7,64	-3,80
T2	-1,18	-9,27	-4,64
T3	0,18	-9,31	-4,60
T4	-0,45	-8,70	-4,82
T5	-1,67	-9,34	-4,73

Los datos de la presente investigación indican que la temperatura del sustrato y su variabilidad espacial–temporal deben interpretarse en estrecha relación con las propiedades físico-hidráulicas observadas: sustratos con mayor VWC y mayor fracción de poros finos (T3: 75,57 %; T5: 77,21 %) presentan mayor inercia térmica y conductividad térmica efectiva que disminuyó los picos de temperatura interna en relación a la temperatura ambiente y redujo la amplitud de los gradientes temperatura entre el sustrato y el ambiente, mientras que mezclas más porosas y de baja densidad favorecieron enfriamiento por evaporación y elevada variación térmica superficial. Desde la teoría de la transferencia de calor en medios porosos, propiedades como la conductividad térmica, la capacidad calorífica y la densidad aparente se ven moduladas por el contenido de agua y por la velocidad de ganancia y pérdida térmica. Por ello, los sustratos con un mayor contenido volumétrico de agua (VWC) presentan una capacidad calorífica superior y una menor tasa de calentamiento durante las horas de mayor radiación, lo que contribuye a estabilizar la temperatura en la rizosfera. Esta estabilidad térmica protege procesos radiculares críticos: la respiración y la actividad enzimática se mantienen en rangos más favorables, la elongación de las raíces avanza con menos pulsos de demanda de carbono y la actividad microbiana descompone la materia orgánica de forma más continua. En conjunto, estos efectos favorecen el vigor y la resiliencia de las plántulas. Finalmente, a nivel de riesgo fisiológico, incrementos sostenidos de temperatura radicular en el orden de 5–10 °C sobre la condición óptima incrementan la respiración y la demanda de carbono, y exposiciones a temperaturas críticas de raíz (>37–40 °C) pueden ocasionar daño directo y mortalidad, de modo que el manejo hídrico que mantenga VWC en torno al 70–80 % contribuyen a la disponibilidad de agua y a la moderación térmica que protege la fisiología radicular y optimiza el desarrollo de las plántulas (Gohardoust et al., 2020; Nambuthiri et al., 2015).

En la presente investigación, los datos de temperatura medidos se emplearon para obtener el gradiente térmico sustrato/ambiente que resultó en promedios de –3,80 a –4,82 °C

según tratamiento (Tabla 21), con temperatura ambiente media del campus de 17,70 °C en el tiempo que se realizó el estudio; a partir de estos valores, la temperatura promedio estimada del volumen de sustrato fue del orden de 12,88–13,90 °C en los tratamientos. Estos valores indicaron que el sustrato se mantuvo consistentemente más frío que el aire ambiente durante las mediciones (realizadas entre las 11:00–13:00 horas), lo cual redujo la probabilidad de estrés térmico radical en comparación con escenarios de verano extremo. El estudio multi-sitio en HortTechnology registró temperaturas medias del sustrato en contenedores plásticos cercanas a 36 °C (con picos y días en que se superó la “temperatura crítica de zona radical”  $\geq 37.7$  °C en algunos sitios), y mostró gradientes mucho mayores entre contenedores plásticos y contenedores porosos; sin embargo, ese ensayo se realizó en estaciones cálidas de estados de EE. UU. (Michigan, Kentucky, Mississippi y Texas) durante mayo–octubre, es decir en regiones con marcada estacionalidad y picos estivos de radiación y días largos, condiciones que amplifican la ganancia térmica lateral de los contenedores y que no son representativas del agroclima monzónico/tropical donde se realizó la presente investigación. Por lo tanto, la comparación directa de magnitudes absolutas (13–14 °C vs.  $\approx 36$  °C), teniendo en cuenta que las diferencias observadas se debieron a variaciones climáticas de fondo (diferente radiación, duración del día y régimen estacional) y al diseño experimental (tipo de contenedor, exposición y riego) (Nambuthiri *et al.*, 2015).

En otro estudio realizado en Tailandia se documentó la implementación de enfriamiento de la zona radical en invernadero tropical produjo una reducción de la temperatura radical del orden de  $\approx 2$  °C y se asoció con mejoras en el crecimiento y desarrollo del cultivo bajo condiciones de alta irradiancia y temperaturas ambientales elevadas. Contrastando con los datos de la presente investigación se precisa que las temperaturas de sustrato observadas están por debajo de los rangos del invernadero tropical en el que detectaron riesgo térmico y por tanto el potencial beneficio de medidas activas de enfriamiento radical es limitado en este contexto; la reducción térmica lograda por enfriamiento activo en el invernadero tropical es comparable en magnitud a la atenuación pasiva que proporcionan sustratos con alta VWC e inercia térmica, lo que sugiere que mantener VWC elevadas (como en T3/T5) cumplió una función protectora similar en climas tropicales sin necesidad de infraestructura adicional; por tanto, la combinación de estructura del sustrato y régimen de riego mantuvo las condiciones térmicas de la rizosfera en rangos seguros (Naphrom *et al.*, 2025).

## 3.2 Características morfológicas de la parte aérea y radicular de las plántulas de *Caesalpinia spinosa*

### 3.2.1 Altura del tallo

El comportamiento de la altura del tallo cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 44) y homocedasticidad (Tabla 45). El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 16) evidenció diferencias significativas entre los tratamientos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron 75% y 68% respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que indica que el modelo se ajusta. El coeficiente de variación (CV) fue de 6,2%, lo cual respalda la precisión del experimento (Tabla 46).

**Tabla 16.**

*Cuadro de Análisis de la varianza de la altura del tallo de la plántula a las 14 semanas*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Tratamientos	22,2	4	5,6	11,01	0,0002
Error	7,56	15	0,5		
Total	29,8	19			

La prueba *post hoc* de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) mostró las diferencias entre los tratamientos tabla 17, se evidenció que los tratamientos T5, T3 y T1 presentaron mayores medias de alturas y diferencias significativas con los otros dos tratamientos. En contraste, los tratamientos T2 y T4 se ubicaron en un mismo grupo estadístico sin diferencias significativas entre ellos y con las medias de altura más bajas.

**Tabla 17.**

*Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey de la altura del tallo de la plántula a las 14 semanas*

<b>Tratamiento</b>	<b>Medias (cm)</b>	<b>E.E.</b>	<b>DMS = 1,55</b>
T5	12,5	4	A
T3	12,3	4	A
T1	12,1	4	A
T4	10,5	4	B
T2	9,92	4	B

Los resultados obtenidos en la variable altura del tallo mostraron diferencias significativas entre los sustratos empleados. Este comportamiento puede explicarse porque la elongación del tallo está directamente asociada a la disponibilidad de nutrientes, el equilibrio hídrico y la aireación del medio de cultivo. Debido a que esta variable es un indicador fundamental del crecimiento vegetativo inicial, ya que refleja la capacidad de las plántulas para competir por luz y establecerse en campo (Campos *et al.*, 2023). Además, la composición de los sustratos (T5= Perlita, T3= Fibra de coco y T1= Sustrato base) influyó en la porosidad y la retención de humedad, condiciones que regulan la actividad celular y la elongación del tallo (Shukla, 2023). En particular, sustratos con un balance adecuado entre componentes orgánicos e inorgánicos tienden a favorecer un mayor crecimiento en altura debido a que proporcionan tanto nutrientes disponibles como estabilidad estructural (Bunt, 2012; Sonneveld y Voogt, 2009).

En un estudio realizado en invernadero (casa de vegetación) del Centro de Ciencias Agrarias de la Universidad Federal da Paraíba (CCA-UFPB), Areia, Paraíba, Brasil, emplearon mezclas con fibra de coco y cascarilla de arroz en *Caesalpinia pulcherrima* y reportaron que los sustratos con fibra de coco con vermiculita favorecieron el desarrollo vertical ya que proporcionó el mejor desarrollo de la parte aérea de 15,68 cm (media), registrada a los 21 días (Alves *et al.*, 2017). En un ensayo desarrollado en México, autores afiliados a universidades de Durango y áreas circundantes, trabajaron con *Caesalpinia platyloba* en vivero y evaluaron altura con una evaluación a los 15 días y seguimiento en trasplante; encontraron que mezclas 50% composta (o lombricomposta) + 50% vermiculita mejoraron significativamente altura frente a otros sustratos donde a 15 días el tratamiento que inicialmente mostró mayor altura fue T6 (100% composta) con  $8.9 \pm 2.15$  cm, pero a los 60 días T1 fue el que presentó la mayor altura  $12.3 \pm 0.58$  cm (Velázquez *et al.*, 2025).

En Colombia (Bogotá y/o suelos urbanos, Floresta e Ambiente) muestran que la adición de composta al sustrato/suelo incrementa la fertilidad y promueve el crecimiento en altura en cinco especies nativas usadas en silvicultura urbana; el tratamiento con el mejor resultado de altura de la plántula fue SC-12.5, compuesto por: 87,5 % suelo franco (45,5 % arena, 43,3 % limo, 9,1 % arcilla), 12,5 % compost comercial (TerraViva, pH 6,9; C orgánico 9,94 %; N total 0,94 %; CIC 35,2 cmol(+)/kg; C/N  $\approx$ 10,5) y 10 % cascarilla de arroz (incluida como mejorador físico en todas las mezclas) con un resultado aproximado de 20,58 cm al cabo de 6 meses de evaluación en *Caesalpinia spinosa* (Manrique y Alvarado, 2023).

### 3.2.2 Diámetro del cuello de la plántula

El comportamiento del diámetro del cuello de la plántula cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 44) y homocedasticidad (Tabla 45). El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 18) evidenció diferencias significativas entre los tratamientos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron 82% y 78% respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que indica que el modelo se ajusta. El coeficiente de variación (CV) fue de 3,21%, lo cual respalda la precisión del experimento (Tabla 46).

**Tabla 18.**

*Cuadro de Análisis de la varianza de la altura del tallo de la plántula a las 14 semanas*

Tratamientos	Medias	D.E.	Medianas	H	p-valor
Tratamientos	0,9	4	0,2	17,39	<0,0001
Error	0,2	15	0,0		
Total	1,1	19			

La prueba *post hoc* de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) mostró las diferencias entre los tratamientos tabla 19, siendo el T1 aquel que obtuvo el mayor engrosamiento del tallo y diferenciándose de los demás tratamientos, tanto el T3 como T1 y T4, no presentaron diferencias significativas entre sí, y solamente el T2 comparte el mismo grupo estadístico con el T4.

**Tabla 19.**

*Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey del diámetro del cuello de la plántula a las 14 semanas*

Tratamiento	Medias (mm)	E.E.	DMS = 0,243
T1	3,79	4	A
T5	3,54	4	B
T3	3,54	4	B
T4	3,31	4	B C
T2	3,19	4	C

El diámetro del cuello es un indicador clave de la robustez de las plántulas, ya que se asocia directamente con la capacidad de sostén y la resistencia al estrés hídrico y mecánico. En este estudio, el tratamiento T1 (3,79 mm) presentó los mayores valores tras 105 días. Estos resultados pueden explicarse por la influencia de la composición del sustrato en la acumulación de biomasa y en el balance entre la parte aérea y la radicular, lo que favorece un tallo basal más desarrollado (Campos *et al.*, 2023). De acuerdo con Shukla (2023), los sustratos con mayor

capacidad de retención de agua y aporte orgánico tienden a mejorar el diámetro del cuello, dado que proporcionan estabilidad y nutrientes de liberación progresiva.

En el estudio realizado con *Caesalpinia platyloba* en vivero ubicado en El Fuerte, Sinaloa, México, con trasplantes medidos en condiciones de vivero y evaluación a los 15 y 60 días después del trasplante, donde el sustrato conformado por mezclas con composta o lombricomposta combinadas con vermiculita en relación 1:1, fueron las que mejoraron el engrosamiento del tallo; con 0,78 mm a los 15 días y 2,03 mm a los 60 días después del trasplante. Los resultados del diámetro en las plantas en la presente investigación son 2/3 mayores que los del estudio en El Fuerte, sin embargo, la causa es variada al ser diferentes especies y el periodo de tiempo entre ambos estudios se diferencia casi al doble (Velázquez *et al.*, 2025).

Investigadores evaluaron la adición de composta en tres sustratos: suelo control; SC-12.5 = suelo + 12.5 % compost v/v; SC-25 = suelo + 25 % compost v/v, en cinco especies nativas, entre ellas *Caesalpinia spinosa*, en un ensayo en Chía (Cundinamarca, Colombia) en invernadero durante 6 meses (las condiciones medias declaradas: temp.  $\approx 15$  °C, RH  $\approx 84.5$  %; árboles con edad de 12–15 meses al inicio del experimento; evaluación mensual durante 6 meses). los autores reportan que la mezcla SC-12.5 incrementó el crecimiento radial aproximadamente entre 12–14 mm (debido a que evaluaron los incrementos mensuales en promedio  $\approx 4,0$  mm en 6 meses al diámetro inicial de 8–10 mm), en contraste los resultados obtenidos en el presente ensayo reflejan que el crecimiento inicial del diámetro en plantas de *Caesalpinia spinosa* se encuentra dentro del rango de crecimiento constante en esta especie, debido a que el periodo de evaluación fue de aproximadamente tres meses y medio, con valores pico de diámetro de 4,02 mm en *Caesalpinia spinosa*, no obstante, es necesario recalcar que en los primeros meses de vida de la plántula el crecimiento vertical es dominante, por ello los árboles del estudio en Cundinamarca al ser evaluados a partir del año de edad los resultados promedios son mayores al predominar el crecimiento horizontal (Manrique y Alvarado, 2023).

### **3.2.3 Número de hojas de la plántula**

El comportamiento del número de hojas de la plántula cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 44) y homocedasticidad (Tabla 45). El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 20) evidenció diferencias significativas entre los tratamientos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron 90% y 88% respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que

indica que el modelo se ajusta. El coeficiente de variación (CV) fue de 5,17%, lo cual respalda la precisión del experimento (Tabla 46).

**Tabla 20.**

*Cuadro de Análisis de la varianza del número de hojas de la plántula a las 14 semanas*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Tratamientos	22,8	4	5,7	34,66	<0,0001
Error	2,47	15	0,2		
Total	25,3	19			

La prueba *post hoc* de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) mostró las diferencias entre los tratamientos tabla 21, donde las medias evaluadas reflejaron que el T1 y e T5 aquellos que obtuvieron la mayor cantidad de número de hojas por plántula con diferencias significativas con el resto de los tratamientos a excepción del T5 que no se diferencia significativamente del T3, tanto el T4 como el T2 son con diferencia los que menores valores obtuvieron además de diferenciarse significativamente entre sí.

**Tabla 21.**

*Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey del número de hojas de la plántula a las 14 semanas*

<b>Tratamiento</b>	<b>Medias</b>	<b>E.E.</b>	<b>DMS = 0,89</b>		
T1	9,2	4	A		
T5	8,5	4	A	B	
T3	8,2	4		B	
T4	7,1	4			C
T2	6,2	4			D

El número de hojas es un indicador del vigor fotosintético de las plántulas, debido a que determina la superficie foliar disponible para captar radiación y producir biomasa. En este estudio, tras 105 días, los tratamientos T1 (9,2 hojas) y T5 (8,5 hojas) presentaron los mayores valores, sin diferencias estadísticas significativas entre ellos. Estos resultados se explican porque la incorporación de componentes como la arena y la perlita respectivamente mejora la infiltración del agua y la retención de humedad, lo que promueve la formación de nuevas hojas (Hartmann *et al.*, 2014). Según Taiz *et al.* (2015), la expansión foliar responde directamente a la disponibilidad de nitrógeno y fósforo, nutrientes que favorecen tanto la síntesis de clorofila como la división celular en meristemas foliares. Por lo tanto, los materiales que conformaron tanto el T1 como el T5 favorecieron a la disponibilidad de estos nutrientes.

En la presente investigación, *Caesalpinia spinosa* alcanzó un máximo de 9,2 hojas en el tratamiento T1 y 8,5 en el T5 a los 105 días de evaluación, En un experimento realizado en casa de vegetación en el estado de Bahía (Brasil) con *Caesalpinia pulcherrima*; las evaluaciones se hicieron a los 90 días después de la siembra y entre las variables analizadas estuvo el número de hojas, donde el mejor resultado numérico estimado fue ~4,3 hojas por planta para el sustrato formulado con el compuesto orgánico de poda + estiércol (COP) a una proporción aproximada de 29:71 (residuo: suelo), mientras que otras combinaciones (CLU —compost urbano— y RES —residuo de sisal) presentaron valores similares pero decrecientes al aumentar la proporción de residuo. El contraste de los resultados obtenidos en Brasil con los de la presente investigación radica en la diferencia de la especie, a pesar de que el tiempo de evaluación es similar, no obstante, las condiciones ambientales influyen primordialmente debido a que la planta mientras más hojas tiene, su demanda hídrica aumenta, por tanto, es fundamental considerar la humedad como una variable que deriva en la cantidad de hojas que genera una planta (Moreira *et al.*, 2018).

Otro estudio que se desarrolló en San Pablo, provincia de Cajamarca (Perú), realizado en campo, vivero (vivero Kuntur Wasi) y laboratorio, con *Caesalpinia spinosa* (taya); en las evaluaciones de vivero (diseño completamente randomizado con 6 tratamientos que correspondían a sustratos procedentes de distintas altitudes) los resultados muestran que el tratamiento T4 (procedencia: Yuragalpa, 2 800 m s.n.m.) superó a los demás con 10,5 hojas (T4) frente a 9,5 hojas (testigo T6) y valores intermedios en los otros. Esto implica que los resultados obtenidos se asemejan a los obtenidos en Cajamarca, además de que las condiciones del lugar de ambos estudios y la especie coinciden lo cual alude a la confiabilidad de los resultados obtenidos en el presente ensayo (Zurita *et al.*, 2021).

### **3.2.4 Longitud de la radícula de la plántula**

El comportamiento de la longitud de la radícula de la plántula cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 44) y homocedasticidad (Tabla 45). El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 22) evidenció diferencias significativas entre los tratamientos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron 76% y 70% respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que indica que el modelo se ajusta. El coeficiente de variación (CV) fue de 12,13%, lo cual respalda la precisión del experimento (Tabla 46).

**Tabla 22.**

*Cuadro de Análisis de la varianza de longitud de la radícula de la plántula a las 14 semanas*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Tratamientos	22,2	4	5,6	11,01	0,0002
Error	7,56	15	0,5		
Total	29,8	19			

La prueba *post hoc* de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) mostró las diferencias entre los tratamientos tabla 23, los tratamientos T5 y T3 presentaron la mayor media de longitud de raíz siendo estadísticamente similar entre ellos, sin embargo, solamente el T3 comparte el mismo grupo que el T1 y con T2 y T4 se diferencian de los dos mejores tratamientos y conforman el mismo grupo con T1.

**Tabla 23.**

*Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey de longitud de la radícula de la plántula a las 14 semanas*

<b>Tratamiento</b>	<b>Medias (cm)</b>	<b>E.E.</b>	<b>DMS = 5,48</b>		
T5	26,45	4	A		
T3	23,94	4	A	B	
T1	19,54	4		B	C
T4	17,52	4			C
T2	16,10	4			C

La longitud de la radícula observada en el ensayo con los dos tratamientos que evidenciaron un incremento superior tanto el T5 = 26,45 cm como el T3 = 23,94 cm, se debe a las propiedades físicas y químicas de los sustratos que condicionan la exploración radicular, donde sustratos con mayor porosidad y buen balance entre drenaje y retención hídrica facilitan la elongación de la raíz al ofrecer aireación y agua disponible, además la interacción entre textura, densidad aparente y contenido de agua del sustrato; por ello los tratamientos con componentes que aumentan porosidad (T5 perlita y T3 fibra de coco) y con fracciones orgánicas equilibradas tienden a producir raíces más largas en estado de vivero (Lawrence y Newell, 1939; Shukla, 2023; Campos *et al.*, 2023).

En un ensayo conducido en invernadero del Centro de Ciencias Agrarias, Universidad Federal da Paraíba, evaluaron plántulas de *Caesalpinia pulcherrima* durante 21 días después de la siembra, donde el tratamiento con vermiculita evidenció resultados aproximados de longitud de raíz entre 15–16 cm a los 21 días, resultados visiblemente inferiores a los obtenidos en a

presente investigación, sin embargo, el tiempo de evaluación entre ambos estudios está diferenciado considerablemente (Alves *et al.*, 2017). En otro estudio realizado en el distrito de San Pablo (Provincia de Cajamarca, Perú) con trabajo de campo (muestras de sustrato de distintas altitudes) y ensayos en el vivero Kuntur Wasi con *Caesalpinia spinosa* el T4 (sustrato procedente de Yuragalpa, altitud 2 800 m.s.n.m., caracterizado por un alto contenido de materia orgánica (~23,32%) y presencia de hongos micorrízicos ectópicos) presentó el mayor incremento en la elongación de la raíz de las plántulas con 37,53 cm, estos resultados son superiores a los de la presente investigación, lo que implica que las condiciones de Cajamarca permitieron un mejor desarrollo radicular a en la misma especie estudiada (Zurita *et al.*, 2021).

### 3.2.5 Relación biomasa peso seco/peso verde de la plántula

Los datos de esta variable tomados a las 14 semanas posteriores al repique cumplieron con el supuesto paramétrico de normalidad tabla 44, pero no con la homocedasticidad tabla 45. Por lo tanto, se procedió a realizar una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis Tabla 24.

**Tabla 24.**

*Cuadro de prueba de Kruskal-Wallis de longitud de la relación biomasa peso seco/peso verde de la plántula a las 14 semanas*

Tratamientos	Medias	D.E.	Medianas	H	p-valor
T1	0,18	0,01	0,19	9,53	0,0433
T2	0,27	0,06	0,3		
T3	0,18	0,02	0,17		
T4	0,23	0,06	0,24		
T5	0,16	0,02	0,17		

La prueba de comparación múltiple de Dunn con ajuste de Bonferroni tabla 25, identificó diferencias significativas entre los tratamientos tabla 31. Los tratamientos T5 y T3 presentaron la mayor media de relación del peso S/V, siendo estadísticamente diferente solo del T2.

**Tabla 25.**

*Cuadro de la prueba de comparación múltiple de Dunn, con ajuste de Bonferroni de la relación biomasa peso seco/peso verde de la plántula a las 14 semanas*

Trat.	Ranks
T5	5,5 A
T3	7,0 A
T1	10,1 A B
T4	13,1 A B

Los resultados obtenidos muestran que un mayor contenido hídrico relativo implica más peso fresco por unidad de materia seca, mientras que valores más altos indican mayor proporción de materia seca (mayor lignificación/menos agua relativa); por tanto, los valores observados sugieren que T5 y T3 presentan mayor proporción de agua relativa y menor acumulación relativa de materia seca que T2, lo cual es coherente con sustratos que favorecen retención de humedad y crecimiento rápido pero con menor secado tisular (Campos *et al.*, 2023; Calderón *et al.*, 2025; Go *et al.*, 2025).

En un vivero en San Pablo, Cajamarca (Perú) estudiaron a *Caesalpinia spinosa*, donde el tratamiento procedente de Yuragalpa (T4) con alto contenido de materia orgánica (~23 %) y asociado con micorrizas a pesar de tener los valores de peso seco y peso verde más elevados y acordes, no presentó diferencia significativa con ninguno de los otros tratamientos, con 15,19 g de peso húmedo total de 10 plántulas (PHP) lo que equivale a 1,5198 g/plántula y 5,3250 g peso seco total de 10 plántulas (PSP) lo que equivale a 0,5325 g/plántula, de manera que la relación de peso seco/verde por plántula aproximado de 0,35 siendo superior al resultado obtenido en el sustrato T2 de la presente investigación, lo que implica que el contenido de agua por plántula en el estudio de Cajamarca es mayor y por ende no presentan una lignificación avanzada (Zurita *et al.*, 2021).

### 3.2.6 Relación longitud tallo/raíz de la plántula

El comportamiento de la relación longitud tallo/raíz de la plántula cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 44) y homocedasticidad (Tabla 45). El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 26) evidenció que no existieron diferencias significativas entre los tratamientos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron 42% y 26% respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que indica que el modelo tiene un ajuste bajo. El coeficiente de variación (CV) fue de 15,2%, lo cual respalda la precisión del experimento (Tabla 46).

**Tabla 26.**

*Cuadro de Análisis de la varianza de la relación longitud tallo/raíz de la plántula a las 14 semanas*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	0,1	4	0,0	2,69	0,0716
Error	0,1	15	0,0		
Total	0,2	19			

A pesar de que no existieron diferencias significativas en base a la estadística, además de que el error es igual al tratamiento, lo cual implica que los resultados obtenidos no presentarían un peso relevante de existir diferencias, los valores de la relación de la longitud tallo/raíz fueron los siguientes: T1 = 0,619; T2 = 0,616; T3 = 0,514; T4 = 0,599; T5 = 0,473, es necesario destacar que a pesar de que en algunos casos los sustratos poseían una diferencia marcada en la altura del tallo y la longitud de la raíz, el ensayo fue realizado con el debido control que al momento de relacionar las dos variables, las diferencias no fueron significativas dado que los sustratos en los que la planta se desarrolló mejor en altura, también se desarrolló mejor a nivel radicular.

En este contexto los resultados obtenidos de la relación tallo/raíz refleja la asignación de recursos entre exploración aérea y exploración radicular. En la etapa inicial de la planta esa relación se reduce a la búsqueda de agua y nutrientes, la textura/porosidad del sustrato y señales hormonales que regulan crecimiento apical y radical. Por lo tanto, una mayor inversión relativa en raíces mejora captación de agua y anclaje (crítico en especies de bosque seco), mientras que una mayor inversión en parte aérea mejora captura de luz y producción fotosintética, por ende, la relación ideal dependerá del objetivo (vivero vs trasplante) y del hábitat de destino (Taiz *et al.*, 2015; Campos *et al.*, 2023; Gómez y de Souza, 2022).

En un ensayo en invernadero en el Centro de Ciencias Agrarias, Universidad Federal de Paraíba, estudiaron a *Caesalpinia pulcherrima* y encontraron que el sustrato con vermiculita obtuvo valores de relación tallo/raíz de 0,99, lo que indica que fue equilibrada entre tallo y raíz bajo este tratamiento (Alves *et al.*, 2017). En San Pablo, Provincia de Cajamarca, Perú, un experimento en vivero con sustratos de procedencias altitudinales y alto contenido de materia orgánica reportó que el tratamiento T4 (sustrato con mayor contenido orgánico y presencia de micorrizas) superó a los demás en altura y longitud de raíz, sin embargo el T5 es el que obtuvo la relación tallo/raíz más equilibrada con un valor de 1,09, aunque estos resultados fueron estimados a partir de los incrementos de altura del tallo y la raíz durante 6 meses con una medición mensual (Zurita *et al.*, 2021).

### **3.2.7 Relación peso seco tallo/raíz de la plántula**

El comportamiento de la relación peso seco tallo/raíz de la plántula cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 44) y homocedasticidad (Tabla 45). El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 27) evidenció que no existieron diferencias significativas entre los tratamientos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron 34% y 17%

respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que indica que el modelo tiene un ajuste bajo. El coeficiente de variación (CV) fue de 19,01%, lo cual respalda la precisión del experimento cerca del límite permitido (Tabla 46).

**Tabla 27.**

*Cuadro de Análisis de la varianza de la relación peso seco tallo/raíz de la plántula a las 14 semanas*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Tratamientos	1,4	4	0,4	1,94	0,1553
Error	2,7	15	0,2		
Total	4,1	19			

Aunque las pruebas estadísticas reflejaron que no existieron diferencias significativas, además de que el efecto del error es superior al de los tratamientos, cabe destacar que la relación peso seco tallo/raíz refleja la proporción de biomasa seca asignada a la parte aérea frente a la radicular, por lo tanto, es un indicador del equilibrio estructural y de la estrategia de la plántula frente a recursos hídricos y nutricionales, por lo que valores elevados indican mayor asignación a la parte aérea y por otro lado, valores bajos señalan un mayor desarrollo radicular. Esta relación depende directamente de la disponibilidad de agua y nutrientes del sustrato, de su porosidad/drenaje y de la fenología de la especie (Campos *et al.*, 2023; Shukla, 2023; Calderón *et al.*, 2025).

En un ensayo realizado por investigadores del Instituto de Ciencias Agrarias (CSIC, Madrid) sobre plántulas de *Caesalpinia spinosa* sometidas a 100 días de estrés por sequía frente a riego (condición control), el control y los tres tratamientos con fertilización biológica no presentaron diferencias entre sí, con valores promedios de relación peso seco tallo/raíz de 1, tanto en condiciones de riego como bajo sequía, mientras que las plantas con fertilización química mostraron una proporción notablemente mayor de hasta 2,1 (es decir, más biomasa seca aérea relativa frente a raíz). El muestreo fue destructivo (separación y secado a 65 °C) y los datos son medias  $\pm$  EE (n = 10–12), con exactamente el mismo resultado obtenido en la presente investigación, compartiendo tanto especie como el mismo tiempo de evaluación implica una concordancia en los resultados obtenidos (Cordero *et al.*, 2024). En un experimento en invernadero (Centro de Ciencias Agrarias, Universidad Federal de Paraíba, Areia, Paraíba, Brasil) las plántulas de *Caesalpinia pulcherrima* se evaluaron a 21 días en 14 formulaciones de sustrato; el mejor sustrato para acumulación de masa seca de la parte aérea de 0,164 g·plántula<sup>-1</sup> y masa seca de raíz de 0,035 g·plántula<sup>-1</sup>, lo que da una relación peso seco tallo/raíz (PSA/PSR)

de 4.69, los sustratos a base de viruta de madera o cascarilla carbonizada dieron los valores más bajos. En contraste, los resultados promedios obtenidos en la presente investigación fueron de 2,2 siendo la mitad de lo que se obtuvo en el estudio realizado en Brasil, con la diferencia marcada en los periodos entre ambos estudios (Alves *et al.*, 2017).

### 3.3 Características fisiológicas de la parte aérea y radicular de las plántulas de *Caesalpinia spinosa*

#### 3.3.1 Velocidad de crecimiento longitudinal del tallo

El comportamiento de la velocidad de crecimiento longitudinal del tallo cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 47) y homocedasticidad (Tabla 48). El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 28) evidenció diferencias significativas entre los tratamientos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron 74% y 67% respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que indica que el modelo tiene un buen ajuste. El coeficiente de variación (CV) fue de 6,26%, lo cual respalda la precisión del experimento cerca del límite permitido (Tabla 49).

**Tabla 28.**

*Cuadro de Análisis de la varianza de la velocidad de crecimiento longitudinal del tallo de la plántula a las 14 semanas*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Tratamientos	0,23	4	0,06	10,71	0,0003
Error	0,08	15	0,01		
Total	0,31	19			

La prueba *post hoc* de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) mostró las diferencias entre los tratamientos tabla 29, Siendo T5, T3 y T1 aquellos que obtuvieron la mayor velocidad de crecimiento longitudinal del tallo con diferencias significativas con el resto de los tratamientos, tanto el T4 como el T2 son con diferencia los que menores valores obtuvieron sin diferencias significativas entre ellos.

**Tabla 29.**

*Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey de la velocidad de crecimiento longitudinal del tallo de la plántula a las 14 semanas*

<b>Tratamiento</b>	<b>Medias (mm*día<sup>-1</sup>)</b>	<b>E.E.</b>	<b>DMS = 0,1597</b>
T5	1,27	0,04	A
T3	1,26	0,04	A
T1	1,24	0,04	A
T4	1,07	0,04	B
T2	1,01	0,04	B

La velocidad de crecimiento longitudinal del tallo ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ) expresa el incremento medio de longitud del tallo en un periodo dado, por lo que los resultados obtenidos en el caso de los tres mejores tratamientos con una media de  $1,25 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$  implican que las plantas tuvieron un crecimiento constante y elevado para ser una especie forestal. La interacción entre disponibilidad de carbono (fotosíntesis), agua, nutrientes y condiciones físicas del sustrato que regulan división y elongación celular; en vivero se calcula a partir de la diferencia entre la longitud final y la inicial dividida por los días transcurridos y es sensible a factores ambientales (luz, temperatura, agua) y a la composición del sustrato (textura, porosidad, retención de humedad), de modo que sustratos que optimizan la relación aire/agua y suministro influirán positivamente en la velocidad de crecimiento, mientras que condiciones limitantes la reducen (Ali *et al.*, 2021; Campos *et al.*, 2023).

En un invernadero, Universidade Federal da Paraíba (Areia, Paraíba, Brasil), experimentaron con *Caesalpinia pulcherrima*, realizando una medición a los 21 días, donde el mejor sustrato fue el que estaba compuesto por vermiculita y dando como resultado una velocidad de crecimiento promedio de  $7,47 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$  (tomando en cuenta el incremento sobre 21 días) dado que el tiempo de evaluación fue corto y que es otra especie la estudiada los resultados se distancian considerablemente a los obtenidos en la presente investigación, no obstante permite dar una referencia de la calidad de plántulas que se desarrollan en un periodo establecido de tiempo (Alves *et al.*, 2017). De igual manera en un vivero universitario en El Fuerte, Sinaloa (México), estudiaron a *Caesalpinia platyloba*; donde realizaron mediciones a 15 y 60 días, donde el mejor tratamiento T1 (50% composta: 50% vermiculita) evidenció una velocidad de crecimiento longitudinal promedio de  $2,05 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ , los valores obtenidos en la presente investigación de velocidad de crecimiento longitudinal son menores a los de El Fuerte, sin embargo el tiempo de evaluación fue menor, además de que es otra especie, lo cual refleja que el valor promedio puede incrementar al ser menos días para los que se divide el valor total de la altura (Velázquez *et al.*, 2025). En Chía (Cundinamarca, Colombia) evaluaron *Caesalpinia spinosa* en invernadero durante 6 meses y reportaron la ganancia mensual de altura (SG) por tratamiento, donde el mejor sustrato fue SC-12.5 (12,5 % compost + 87,5 % suelo; 10 % cascarilla de arroz incorporada en la mezcla) con  $\text{SG} = 3,03 \text{ cm}\cdot\text{mes}^{-1}$ , que equivale aproximadamente a  $1,01 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$  (suponiendo 30 días/mes), los resultados de la presente investigación concuerdan con los obtenidos en Cundinamarca, esto reforzado por el hecho de que comparten la especie que permite observar un comportamiento similar en la velocidad de crecimiento longitudinal (Manrique y Alvarado, 2023).

### 3.3.2 Velocidad de crecimiento diametral de cuello

El comportamiento de la velocidad de crecimiento diametral del tallo cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 47) y homocedasticidad (Tabla 48). El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 30) evidenció diferencias significativas entre los tratamientos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron 79% y 73% respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que indica que el modelo tiene un buen ajuste. El coeficiente de variación (CV) fue de 3,68%, lo cual respalda la precisión del experimento cerca del límite permitido (Tabla 49).

**Tabla 30.**

*Cuadro de Análisis de la varianza de la velocidad de crecimiento diametral del tallo de la plántula a las 14 semanas*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	0,00010	4	0,000024	14,10	0,0001
Error	0,00003	15	0,000002		
Total	0,00012	19			

La prueba *post hoc* de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) mostró las diferencias entre los tratamientos tabla 31, donde T1 y T5 aquellos que obtuvieron la mayor velocidad de crecimiento diametral con diferencias significativas con el resto de los tratamientos, y el T4 y T2 con una velocidad de crecimiento diametral menor significativamente en comparación con los demás tratamientos.

**Tabla 31.**

*Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey de la velocidad de crecimiento diametral del tallo de la plántula a las 14 semanas*

Tratamiento	Medias (mm*día <sup>-1</sup> )	E.E.	DMS = 0,00286		
T1	0,03866	0,00066	A		
T5	0,03611	0,00066	A	B	
T3	0,03609	0,00066	B		C
T4	0,03372	0,00066	C		D
T2	0,03256	0,00066	D		

La velocidad de crecimiento diametral del cuello (mm·día<sup>-1</sup>) refleja la tasa de engrosamiento del tallo y resume la interacción entre disponibilidad de carbohidratos, nutrientes (especialmente N y P), agua, la lignificación y las propiedades físicas del sustrato (densidad aparente, porosidad, aireación), por ende, sustratos que optimizan el balance aire/agua y suministran nutrientes de forma sostenida favorecen mayor división secundaria y engrosamiento; en contraste, condiciones que promueven elongación rápida pero con menor soporte nutricional implican velocidades diametrales menores (Campos *et al.*, 2023).

En Chía, Colombia evaluaron a *Caesalpinia spinosa* durante 6 meses reportaron crecimiento radial mensual  $SC-12.5 = 1,12 \text{ mm} \cdot \text{mes}^{-1}$  que equivale a  $0,0373 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , lo cual en contraste con los resultados obtenidos en la presente investigación reflejan que *Caesalpinia spinosa* se desarrolló en el plano horizontal igual que en los resultados obtenidos en Chía (Manrique y Alvarado, 2023). En El Fuerte, Sinaloa, *Caesalpinia platyloba* en mediciones tempranas informan aumentos diametrales muy rápidos en el mejor sustrato compuesto de vermiculita con incrementos reportados de 2,03 mm a los 15 días en uno de los mejores tratamientos, lo que equivale a  $0,135 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  en esa fase temprana, estos resultados son considerablemente mayores a los obtenidos en la presente investigación, sin embargo, implica la diferente especie estudiada además del tiempo de evaluación fue menor (Velázquez *et al.*, 2025).

### 3.3.3 Tasa de supervivencia de plántulas

El comportamiento de la tasa de supervivencia de plántulas cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 47) y homocedasticidad (Tabla 48). El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 32) evidenció que no existieron diferencias significativas entre los tratamientos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron 35% y 17% respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que indica que el modelo tiene un ajuste bajo. El coeficiente de variación (CV) fue de 8,89%, lo cual respalda la precisión del experimento cerca del límite permitido (Tabla 49).

**Tabla 32.**

*Cuadro de Análisis de la varianza de la tasa de supervivencia de plántulas a las 14 semanas*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamientos	0,05	4	0,01	1,98	0,1502
Error	0,09	15	0,01		
Total	0,14	19			

El análisis de la tasa de supervivencia no reflejó diferencias significativas entre los tratamientos, además el error es superior al efecto de los tratamientos. Sin embargo, los factores edafo-físicos son los determinantes de la integridad de plántulas como: disponibilidad hídrica estable en el sustrato, equilibrio entre porosidad y retención (aireación + agua), y aporte de materia orgánica que mejora la nutrición y la resistencia al estrés en etapas iniciales, debido a que estos factores reducen mortalidad por asfixia radicular o estrés hídrico y explican por qué las plántulas mantuvieron alta supervivencia en todos los tratamientos del ensayo (Campos *et al.*, 2023).

Un estudio en Rumania con *Robinia pseudoacacia* bajo condiciones de semillero/invernadero que comparó mezclas con distintas turbas y enmiendas (mezclas de turba con perlita u otros sustratos comerciales), se reportaron diferencias significativas entre los sustratos, donde los sustratos con menor estructura/porosidad reflejaron una supervivencia mínima de 86.7%, mientras que las mezclas mejor balanceadas consiguieron supervivencias de hasta 90%, lo que muestra que la estructura física del sustrato (mayor porosidad + retención equilibrada) es crítica para mantener supervivencia elevada, en contraste, los resultados de la tasa de supervivencia en a presente investigación fue en promedio del 87%, siendo resultados similares a los del estudio con *Robinia pseudoacacia*(Drăghici *et al.*, 2024). En otro estudio realizado en *Caesalpinia pyramidalis*, en Brasil, los autores evaluaron distintas mezclas orgánicas (compostas y enmiendas) donde la mezcla compostada 1:1:1 mostró una supervivencia inicial de 83.1%, valores semejantes a los obtenidos en la presente investigación, que implica que el sustrato no influyó de forma directa en la supervivencia de las plántulas (Conceição *et al.*, 2018).

### 3.3.4 Índice de calidad de Dickson de las plántulas

El comportamiento del índice de Dickson de las plántulas cumplió los supuestos de normalidad (Tabla 47) y homocedasticidad (Tabla 48). El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 33) evidenció que existieron diferencias significativas entre los tratamientos. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el  $R^2$  ajustado fueron 68% y 60% respectivamente en los ANOVAS realizados, lo que indica que el modelo tiene un buen ajuste. El coeficiente de variación (CV) fue de 13,22%, lo cual respalda la precisión del experimento cerca del límite permitido (Tabla 49).

**Tabla 33.**

*Cuadro de Análisis de la varianza del índice de calidad de dickson de las plántulas a las 14 semanas*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Tratamientos	0,28	4	0,07	8,02	0,0011
Error	0,13	15	0,01		
Total	0,41	19			

La prueba *post hoc* de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) mostró las diferencias entre los tratamientos tabla 34. Los tratamientos T1, T5 y T3 fueron aquellos que obtuvieron el mejor índice de Dickson, sin embargo, solamente T1 se diferencia significativamente de T4 y T2.

**Tabla 34.**

*Cuadro de la prueba de comparación de medias de Tukey del índice de calidad de Dickson de las plántulas a las 14 semanas*

<b>Tratamiento</b>	<b>Medias</b>	<b>E.E.</b>	<b>DMS = 0,00286</b>		
T1	0,87	0,05	A		
T5	0,78	0,05	A	B	
T3	0,74	0,05	A	B	C
T2	0,61	0,05		B	C
T4	0,54	0,05			C

El Índice de Calidad de Dickson (ICD) integra biomasa total seca, altura y diámetro y las relaciones biomasa aérea/raíces para dar una medida única del “vigor” y equilibrio de la plántula: valores altos indican plantas con buena asignación de biomasa, relación altura/diámetro equilibrada y suficiente masa radicular para sobrevivir en campo, mientras que valores bajos suelen señalar plantas desequilibradas (muy alargadas, poco radicadas o con baja biomasa total), por lo cual, sustratos con materia orgánica madura y buena estructura (que aportan nutrientes y balance aire/agua) favorecen mayor biomasa total y mejor relación raíz: parte aérea, elevando el ICD y por otro lado, sustratos más ligeros en nutrientes pueden producir plantas más largas pero con menor biomasa/raíces y por tanto menor ICD (Dickson *et al.*, 1960, citado en Maarroof *et al.*, 2022).

Un estudio en Frederico Westphalen (Rio Grande do Sul, Brasil), en ambiente protegido con sombreado (50% interceptación de luz) y riego controlado, trabajaron con *Caesalpinia pluviosa* y evaluaron ICD a los 120 días, donde el T2 (10% compuesto orgánico + 75% suelo + 15% arena) y T3 (15% compuesto orgánico + 70% suelo + 15% arena) indicaron valores de 3,91 (T2) y 4,10 (T3), mientras tratamientos con sustratos únicamente orgánicos o comerciales tuvieron valores menores (T5 = 0,21; T6 = 0,15), los valores obtenidos en la presente investigación son considerablemente menores a los obtenidos en Rio Grande, sin embargo influyó la diferencia de las especies a pesar de que el tiempo de evaluación fue similar (Oliveira *et al.*, 2017). En un trabajo sobre *Caesalpinia pyramidalis* en Catingueira y evaluaron la producción de plántulas en diferentes sustratos y reportó ICD como indicador de calidad a los 120 días donde los tratamientos COM ofrecieron el mejor equilibrio planta–sustrato COM 2:1:1 registró un ICD = 0,85, y COM 1:1:1 un ICD = 0,82, los resultados obtenidos en el presente estudio concuerdan con los obtenidos en el estudio realizado en Catingueira, siendo una especie más cercana a *C. spinosa* y el tiempo de evaluación ser relativamente similar, enfatizando la confiabilidad de los resultados obtenidos (Conceição *et al.*, 2018).



## CAPÍTULO IV

### Conclusiones y Recomendaciones

#### 4.1 Conclusiones

La incidencia de los sustratos en el desarrollo vegetativo de *Caesalpinia spinosa* fue considerable en diferentes aspectos del crecimiento evaluados en las plántulas.

El comportamiento de los sustratos en función de sus características básicas evidenció tendencias claras, además permitió determinar las condiciones ideales para que *Caesalpinia spinosa* se desarrolle, con sustratos ligeramente alcalinos, con una retención de humedad elevada y una temperatura constante y menor en comparación al ambiente.

Las características morfológicas de la parte aérea y radicular de las plántulas de *Caesalpinia spinosa* indicaron un desarrollo proporcional en base a la etapa inicial del crecimiento, con una elongación del tallo marcada, un engrosamiento del tallo reducida, la cantidad de hojas proporcional, un desarrollo radicular considerablemente superior en desarrollo en comparación a otros sistemas de la planta, una relación biomasa peso seco/peso verde diferenciada entre los tratamientos empleados en la que *Caesalpinia spinosa* al ser una especie procedente del bosque seco, se desarrolla mejor en sustratos que retienen la humedad pero el exceso de la misma se percola de forma que no perjudica a la planta. Tanto en la relación tallo/raíz como la relación peso seco tallo/raíz los tratamientos no influyeron significativamente en estas variables.

Por otro lado, en las características fisiológicas de la parte aérea y radicular de las plántulas de *Caesalpinia spinosa* los sustratos influyeron notablemente, por ello tanto en la velocidad de crecimiento longitudinal como diametral se observaron diferencias claras entre los tratamientos, además el índice de Dickson reveló que el análisis en conjunto de las variables medidas presenta resultados cercanos a la calidad de la planta, lo cual permitió seleccionar a tres tratamientos como los que potenciaron el desarrollo vegetativo de *Caesalpinia spinosa*, finalmente en cuanto a la tasa de supervivencia de las plántulas los tratamientos no representaron un efecto significativo .

#### 4.2 Recomendaciones

- Se sugiere a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) y al (MAG) que adopten el uso de los sustratos compuestos por fibra de coco y perlita con la finalidad de obtener plántulas de *Caesalpinia spinosa* en cantidad y calidad.

- Se motiva a los investigadores a realizar estudios complementarios que analicen la interacción simbiótica en el crecimiento inicial de las plántulas de *Caesalpinia spinosa* con hongos fijadores de nitrógeno en función del sustrato empleado.
- Se incita a la comunidad científica a emplear la metodología aplicada en la presente investigación con el fin de enriquecer la teoría base de la silvicultura en el campo de producción en vivero.

## Referencias Bibliográficas

- Ali, H., Bhatti, S., Maqsood, A., & Rehman, A. (2021). Vegetative growth patterns and physiological analysis in seedlings under varying conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(3), 450–462. Obtenido de: <https://doi.org/10.1111/jac.12432>
- Álvarez, F., y Muñoz, T. (2023). *Optimización del biorregulador 6-Bencilaminopurina en la inducción a brotes de Caesalpinia spinosa a nivel in vitro* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio UPS. Obtenido de: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24515>
- Alves, M., Alves, U., Araújo, D., y Lima, M. (2017). Substrate in the emergence and initial growth of seedlings of *Caesalpinia pulcherrima*. *Ciência Rural*, 47, e20150433. Obtenido de: <https://www.scielo.br/j/cr/a/TBmJMnWmvq9MFVQPBj4BZKS/>
- Ansorena, J. (1994). *Sustratos: propiedades y caracterización*. Ediciones Mundi-Prensa. Obtenido de: <https://es.scribd.com/document/761246839/Botanica-Jardineria-Libro-Sustratos-Propiedades-y-Caracterizacion-Ansorena-J-Mundi-Prensa-1994>
- Attri, M., Pandey, S., & Yadav, K. (2023). Standardization of growing medium for growth of *Azadirachta indica* seedlings in semi-arid region of Rajasthan, India. *Plant Archives*, 23(1), 45–52. Obtenido de: <https://plantarchives.org/article/6%20STANDARDIZATION-OF-GROWING-MEDIUM-FOR-GROWTH-OF-AZADIRACHTA-INDICA-SEEDLINGS-IN-SEMI-ARID-REGION-OF-RAJASTHAN,-INDIA.pdf>
- Barrow, J., y Hartemink, E. (2023). The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant and Soil*, 487, 21–37. Obtenido de: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>
- Bonelli, L., Montesano, F., D'Imperio, M., Gonnella, M., Boari, A., Leoni, B., y Serio, F. (2024). Sensor-based fertigation management enhances resource utilization and crop performance in soilless strawberry cultivation. *Agronomy*, 14(3), 465. Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/3/465>
- Bukan, M., Kereša, S., Pejić, I., Sudarić, A., Lovrić, A., y Šarčević, H. (2024). Variability of root and shoot traits under PEG-induced drought stress at an early vegetative growth stage of soybean. *Agronomy*, 14(6), 1188. Obtenido de: <https://doi.org/10.3390/agronomy14061188>
- Bunt, R. (2012). *Media and mixes for container-grown plants: a manual on the preparation and use of growing media for pot plants*. Springer Science & Business Media. Obtenido de: [https://home.czu.cz/storage/737/65060\\_A.-C.-Bunt-auth.-Media-and-Mixes-for-](https://home.czu.cz/storage/737/65060_A.-C.-Bunt-auth.-Media-and-Mixes-for-)

Container-Grown-Plants-A-manual-on-the-preparation-and-use-of-growing-media-for-pot-plants-Springer-Netherlands-1988-.pdf

- Cadena, S. (2013). Efecto de *Azolla* sp., en la productividad y mejoramiento del suelo en la granja experimental Yuyucocha, Imbabura (Tesis de pregrado). Universidad Técnica del Norte. Obtenido de: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/2068/1/03%20RNR%20164%20TE%20SIS.pdf>
- Calderón, F., Álvarez, C., y Acevedo, M. (2025). Phosphorus fertilization and chemical root pruning: Effects on root traits during the nursery stage in two Mediterranean species from Central Chile. *Plants*, 14(2), 195. Obtenido de: <https://doi.org/10.3390/plants14020195>
- Campos, P., Rufini, M., Silva, M., Santos, N., Mendoza, Y., Rezende de Souza, C., & Fagundes, P. (2023). *Biometric and morphological adjustments of Eugenia dysenterica* DC. seedlings in response to increased soil water deficit. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 45, e62761. Obtenido de: <https://www.periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciBiolSci/article/view/62761>
- Cao, J., Li, X., Chen, L., He, M., & Lan, H. (2022). The developmental delay of seedlings with cotyledons only confers stress tolerance to *Suaeda aralocaspica* (Chenopodiaceae) by unique performance on morphology, physiology, and gene expression. *Frontiers in Plant Science*, 13, 844430. Obtenido de: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.844430>
- Carlowitz, H. C. von. (1713). *Sylvicultura oeconomica: Oder, hauswirthliche Nachricht und naturgemäße Anweisung zur wilden Baumzucht*. Leipzig: Bey der Weidmannschen Buchhandlung. Obtenido de: [https://archive.org/details/bub\\_gb\\_nFDAAAACAAJ](https://archive.org/details/bub_gb_nFDAAAACAAJ)
- Carvajal, G., Paredes, H., Rosales, O., Mugmal, C., Layana, M., y Varela, M. (2023). Análisis de rentabilidad de un modelo agroforestal tradicional, en la comunidad Quichua El Manzanal, Ibarra – Ecuador. *Pentaciencias*, 5(7), 238–253. Obtenido de: <http://www.editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/download/934/1295>
- Carvajal, G., Paredes, H., Haro, G., Garzón, B., Enríquez, C., y Rosero, R. (2025). Evaluación fito física del arbolado urbano en Caranqui – Ecuador: Diversidad, riesgos y prioridades de conservación para una gestión socioecológica. *Innova Science Journal*, 3(3), 28–45. Obtenido de: <https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n3/68>
- Chang, J., Qu, Z., Xu, R., Pan, K., Xu, B., Min, Y., Ren, Y., Yang G., y Ge., Y. (2017). Assessing the ecosystem services provided by urban green spaces along urban center-

- edge gradients. *Scientific Reports*, 7(11226), 1-9. Obtenido de: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11559-5>
- Chhaya, A., Yadav, B., Jogawat, A., Gnanasekaran, P., Kumari, P., Lakra, N., Lal, S. K., Pawar, J., y Narayan, P. (2021). An overview of recent advancement in phytohormones-mediated stress management and drought tolerance in crop plants. *Plant Gene*, 25, Article 100264. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2020.100264>
- Conceição, N., Dias, M., Paes, É., Silva, T., Nóbrega, R., y Nóbrega, J. (2018). Different substrates in seedling production of *Caesalpinia pyramidalis* Tul. *Journal of Experimental Agriculture International*, 27(3), 1–7. Obtenido de: <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/44805>
- Cordero, I., Pueyo, J., y Rincón, A. (2024). Bio-fertilisation with native plant growth promoting rhizobacteria increases the tolerance of the neotropical legume tree *Caesalpinia spinosa* to water deficit. *Forest Ecology and Management*, 558, 121786. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121786>
- Cun, Z., Wu, M., Zhang, Y., Shuang, P., Hong, J., An, X., y Chen, W. (2022). Suppression of leaf growth and photosynthetic capacity as an acclimation strategy to nitrogen deficiency in a nitrogen-sensitive and shade-tolerant plant *Panax notoginseng*. *Journal of Plant Interactions*, 17(1), 980–990. Obtenido de: <https://doi.org/10.1080/17429145.2022.2141902>
- Derkzen, M., Astrid, J., van Teeffelen, A., y Verburg, P. (2015). REVIEW: Quantifying urban ecosystem services based on high-resolution data of urban green space: an assessment for Rotterdam, the Netherlands. *Journal of Applied Ecology*, 52: 1020-1032. Obtenido de: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12469>
- Drăghici, C., Enescu, R., Hoble, A., y Abrudan, V. (2024). Responses of containerized seedlings of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) under field conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 50(2), 181–190. Obtenido de: <https://www.notulaebotanicae.ro/index.php/nbha/article/download/14273/9914>
- Du, H., Cai, W., Xu, Y., Wang, Z., Wang, Y., y Cai, Y. (2017). Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing Data Urban For. *Urban Greening*, pp. 24-31. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.008>
- Enríquez, H. (2015). Propagación vegetativa de Quishaur (*Buddleja incana*) y aliso (*Alnus acuminata*) Empleando tres enraizadores en la Granja Experimental Yuyucocha, de la universidad Técnica del Norte (Tesis de pregrado). Obtenido de:

<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/4321/1/03%20FOR%20220%20TE SIS.pdf>

- Erazo, N., y Añazco, M. (2022). *Propagación sexual de Hieronyma macrocarpa Müll. Arg. en la parroquia Huaca, provincia del Carchi* [Trabajo de titulación, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio UTN. Obtenido de: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12559>
- Espinosa, M., Acuña, E., García, J., Rodríguez, R., & Rubilar, R. (2017). *Silvicultura de bosques plantados con fines productivos. Editorial Universitaria de Concepción. Concepción, Chile*. Obtenido de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstreams/c8bac9c3-ed2e-4095-aa9a-e1a26f7c5aea/download>
- FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Obtenido de: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e233d727-a8c9-4f90-a05d-a34b93c8a923/content>
- Fonseca, D., Potosí, E., Sono, D., Carvajal, G., Varela, E., y Garzón, B. (2023). Análisis de tratamientos pregerminativos químicos en semillas de *Juglans neotropica* Diels de procedencia de San Blas, cantón Urcuquí, Imbabura-Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4). Obtenido de: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i4.7571](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7571)
- Garrido, L., Carvajal, G., Valencia, G., Varela, E., y Cuarán, J. (2023). Diagnóstico del arbolado urbano en la ciudad de Ibarra, como base para una gestión de arbolado más humano. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2). Obtenido de: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i2.5743](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5743)
- Go, Y., Ju, S., Kim, E. J., Kim, Y., & Lee, B. (2025). Growth and quality of grafted watermelon seedlings under controlled light intensity in a plant factory nursery system. *Journal of Bio-Environmental Control*, 34(2), 102–113. Obtenido de: <https://koreascience.kr/article/JAKO202514750408742.pdf>
- Gohardoust, R., Bar-Tal, A., Effati, M., y Tuller, M. (2020). Characterization of physicochemical and hydraulic properties of organic and mineral soilless culture substrates and mixtures. *Agronomy*, 10(9), Article 1403. Obtenido de: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091403>
- Gómez, A., y Delgado, A. (2024). *The Soil: Physical, Chemical, and Biological Properties. Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture* (pp. 21–54). Springer. Obtenido de: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-69150-8\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-69150-8_2)

- Gomez, R., y de Souza, C. (2022). Initial growth and quality of seedlings of forest species under water deficit. *Revista Árvore*, 46, e4633. Obtenido de: <https://doi.org/10.1590/1806-908820220000033>
- Gondal, R., Saleem, Y., Rizvi, A., Riaz, A., Naseem, W., Muhammad, G., Hayat, S., y Iqbal, M. (2021). Assessment of drought tolerance in various cotton genotypes under simulated osmotic settings. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 2, Article 202008437. Obtenido de: <https://doi.org/10.35495/ajab.2020.08.437>
- González, K. (2021). *Propagación de Caesalpinia spinosa (Molina) Kuntze mediante cuatro tratamientos pre germinativos en tres tipos de sustratos, bajo condiciones de invernadero* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio ESPOCH. Obtenido de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15881>
- Gower, B. (1996). *Scientific method: A historical and philosophical introduction* (1st ed.). Routledge. Obtenido de: <https://doi.org/10.4324/9780203046128>
- Gregory, P., y Nortcliff, S. (Eds.). (2013). *Soil conditions and plant growth*. Wiley-Blackwell. Obtenido de: <https://marwanbaloch.files.wordpress.com/2015/01/soil-conditions-and-plant-growth.pdf>
- Hartmann, T., Kester, E., Davies, T., y Geneve, L. (2014). *Plant Propagation: Principles and Practices* (8th ed.). Pearson: Education Limited. Obtenido de: <https://archive.org/details/PlantPropagationPrinciplesAndPacticesByHartmannAndKesters8thEdition>
- Kormanek, M., Małek, S., Banach, J., & Durło, G. (2023). Effect of changing substrate density and water application method on substrate physical properties and container-grown seedling growth. *Forests*, 14(7), 1490. Obtenido de: <https://www.mdpi.com/1999-4907/14/7/1490>
- Krishnan, R., Kalia, K., Tewari, C., & Roy, M. (2014). *Plant nursery management: principles and practices*. Central Arid Zone Research Institute, Jodhpur, 40. Obtenido de: <https://www.academia.edu/download/104668334/PRathaKrishnan.pdf>
- Langenfeld, N., Skabelund, H., Heins, R., & Bugbee, B. (2024). Advantages of a novel in situ pH measurement for soilless media. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1334328. Obtenido de: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2024.1334328/pdf>
- Lawrence, W., & Newell, J. (1939). *Seed and potting composts, with special reference to soil sterilization*. G. Allen & Unwin Ltd. Obtenido de: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19391601885>

- Lépiz, R., Chavarín, E., López, J., & Rodríguez, E. (2018). Acumulación de materia seca durante las etapas de desarrollo de variedades de frijol. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41(3), 275-283. Obtenido de: <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.3.275-283>
- Li, N., Euring, D., Cha, J., Lin, X., Lu, M., Huang, L., y Kim, Y. (2021). Plant hormone-mediated regulation of heat tolerance in response to global climate change. *Frontiers in Plant Science*, 11, 627969. Obtenido de: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.627969>
- Liu, Y., Chen, S., Pal, S., Yu, J., Zhou, Y., ... & Xia, X. (2024). The hormonal, metabolic, and environmental regulation of plant shoot branching. *New Crops*, 1(2), 100028. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.ncrops.2024.100028>
- Llumitasig, S., Carranza, M., Cusquillo, B., Herrera, R., y Agualzaca, D. (2024). Caracterización y propuesta de un plan de manejo para la conservación de *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze en el cantón Guano. *Revista Código Científico*. Obtenido de: <https://revistacodigocientifico.itslosandes.net/index.php/1/article/view/505>
- López, P. (2023). Regulación genética y fisiológica en el desarrollo vegetal. *Revista de la SEBP*, (73), 56–64. Obtenido de: <https://www.sebp.es/wp-content/uploads/numero-73-2023.pdf#page=56>
- Lorrai, R., Boccaccini, A., Ruta, V., Possenti, M., Costantino, P., y Vittorioso, P. (2018). Abscisic acid inhibits hypocotyl elongation acting on gibberellins, DELLA proteins and auxin. *AoB PLANTS*, 10(5), ply061. Obtenido de: <https://doi.org/10.1093/aobpla/ply061>
- Maarroof, A., Aziz, M., & Ahmed, K. (2022). *The Scientific Guide to Measure Field Crop Traits*. University of Kirkuk. Obtenido de: <https://uokirkuk.edu.iq/Agriculture-Hawija/images/mktb%20astshary/dalil/4.pdf>
- Marschner, H. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press. Obtenido de: [https://home.czu.cz/storage/737/65060\\_Mineral-Nutrition-of-higher-plants-Marschner-2012.pdf](https://home.czu.cz/storage/737/65060_Mineral-Nutrition-of-higher-plants-Marschner-2012.pdf)
- Manrique, M., y Alvarado, O. (2023). Compost Increases Soil Fertility and Promotes the Growth of Five Tropical Species Used in Urban Forestry. *Floresta e Ambiente*, 30, e20230018. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/profile/Oscar-Alvarado-Sanabria/publication/376199282\\_Compost\\_Increases\\_Soil\\_Fertility\\_and\\_Promotes\\_the\\_Growth\\_of\\_Five\\_Tropical\\_Species\\_Used\\_in\\_Urban\\_Forestry-El\\_compost\\_aumenta\\_la\\_fertilidad\\_del\\_suelo\\_y\\_promueve\\_el\\_crecimiento\\_de\\_cinco\\_especies\\_tropical/links/656dddcfce88b8703131d292/Compost-Increases-Soil-](https://www.researchgate.net/profile/Oscar-Alvarado-Sanabria/publication/376199282_Compost_Increases_Soil_Fertility_and_Promotes_the_Growth_of_Five_Tropical_Species_Used_in_Urban_Forestry-El_compost_aumenta_la_fertilidad_del_suelo_y_promueve_el_crecimiento_de_cinco_especies_tropical/links/656dddcfce88b8703131d292/Compost-Increases-Soil-)

Fertility-and-Promotes-the-Growth-of-Five-Tropical-Species-Used-in-Urban-Forestry-El-compost-aumenta-la-fertilidad-del-suelo-y-promueve-el-crecimiento-de-cinco-especies-tropical.pdf

- Moreira, M., Nóbrega, A., Santos, D., Silva, D., y Nóbrega, A. (2018). Cultivation of *Caesalpinia pulcherrima* L. Sw. in regional substrates. *Revista Árvore*, 42, e420212. Obtenido de: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/kBCJ66bPdwwfcDqPxjyKlgqB/>
- Murga, H., Abanto, C., Lobo, A., y Amorim, S. (2023a). Tara (*Caesalpinia spinosa*) in Natural and Agroforestry Systems under an Altitudinal Gradient in the Peruvian Andes: Responses to Soil and Climate Variation. *Agronomy*, 13(2), 282. Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/2/282>
- Murga, H., Lobo, A., y Santos Silva, R. (2023b). Increased Production of Tara (*Caesalpinia spinosa*) by Edaphoclimatic Variation in the Altitudinal Gradient of the Peruvian Andes. *Agronomy*, 13(3), 646. Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/3/646>
- Nambuthiri, S., Geneve, L., Sun, Y., Wang, X., Fernandez, T., Niu, G., Bi, G., y Fulcher, A. (2015). Substrate temperature in plastic and alternative nursery containers. *HortTechnology*, 25(1), 50–56. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/publication/275343417\\_Substrate\\_Temperature\\_in\\_Plastic\\_and\\_Alternative\\_Nursery\\_Containers?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.researchgate.net/publication/275343417_Substrate_Temperature_in_Plastic_and_Alternative_Nursery_Containers?utm_source=chatgpt.com)
- Naphrom, D., Santasup, C., Panchai, W., Boonraeng, S., y Promwungkwa, A. (2025). The effect of root zone cooling on the growth and development of strawberry (*Fragaria × ananassa*) in a tropical climate. *International Journal of Plant Biology*, 16(2), 54. Obtenido de: <https://doi.org/10.3390/ijpb16020054>
- Nemali, S., Montesano, F., Dove, K., y Van Iersel, W. (2007). Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH2O and Theta probes. *Scientia Horticulturae*, 112, 227–234. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.013>
- Oliveira, D., Caron, O., Elli, V., Monteiro, C., Schwerz, F., Basso, J., y Manfron, A. (2017). Production and quality of *Caesalpinia pluviosa* seedlings in different substrates. *Jaboticabal* 45(1), 1-8. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/profile/Gc-Monteiro/publication/313546205\\_Production\\_and\\_quality\\_of\\_Caesalpinia\\_pluviosa\\_seedlings\\_in\\_different\\_substrates/links/59baf157aca272aff2d0234d/Production-and-quality-of-Caesalpinia-pluviosa-seedlings-in-different-substrates.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Gc-Monteiro/publication/313546205_Production_and_quality_of_Caesalpinia_pluviosa_seedlings_in_different_substrates/links/59baf157aca272aff2d0234d/Production-and-quality-of-Caesalpinia-pluviosa-seedlings-in-different-substrates.pdf)
- Paul, A., y Frey, D. (2023). *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (5th ed.). Academic Press. Obtenido de: <https://www.academia.edu/download/30925043/125183992.pdf>

- Paredes, O., Varela, G., Rosales, O., Carvajal, G., y León, E. (2023). Herbario Universidad Técnica del Norte HUTN, un laboratorio para conocer la diversidad de especies forestales del Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(3), 1167–1184. Obtenido de: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i3.6262](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6262)
- Peng, C., Yu, W., Shi, F., y Shen, Y. (2023). Review of the current research progress of seed germination inhibitors. *Horticulturae*, 9(4), 462. Obtenido de: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040462>
- Poethig, S., y Fouracre, J. (2024). Temporal regulation of vegetative phase change in plants. *Developmental Cell*, 59(1), 4-19. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2023.11.010>
- Quiñones, R. (2015). Manual diseño y organización de viveros. *Santo Domingo, República Dominicana*. Obtenido de: <https://biologiaccadinarte11mogrado.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/04/manual-de-disec3b1o-y-organizac3b3n-de-viveros.pdf>
- Raviv, M., Lieth, H., & Bar-Tal, A. (Eds.). (2019). *Soilless culture: Theory and practice: Theory and practice*. Elsevier. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/profile/Avner-Silber/publication/332235948\\_Chemical\\_Characteristics\\_of\\_Soilless\\_Media/links/625e92ad709c5c2adb86e7cb/Chemical-Characteristics-of-Soilless-Media.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Avner-Silber/publication/332235948_Chemical_Characteristics_of_Soilless_Media/links/625e92ad709c5c2adb86e7cb/Chemical-Characteristics-of-Soilless-Media.pdf)
- Rhie, H., y Kim, J. (2017). Changes in physical properties of various coir dust and perlite mixes and their capacitance sensor volumetric water content calibrations. *HortScience*, 52(1), 162–166. Obtenido de: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11362-16>
- Salas, C. (2023). Silvicultura de Bosques Nativos. *Gayana. Botanica*, 80(2), 188-189. Obtenido de: [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-66432023000200188&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-66432023000200188&script=sci_arttext)
- Salazar, S., y Añazco, M. (2022). *Propagación vegetativa de Morella pubescens en San Pedro de Huaca, Carchi, Andes del Norte del Ecuador* [Trabajo de titulación, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio UTN. Obtenido de: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13330>
- Schafer, G., & Lerner, L. (2022). Physical and chemical characteristics and analysis of plant substrate. *Ornamental Horticulture*, 28, 181-192. Obtenido de: <https://www.scielo.br/j/oh/a/YTYZ66L8dcFSYrkvvPzBMvB/?format=html&lang=en>
- Schulker, A., Jackson, E., Fonteno, C., Heitman, L., y Albano, P. (2021). Exploring substrate water capture in common greenhouse substrates through preconditioning and irrigation

- pulsing techniques. *Agronomy*, 11(7), 1355. Obtenido de: <https://doi.org/10.3390/agronomy11071355>
- Sachs, J. (1868). *Lehrbuch der Botanik nach dem gegenwärtigen Stand der Wissenschaft*. Leipzig: Wilhelm Engelmann. Obtenido de: <https://archive.org/details/lehrbuchderbotan00sach/page/n5/mode/2up>
- Shi, K., Liang, J., Ji, F., & He, D. (2024). Effects of plug tray cell size on the growth of *Atractylodes chinensis* seedlings. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 17(3), 89–98. Obtenido de: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/8916>
- Shukla, K. (2023). *Soil Physics: An Introduction*. CRC Press. Obtenido de: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b14926/soil-physics-manoj-shukla>
- Siqueira, P., Ford, C., Lloyd, A., & White, D. (2025). Container size and site quality affect survival and early growth performance of New Zealand native tree species. *Journal of Forestry Research*, 36, 1–12. Obtenido de: <https://doi.org/10.1007/s11676-025-01851-w>
- Scoggins, L., y Van Iersel, W. (2006). In situ probes for measurement of electrical conductivity of soilless substrates: Effects of temperature and substrate moisture content. *HortScience*, 41(1), 210–214. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/profile/Marc-Van-Iersel/publication/258514984\\_In\\_Situ\\_Probes\\_for\\_Measurement\\_of\\_Electrical\\_Conductivity\\_of\\_Soilless\\_Substrates\\_Effects\\_of\\_Temperature\\_and\\_Substrate\\_Moisture\\_Content/links/0deec5287a6b422eb5000000/In-Situ-Probes-for-Measurement-of-Electrical-Conductivity-of-Soilless-Substrates-Effects-of-Temperature-and-Substrate-Moisture-Content.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Marc-Van-Iersel/publication/258514984_In_Situ_Probes_for_Measurement_of_Electrical_Conductivity_of_Soilless_Substrates_Effects_of_Temperature_and_Substrate_Moisture_Content/links/0deec5287a6b422eb5000000/In-Situ-Probes-for-Measurement-of-Electrical-Conductivity-of-Soilless-Substrates-Effects-of-Temperature-and-Substrate-Moisture-Content.pdf)
- Sonneveld, C., y Voogt, W. (2009). *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer Science & Business Media. Obtenido de: [https://home.czu.cz/storage/737/65060\\_Plant-Nutrition-of-Greenhouse-Crops-Springer-Netherlands-2009-ucebnice.pdf](https://home.czu.cz/storage/737/65060_Plant-Nutrition-of-Greenhouse-Crops-Springer-Netherlands-2009-ucebnice.pdf)
- Sprague, T. (1931). The botanical name of "Tara." *Bulletin of Miscellaneous Information (Royal Botanic Gardens, Kew)*, (1), 29–30. Obtenido de: <https://www.jstor.org/stable/4102518>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I., y Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sunderland, MA: Sinauer Associates. Obtenido de:

[https://sirsyedcollege.ac.in/crm/public/uploads/download\\_image/H8aTDrHeKuTogIS07SE1r80gjP2dmU.pdf](https://sirsyedcollege.ac.in/crm/public/uploads/download_image/H8aTDrHeKuTogIS07SE1r80gjP2dmU.pdf)

- Torres, B., Huera, T., y López, A. (2024). Biodiversity and carbon sequestration in chakra-type agroforestry systems and humid tropical forests of the Ecuadorian Amazon. *Forests*, 15(3), 557. Obtenido de: <https://doi.org/10.3390/f15030557>
- Trugman, T., y Anderegg, L. (2025). Source vs sink limitations on tree growth: From physiological mechanisms to evolutionary constraints and terrestrial carbon cycle implications. *New Phytologist*, 245(3), 966–981. Obtenido de: <https://doi.org/10.1111/nph.20294>
- Tyagi, S., Venkateswarlu, C., Paul, J., Gurjar, K. S., Dixit, S., ... y Singh, M. (2024). Unveiling the genetic basis of seedling emergence from deep soil depth under dry direct-seeded conditions in rice (*Oryza sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 15, 151223. Obtenido de: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1512234>
- Van Helmont, J. (1648). *Ortus medicinae*. Amsterdam: Ludovicum Elzevirium. Obtenido de: <https://archive.org/details/ortus-medicinae/page/n5/mode/2up>
- Velázquez, E., Martínez, G., Prieto, Á., y Félix, A. (2025). Crecimiento de plantas de *Caesalpinia platyloba* S. Watson en vivero bajo diferentes sustratos orgánicos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 12(1), e3519. Obtenido de: <https://doi.org/10.19136/era.a12n1.3519>
- Vélez, N. (2016). Efecto de retenedores de agua en la producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad Crespa Salad en la Granja Experimental Yuyucocha, provincia de Imbabura [Trabajo de titulación, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Institucional UTN. <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/6884/3/03%20AGP%20196%20ARTICULO.pdf>
- Villanueva, R., Pérez, A., Prieto, A., & Muñoz, J. (2023). *Survival, growth and carbon content in a forest plantation established after a clear-cutting in Durango, México*. PeerJ, 11, e12182. Obtenido de: <https://doi.org/10.7717/peerj.12182>
- Vogel, S., Emmerich, K., Schröter, I., Bönecke, E., Schwanghart, W., Rühlmann, J., ... & Gebbers, R. (2023). The effect of soil moisture content and soil texture on fast in situ pH measurements with two types of robust ion-selective electrodes. *EGUsphere*, 2023, 1-20. Obtenido de: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2023/egusphere-2023-1470/egusphere-2023-1470.pdf>
- Wang, R., Qin, X., Pan, H., Li, D., Xiao, X., Jin, Y., ... y Wang, Y. (2025). Assessing the effects of drought stress on photosynthetic performance and physiological resistance in

- camphor seedling leaves. *PLOS ONE*, 20(1), e0313316. Obtenido de: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313316>
- Woodward, J. (1699). Some thoughts and experiments concerning vegetation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 21(252–254), 193–227. Obtenido de: <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rstl.1699.0040>
- Xiao, S., Liu, L., Wang, H., Li, D., ... & Li, C. (2019). Exogenous melatonin accelerates seed germination in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *PLoS ONE*, 14(6), e0216575. Obtenido de: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216575>
- Yanez, M., Gomez, P., Gajardo, J., & Espinoza, S. (2021). Growth and physiological acclimation to shade in young plants of *Adesmia bijuga* Phil., a critically endangered species in central Chile. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 14(4), 307. Obtenido de: <https://iforest.sisef.org/contents/?id=ifor3640-014>
- Zambrano, A., Pinargote, Y., Morales, D., & Andrade, A. (2024). Characterization of the physical and chemical components of mangrove mud in the Cojimies River estuary, Latitude 0 Experimental Station located in the Mache River. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(5), e07179. Obtenido de: <https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/7179/2951>
- Zhao, D., Reddy, R., Kakani, G., y Reddy, R. (2005). Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. *European Journal of Agronomy*, 22(4), 391–403. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.06.00>
- Zhang, X., Wang, D., Zhao, B., Li, D., y Liu, X. (2023). Effect of K<sup>+</sup> concentration on the direct pH measurement of peat matrix by Sb electrode pH sensor and compensation methods. *IEEE Sensors Journal*, PP(99), 1–1. Obtenido de: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3278931>
- Zhou, L., Thakur, M. P., Jia, Z., Hong, Y., Yang, W., An, S., y Zhou, X. (2023). Light effects on seedling growth in simulated forest canopy gaps vary across species from different successional stages. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, Article 1088291. Obtenido de: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.1088291>
- Zurita, R., Cadenillas, A., y Gallardo, M. (2021). Influence of Rhizobium and Mycorrhizae in the Production of Seedlings of *Caesalpinia Spinosa* L. Taya in San Pablo, Peru. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of STEAM*, 1166–1178. Obtenido de: <https://knepublishing.com/index.php/epoch/article/download/9514/15892>



## Anexos

**Tabla 35.**

*Cuadro de la prueba de Shapiro-Wilks (modificado) de la variable pH en las semanas de cada tratamiento*

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO pH en T1	60	0,00	0,11	0,96	0,267
RDUO pH en T2	60	0,00	0,07	0,98	0,782
RDUO pH en T3	60	0,00	0,10	0,98	0,853
RDUO pH en T4	60	0,00	0,11	0,97	0,566
RDUO pH en T5	60	0,00	0,08	0,97	0,578

**Tabla 36.**

*Cuadro de la prueba de Levene (modificado) de la variable pH en las semanas de cada tratamiento*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
RABS pH en T1	0,080	14	0,010	1,330	0,227
RABS pH en T2	0,030	14	0,003	1,440	0,177
RABS pH en T3	0,060	14	0,004	1,130	0,364
RABS pH en T4	0,060	14	0,005	1,260	0,268
RABS pH en T5	0,03	14	0,002	0,91	0,553

**Tabla 37.**

*Cuadro de la prueba de evaluación del modelo de la variable pH en las semanas de cada tratamiento*

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Tratamientos de T1	60	0,67	0,57	1,60
Tratamientos de T2	60	0,72	0,64	1,14
Tratamientos de T3	60	0,61	0,49	1,50
Tratamientos de T4	60	0,72	0,64	1,68
Tratamientos de T5	60	0,81	0,75	1,26

**Tabla 38.**

*Cuadro de la prueba de Shapiro-Wilks (modificado) de la variable humedad en las semanas de cada tratamiento*

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO Humedad en T1	60	0,00	1,71	0,96	0,341
RDUO Humedad en T2	60	0,00	2,62	0,93	0,012
RDUO Humedad en T3	60	0,00	1,81	0,94	0,042
RDUO Humedad en T4	60	0,00	3,74	0,97	0,564
RDUO Humedad en T5	60	0,00	1,82	0,97	0,613

**Tabla 39.**

*Cuadro de la prueba de Levene (modificado) de la variable humedad en las semanas de cada tratamiento*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
RABS Humedad en T1	10,96	14	0,78	0,63	0,823
RABS Humedad en T2	73,72	14	5,27	2,08	0,033
RABS Humedad en T3	42,69	14	3,05	2,55	0,009
RABS Humedad en T4	224,33	14	16,02	4,76	<0,0001
RABS Humedad en T5	23,67	14	1,69	1,45	0,171

**Tabla 40.**

*Cuadro de la prueba de evaluación del modelo de la variable humedad en las semanas de cada tratamiento*

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> Aj</b>	<b>CV</b>
Tratamientos de T1	60	0,95	0,93	2,73
Tratamientos de T5	60	0,9	0,86	2,69

**Tabla 41.**

*Cuadro de la prueba de Shapiro-Wilks (modificado) de la variable gradiente térmico en las semanas de cada tratamiento*

<b>Variable</b>	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>D.E.</b>	<b>W*</b>	<b>p(Unilateral D)</b>
RDUO Gradiente térmico en T1	60	0,00	0,70	0,96	0,373
RDUO Gradiente térmico en T2	60	0,00	0,72	0,93	0,012
RDUO Gradiente térmico en T3	60	0,00	1,10	0,90	<0,0001
RDUO Gradiente térmico en T4	60	0,00	0,65	0,96	0,371
RDUO Gradiente térmico en T5	60	0,00	0,68	0,91	<0,0001

**Tabla 42.**

*Cuadro de la prueba de Levene (modificado) de la variable gradiente térmico en Las semanas de cada tratamiento*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
RABS Gradiente térmico en T1	3,00	14	0,210	1,120	0,366
RABS Gradiente térmico en T2	5,30	14	0,380	1,630	0,107
RABS Gradiente térmico en T3	12,94	14	0,920	2,020	0,038
RABS Gradiente térmico en T4	4,20	14	0,300	1,85	0,060
RABS Gradiente térmico en T5	5,19	14	0,37	2,13	0,028

**Tabla 43.**

*Cuadro de la prueba de evaluación del modelo de la variable gradiente térmico en Las semanas de cada tratamiento*

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Tratamientos de T1	60	0,81	0,76	21,14
Tratamientos de T4	60	0,91	0,88	15,41

**Tabla 44.**

*Cuadro de la prueba de Shapiro-Wilks (modificado) de las variables del objetivo dos a las 14 semanas*

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO Altura_cm	20	0,0	0,630	0,94	0,506
RDUO Diametro_mm	20	0,0	0,100	0,92	0,276
RDUO Número_Hojas	20	0,0	0,360	0,91	0,198
RDUO Longitud_radicula_cm	20	0,0	2,230	0,92	0,234
RDUO Relación peso seco/peso verde plántula	20	0,0	0,040	0,92	0,274
RDUO Relación_longitud_tallo/raíz	20	0,0	0,080	0,98	0,961
RDUO Relación_peso_seco_tallo/raíz	20	0,0	0,38	0,93	0,328

**Tabla 45.**

*Cuadro de la prueba de Levene (modificado) de las variables del objetivo dos a las 14 semanas*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
RABS Altura_cm	1,26	4,00	0,32	2,43	0,094
RABS Diametro_mm	0,02	4,00	0,01	2,28	0,109
RABS Número_Hojas	0,14	4,00	0,03	0,87	0,504
RABS Longitud_radicula_cm	13,15	4,00	3,29	2,10	0,132
RABS Relación_peso_seco/peso_verde_plántula	0,01	4,00	0,00	4,94	0,010
RABS Relación_longitud_tallo/raíz	0,02	4,00	0,00	2,94	0,056
RABS Relación_peso_seco_tallo/raíz	0,34	4,00	0,09	2,12	0,128
RABS Altura_cm	1,26	4,00	0,32	2,43	0,094

**Tabla 46.**

*Cuadro de la prueba de evaluación del modelo de las variables del objetivo dos a las 14 semanas*

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Altura_cm	20	0,75	0,68	6,20
Diametro_mm	20	0,82	0,78	3,21
Número_Hojas	20	0,90	0,88	5,17
Longitud_radicula_cm	20	0,76	0,70	12,13
Relación_longitud_tallo/raíz	20	0,42	0,26	15,20

Relación peso seco tallo/raíz 20 0,34 0,17 19,01

**Tabla 47.**

*Cuadro de la prueba de Shapiro-Wilks (modificado) de las variables del objetivo tres a las 14 semanas*

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO Velocidad_longitudinal_mm*día <sup>-1</sup>	20	0,0	0,060	0,94	0,52
RDUO Velocidad_diametral_mm*día <sup>-1</sup>	20	0,0	0,001	0,93	0,33
RDUO Tasa_supervivencia	20	0,0	0,070	0,95	0,65
RDUO Indice_Calidad_Dickson	20	0,0	0,080	0,97	0,88

**Tabla 48.**

*Cuadro de la prueba de Levene (modificado) de las variables del objetivo tres a las 14 semanas*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
RABS Velocidad_longitudinal_mm*día <sup>-1</sup>	0,01	4,00	0,00	2,33	0,10
RABS Velocidad_diametral_mm*día <sup>-1</sup>	0,00	4,00	0,00	1,59	0,23
RABS Tasa supervivencia	0,01	4,00	0,00	2,16	0,12
RABS Indice Calidad Dickson	0,03	4,00	0,01	3,11	0,05

**Tabla 49.**

*Cuadro de la prueba de evaluación del modelo de las variables del objetivo tres a las 14 semanas*

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Velocidad_longitudinal_mm*día <sup>-1</sup>	20	0,74	0,67	6,26
Velocidad_diametral_mm*día <sup>-1</sup>	20	0,79	0,73	3,68
Tasa_supervivencia	20	0,35	0,17	8,89
Indice Calidad Dickson	20	0,68	0,60	13,22

**Figura 6.**

*Identificación de frutos de Caesalpinia spinosa en árboles en la ciudad de Ibarra*



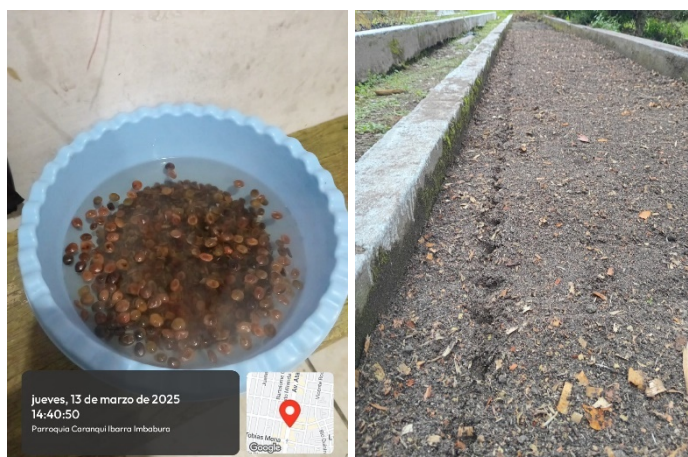
**Figura 7.**

*Instalación de la cama de germinación*



**Figura 8.**

*Proceso de siembra de las semillas de *Caesalpinia spinosa* con el respectivo tratamiento pregerminativo*



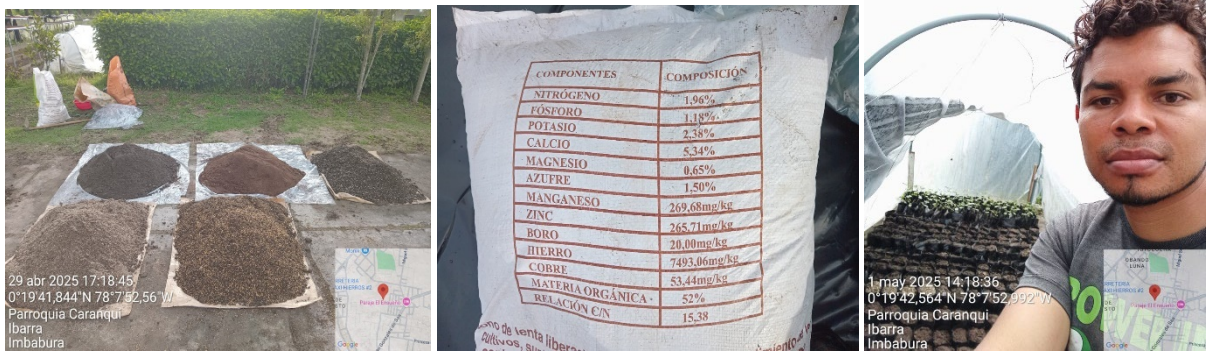
**Figura 9.**

*Instalación de estructura para mantener la temperatura y humedad controlada en la germinación y la emergencia de plántulas*



**Figura 10.**

*Preparación del sustrato y llenado de las fundas*



**Figura 11.**

*Repique de las plántulas en las fundas con los diferentes sustratos conformando el diseño experimental*



**Figura 12.**

*Toma de datos del objetivo 1 con el soil tester (YIERYI 3 in 1) mediante el método de fast in situ y el higrómetro digital (PROMEX HT607).*



**Figura 13.**

*Toma de datos de altura del tallo, diámetro y longitud de la radícula con el calibrador digital*



**Figura 14.**

*Preparación y toma de datos de las muestras de cada unidad experimental para determinar la biomasa fresca y seca.*

