



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DIRECCIÓN DE POSGRADO

PROGRAMA DE MAESTRIA

MODALIDAD DE TITULACIÓN PRESENCIAL

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado académico de
Magister en Agronomía Mención Nutrición Vegetal

Tema: “Efecto del biocarbono sobre la respuesta morfo-fisiológica de
vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. var. Cecilia en invernadero”

Autor: Ing. Danny Fabián del Castillo Bastidas

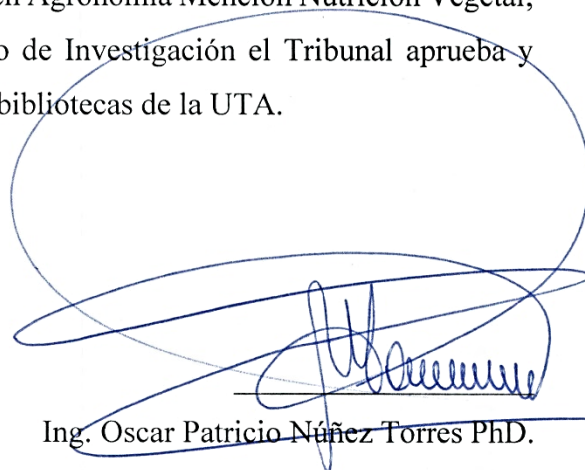
Director: Ing. Manolo Muñoz

Ambato – Ecuador

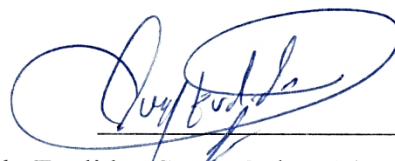
2023

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ciencias Agropecuarias

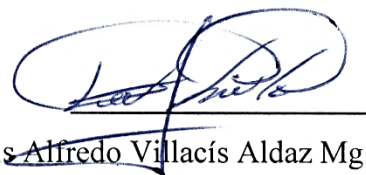
El Tribunal receptor del Trabajo de Investigación presidido por el Ing. Oscar Patricio Núñez Torres Ph.D, e integrado por los señores: Ingenieros designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “Efecto del biocarbono sobre la respuesta morfo-fisiológica de vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. var. Cecilia en invernadero” aprobado por la Unidad Académica de Titulación, elaborado y presentado por el señor Ingeniero Danny Fabián del Castillo Bastidas, para optar por el Grado Académico de Magister en Agronomía Mención Nutrición Vegetal; una vez escuchada la defensa oral Trabajo de Investigación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.



Ing. Oscar Patricio Núñez Torres PhD.
Presidente y Miembro del Tribunal



Ing. Segundo Euclides Curay Quispe PhD.
Miembro del Tribunal



Ing. Luis Alfredo Villacís Aldaz Mg.
Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN


La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Investigación, presentado con el tema: “Efecto del biocarbono sobre la respuesta morfo-fisiológica de vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. var. Cecilia en invernadero”, le corresponde exclusivamente a: Ingeniero Danny Fabián del Castillo Bastidas, Autor bajo la Dirección del Ingeniero Manolo Muñoz, Director del Trabajo de Investigación y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Danny Fabián del Castillo Bastidas

C.C.

AUTOR



Ing. Manolo Muñoz

C.C.

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Investigación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.



Ing. Danny Fabián del Castillo Bastidas

C.C.

AUTOR

DEDICATORIA

A mi bella hija Danna Sofía, quien ha sido mi fuente constante de alegría, motivación y amor. Cada página de esta tesis lleva consigo el deseo de construir un futuro mejor para ti. Eres mi inspiración diaria, y este logro es también tuyo.

A mis queridos padres, Pedro Francisco y Gladys del Socorro, este logro no sería posible sin el amor, apoyo y guía que cada uno de ustedes ha brindado a lo largo de mi vida.

A mis hermanos José Mauricio y Pedro Francisco que resplandecen y que velan por mí desde el cielo, aunque físicamente ausentes, su memoria y amor siguen vivos en mi corazón. Cada paso que doy es en honor a la conexión eterna que compartimos, y sé que su orgullo ilumina mi camino.

A mis hermanos Rubén Darío y Vanessa, mis compañeros de vida en esta tierra, su apoyo constante ha sido mi roca. Gracias por estar a mi lado, por celebrar mis alegrías y por sostenerme en los desafíos. Este logro es tan suyo como mío.

A mis buenos amigos, quienes han creído en mí.

Gracias por ser mi inspiración constante y por ser la luz que guía mi camino.

Con todo mi amor, Danny.

IN MEMORIAM

Agradecido por tu amistad, tu mentoría y tu impacto duradero.

Este logro va dedicado a ti, Carlos Armando Falconí †,

un mentor extraordinario y un amigo eterno.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, fuente de inspiración y fortaleza, por guiarme en este viaje académico y brindarme la sabiduría necesaria para alcanzar este logro.

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Técnica de Ambato, cuyo compromiso con la excelencia académica y el desarrollo integral ha sido fundamental en mi formación.

Al Ing. Manolo Muñoz, mi director de tesis, le agradezco por su liderazgo, orientación y dedicación inquebrantable. Su apoyo ha sido esencial para el éxito de este proyecto.

A la Ing. Irina Andrade, agradezco su apoyo incondicional a lo largo de todo este proceso. Su compromiso y asesoramiento han sido un faro constante, iluminando mi camino hacia el cumplimiento de esta meta.

A mis queridos amigos, agradezco las risas compartidas, los momentos de aliento y la amistad fiel. Su compañía ha sido un bálsamo en los momentos difíciles y una fuente de alegría en los momentos felices. Este logro lleva consigo la esencia de nuestra amistad, y estoy agradecido por tenerlos en mi vida.

Mis sinceros agradecimientos a mis profesores de maestría, cuya experiencia y enseñanzas han enriquecido mi conocimiento y han sido la base de este logro académico.

A los funcionarios de la universidad técnica de Ambato, les expreso mi gratitud por su constante guía en este proceso. Su profesionalismo y compromiso han sido un pilar esencial en mi travesía académica.

Al Doctor Michel Leiva-Mora y a la Ingeniera Catherine Silva, por su apoyo y asesoramiento en el comienzo y desarrollo de la investigación. Su colaboración fue muy importante, gratitud.

A todos ustedes, mi familia y amigos, les agradezco por su inquebrantable respaldo, comprensión y amor. Cada palabra de ánimo, cada gesto de aliento y cada momento compartido ha contribuido significativamente a la culminación de esta meta.

Con gratitud infinita y el corazón lleno de amor, Danny.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT	XIV
CÁPITULO I.....	1
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. Objetivo General.....	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
CAPÍTULO II	3
ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	3
2.1. Antecedentes investigativos	3
2.2. El biocarbón.....	10
2.2.1. Generalidades.....	10
2.2.2. Historia del biocarbón.....	10
2.2.3. Métodos de obtención del biocarbón	11
2.2.4. Propiedades del biocarbón	12
2.2.5. Usos del biocarbón.....	13
2.2.6. Biomásas para la producción del biocarbón	14
2.3. La turba.....	14
2.3.1. Características generales de la turba.....	14
2.3.2. Origen de los depósitos de turba.....	15
2.3.3. Clasificación de la turba	15
2.4. La papa	15

2.4.1. Generalidades del cultivo de papa	15
2.4.2. Morfología de la papa	16
2.4.3. Etapas fenológicas del cultivo de papa	19
2.3.4. Importancia del cultivo en Ecuador	21
CAPÍTULO III	22
MARCO METODOLÓGICO	22
3.1. Ubicación.....	22
3.1.1. Ubicación política	22
3.1.2. Ubicación Geográfica	22
3.1.3. Ubicación Geográfica	22
3.2. Materiales y equipos.....	22
3.3. Tipo de investigación	24
3.4. Manejo del ensayo	24
3.5. Prueba de hipótesis	25
3.6. Recolección de la información	25
3.7. Procesamiento de la información	26
3.8. Variables respuesta.....	27
3.8.1. Morfología de la hoja:	27
3.8.2. Morfología del tallo:	27
3.8.3. Morfología de la raíz:.....	28
3.8.4. Materia fresca, g:.....	28
3.8.5. Materia seca, g	29
3.8.6. Contenido de macronutrientes y micronutrientes, %	29
CAPÍTULO IV	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
4.1. Porcentaje de supervivencia de vitroplantas de <i>S. tuberosum</i> var. Cecilia sembradas en sustrato de biocarbono (Tectopore).	30

4.2. Influencia del sustrato de biocarbono (Tectopore) y de su combinación con turba en diferentes proporciones, sobre el crecimiento de vitroplantas de <i>S. tuberosum</i> var. Cecilia.....	31
4.3. Respuesta morfológica de plantas de <i>S. tuberosum</i> var. Cecilia bajo el efecto de las combinaciones del sustrato (Tectopore) y turba.	34
4.4. Contenido de macronutrientes y micronutrientes en plantas de <i>S. tuberosum</i> var. Cecilia bajo condiciones de invernadero.	46
CAPÍTULO V	48
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS	48
5.1. Conclusiones.....	48
5.2. Recomendaciones	49
5.3. Bibliografía.....	49
5.4. Anexos.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de los tratamientos.....	26
Tabla 2. Prueba de Kruskal Wallis para la variable altura de vitroplantas	31
Tabla 3. Prueba de Kruskal Wallis para la variable peso de materia verde	32
Tabla 4. Prueba de Kruskal Wallis para la variable peso de materia seca	33
Tabla 5. Prueba de Kruskal Wallis para la variable número de brotes	35
Tabla 6. Prueba de Kruskal Wallis para la variable número de nudos.....	36
Tabla 7. Prueba de Kruskal Wallis para la variable grosor de nudos.....	37
Tabla 8. Prueba de Kruskal Wallis para la variable distancia entre nudos	38
Tabla 9. Prueba de Kruskal Wallis para la variable número de hojas.....	39
Tabla 10. Prueba de Kruskal Wallis para la variable área foliar.....	40
Tabla 11. Prueba de Kruskal Wallis para la variable número de raíces.....	41
Tabla 12. Prueba de Kruskal Wallis para la variable longitud de raíces.....	42
Tabla 13. Prueba de Kruskal Wallis para la variable número de mini tubérculos	43
Tabla 14. Prueba de Kruskal Wallis para la variable peso de mini tubérculos	44
Tabla 15. Prueba de Kruskal Wallis para la variable diámetro de mini tubérculos ..	45
Tabla 16. Contenido de macronutrientes y micronutrientes en plantas de <i>S. tuberosum</i> var. Cecilia con diferentes concentraciones de Tectopore y turba.....	47

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Morfología de la planta de papa (<i>Solanum tuberosum</i>).....	16
Gráfico 2. Porcentaje de supervivencia de vitroplantas de <i>S. tuberosum</i> var. Cecilia sembradas en sustrato de biocarbono (Tectopore).....	30
Gráfico 3. Media de los tratamientos en la variable altura de las vitroplantas	32
Gráfico 4. Media de los tratamientos en la variable peso de materia verde.....	33
Gráfico 5. Media de los tratamientos en la variable peso de materia seca.....	34
Gráfico 6. Media de los tratamientos en la variable número de brotes.....	35
Gráfico 7. Media de los tratamientos en la variable número de nudos.....	36
Gráfico 8. Media de los tratamientos en la variable grosor de nudos.....	37
Gráfico 9. Media de los tratamientos en la variable distancia entre nudos.....	38
Gráfico 10. Media de los tratamientos en la variable número de hojas.....	39
Gráfico 11. Media de los tratamientos en la variable área foliar.....	40
Gráfico 12. Media de los tratamientos en la variable número de raíces.....	41
Gráfico 13. Media de los tratamientos en la variable longitud de raíces.....	42
Gráfico 14. Media de los tratamientos en la variable número de mini tubérculos....	43
Gráfico 15. Media de los tratamientos en la variable peso de mini tubérculos.....	44
Gráfico 16. Media de los tratamientos en la variable diámetro de mini tubérculos..	45

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Preparación de explantes.....	57
Anexo 2. Siembra de explantes.....	57
Anexo 3. Crecimiento de los explantes.....	58
Anexo 4. Medición del pH.....	59
Anexo 5. Análisis de la morfología de la planta.....	60

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE MAESTRÍA

INFORMACIÓN GENERAL

TEMA: EFECTO DEL BIOCARBONO SOBRE LA RESPUESTA MORFO-FISIOLÓGICA DE VITROPLANTAS DE *Solanum tuberosum* L. Var. CECILIA EN INVERNADERO

AUTOR: Danny Fabián del Castillo Bastidas

Ingeniero agrónomo

Correo electrónico: ddelcastillo7888@uta.edu.ec

DIRECTOR: Ing. Manolo Muñoz

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

- Producción agroalimentaria y medio ambiente

RESUMEN

La presente investigación tuvo por objetivo determinar el efecto de diferentes proporciones de biocarbono (Tectopore) y turba como sustrato, sobre la respuesta morfo-fisiológica de vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. var. Cecilia bajo condiciones de invernadero. Para la investigación se utilizó un diseño completamente al azar (D.C.A) con 10 repeticiones por tratamiento, integrando una vitroplanta por cada unidad experimental. Los tratamientos que se aplicaron fueron los siguientes: T1 (100% Tectopore), T2 (80% Tectopore + 20% Turba), T3 (50% Tectopore + 50% Turba), T4 (20% Tectopore + 80% Turba) y T5 (100% Turba). Las variables que se analizaron fueron la tasa de supervivencia de las plantas, el número de brotes presentes, el número y longitud de las raíces, presencia, longitud y grosor de nudos, así como la distancia entre nudos, el área foliar de las hojas, altura de la planta, materia fresca, materia seca, número de mini tubérculos, peso y diámetro de estos. Por último, se efectuó un análisis del contenido de macro y micro nutrientes de las plantas. Los hallazgos de la investigación determinaron que la incorporación de turba conjuntamente con biocarbono mejoró de manera significativa el porcentaje de supervivencia de las vitroplantas, así como la respuesta morfológica y el contenido de nutrientes en las mismas. De manera particular, T5, demostró resultados superiores en las variables estudiadas. En adición a esto, las variaciones en las concentraciones de micro y macronutrientes resaltaron la influencia positiva del biocarbón al estado nutricional de las plantas, donde los tratamientos específicos reflejaron una tendencia a cumplir con las necesidades de ciertos nutrientes.

Palabras clave: biocarbono, explantes, *Solanum tuberosum*, vitroplantas

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the effect of different proportions of biocarbon (Tectopore) and peat as a substrate, on the morpho-physiological response of *Solanum tuberosum* L. Var vitroplants. Cecilia under greenhouse conditions. For the investigation, a completely randomized design (DCA) was used with 10 repetitions per treatment, integrating one vitroplant for each experimental unit. The treatments that were applied were the following: T1 (100% Tectopore), T2 (80% Tectopore + 20% Peat), T3 (50% Tectopore + 50% Peat), T4 (20% Tectopore + 80% Peat) and T5 (100% Peat). The variables that were analyzed were the survival rate of the plants, the number of shoots present, the number and length of the roots, presence, length and thickness of nodes, as well as the distance between nodes, the leaf area of the leaves, plant height, fresh matter, dry matter, number of mini tubers, weight and diameter of these. Finally, an analysis of the macro- and micronutrient content of the plants was carried out. The research findings determined that the incorporation of biocarbon significantly improved the survival percentage of the vitroplants, as well as the morphological response and nutrient content in them. In particular, T5 demonstrated superior results in the variables studied. In addition to this, variations in micro- and macronutrient concentrations highlighted the positive influence of biochar on the nutritional status of plants, where specific treatments reflected a tendency to meet the needs of certain nutrients.

Keywords: biochar, explants, *Solanum tuberosum*, vitroplants

CÁPITULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es una especie herbácea originaria de América del Sur, su cultivo se remonta aproximadamente 8000 años atrás en las tierras altas de los Andes. El consumo de papa se ha incrementado con el tiempo, siendo cultivada en diversas partes del mundo solidificando su estatus como fuente primaria de alimento para los humanos (Villanueva, 2017).

La papa posee la capacidad de reproducirse tanto de forma sexual, facilitada por semillas botánicas conocidas como semillas verdaderas, así como por forma asexual mediante la utilización de tubérculos, este último es el método de propagación más empleado para la multiplicación y producción. No obstante, el rendimiento de la papa se ve influenciado por diversos factores ambientales y técnicas de producción, siendo el uso de tubérculos o semillas el principal determinante de dicho rendimiento.

Los métodos convencionales de propagación vegetativa, mediante el empleo tubérculos portadores de patógenos como hongos, virus y bacterias, conducen a una reducción de la calidad y rendimiento deficiente en los cultivos (Altindal y Karadogan, 2010). Los métodos de propagación *in vitro*, han logrado una regeneración exitosa de plantas de papa a partir de explantes procedentes de diversos órganos y tejidos (Khalafalla et al., 2010). Las plantas multiplicadas a partir de explantes se pueden trasplantar a un sustrato adecuado para un crecimiento y desarrollo continuo.

La aplicación de sustratos en las plantas puede tener un gran impacto en la calidad nutricional del cultivo. Partiendo de esta premisa, en los últimos años se han llevado cabo numerosos estudios sobre los efectos de la aplicación de biocarbón a los suelos con el fin de mejorar sus funciones biológicas, químicas y físicas (Knoblauch et al., 2021). El uso agrícola del biocarbón ha ido creciendo y atrayendo más interés de investigación a nivel mundial debido a sus beneficios potenciales para la producción de cultivos, la fertilidad del suelo y el secuestro de carbono (Timilsina et al., 2017).

1.2. Justificación

La investigación de sustratos en el cultivo de papa tiene importancia debido a su gran impacto en la calidad y el rendimiento de estos. El biocarbón es sustrato de alta calidad, puede mejorar la absorción de nutrientes por parte de las plantas, reduce el riesgo de enfermedades y plagas (Hossain et al., 2020). En el ámbito de la investigación agrícola, optimizar el crecimiento y la productividad de los cultivos es un objetivo primordial, particularmente frente a la creciente demanda global de recursos alimentarios. En este contexto, el presente estudio se centra en el estudio del efecto del biocarbón de influir respuestas morfofisiológicas de vitroplantas *Solanum tuberosum* L. var Cecilia,

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Determinar el efecto de diferentes proporciones de biocarbón (Tectopore) y turba como sustrato, sobre la respuesta morfo-fisiológica de vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. var. Cecilia bajo condiciones de invernadero.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar el porcentaje de supervivencia de vitroplantas de *S. tuberosum* var. Cecilia sembradas en sustrato de biocarbón (Tectopore).
- Analizar la influencia del sustrato de biocarbón (Tectopore) y de su combinación con turba en diferentes proporciones, sobre el crecimiento de vitroplantas de *S. tuberosum* var. Cecilia, bajo condiciones de invernadero utilizando índices fisiológicos.
- Evaluar el efecto de las combinaciones del sustrato (Tectopore) y turba sobre la respuesta morfológica de plantas de *S. tuberosum* var. Cecilia.
- Evaluar el impacto del biocarbón (Tectopore) en el contenido de macronutrientes y micronutrientes en plantas de *S. tuberosum* var. Cecilia bajo condiciones de invernadero.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

2.1. Antecedentes investigativos

En numerosos estudios se ha demostrado que el biocarbón tiene la capacidad de capturar diversos nutrientes, como nitrógeno en forma de nitritos, nitratos y urea, así como el fósforo en forma de ortofosfato y el potasio. Estos nutrientes se encuentran presentes generalmente en soluciones acuosas como lixiviados de vertederos, residuos anaeróbicos y aguas residuales de explotaciones ganaderas. La asimilación de estos nutrientes por el biocarbón ofrece el potencial de su utilización como enmiendas del suelo para mejorar la calidad del mismo (Kizito et al., 2019).

En los últimos años, la aplicación de biocarbón en el suelo ha despertado la atención de la comunidad científica. La investigación se ha centrado en su relación costo-efectividad y en sus características respetuosas con el medio ambiente, incluyendo su papel en la captura de carbono y la remediación de suelos contaminados. El biocarbón puede influir en los nutrientes del suelo de varias maneras: como fuente de nutrientes, el biocarbón puede suministrar nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y otros oligoelementos inherentes a la materia prima original utilizada para la producción de biocarbón. Mientras que parte del nitrógeno y azufre en la materia prima se pierde a través de emisiones gaseosas durante la pirólisis (Hossain et al., 2020).

Un estudio realizado por Timilsina (2017) que involucró la aplicación de biocarbón resultó en un incremento sustancial la biomasa y el rendimiento tanto de la raíz y como de la parte aérea del rábano. Además, la materia orgánica del suelo, la densidad aparente del suelo, el nitrógeno total, el fósforo y el potasio disponible también aumentaron significativamente con la adición de biocarbón. No obstante, el pH del suelo no mostró diferencias significativas, pero aumentó con la aplicación creciente de biocarbón.

El uso de biocarbón para mejorar el suelo y capturar carbono está atrayendo mucha atención. Sus características químicas, físicas y biológicas, como su gran área

superficial, capacidad de intercambio catiónico (CIC), alta capacidad de retención de agua, tamaño de poro, volumen, distribución y composición de elementos, afectan sus influencias reconocidas, especialmente en las comunidades microbianas (Shareef y Zhao, 2017).

Mollick y colaboradores (2020) investigaron el efecto del biocarbón en el rendimiento y calidad del tubérculo de papa y la dosis óptima de este sustrato junto con fertilizante inorgánico para lograr el máximo rendimiento de este cultivo. El experimento incluyó nueve tratamientos, variando la combinación de dosis de fertilizante inorgánico y biocarbón. Los resultados revelaron que la aplicación de biocarbón tuvo un efecto positivo en la altura de la planta, peso, rendimiento y contenido de materia seca de los tubérculos, así como la gravedad específica y carbono orgánico del suelo.

En este mismo ámbito, la investigación realizada por Nair et al., (2014) tuvo como propósito determinar una tasa de aplicación óptima de biocarbón y evaluar sus efectos sobre el rendimiento de los cultivos de papa. Se evaluaron cuatro tasas de aplicación de biocarbón (0; 2.5; 5.0 y 10,0 tn/acre). Al término de la temporada de crecimiento, el pH del suelo osciló entre 6.1 y 6.4. A pesar de que el biocarbón demostró una tendencia a incrementar el pH del suelo con tasas de aplicación elevadas, las diferencias no fueron estadísticamente significativas. Por otro lado, en 2013, se observaron diferencias significativas en el pH del suelo, y el tratamiento de control mostró un pH más bajo en comparación con los tratamientos de 5 y 10 tn/acre. A pesar de las diferencias visibles en el crecimiento de las plantas, no hubo diferencias numéricas estadísticamente significativas en la altura y el ancho de las plantas registradas. De la misma manera, no se registraron diferencias en los rendimientos comercializables y no comercializables, sin embargo, persistió un aumento considerable de este cultivo en 2013.

Un estudio realizado por Rodríguez y colaboradores (2022), determinó el efecto sustitutivo del fertilizante a base de compost con IHPLUS®BF y biocarbón en comparación con la fertilización convencional para el cultivo de papa (*S. tuberosum* L.). Las evaluaciones se realizaron bajo dos escenarios: uno con manejo agrotécnico óptimo basado en la cartilla tecnológica y otro con manejo agrotécnico deficiente. En condiciones óptimas de manejo, la dosis de fertilizante de 7.5 toneladas de compost-

IHPLUS®BF arrojó resultados comparables a la fertilización química. Por otro lado, una gestión deficiente provocó condiciones desfavorables del suelo y una reducción de la producción agrícola. El estudio reveló que los fertilizantes a base de biocarbón tuvieron un mayor impacto que los fertilizantes químicos en tales condiciones. Se identificaron importantes relaciones de interdependencia, develando que, el cultivo de papa con fertilizantes a base de compost y biocarbón en granjas campesinas puede mejorar la producción agrícola al mejorar las condiciones del suelo.

La investigación realizada por Upadhyay et al. 2020, evaluó el impacto de cinco tipos de biocarbono sobre el crecimiento y rendimiento en papas cultivadas en dos ambientes diferentes de Nepal. Para el estudio se aplicaron al suelo fertilizantes y biocarbono recomendados a razón de 2 tn/ha, mientras que los tubérculos-semilla se cubrieron completamente con una cantidad similar de biocarbono antes de cubrirlos con tierra. Los resultados indicaron que el rendimiento total y comercializable de papas variaba según la fuente de biocarbono, siendo el biocarbono derivado de *Lantana camara* el que producía la mayor cantidad y peso de tubérculos y un menor daño en los cultivos causado por hormigas rojas.

En este mismo contexto, Huerta (2019), realizó un estudio para evaluar el impacto del biocarbón elaborado a partir de residuos orgánicos, sobre la calidad y producción del cultivo de papa (*S. tuberosum* L.) en el Centro Experimental Ecológico de Tuyu Ruri. Las papas fueron tratadas con distintos porcentajes de biocarbono (0%, 5%, 10% y 15%) en parcelas experimentales. El estudio confirmó que las papas que se trataron con el 10% de biocarbono exhibieron mejoras sustanciales en la altura, estado fitosanitario, cantidad y peso de las papas en comparación con los demás tratamientos.

La inclusión de biocarbón en el suelo demuestra tener varios efectos favorables, entre los que se incluyen: una reducción de la densidad aparente y la compactación, junto con el incremento en la capacidad de retención de agua. En el estudio realizado por Olmo (2016), la adición de biocarbono influyó significativamente en la disponibilidad de nutrientes del suelo, mejorando la presencia de P, K, Ca, Mg y Cu, y reduciendo la de N. Estas alteraciones en las propiedades del suelo tuvieron un impacto notable en la morfología de las raíces, presentando una mayor longitud específica de estas y una reducción del diámetro y densidad del tejido. La adición de biocarbón afectó

positivamente el estado hídrico de las plantas, alcanzando una mayor producción de biomasa en la parte aérea, promoviendo de esta manera el crecimiento y la producción general de las plantas.

Entre los atributos favorables del biocarbono, se encuentra su alta capacidad de adsorción debido a su alta superficie expansiva y propiedades de intercambio iónico. Akhtar y colaboradores (2015) evaluaron el potencial de adsorción de sal del biocarbono y su efecto sobre el crecimiento, fisiología, y rendimiento de papa cultivada en maceta bajo estrés salino. Los resultados demostraron que la aplicación de biocarbón y nanoelementos (potasio y silicio) mejoró significativamente diversas propiedades agrofisiológicas y componentes bioquímicos de las plantas de papa en comparación con las plantas que no fueron tratadas. Entre estos parámetros se describen: la altura de la planta, biomasa, recuento de tallos, contenido relativo de agua de las hojas, contenido de clorofila, tasa fotosintética, conductancia estomática y rendimiento de tubérculos. De la misma manera el tratamiento combinado mostró parámetros de crecimiento óptimos, respuestas fisiológicas, concentraciones de nutrientes y tasas de transpiración, y actividades de enzimas antioxidantes reducidas.

El estudio llevado a cabo por Youseef y colaboradores (2017) tuvo como objetivo evaluar el impacto de diferentes dosis de aplicación de biocarbón (0, 1,25, 2,5 y 5 m³/fed) en la productividad y la calidad de los tubérculos de tres variedades de papa (Accent, Cara, y Spunta) en condiciones de suelo arenoso durante las temporadas de veranos 2016 y 2017. Las variedades Cara y Spunta exhibieron rasgos morfológicos superiores, mayor contenido foliar de Ca, Mn y Cu, así como un rendimiento y calidad superior de los tubérculos. El aumento de las tasas de aplicación de biocarbón hasta 5 m³/alimentado mejoró significativamente el crecimiento de las plantas, los pigmentos fotosintéticos de las hojas, el contenido mineral, el rendimiento y la calidad de los tubérculos para todos los cultivares probados. La adición de biocarbón en dosis de 2,5 o 5 m³/fed dio como resultado el contenido de nitrato foliar más bajo. En particular, el tratamiento de los cultivares de Cara con biocarbón a una tasa de 5 m³/alimentado produjo los mayores retornos brutos y netos, así como una proporción beneficiosa

De la misma manera, Indawan et al. (2018) evaluó el efecto del biocarbón sobre el desempeño en cultivos de camote. El estudio integró siete variedades y seis muestras recolectadas de dos universidades, con dosis aplicadas de biocarbón (B0 y B1). Los resultados alcanzados revelaron una respuesta positiva para los cultivos de camote en los que se aplicó biocarbón, mejorando el peso fresco y seco de las raíces almacenadoras, el peso seco de la biomasa, el índice de cosecha y el rendimiento de las raíces almacenadoras. Los rendimientos de las raíces almacenadoras variaron de 8 a 21 tn/ha sin biocarbón y aumentaron de 10 a 23 tn/ha con 5 toneladas de biocarbón/ha. El uso de 5 tn de biocarbón/ha condujo a un aumento significativo en el rendimiento de las raíces almacenadoras, que oscilaron entre el 8 y el 45 %.

Tadesse et al. (2022) llevaron a cabo un estudio para evaluar la productividad de *Chloris gayana* y *Panicum coloratum* mediante la aplicación de distintos niveles de biocarbón de cáscara de café y fertilizantes inorgánicos (DAP y urea). Los tratamientos a evaluar incluyeron: un control (cero fertilizantes), únicamente fertilizante inorgánico y combinaciones de biocarbón con fertilizante inorgánico para ambas especies de pasto. Los resultados demostraron que la aplicación combinada de biocarbón y fertilizante inorgánico influyó significativamente en las variables fenológicas, parámetros agronómicos, rendimiento de semillas y biomasa para ambas especies de pastos en diferentes etapas de crecimiento. En particular, la aplicación de 5 t ha⁻¹ de biocarbón con 100 kg ha⁻¹ de fertilizante inorgánico provocó un retraso en la floración y la madurez, un aumento de la altura de la planta, la longitud de las hojas, el número de macollos y las hojas por planta en comparación con otros tratamientos.

Upadhyay et al. (2017), efectuaron un estudio con el objetivo de identificar la combinación óptima de dosis de aplicación de biocarbón (0, 2, 4 y 6 tn/ha como parcelas principales) y esquema de riego (una, dos y tres veces al mes a manera de subparcelas) en plantas de papa variedad Desiree cultivadas en macetas de plástico con un diámetro de 26 cm. El biocarbón empleado se produjo a partir de Lantana cámara a través de una técnica de semipirólisis. Los hallazgos revelaron un impacto positivo de la dosis de biocarbón, particularmente a una dosis de 2 tn/ha, en parámetros como la altura de la planta, peso fresco de raíces y tallo, peso seco de raíces y tubérculos, así como en el peso seco total. De la misma manera, los programas de riego mostraron diferencias significativas en las variables mencionadas previamente. En particular, los

efectos de regar dos y tres veces al mes reflejaron efectos similares, lo que sugiere la posibilidad de reducir la frecuencia de riego al aplicar biocarbono. Por último, los efectos de interacción fueron notables sobre el peso seco del tubérculo.

La incorporación del biocarbono al suelo destaca como un enfoque altamente eficaz en su manejo debido a que mejora sus propiedades tanto físicas como químicas y ayuda a contrarrestar las condiciones de déficit hídrico del suelo. Con base a este precedente, Farooque y colaboradores (2020) determinaron la idoneidad del biocarbono como enmienda nutritiva del suelo para el cultivo de papa en el Atlántico canadiense. Para el estudio se utilizaron tres réplicas de doce lisímetros, cada uno de 8000 cm² con suelo procedente del Atlántico canadiense para cultivar papas bajo cuatro tratamientos: T1 (control), T2 (biocarbono), T3 (fertilizante sintético con NPK recomendado) y T4 (biocarbono + NPK recomendado). La enmienda de biocarbono mejoró de forma sustancial la concentración de micro y macronutrientes en el suelo, lo que condujo a un incremento de la materia orgánica, el pH y la capacidad de intercambio catiónico del suelo. La aplicación combinada de biocarbono sumado al fertilizante sintético reportó un máximo rendimiento en el cultivo de papa (30467.4 kg/h) y un beneficio neto de \$4433.98 por hectárea.

Se llevaron a cabo cuatro experimentos en la Universidad Federal de Minas Gerais, por parte de Souza et al. (2023) con el fin de evaluar el uso de biocarbón a partir de bagazo de caña de azúcar en viales con o sin cubiertas para membranas porosas en pitahaya (*Hylocereus undatus* Haw) y fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en los experimentos 1 y 2 respectivamente. De la misma manera, en el experimento 3 se evaluó la combinación de biocarbón de bagazo de caña de azúcar y nitrato de plata (AgNO₃) pitahaya y en el experimento 4, se utilizó la misma combinación en fresa. El tipo de cubierta no afectó el crecimiento y la cantidad en ambos cultivos. Los hallazgos del estudio revelaron que la adición de 4 g de biocarbón, independientemente del tipo de membrana favoreció el crecimiento y desarrollo para las raíces de pitahaya y fresa. Por otro lado, el nitrato de plata promovió una mayor longitud y materia seca para las raíces de pitahaya y únicamente la materia seca en raíces de fresa. Sin embargo, la introducción del biocarbón redujo los efectos del AgNO₃ en el cultivo *in vitro*.

Un estudio realizado en Camboya evaluó el impacto de biocarbón de cáscara de arroz en el crecimiento de lechuga (*Lechuga sativa*) y col china (*Brassica chinensis*) trasplantadas durante un ciclo de tres cultivos (lechuga-repollo-lechuga). El biocarbón como subproducto de la gasificación de la cáscara de arroz, contenía un 28.7% de carbono (C) en masa. Se emplearon dosis de aplicación de 25, 50 y 150 g/kg en macetas con y sin fertilizantes disponibles de manera local. El biocarbón de cáscara de arroz al ser ligeramente alcalino elevó el pH del suelo así mismo presentó niveles elevados de ciertos metales traza y cationes intercambiables (Ca, K y g). Los tratamientos que utilizaron biocarbón incrementaron la biomasa final, biomasa de las raíces, altura de las plantas y el recuento final de hojas en todos los ciclos de cultivo. En particular, el aumento más significativo de biomasa (903%) se produjo en suelos no fertilizados, superando aquellos que fueron fertilizados con 483% en las mismas condiciones de aplicación de biocarbón. Aunque el impacto del biocarbón se redujo a lo largo de los ciclos de cultivo, se apreció un aumento sustancial del 363% de biomasa durante el tercer ciclo de la lechuga (Carter et al., 2013).

Ahmed y Schoenau (2015) evaluaron la respuesta de la canola y trigo cultivados en rotación ante tres dosis diferentes de biocarbón (0, 1 y 2 tn/ha) bajo un ambiente controlado en suelo Chernozem marrón y negro. Se emplearon cinco tipos de biocarbón a partir de tres fuentes de materia prima con o sin fertilizantes de nitrógeno (N) y fósforo (P). El estudio encontró que, el biocarbón de fracción fina de paja de trigo producto de pirolisis rápida y la fracción fina de sauce aumentaron de forma significativa el rendimiento de biomasa en cultivos de canola en el suelo Chernozem negro, mientras que otros tipos de biocarbón no presentaron ningún efecto. Para el caso del trigo, únicamente el biocarbón fino de paja a razón de 1 tn/ha registró un efecto residual significativo en el rendimiento de este cultivo. Las aplicaciones de biocarbón de 1 a 2 tn/ha en los suelos Chernozems de pradera tenían efectos mínimos sobre el crecimiento de las plantas y las propiedades del suelo, sin que se aprecien alteraciones sustanciales en la disponibilidad de nitrógeno y fósforo en el suelo, así como del pH, carbono orgánico y conductividad eléctrica.

2.2. El biocarbón

2.2.1. Generalidades

El término "biocarbón" se empezó a utilizar para hacer referencia al carbono negro utilizado en la agricultura. El biocarbón o biocarbono es una sustancia sólida, rica en carbono, se produce mediante la pirolisis de la biomasa vegetal o animal en condiciones de exclusión limitada o parcial de oxígeno (Bolan et al., 2021)

La vida útil del biocarbón tiene varias implicaciones. Por un lado, los impactos favorables del biocarbón sobre la retención de nutrientes y la mayor capacidad de retención de agua perduran durante un largo período de tiempo, contribuyendo a una mejora continua de la fertilidad del suelo. En este sentido, la aplicación de biocarbón al suelo representa una inversión prolongada, debido a que sus efectos beneficiosos tienden a perdurar durante siglos. Esto contrasta marcadamente con las enmiendas tradicionales del suelo, que necesitan de aplicaciones recurrentes para mantener su eficacia (Gathorne et al., 2009).

2.2.2. Historia del biocarbono

El biocarbono es un concepto tanto nuevo como antiguo, generalmente se refiere a una sustancia sólida rica en carbono producida a través de la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno (Lehmann et al., 2006). El carbón vegetal, un precursor común del biocarbono, se ha encontrado estrechamente vinculado a la civilización humana desde la era Paleolítica, caracterizada por prácticas de tala y quema (Chen et al., 2019).

Los efectos positivos del biocarbón en la producción de cultivos han sido reconocidos desde la antigüedad (Bananomi et al., 2017). Si bien la práctica de enmienda de suelos mediante la aplicación de carbón vegetal para el manejo de la fertilidad se remonta a milenios, en el presente aún se continúan desarrollando en todo el mundo nuevos ejemplos de prácticas tradicionales que emplean este material (Scholz et al., 2014)

En la cuenca del río Amazonas, las poblaciones antiguas desarrollaron suelos de “terra petra”, también conocidos como “tierra oscura amazónica” a través de ciclos repetidos de quema de vegetación y la adición de enmiendas orgánicas como hojarascas, desechos de cocina ricos en nutrientes y material fecal (Kammann et al., 2016). Los suelos de Terra petra se destacan por su elevada capacidad para almacenar carbono, reteniendo hasta tres veces la cantidad de carbono orgánico en comparación con suelos de alrededor (Glaser et al., 2001). Se cree que estos suelos fueron creados a partir de prácticas intencionales de manejo del suelo por parte de las poblaciones precolombinas. Entre estas prácticas se incluían enmiendas como el carbón vegetal, mismo que impartía un distintivo color negro a los suelos.

2.2.3. Métodos de obtención del biocarbono

Existen diversas tecnologías para la obtención del biocarbono, de acuerdo con Chen et al. (2014) las características predominantes más comunes a las tecnologías de pirólisis actualmente operativas son las siguientes:

- **Tecnologías combinadas:** la mayoría de las tecnologías de pirólisis existentes están integralmente vinculadas con otros procesos, como la gasificación o la combustión. De la combinación con la gasificación se obtiene un gas combustible que posee un poder calorífico moderado, aunque requiere importantes inversiones de capital.
- **Alimentación con materiales pre-tratados:** los sistemas de pirólisis comúnmente emplean metodologías de pretratamiento que implican la segregación de componentes indeseables y la reducción de las dimensiones del material de entrada. Ocasionalmente, es imperativa una fase de secado preliminar para disminuir el contenido de humedad de los materiales previstos para el reactor.
- **Instalaciones con tratamiento secundario de productos:** Las tecnologías de pirólisis disponibles comercialmente muestran una tendencia a utilizar rápidamente productos de pirólisis en cámaras de combustión o motores de gas. Esta práctica sugiere que es posible que estos productos no estén estandarizados o no estén listos para el mercado. En los casos en que los gases de pirólisis se dirigen a un motor de gas, la gasificación asume un papel

principal, seguida de un proceso de lavado de gas para garantizar la calidad del gas de síntesis resultante.

2.2.4. Propiedades del biocarbono

Si bien el estudio de la Terra preta proporciona información relevante sobre el biocarbono en los suelos, es importante reconocer que el biocarbono puede exhibir una amplia gama de características. Los suelos de Terra preta están moldeados por diversas influencias más allá del biocarbono y no todas sus propiedades se encuentran asociadas a la adición de biocarbón (Scholz et al. 2014).

El biocarbono puede variar significativamente debido a que sus características y efectividad se encuentran influenciadas por factores como el tipo de biomasa empleada, la duración de la descomposición, la temperatura, la presión, la velocidad de calentamiento y el contenido de humedad inicial de la biomasa (Nanda et al., 2015).

En cuanto a sus propiedades físicas, el biocarbón constituye un sólido carbonoso de tonalidad oscura, caracterizado por una superficie compleja e irregular. Las características estructurales del biocarbón dependen del tipo específico y la duración de la pirólisis empleada (Escalante et al., 2016). De acuerdo con estudios de microscopía electrónica de barrido realizadas por Qiu et al. (2008), el biocarbón suele demostrar una naturaleza amorfa.

Las propiedades químicas del biocarbón están influenciadas por factores en los que se citan: el tipo de materia prima, la temperatura de pirólisis, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, el tamaño de las partículas, el tipo de reactor y las condiciones de presión (Ahmad et al., 2014). El biocarbón comprende partículas de diferentes dimensiones, dependiendo de la fuente y las dimensiones de las materias primas (Lehmann, 2007).

El biocarbono muestra una porosidad pronunciada, presentando macro, meso y microporos, con los siguientes rangos de tamaño >50 nm, 2-50 nm y <2 nm respectivamente. Esta configuración estructural ha llevado a analogías que comparan el biocarbono con un “arrecife subterráneo” con la capacidad de servir como hábitat

para diversos microorganismos (Downie et al., 2009). Los macroporos del biocarbón derivan de los intersticios presentes en la materia prima original, permitiendo el rápido transporte de sorbatos y su posterior difusión en el interior del volumen de los microporos, colaborando de esta manera en el transporte de moléculas concentradas (Martínez et al., 2006)

El impacto del biocarbón en las propiedades del suelo está influenciado por factores como la textura del suelo, el tipo de biocarbón en función de la materia prima y la temperatura de producción, que determina las características clave del biocarbón (Gu et al., 2014)

2.2.5. Usos del biocarbón

El uso de biocarbón en suelos agrícolas ha despertado un interés creciente debido a su capacidad para mejorar la disponibilidad de nutrientes, aumentar la producción de cultivos y contribuir al secuestro de carbono.

En el caso de la aplicación de biocarbón, su integración en el suelo manifiesta mejoras sobre varios atributos críticos del suelo. En particular, esta asimilación contribuye a mejorar la retención de humedad, influye en las alteraciones de la densidad aparente, aumenta los niveles de materia orgánica y facilita la regulación del pH. Además, impacta positivamente en la facilidad de labranza del suelo permitiendo mejoras estructurales en el mismo (Sánchez et al., 2020). En adición a esto, el biocarbón funciona como medio para los microorganismos y su inclusión como enmienda provoca la estimulación del crecimiento de hongos beneficiosos, como *Trichoderma spp.* (Escalante et al., 2016)

Sin embargo, es importante tener en cuenta que su uso en cantidades excesivas puede tener efectos negativos, como la reducción de la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Por lo tanto, es fundamental realizar una evaluación minuciosa de sus efectos en las propiedades del suelo y el rendimiento de los cultivos, preferiblemente en condiciones de campo (Knoblauch et al., 2021).

Sin embargo, existe escasa información sobre el biocarbón para varios agricultores en el ámbito agrícola. Por lo tanto, los agricultores y jardineros se enfrentan a nuevas oportunidades y desafíos cada día, desde alimentar a una población mundial en constante crecimiento hasta cumplir con los nuevos requisitos de emisiones, todo ello mientras se produce más alimentos en una menor área de tierra y se reducen las emisiones ambientales (Shareef y Zhao, 2017).

2.2.6. Biomásas para la producción del biocarbón

El biocarbón es un sólido rico en carbono producido mediante la pirólisis de biomasa en una atmósfera baja en oxígeno. La condensación de compuestos aromáticos durante el tratamiento térmico hace que el biocarbón sea altamente recalcitrante en el suelo (Ahmad et al., 2014). El biocarbón presenta una estructura fina y porosa. Microscópicamente las partículas tienen cargas eléctricas capaces de absorción y adsorción para metales pesados (Sánchez et al., 2020).

En la producción de biocarbón se utilizan diversas materias primas, como residuos agrícolas, mazorcas de maíz, residuos de trigo, paja de arroz, desechos animales (especialmente de ganado bovino), lodos de depuradora, desechos sólidos municipales y residuos de biogás (Zhou et al., 2021).

2.3. La turba

2.3.1. Características generales de la turba

La turba es un material que surge de la acumulación sustancial de materia orgánica parcialmente descompuesta, facilitada por un ambiente saturado de agua. Esta condición induce condiciones anaeróbicas, retardando significativamente el proceso de descomposición de la materia vegetal. En consecuencia, se acumulan restos orgánicos que poco a poco forman extensas capas de turba. Estos suelos se clasifican dentro del orden de los histosoles (Guerrero y Polo, 1990).

2.3.2. Origen de los depósitos de turba

La acumulación de turba ocurre en ambientes de suelo que se caracterizan por una retención sustancial de agua como resultado de precipitaciones elevadas, evapotranspiración limitada y un drenaje inadecuado. Estas condiciones impiden y/o desaceleran la oxidación de la materia orgánica, facilitando su transformación paulatina en turba a lo largo del tiempo. Inicialmente, las estructuras vegetales discernibles persisten dentro de la turba, mientras que, en etapas posteriores, la composición orgánica se vuelve imperceptible a simple vista (López, 2006).

2.3.3. Clasificación de la turba

En una categorización básica, se reconocen dos tipos distintos de turba: rubia y negra. La turba rubia presenta una menor descomposición y concentración más elevada de materia orgánica. Por el contrario, la turba negra presenta niveles reducidos de materia orgánica y está más mineralizada. La turba rubia se distingue por su encomiable capacidad de retención de agua y aireación; sin embargo, su composición varía significativamente debido a sus diversos orígenes (Ilvay, 2012).

2.4. La papa

2.4.1. Generalidades del cultivo de papa

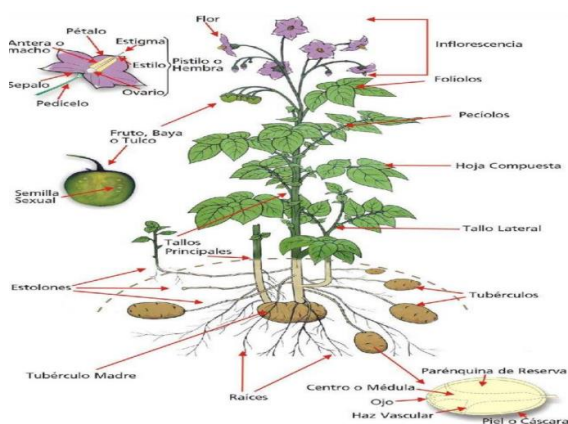
La papa (*Solanum tuberosum*) es considerado como el cuarto cultivo con mayor importancia en el mundo luego del arroz, maíz y trigo, según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) en 2022. De acuerdo con datos de la FAO, en 2022 se produjeron alrededor de 375 millones de toneladas a nivel mundial, siendo China con 95.5 millones de toneladas y la India con 56 millones de toneladas, los principales productores. Su comercialización se realiza principalmente para el consumo en fresco, tanto de forma local como para el comercio industrial, razón por la que, es un producto clave en la canasta básica (Vignola et al., 2017).

Es una planta que pertenece a la familia de las *solanáceas*. Por otro lado, el género *solanum*, lo integra un grupo polimorfo y en gran parte tropical como subtropical que presenta más de 1000 especies (Spooner y Knapp, 2013). Las papas correspondientes al género *Solanum* de la sección *Potatoe*, integra plantas que generan tubérculos verdaderos (Falconi, 2013).

2.4.2. Morfología de la papa

La papa (*S. tuberosum*) es una planta suculenta, herbácea, con muchos tallos carnosos que pueden alcanzar una altura de hasta 1.2 metros, estos son robustos, angulares y ramificados (Datiles y Acevedo, 2014). De la misma manera la planta presenta un sistema subterráneo compuesto por raíces, estolones tubulares y tubérculos (Huarte y Capezio, 2013). Tal y como se aprecia en el gráfico 1.

Gráfico 1. Morfología de la planta de papa (*Solanum tuberosum*)



Fuente: Huarte y Capezio (2013).

La planta de papa está compuesta por las siguientes estructuras:

a) Raíz

El sistema radicular normalmente se extiende entre 40 y 50 cm de profundidad y libre de impedimentos hasta 1 m (Datiles y Acevedo, 2014). El origen del sistema de raíces de la planta varía a partir del empleo de semillas verdaderas o de tubérculos. En el caso

de que proceda de una verdadera germinación de semillas, la planta exhibe una raíz principal, hipocótilo, epicótilo y cotiledones. Por el contrario, las plantas que se derivan de tubérculos desarrollan raíces adventicias que emergen en la base de cada brote y posteriormente por encima de los nudos a lo largo de cada tallo (Taramuel, 2017).

b) Tallo

La planta de papa posee tres tipos de tallos: un tallo aéreo encargado de sostener las hojas y dos tallos subterráneos que presenta estolones y tubérculos. El tallo primario emerge del brote del tubérculo semilla., mientras que los tallos secundarios se desarrollan a partir de yemas nodales. Por otro lado, las plantas que emergen de semillas verdaderas exhiben simplemente un tallo principal singular (Villanueva, 2017).

Los tallos pueden llegar a ser sólidos o parcialmente tubulares, como resultado de la descomposición de las células presentes en la médula. Las yemas que se origina en las axilas de las hojas del tallo tienen el potencial para convertirse en tallos laterales, estolones, inflorescencias y de manera ocasional tubérculos aéreos (Huamán, 1986).

c) Hojas

En la planta de papa se presentan hojas compuestas, de forma lanceolada, con siete a nueve folíolos dispuestos en espiral a lo largo de los tallos. Los folíolos presentes en las hojas pueden ser primarios, secundarios hasta terciarios. Las hojas se encuentran provistas de varios tipos de pelos, así también en otras partes de la planta (Datiles y Acevedo, 2014).

Las hojas son bifaciales y la epidermis tiene paredes sinuosas que desempeñan un papel importante en la distribución de los tricomas, donde su intensidad varía dependiendo de la técnica de cultivo. Estos tricomas pueden ser glandulares, uniserios o glandulares con porciones apicales esféricas de acuerdo con la variedad específica (Falconi, 2013).

d) Inflorescencia

Las flores emergen en racimos y se encuentran comúnmente en los extremos terminales de los tallos. Cada florea posee órganos reproductores tanto masculinos (andróceos) como femeninos (gináceos). Estos son pentámeros, integrados por cinco pétalos y sépalos que se presentan en diversos colores, siendo los más comunes, el blanco, amarillo, rojo y morado (Pumisacho y Sherwood, 2002).

La inflorescencia a manera de panícula cimosa está integrada por numerosas flores, que se acompaña ocasionalmente de pequeñas bractéolas; el pedúnculo mide de 5-15 cm de largo se ramifica hacia arriba, mientras que el pedicelo puede alcanzar hasta 3,5 cm con una articulación en el medio o por encima (Datiles y Acevedo, 2014).

e) Fruto, semilla

El fruto de la planta de papa se presenta a manera de una baya compacta y pulposa que alberga semillas sexuales, exhibe una forma redonda u ovalada con tonalidades verde amarillento o marrón rojizo. Con dos compartimentos que suele contener entre 200 y 300 semillas (Pumisacho y Sherwood, 2002).

f) Tubérculos

Los tubérculos, que emergen como tallos subterráneos agrandados, presentan yema conocidas como “ojos” que tienen el potencial de brotar nuevos tallos verdaderas (Hoopes y Plaisted, 1987). Estos tallos subterráneos modificados están provistos de ojos o yemas, y cada ojo normalmente está integrado por tres yemas (Pardavé, 2004).

Los tubérculos de papa se presentan como tallos modificados y exhiben todas las características de un tejido caulinar. El extremo basal del tubérculo se encuentra unido al estolón, conectándolo con las partes restantes de la planta durante el crecimiento (Huarte y Capezio, 2013). El tubérculo sirve como un depósito de nutrientes para la nueva planta, y las plantas que se originan a partir de tubérculos suelen exhibir un mayor vigor inicial en comparación de aquellas cultivadas a partir de semillas verdaderas (Hoopes y Plaisted, 1987).

g) Brotes

Las yemas que se encuentran en crecimiento se denominan “brotes” mismos que, exhiben características distintas en términos de color, forma y pilosidad permitiéndolos identificar diferentes variedades (Huarte y Capezio, 2013).

Los brotes pueden ser blancos, parcialmente coloreados en la base o en la totalidad de estos. Cuando se exponen los brotes blancos indirectamente a la luz, tienden a cambiar a una tonalidad verde. La sección inferior del brote tiende a formar la porción subterránea del tallo y se encuentra marcada por la presencia de lenticelas. Luego de la plantación, este segmento produce raíces de forma rápida, seguidas de estolones o tallos laterales (Huamán, 1986).

La cantidad de brotes que se desarrollan de cada tubérculo depende de varios factores como la variedad, tamaño, edad fisiológica, manejo y tratamiento de la semilla. Se puede aumentar el número de brotes eliminando el brote apical y cortando parcialmente los tubérculos vigorosos con el fin de eliminar la dormancia (Pumisacho y Sherwood, 2002).

2.4.3. Etapas fenológicas del cultivo de papa

a) Fase de emergencia o brotación

Esta fase inicia luego de la preparación del suelo y la colocación de las semillas en los surcos y su duración está relacionada a las condiciones de almacenamiento, la variedad empleada y el grado de brotación de las semillas. A través de cambios bioquímicos, el brote de semilla inicia el desarrollo de una planta nueva que se caracteriza al comienzo por un rápido crecimiento de las raíces, seguido de la aparición de tallos y hojas (Avilés y Piedra, 2016).

b) Fase vegetativa

Durante esta fase, la planta empieza con la producción de estolones en la zona radicular, marcando el inicio de la formación de tubérculos. Esta etapa suele transcurrir

aproximadamente entre los 40 y 55 días luego de la siembra. Tiene una importancia crucial en el desarrollo del cultivo debido a que determina la cantidad de tubérculos que se producirá en cada tallo (Rojas y Orena, 2006). Esta fase es fisiológicamente distintiva debido a que la planta canaliza los fotosintatos dirigidos hacia la solidificación del desarrollo del tubérculo (Falconi, 2013).

c) Fase de inicio de la tuberización

En esta etapa los tubérculos se desarrollan en el extremo de los estolones (porción subterránea). En la mayoría de los cultivares, la conclusión de esta fase coincide con el inicio de la floración (Avilés y Piedra, 2016). A lo largo de esta fase intervienen múltiples sustancias entre las que se incluyen hormas y reguladores de crecimiento. Diversos factores como la fertilización con nitrógeno, la disponibilidad de agua, la temperatura y la duración del día influyen en el equilibrio de estas sustancias involucradas (Huarte y Capezio, 2013).

d) Fase de llenado de tubérculos

Esta fase se alinea con el inicio de la floración para algunas variedades de papa, donde la expansión de las células del tubérculo inicia mediante la acumulación de agua, nutrientes y carbohidratos con una duración de entre 60 a 90 días. A lo largo de esta fase, los tubérculos absorben la mayor cantidad de nutrientes y carbohidratos accesibles a la planta (Vignola et al., 2017).

El inicio de esta fase podría retrasarse por determinadas prácticas agrícolas, entre las que se encuentra la fertilización excesiva con nitrógeno. El crecimiento de los tubérculos depende de factores como los niveles de humedad, la duración del día y la temperatura. Así también, la humedad del suelo está involucrado con el tamaño y calidad de las papas retrasando su desarrollo en situaciones de escasas de agua (González, 2015).

e) Fase de maduración

La maduración fisiológica de los tubérculos alcanza luego de los 75 días en las para

las variedades tempranas, 90 días en las intermedias y 120 días para las tardías. En esta etapa los tubérculos se encuentran listos para la cosecha y el almacenamiento (Molina et al., 2004). A medida que el sistema foliar cambia a un tono amarillo, tiene pocas hojas verdes y el inicio de la caída de hojas en la planta marca la plenitud de su madurez. El tubérculo se considera maduro cuando se puede presionar suavemente su cutícula sin que se desprenda, con una duración aproximada de 15 días (Falconi, 2013)

2.3.4. Importancia del cultivo en Ecuador

El cultivo de papa es un elemento importante para la agricultura ecuatoriana, debido a que su papel no solo se limita a contribuir con la alimentación del, sino que permite dinamizar la economía, considerándose como el cuarto cultivo con mayor importancia en la producción agrícola nacional.

Según el Instituto Ecuatoriano de Estadísticas de Censos (INEC) en el año 2022, el cultivo de papa a nivel nacional abarcó una superficie de 19.390 hectáreas. La distribución del área total plantada se concentró notablemente en las provincias de Carchi (24,10%), Cotopaxi (17,50%), Chimborazo (13,6%), Tungurahua (11,53%) y otras provincias que representaron el 33,5% de acuerdo con la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continúa (ESPAC).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Ubicación

3.1.1. Ubicación política

Provincia: Tungurahua

Cantón: Cevallos

Sector: Querochaca

3.1.2. Ubicación Geográfica

Latitud: 1° 22' 09.3" S

Longitud: 78° 36' 24.1" W

3.1.3. Ubicación Geográfica

Temperatura media: 11-15 °C

Altitud: 2886 m.s.n.m

Precipitación anual: 571.2 mm

Clima: Frío

Zona ecológica: Relieve montañoso

Humedad relativa: 75%

3.2. Materiales y equipos

Para la técnica de micropropagación del material vegetal de muestras emplearon los siguientes materiales y equipos:

- Vitroplantas de papa variedad Cecilia.
- Medio Basal de cultivo Murashige & Skoog M519 (PHYTOTECH).
- Sacarosa (Azúcar blanca Valdez).
- Agar (en polvo para cultivo de tejidos vegetales – Agar Powder for tissue SRL).

- Frascos de vidrio boca ancha de capacidad 250 ml.
- Papel aluminio.
- Alcohol al 70%.
- Balanza Analítica (OHAUS – Pioneer).
- Balanza digital U.S. SOLID (cap. 200 g; 0.001 g)
- pH metro (PEAK Instruments).
- pH metro portátil (HANNA)
- Autoclave (MIDMARK).
- Matraces Erlenmeyer (1000 ml, 500 ml, 250 ml).
- Destilador de agua (DIRECT – Q / MILLOPONE).
- Microondas (PANASONIC).
- Cabina de flujo laminar (PURIFIER - MAGELLAN).
- Bata quirúrgica.
- Zapatones.
- Mascarilla.
- Goteros.
- Probetas (50 ml).
- Bisturí (STAINLESS N°4).
- Libreta de apuntes
- Smartphone
- Laptop

Durante la fase de aclimatación bajo invernadero se utilizaron los siguientes materiales:

- Vasos plásticos desechables de 16 oz.
- Agua destilada destinada para el riego
- Sustrato obtenido a partir de Teca (*Tectona grandis* L.) de nombre comercial TECTOPORE

Material vegetal:

- Vitroplantas de papa *S. tuberosum* var. Cecilia.

Para la fase de campo se utilizó un sustrato a partir de biocarbono con las siguientes características:

- Material sustrato obtenido a partir de Teca (*T. grandis*) de nombre comercial TECTOPORE.
- Turba rubia (TS4).

3.3. Tipo de investigación

La investigación se encaminó hacia un enfoque experimental de carácter cuantitativo, a razón de intervenir y manipular las variables independientes con el objetivo de observar su efecto sobre la variable dependiente. Con este tipo de investigación, se buscó establecer una relación causal entre las variables independiente y dependiente.

3.4. Manejo del ensayo

La propagación *in vitro* de los explantes y trasplante al área de aclimatación se llevó a cabo con el siguiente proceso:

1. Selección del material vegetal: Se seleccionaron vitroplantas de *S. tuberosum* var. Cecilia del banco de plantas del laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Ambato.
2. Preparación del medio de cultivo: Se utilizó como medio de cultivo el medio de Murashige y Skoog, que contenía sales, nutrientes, vitaminas y hormonas vegetales. El medio se ajusta al pH adecuado y se solidifica utilizando agar.
3. Preparación del material vegetal: las plantas *in vitro* se cortaron en pequeñas secciones llamados explantes (segmentos nodales) de aproximadamente 1 cm.
4. Siembra del material vegetal: Los explantes se sembraron en el medio de cultivo en frascos de vidrio.
5. Incubación: Los frascos se llevaron al área de transferencia, bajo

condiciones controladas de temperatura, luz y humedad para favorecer el crecimiento y desarrollo de los explantes.

6. Aclimatización: Después de varias semanas de crecimiento en el medio de cultivo, los explantes se retiraron y se llevaron a trasplante en biocarbón (Tectopore) en vasos desechables, el periodo de aclimatización fue de 6 semanas, en condiciones ambientales semicontroladas antes de ser llevadas a campo bajo condiciones de invernadero.

3.5. Prueba de hipótesis

Las hipótesis que se propuso a defender, por cada una de las variables de estudio, se describen a continuación:

H0: No existe un efecto significativo de diferentes proporciones de biocarbón (Tectopore) y turba como sustrato sobre la respuesta morfofisiológica de las vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. var. Cecilia en condiciones de invernadero.

H1: Existe un efecto significativo de diferentes proporciones de biocarbón (Tectopore) y turba como sustrato sobre la respuesta morfofisiológica de las vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. var. Cecilia en condiciones de invernadero.

3.6. Recolección de la información

Para el experimento se evaluó la influencia de combinaciones de Tectopore y turba sobre la respuesta morfológica de *S. tuberosum* Var. Cecilia bajo invernadero, resultante en cinco tratamientos. Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con diez repeticiones por tratamiento, integrando vitroplantas por cada unidad experimental. La distribución de los tratamientos se presenta en la tabla.

Tabla 1. *Distribución de los tratamientos*

Tratamientos
T1. 100% Tectopore
T2. 80% Tectopore + 20% Turba
T3. 50% Tectopore + 50% Turba
T4. 20% Tectopore + 80% Turba
T5. 100% Turba

3.7. Procesamiento de la información

Para el procesamiento de datos estadísticos se tomaron cuenta los siguientes lineamientos estadísticos:

a) Preparación de los datos:

Los datos fueron organizados de acuerdo con las diferentes combinaciones de Tectopore y turba, asegurándonos de tener una muestra igual en cada grupo. Se registraron adecuadamente las variables independientes y dependientes.

b) Análisis descriptivo:

Se efectuó un análisis de carácter descriptivo para cada grupo, calculando medidas de tendencia central (como la media) y medidas de dispersión (como la desviación estándar).

c) Verificación de supuestos:

Se evaluaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza para la variable dependiente en cada grupo. Se utilizaron pruebas estadísticas como la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y la prueba de Fligner-Killeen para la homogeneidad de varianza.

Para el caso de las variables que no cumplieron con los criterios de normalidad y homogeneidad se utilizaron pruebas no paramétricas, en este caso se efectuó la prueba de Kruskal-Wallis y el test de Bonferroni.

d) Pruebas Post Hoc:

Se efectuó la prueba Post Hoc para identificar qué combinación específica de Tectopore y turba difieren entre sí. Para este caso, se utilizó la prueba de Bonferroni con el 5% de significancia. Esta prueba permitió realizar comparaciones múltiples ajustando el nivel de significancia para controlar el error tipo I.

e) Interpretación de resultados:

Se examinaron los valores de las comparaciones de medios para identificar las combinaciones de Tectopore y turba que tienen un impacto significativo en la respuesta morfológica de *S. tuberosum* var. Cecilia.

De la misma manera se interpretó de forma gráfica la distribución de los datos y la necesidad entre los grupos.

3.8. Variables respuesta

3.8.1. Morfología de la hoja:

- Área foliar, cm²

Esta medida se tomó empleando la aplicación móvil “Petiole” para cada una de las plantas del estudio.

3.8.2. Morfología del tallo:

- Longitud de los entrenudos, mm

Para obtener esta medida se debe seguir el siguiente proceso:

- a) Seleccionar una planta.

- b) Preparar una regla o calibrador tipo "pie de rey".
- c) Identificar los entrenudos.
- d) Colocar la regla o calibrador en posición. e) Medir la longitud y registrar las mediciones.

- Diámetro del tallo, mm:

- a) Seleccionar el tallo.
- b) Preparar un calibrador tipo "pie de rey".
- c) Colocar el tallo en posición.
- d) Encontrar el punto más ancho.
- e) Alinear el calibrador.
- f) Leer y registrar la medida.

- Número de entrenudos:

- a) Realizar un conteo simple desde la base hasta el ápice caulinar.

3.8.3. Morfología de la raíz:

- Número de raíces:

- a) Extraer la planta y exponer el sistema radicular.
- b) Contar las raíces y registrar el valor.

- Longitud de las raíces, mm:

- a) Utilizando el sistema radicular utilizado para medir su volumen, medir la longitud desde el cuello hasta el extremo de la raíz y registrar el valor en centímetros.

3.8.4. Materia fresca, g:

- Preparación de la muestra:

- a) Seleccionar la planta y eliminar cualquier material no deseado, como tierra o partes dañadas. Si es necesario, lavar la muestra para eliminar residuos superficiales.
- Pesar la muestra:
 - a) Utilizar una balanza de precisión y registrar la masa de la muestra en gramos (g).
 - b) Realizar la medición rápidamente para evitar pérdidas significativas de agua.
 - c) Registrar la masa (g) de la muestra fresca, que representa la cantidad total de materia en la planta, incluyendo el agua contenida.

3.8.5. Materia seca, g

- Preparación de la muestra: eliminar cualquier material no deseado, como tierra o partes dañadas.
- Pesar la muestra fresca: utilizar una balanza precisa y registrar la masa (g) de la muestra fresca en gramos (g).
- Secado de la muestra: colocar la muestra en un horno o estufa a una temperatura constante y baja, generalmente entre 70-80°C, para eliminar la humedad.
- Pesar la muestra seca: después del tiempo de secado (24 horas), retirar la muestra del horno y dejarla enfriar a temperatura ambiente en una desecadora. Luego, pesar nuevamente la muestra seca.
- Cálculo de la materia seca: Calcular la materia seca restando la masa (g) de la muestra seca al peso de la muestra fresca. El resultado será la cantidad de materia seca contenida en la muestra.

3.8.6. Contenido de macronutrientes y micronutrientes, %

Se envió una muestra de material vegetativo al laboratorio especializado y certificado para su análisis. El laboratorio determinó los macronutrientes y micronutrientes extraídos en la muestra.

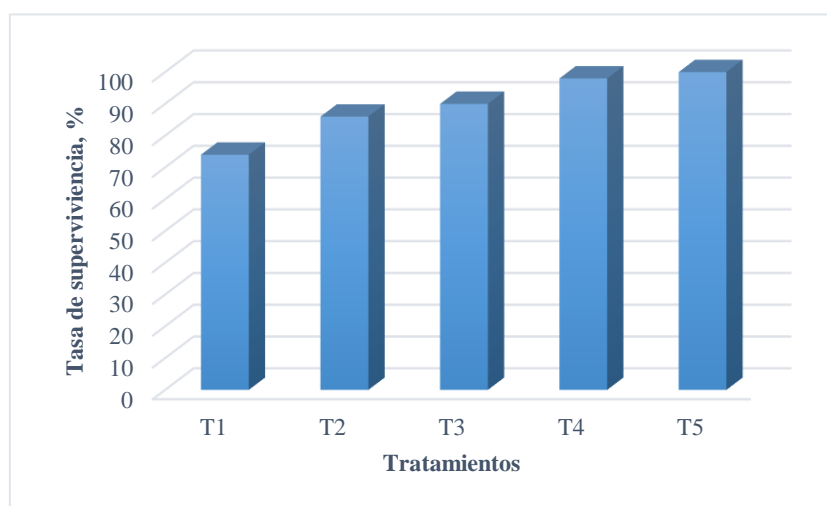
CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Porcentaje de supervivencia de vitroplantas de *S. tuberosum* var. Cecilia sembradas en sustrato de biocarbono (Tectopore).

De acuerdo con el gráfico 2, la tasa de supervivencia en las plantas a las que se suministró T5 (100%), reportaron una mayor tasa de supervivencia en comparación con sus similares. No obstante, es importante resaltar que los demás tratamientos a excepción de T1 y T2 con valores de 74 % y 86% respectivamente, mostraron resultados similares con T5. Este comportamiento, realza el papel fundamental del biocarbono en el desarrollo de las plantas, tal y como lo expone Barrezueta (2022), el biocarbono posee un efecto positivo sobre el crecimiento de las plantas, debido a sus propiedades involucradas en la reducción de ácidos carboxílicos y el incremento de porcentaje de cationes alcalinos, entre los que destacan el calcio y magnesio.

Gráfico 2. Porcentaje de supervivencia de vitroplantas de *S. tuberosum* var. Cecilia sembradas en sustrato de biocarbono (Tectopore).



4.2. Influencia del sustrato de biocarbono (Tectopore) y de su combinación con turba en diferentes proporciones, sobre el crecimiento de vitroplantas de *S. tuberosum* var. Cecilia

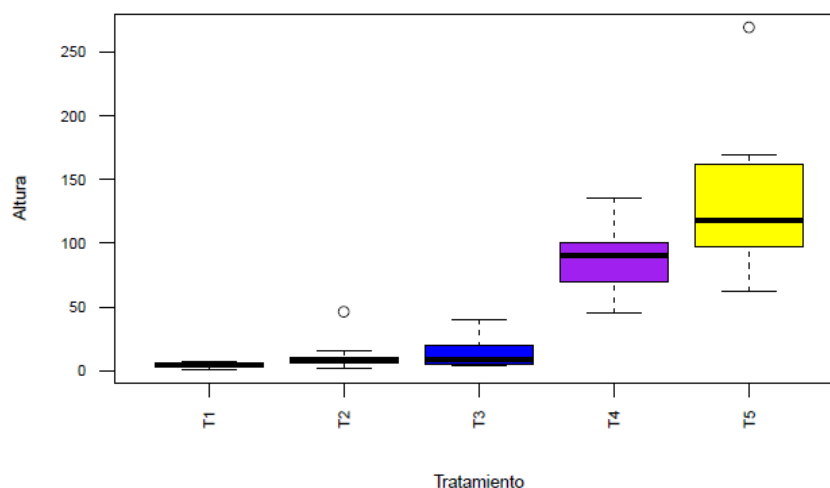
4.2.1. Altura de las vitroplantas

El empleo de la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, registró una significancia asintótica de 0.00 misma que se encuentra por debajo del umbral de 0.00 lo que indica la presencia de diferencias significativas entre los grupos de tratamientos suministrados, como se describe en la tabla 2.

Tabla 2. Prueba de Kruskal Wallis para la variable altura de vitroplantas

	Altura
Chi Cuadrado	38.2447
Gl	4
Sig. asintótica	.00

En el gráfico 3 se puede apreciar que la altura de las vitroplantas refleja diferencias significativas, entre los tratamientos evaluados, donde T5 y T4 alcanzaron los mejores resultados, por encima sus similares. En contraste a esto, T1 registró el menor valor de todos los tratamientos. Estos resultados difieren a los reportados por Concilco et al. (2017), quienes al suministrar biocarbono para mejorar el rendimiento de la avena forrajera, reportaron una altura superior en plantas a las que se suministró 2.25 mg/ha de biocarbono.

Gráfico 3. *Media de los tratamientos en la variable altura de las vitroplantas*

4.2.2. Peso de la materia verde

La aplicación de la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis reportó un valor de significancia asintótica de 0.00, muy por debajo del umbral de 0.05. Este resultado revela la existencia de diferencias significativas entre los grupos de tratamiento, como se describe en la Tabla 3.

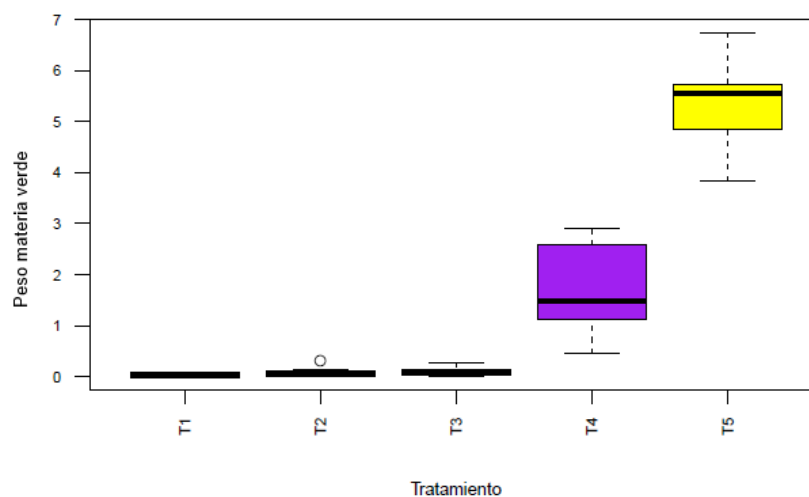
Tabla 3. *Prueba de Kruskal Wallis para la variable peso de materia verde*

	Peso de materia verde
Chi Cuadrado	39.1056
G1	4
Sig. asintótica	.00

En el gráfico 4, se describen distinciones notables en cuanto a la materia verde de las vitroplantas entre los tratamientos aplicados. En este caso, T5 reporta valores superiores. Por otro lado, T3, T2 y T1 alcanzaron resultados muy bajos, siendo este último el inferior de todos. Las implicaciones en esta variable denotan diferencias a lo registrado por Timilsina (2017), quien a través de la aplicación de biocarbón en plantas

de rábano, reportó un incremento sustancial de la biomasa, y del rendimiento tanto en raíz como de la parte aérea. Esta respuesta se le atribuye a la capacidad del sustrato de capturar carbono, así como en el incremento del área superficial, y la alta capacidad de retención del agua (Shareef y Zhao, 2017).

Gráfico 4. *Media de los tratamientos en la variable peso de materia verde*



4.2.3. Peso de la materia seca

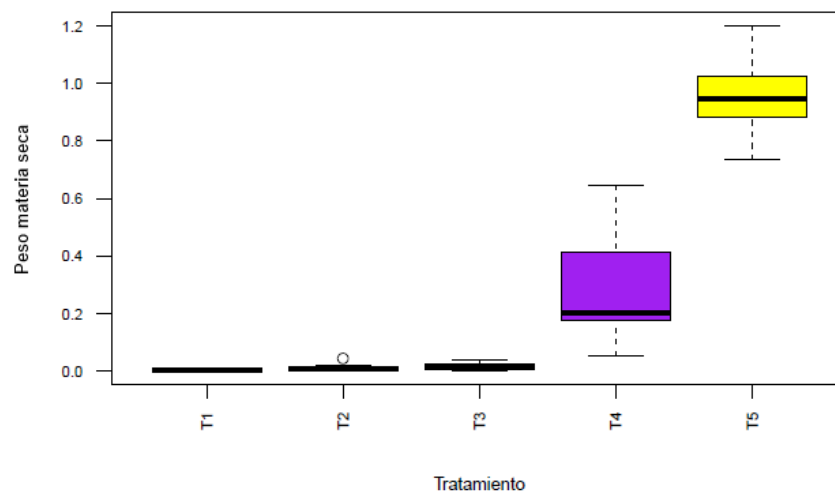
Al efectuarse la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis se apreció un valor notable de significancia asintótica de 0.00, mismo que es significativamente inferior al umbral de 0.05. Este resultado indica la presencia de diferencias significativas entre los grupos de tratamientos, como se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. *Prueba de Kruskal Wallis para la variable peso de materia seca*

	Peso de materia seca
Chi Cuadrado	39.5626
Gl	4
Sig. Asintótica	.00

En el gráfico 5 se puede evidenciar un comportamiento similar a las otras variables, donde T5 reportó mejores resultados tras su aplicación en el peso de la materia seca, seguido por T4. Sin embargo, T3, T2 y T1 denotaron un efecto mínimo del biocarbono, al presentar valores inferiores en contraste a sus similares.

Gráfico 5. Media de los tratamientos en la variable peso de materia seca



4.3. Respuesta morfológica de plantas de *S. tuberosum* var. Cecilia bajo el efecto de las combinaciones del sustrato (Tectopore) y turba.

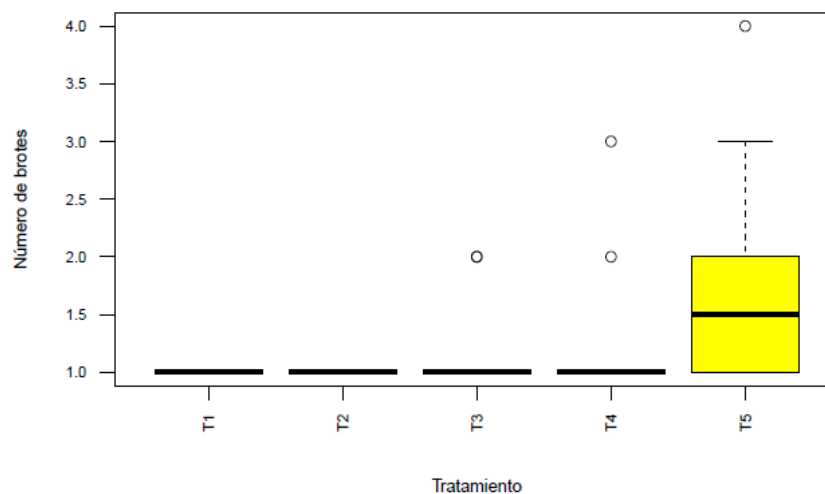
4.3.1. Número de brotes

La prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, denota un valor de significancia a sintónica de 0.02257, mismo que se encuentra por debajo 0.05. En base a esto, se registra la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos aplicados para esta variable analizada, como se describe en la tabla 5.

Tabla 5. Prueba de Kruskal Wallis para la variable número de brotes

Número de brotes	
Chi Cuadrado	23.726
Gl	4
Sig. asintótica	.02257

El gráfico 6, se aprecian distinciones notables con respecto al número de brotes en plantas de *Solanum tuberosum* var. Cecilia. En este caso T5 develó una superioridad con respecto a los demás tratamientos, resaltando que la integración del 100% de turba permitió obtener un mayor número de brotes. Por otro lado, T4, T3, T2 y T1 mostraron un comportamiento similar al presentar resultados por debajo de T5.

Gráfico 6. Media de los tratamientos en la variable número de brotes

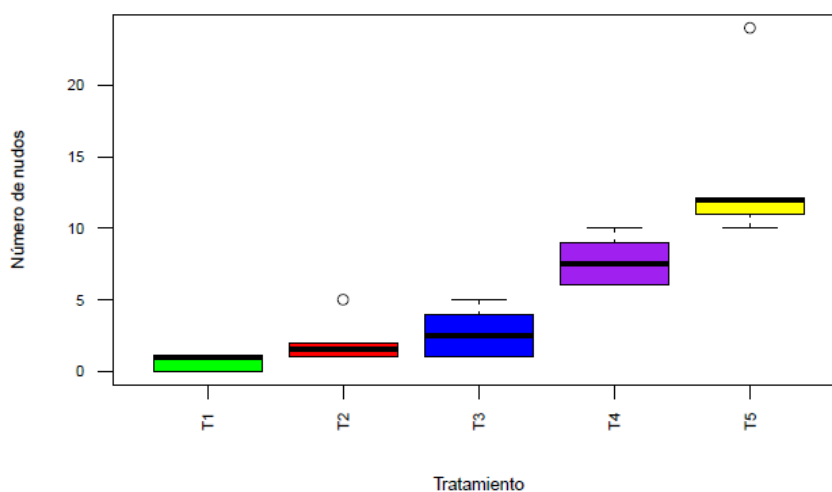
4.3.2. Número de nudos

Al efectuarse la prueba no paramétrica, se apreció un valor destacado de significancia asintótica de 0.00 el mismo que sustancialmente se encuentra por debajo del umbral establecido de 0,05. Este resultado, determina la existencia de diferencias notables entre los grupos de los tratamientos aplicados.

Tabla 6. Prueba de Kruskal Wallis para la variable número de nudos

Número de nudos	
Chi Cuadrado	42.8573
Gl	4
Sig. Asintótica	.00

El gráfico 7, representa el efecto que tuvo el biocarbón sobre la presencia de nudos en vitroplantas de *Solanum tuberosum* var. Cecilia. En este caso se puede evidenciar que la respuesta desciende de manera paulatina conforme la concentración de biocarbón es superior. De esta manera, T5 demuestra ser el tratamiento que presentó los resultados más elevados, seguidos por T4, mientras que sus similares denotan resultados inferiores.

Gráfico 7. Media de los tratamientos en la variable número de nudos

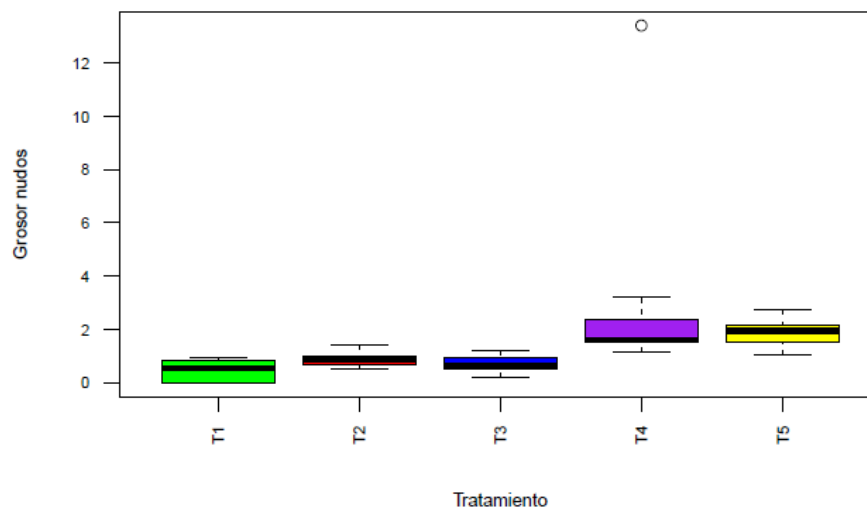
4.3.3. Grosor de nudos

Al llevarse a cabo la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, la presencia de un valor de significancia asintótica de 0.00 por debajo del umbral de 0.05, indica la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos aplicados, como se describe en la tabla 7.

Tabla 7. Prueba de Kruskal Wallis para la variable grosor de nudos

Grosor de nudos	
Chi Cuadrado	35.2427
Gl	4
Sig. asintótica	.00

En el gráfico 8, las distinciones entre los tratamientos son relativamente marcadas. En este caso T4 y T5 presentan un comportamiento similar con leves distinciones entre estos. No obstante, esta respuesta se ve reducida en los demás tratamientos, donde T2 y T3 comparten un nivel de respuesta similar, al contrario de T1, que registra un valor muy reducido a sus contrapartes.

Gráfico 8. Media de los tratamientos en la variable grosor de nudos

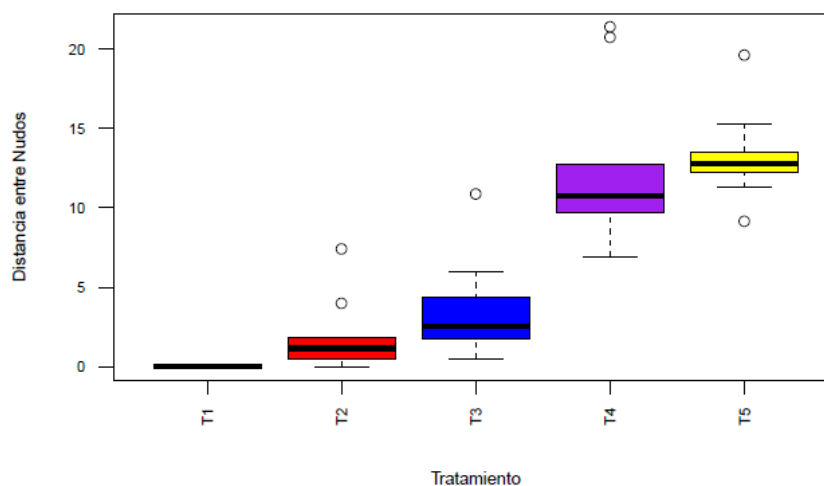
4.3.4. Distancia entre nudos

La prueba no paramétrica indica un valor de significancia de 0.0073 por debajo del umbral de 0,05. En consecuencia, se registra la presencia de diferencias destacables entre los tratamientos administrados para esta variable analizada, como se detalla en la tabla 8.

Tabla 8. Prueba de Kruskal Wallis para la variable distancia entre nudos

Distancia entre nudos	
Chi Cuadrado	19.138
Gl	4
Sig. asintótica	.00073

Como se describe en el gráfico 9, las diferencias significativas entre los tratamientos son notables, en este caso el tratamiento 5 demuestra presentar un valor superior a los demás tratamientos, seguido por T4. En contraste a esto, T1 refleja una respuesta inferior.

Gráfico 9. Media de los tratamientos en la variable distancia entre nudos

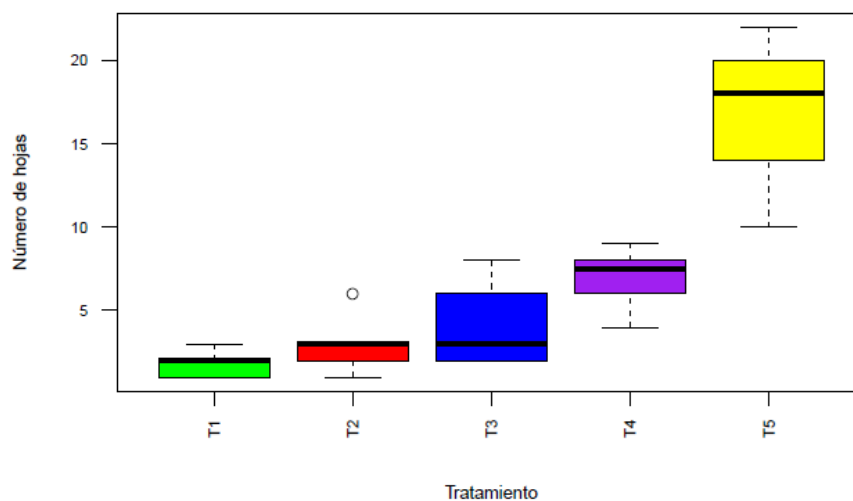
4.3.5. Número de hojas

Tras efectuarse el análisis no paramétrico de Kruskal Wallis, se revela un valor de significancia de 0.00, indicando la presencia de diferencias destacables entre los tratamientos que fueron aplicados sobre la variable examinada, como se detalla en la tabla 9.

Tabla 9. Prueba de Kruskal Wallis para la variable número de hojas

Número de hojas	
Chi Cuadrado	38.2833
Gl	4
Sig. asintótica	.00

En cuanto al número de hojas, se pone en evidencia en el gráfico 10, que la administración de turba influye en esta variable, donde T5 supera a los demás tratamientos, presentando resultados favorables, seguido por T4. No obstante, se aprecia una respuesta mínima cuando se administra biocarbono en el tratamiento 1.

Gráfico 10. Media de los tratamientos en la variable número de hojas

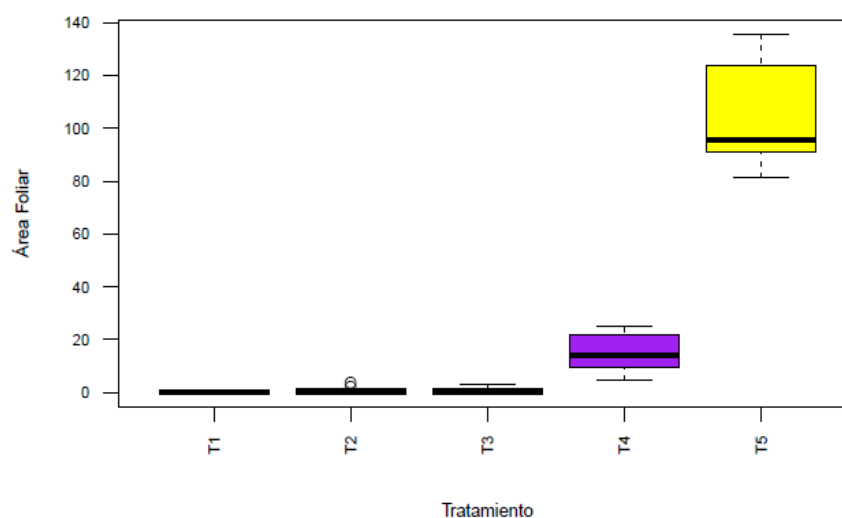
4.3.6. Área foliar

La prueba no paramétrica revela un valor de significancia de 0.00 mismo que está por debajo del umbral de 0.05. En consecuencia, se documenta la presencia de distinciones destacables, de la variable analizada, tal y como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Prueba de Kruskal Wallis para la variable área foliar

Área foliar	
Chi Cuadrado	42.6921
G1	4
Sig. asintótica	.00

En el caso del área foliar, la administración de T5, permitió la obtención de un área foliar superior en relación a los demás tratamientos. Seguido por T4. De la misma manera se apreció un comportamiento similar en los tratamientos T3, T2 y T1. El área foliar registrada, tras la administración del biocarbón, muestra diferencias a lo reportado por Huerta (2019), quien menciona que el biocarbón producido a partir de la pirólisis de residuos sólidos orgánicos influyó positivamente en la mejora tanto de la calidad como de la producción en el cultivo de papa.

Gráfico 11. Media de los tratamientos en la variable área foliar

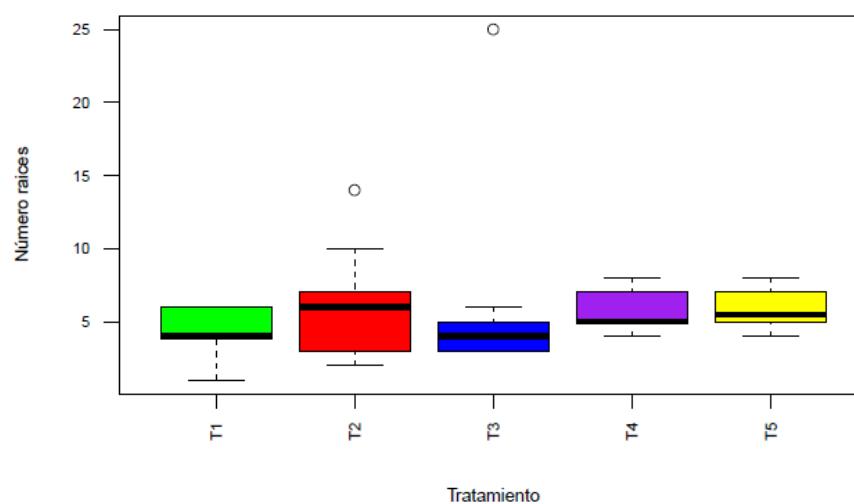
4.3.7. Número de raíces

La prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis indica un valor de significancia asintótica de 0,18, mismo que se encuentra por encima de 0,05. En consecuencia, no se revelan diferencias destacables entre los tratamientos suministrados en esta variable descrita como se detalla en la tabla 11.

Tabla 11. Prueba de Kruskal Wallis para la variable número de raíces

Número de raíces	
Chi Cuadrado	6.2919
Gl	4
Sig. asintótica	.18

En el gráfico 12, no hay evidencia clara de una variación significativa con respecto al número de raíces entre los diferentes tratamientos del experimento. Estos resultados contrastan con los reportados por Indawan et al., (2018), donde la integración de biocarbono reflejó una respuesta positiva en el rendimiento de raíces almacenadoras en plantas de camote, experiencias que se alejan a lo reportado en esta investigación.

Gráfico 12. Media de los tratamientos en la variable número de raíces

4.3.8. Longitud de raíces

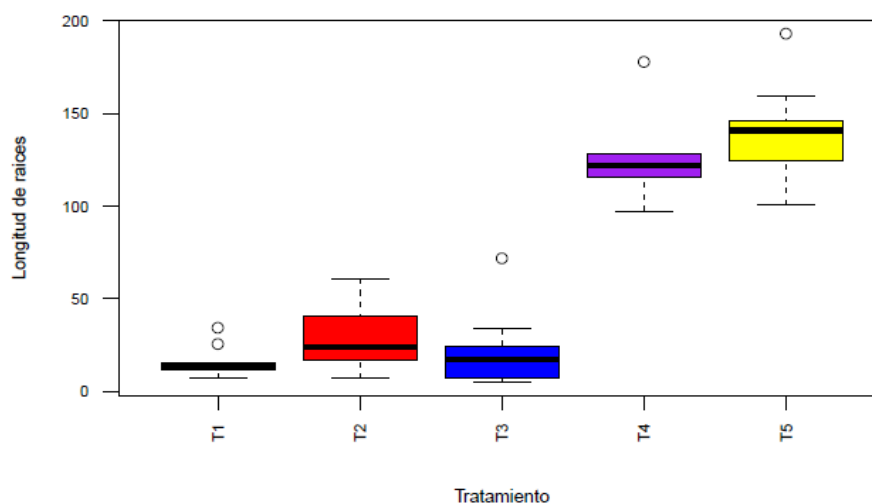
Una vez efectuada la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis indica un valor de significancia asintótica de 0.00, por debajo del 0.05, producto de esto, se observa que existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados para la variable analizada, como se detalla en la tabla 12.

Tabla 12. Prueba de Kruskal Wallis para la variable longitud de raíces

Longitud de raíces	
Chi Cuadrado	37.112
Gl	4
Sig. asintótica	.00

En el gráfico 13, se representa el impacto del biocarbón sobre la longitud de las raíces en plantas de *Solanum tuberosum* var. Cecilia. En este caso es evidente que se obtuvo mejores resultados con la administración de T5 y T4. En contraste a esto, se denota que T1 no reflejó un efecto significativo para esta variable, reportando un valor inferior a los demás tratamientos.

La diferencia entre la longitud de las raíces observada tras la administración de biocarbón, difiere a lo expuesto por Olmo, 2016 quien demostró que existe una correlación positiva y significativa entre la longitud específica de la raíz y la producción de la planta, alcanzando una mayor proliferación de raíces finas debido a la adición de biocarbón. De la misma manera la aplicación combinada de biocarbón y fertilización mejoró consistentemente los rendimientos en comparación con la fertilización única, lo que sugiere que la suplementación con biocarbón mejoró la eficacia del fertilizante aplicado (Olmo, 2016).

Gráfico 13. Media de los tratamientos en la variable longitud de raíces

4.3.9. Número de mini tubérculos

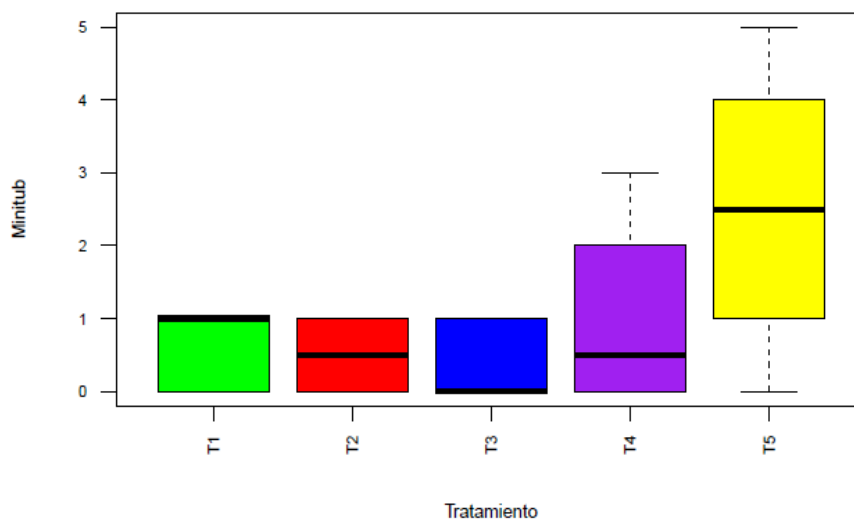
El nivel de significancia de 0.01, mismo que se sitúa por debajo del umbral de 0,05 devela la presencia de diferencias significativas entre los tratamientos aplicados para esta variable analizada, como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Prueba de Kruskal Wallis para la variable número de mini tubérculos

Número de mini tubérculos	
Chi Cuadrado	14.6422
Gl	4
Sig. asintótica	.01

En el gráfico 14, son evidentes las diferencias entre los tratamientos aplicados sobre el número de mini tubérculos que se desarrollaron en las vitroplantas de *Solanum tuberosum* var. Cecilia. Luego de la aplicación de T5, se registraron mejores resultados, seguido por T4, mientras que sus homólogos develaron un comportamiento similar. Según Akhtar et al. (2015) tratamiento combinado de biocarbón y fertilizante registró un mayor rendimiento y calidad de tubérculos, lo que sugiere que las aplicaciones de fertilizante y biocarbón son estrategias prometedoras para mejorar el crecimiento de las plantas y la productividad de los cultivos de papa en condiciones de salinidad.

Gráfico 14. Media de los tratamientos en la variable número de mini tubérculos



4.3.10. Peso de los mini tubérculos

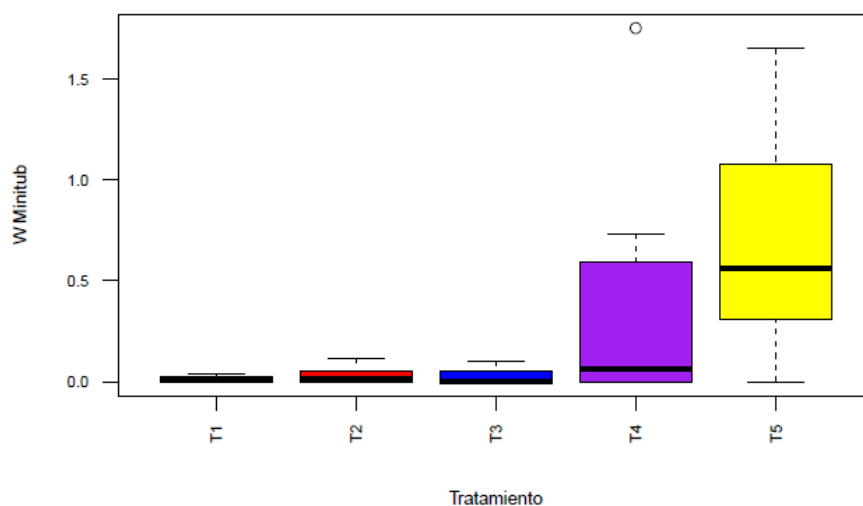
Luego del efectuarse el análisis de Kruskal Wallis, el valor de significancia asintótica por debajo del umbral de 0,05, indica la presencia de diferencias significativas entre los tratamientos aplicados para esta variable analizada, como se detalla en la Tabla 14.

Tabla 14. Prueba de Kruskal Wallis para la variable peso de mini tubérculos

Peso de los mini tubérculos	
Chi Cuadrado	38.2447
Gl	4
Sig. asintótica	.00

Como se muestra en el gráfico 15, son evidentes las distinciones entre los tratamientos evaluados, de manera particular, T5 exhibe un valor más alto que los demás tratamientos, seguido de cerca por T4. No obstante, esta respuesta se ve reducida en T1, siendo este último que registró un menor valor.

Gráfico 15. Media de los tratamientos en la variable peso de mini tubérculos



4.3.11. Diámetro de mini tubérculos

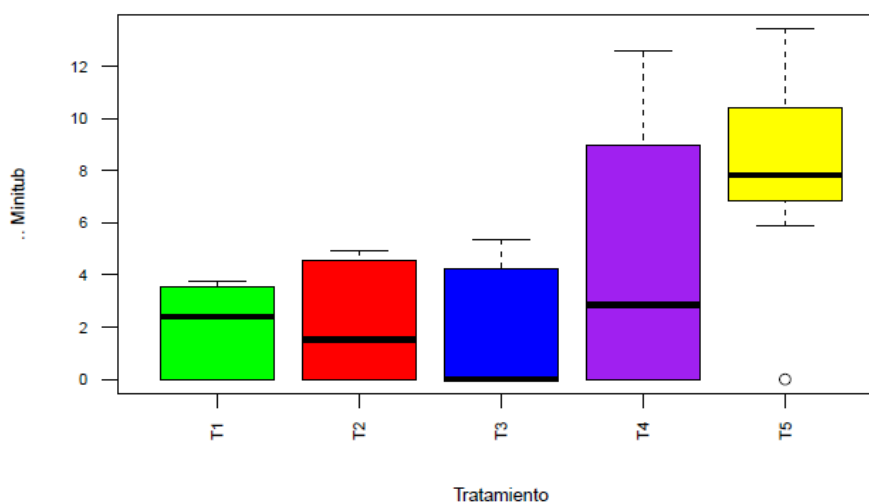
El nivel de significancia asintótica de 0,00, por debajo del umbral de 0,05, revela la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos aplicados para esta variable analizada, como se detalla en la Tabla 15.

Tabla 15. Prueba de Kruskal Wallis para la variable diámetro de mini tubérculos

	Diámetro de mini tubérculos
Chi Cuadrado	15.9733
Gl	4
Sig. asintótica	.00

El gráfico 16, expone la presencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, donde T5 reflejó un valor superior, seguido por T4, que muestra un comportamiento similar. Respecto a esta variable en particular, no se registraron estudios análogos que establezcan distinciones similares a las reportadas en la investigación realizada.

Gráfico 16. Media de los tratamientos en la variable diámetro de mini tubérculos



4.4. Contenido de macronutrientes y micronutrientes en plantas de *S. tuberosum* var. Cecilia bajo condiciones de invernadero.

En la tabla 16, se pone en evidencia que los tratamientos evaluados reportaron composiciones de nutrientes muy variadas, donde T3 (50% Tectopore + 50% turba) registró una mayor concentración de nitrógeno (N), potasio (K), azufre (S). Mientras T1, reportó una concentración superior en cuanto a fósforo (P), hierro (Fe), zinc, (Zn) y boro (B). Por otro lado, luego de la aplicación de T2, las plantas registraron una mayor composición con respecto a magnesio (Mg), sodio (Na) y cobre (Cu). Estas variaciones en la concentración de nutrientes, indican que la elección de la mezcla de sustrato (Tectopore y turba) influye de manera significativa sobre el contenido de los mismos, estableciendo que tratamientos específicos tienden a ser más adecuados para el cumplimiento de requisitos de nutrientes particulares.

Esta diferencia en la concentración de nutrientes remarca la función del biocarbón en los niveles de nutrientes del suelo al funcionar como reservorio de nutrientes, el biocarbón aporta nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y oligoelementos adicionales inherentes a las materias primas originales empleadas para la producción de biocarbón. Es de destacar que cierto contenido de nitrógeno y azufre de las materias primas puede perderse en forma de emisiones gaseosas durante el proceso de pirólisis (Hossain, et al., 2020).

Tabla 16. *Contenido de macronutrientes y micronutrientes en plantas de S. tuberosum var. Cecilia con diferentes concentraciones de Tectopore y turba*

Nutriente	Valores Referenciales (Bryson y Mills, 2014)	Tratamientos				
		T1	T2	T3	T4	T5
Nitrógeno Total (N), %	4.00-6.00	0.57	0.68	1.08	0.73	1.16
Fósforo (P), %	0.25-0.50	1.77	1.64	1.37	0.29	0.37
Potasio (K), %	4.00-11.5	1.82	2.07	2.27	1.91	1.56
Magnesio (Mg), %	0.50-1.50	0.64	0.76	0.72	0.19	0.25
Calcio (Ca), %	0.60-1.00	0.68	1.00	1.22	0.35	0.24
Azufre (S), %	0.19-0.36	0.18	0.20	0.32	0.21	0.36
Sodio (Na), %	0.02-0.10	0.16	0.25	0.15	0.09	0.07
Hierro (Fe), ppm	50-150	587	562	198	45.8	43.0
Manganeso (Mn), ppm	30-450	93.4	49.0	36.8	13.3	86.8
Cobre (Cu), ppm	7-20	7.9	22.3	8.0	3.3	5.2
Zinc (Zn), ppm	20-250	46.2	39.1	27.1	11.2	16.4
Boro (B, ppm)	25-50	145	88.4	76.2	34.4	45.8

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

5.1. Conclusiones

La adición de biocarbono en el porcentaje de supervivencia de vitroplantas de *Solanum tuberosum* var. Cecilia, produjo resultados favorables en la mayoría de tratamientos, en particular con T5 (100% de turba), donde la supervivencia de las plantas fue total con relación a los demás tratamientos. Esta tasa de supervivencia superior sugiere que, como sustrato, tiene un papel fundamental sobre la resistencia y el desarrollo de esta planta.

El biocarbono y su combinación con turba influyó de manera positiva en el crecimiento de vitroplantas de *S. tuberosum* var. Cecilia, bajo condiciones de invernadero, donde la inclusión de T5 y T4, alcanzó mejores resultados en cuanto a la altura de la planta, peso fresco y seco. Este desempeño constante resalta la importancia del biocarbono en el desarrollo de las plantas, especialmente en etapas tempranas.

Las combinaciones del biocarbono (Tectopore) y turba actuaron de manera favorable sobre la respuesta morfológica de las plantas. T5 y T4 se presentan tratamientos altamente efectivos que impacta de forma positiva en varios aspectos morfológicos de la planta, como la presencia, de brotes, grosor y distancia entre nudos, así como en el área foliar, desarrollo, peso y diámetro de mini tubérculos.

Las variaciones registradas en las concentraciones de macro y micronutrientes señalaron el impacto positivo que tiene el biocarbono sobre el estado nutricional de *S. tuberosum* var. Cecilia. Es importante resaltar que tratamientos específicos demostraron cierta tendencia a ser más idóneos al momento de cumplir con la necesidad de nutrientes particulares. En este caso, tanto las combinaciones de biocarbono como su presentación individual reflejaron una concentración diferente de macro y micronutrientes.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda la administración de la combinación de turba (T5) a una proporción del 100% de este sustrato en vitroplantas de *Solanum tuberosum* var. Cecilia, tomando en cuenta el impacto positivo que tiene sobre la morfología, resistencia y contenido de nutrientes en la planta.
- Es recomendable que se explore combinaciones adicionales al biocarbón (Tectopore) y turba empleadas en esta investigación, con el fin de optimizar las condiciones de crecimiento en plantas de papa.
- Por otro lado, se recomienda llevar a cabo un análisis económico para determinar la viabilidad de la aplicación de biocarbón en cultivos de *Solanum tuberosum* var. Cecilia.
- Se recomienda realizar estudios adicionales de la interacción del biocarbón sobre el pH del suelo en otras variedades de papa.

5.3. Bibliografía

- Ahmad, M., Rajapaksha, A., Lim, J., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. y Sik Ok, Y. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19-33. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071
- Ahmed, H. y Schoenau, J. (2015). Effects of biochar on yield, nutrient recovery, and soil properties in a canola (*Brassica napus* L)-wheat (*Triticum aestivum* L) rotation grown under controlled environmental conditions. *BioEnergy Research*, 8, 1183-1196. DOI: 10.1007/s12155-014-9574-x
- Akhtar, S., Andersen, M. y Liu, F. (2015). Biochar mitigates salinity stress in potato. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201, 368-378. DOI: 0.1111/jac.12132
- Altindal, D. y Karadogan, T. (2010). The effect of carbon sources on in vitro microtuberization of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Turkish Journal of Field Crops*, 15(1), 7-11. https://www.researchgate.net/publication/288555614_The_effect_of_carbon_sources_on_in_vitro_microtuberization_of_potato_Solanum_tuberosum_L

- Avilés, J. y Piedra, R. (2016). *Manual del cultivo de papa en Costa Rica*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8214.pdf>
- Bananomi, G., Ippolito, F., Cesarano, G., Nanni, B., Lombardi, N., Rita, A., Saracino, a. y Scala, F. (2017). Biochar as plant growth promoter: Better off alone or mixed with organic amendments? *Frontiers in Plant Science*, 8(1570), 1-12. DOI: 10.3389/fpls.2017.01570
- Barrezueta, S., Condoy, A. y Sánchez, S. (2022). Efecto del biocarbón en el desarrollo de las plantas de banano (*Musa AAA*) en fincas a partir de un manejo orgánico y convencional. *Enfoque UTE*, 13(3), 29-44. DOI: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.815>
- Bolan, N., Hoang, S. A., Beiyuan, J., Gupta, S., Hou, D., Karakoti, A., ... Van Zwieten, L. (2021). Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *International Materials Reviews*, 1-51. DOI: 10.1080/09506608.2021.1922047
- Bryson, G. y Mills, H. (2014). *Plant Analysis Handbook IV*. Georgia, USA. Micro-Macro Publishing Inc.
- Carter, S., Shackley, S. Sohi, S., Suy, T. y Haefele, S. (2013). The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy*, (3), 404-418. DOI: 10.3390/agronomy3020404
- Concilco, E, Moreno, A., García, M., Quiroga, H. y García, O. (2018). Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad de avena forrajera. *Terra Latinoamericana*, 36, 221-228. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.375>
- Chen, Y., del Valle, M., Valdebenito, N. y Zacconi, F. (2014). *Mediciones y métodos de uso común en el laboratorio de química*. 2da edición. Ediciones UC.
- Chen, W., Meng, J., Han, X., Lan, Y. y Zhang, W. (2019). Past, present, and future of biochar. *Biochar*, 1, 75-87. DOI: 10.1007/s42773-019-00008-3
- Datiles, M. J., Acevedo, P. (24 de agosto 2014). *Solanum tuberosum* (potato). *CABI Digital Library*. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendum.50561>

- Downie, A., Crosky, A. y Munroe, P. (2009). Physical properties of biochar. En J. Lehman y S. Joseph (Eds), *Biochar for environmental management*. (pp. 13-30). Earthscan.
- Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., , J., Campo, J., Valtierra, E. y Etchevers, J. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34, 367-382. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>
- Falconi, C. J. (2013). *Manual de cultivo paso a paso: Papa (Solanum tuberosum)*. https://quickagro.edifarm.com.ec/pdfs/manual_cultivos/PAPA.pdf
- Farooque, A., Zaman, Q., Abbas, F., Hammad, H., Acharya, B. y Easu, T. (2020). How can potatoes be smartly cultivated with biochar as a soil nutrient amendment technique in Atlantic Canada? *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 336-344. DOI: 10.1007/s12517-020-05337-3
- Gathorne, A., Knight, J. y Woods, J. (2009). Biochar as a soil amendment positively interacts with nitrogen fertiliser to improve barley yields in the UK. *Earth Environmental Science*, 6. DOI: 10.1088/1755-1307/6/37/372052
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G. y Zech, W. (2001). The ‘Terra Preta’ phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88, 37-41. DOI: 10.1007/s001140000193
- González, J. (2015). *Evaluación agronómica de papa, variedad superchola (Solanum tuberosum), con el uso de semilla prebásica, bajo dos modalidades de fertilización edáfica, complementada con fertilización foliar*. [Tesis de grado. Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/4550>
- Gu, X., Wang, Y., Lai, C., Qiu, J., Hou, Y., Martens, W., Mahmood, N. y Zhang, S. (2014). Microporous bamboo biochar for lithium–sulfur batteries. *Nano Research*, 8, 129–139. DOI: 10.1007/s12274-014-0601-1
- Guerrero, F. y Polo, A. (1990). Usos, aplicación y evaluación de turbas. *Ecología*, 4, 3-13. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/parques-nacionales-oapn/publicaciones/ecologia_04_01_tcm30-100882.pdf
- Hoopes R.W., Plaisted R.L. (1987). Potato. En W. R. Fehr (ed), *Principles of Cultivar Development*. (pp. 385-436). Crop Species.

- Hossain, Z., Bahar, M., Sarkar, B., Donne, S., Sik Ok, Y., Niroshika, K., Kirkham, M., Chowdhury, S. y Bolan, N. (2020). Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar*, 379-420. [https://doi.org/10.1007/s42773-020-00065-](https://doi.org/10.1007/s42773-020-00065-0)
- Huamán, Z. (1986). *Botánica sistemática y morfología de la papa*. Centro Internacional de la Papa. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABD595.pdf
- Huarte, M. A. y Capezio, S. (2013). Cultivo de papa. En F. Gutheim y M. Cauhepe (Eds.), *Agricultura y ganaderías campeanas* (pp. 172-202). Editorial de la Universidad Nacional de Mar de Plata. https://www.researchgate.net/publication/256195293_Cultivo_de_papa
- Huerta, A. J. (2019). *Influencia del biocarbón elaborado con residuos sólidos orgánicos sobre la calidad y producción del cultivo de la papa en el Centro Experimental Ecológico de Tuyu Ruri, noviembre 2018 a abril 2019*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”. <https://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4085>
- Ilvay, L. (2012). Evaluación de sustratos orgánicos para la producción de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea* var. Itálica). [Tesis de Grado. Universidad Técnica de Ambato].
- Indawan, E. Lestari, S. y Thiasari, N. (2018). Sweet potato response to biochar application on sub-optimal dry land. *Journal of degraded and mining lands management*, 5(2), 1133-1139. DOI: 10.15243/jdmlm.2018.052.1133
- Kammann, C., Glaser, B. y Schmidt, H. (2016). Combining biochar and organic amendments. En S. Shackley, G. Ruyschaert, Z. Jwart y B. Glaser (Eds.). *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practice*. (136-164)
- Khalafalla, M., Elaleem, K. y Modawi, R. (2010). Callus formation and organogenesis of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivar almera. *Journal of Phytology*, 2(5), 40-46. https://www.researchgate.net/publication/285598205_Callus_formation_and_organogenesis_of_potato_Solanum_tuberosum_L_cultivar_Almera?enrichId=rgreq-fc618c9a96ee30339144fa4dede37874-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4NTU5ODIwNTtBUzozMDI5OTMyMjI2MzU1MjJAMTQ0OTI1MDYyMTgyMg%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf

- Kizito, S., Luo, H., Lu, J., Bah, Dong, R. y Wu, S. (2019). Role of nutrient-enriched biochar as a soil amendment during maize growth: exploring practical alternatives to recycle agricultural residuals and to reduce chemical fertilizer demand. *Sustainability*, 11, 1-22. DOI: 10.3390/su11113211
- Knoblauch, C., Priyadarshani, S., Haefele, S., Schröder, N. y Pfeiffer, E. (2021). Impact of biochar on nutrient supply, crop yield and microbial respiration on sandy soils of northern Germany. *European Journal of Soil Science*, 1-17. DOI: 10.1111/ejss.13088
- Lehmann, J., Gaunt, J. y Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems- a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 403-427. DOI: 10.1007/s11027-005-9006-5
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(7), 381-387. DOI: 10.1890/1540-9295
- López, A. R. (2006). Diseño y construcción de una máquina desmenuzadora de turba y/o tierra para vivero. [Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2336/1/15T00503.pdf>
- Martínez, M., Torres, M., Guzmán, C. y Maestri, D. (2006). Preparation and characteristics of activated carbon from olive stones and walnut shells. *Industrial Crops and Products*, 23(1), 23-28. DOI: 10.1016/j.indcrop.2005.03.001
- Mollick, O.A., Kumar, A., Alam, I., Mohammd, M. (2020). Effect of biochar on yield and quality of potato (*Solanum tuberosum*) tuber. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 11(5), 445-450. DOI: 10.23910/1.2020.2140
- Molina, J., Santos, B. y Aguilar, L. (2004). *Guía MIP en el cultivo de papa*. 1^{ra} edición. Managua. <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENH10M722.pdf>
- Nair, A., Kruse, R. y Tillman, J. (2014). *Biochar application in potato production*. Muscatine Island Research and Demonstration Farm.
- Nanda, S., Dalai, A., Berruti, F. y Kozinski, J. (2015). Biochar as an exceptional bioresource for energy, agronomy, carbon sequestration, activated carbon and specialty materials. *Waste and Biomass Valorization*, 7(2), 201-235. DOI: 10.1007/s12649-015-9459-z

- Olmo, M. (2016). *Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal*. [Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba]. <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13381/2016000001398.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2022). FAOSTAT Statistics Database. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QI>
- Pardavé, C. (2004). *Cultivo y comercialización del cultivo de papa*. Perú. Palomino
- Pumisacho, M. y Sherwood, S. (2002). *El cultivo de la papa en Ecuador*. 1^{ra} edición. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias.
- Qiu, S., McComb, A y Bell, R. (2008). Ratios of C, N and P in soil water direct microbial immobilisation–mineralization and N availability in nutrient amended sandy soils in southwestern Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 127, 93-99. DOI: 10.1016/j.agee.2008.03.002
- Rodríguez, L., Pentón, G., Sanchez, M. y Fernández, D. (2022). Efecto agroproductivo de un abono basado en compost con IHPLUS®BF y biochar en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Agropat*, 302-307. https://www.researchgate.net/publication/366231317_Efecto_agroproductivo_de_un_abono_basado_en_compost_con_IHPLUSRBF_y_biochar_en_el_cultivo_de_papa_Solanum_tuberosum_L
- Rojas, J. S. y Orena, S. (2006). *Manual de producción de papa para la agricultura familiar campesino*. Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Sánchez, S., Condo, A., Sisalima, P., Barrezueta, S. y Jaramillo, E. (2020). Uso de biocarbones en medios de cultivo para el crecimiento de *Trichoderma* spp. in vitro. *Revista Científica Multidisciplinaria de la Universidad Metropolitana de Ecuador*, 3(2), 67-72. <https://remca.umet.edu.ec/index.php/REMCA/article/view/267>
- Scholz, S., Sembres, T., Roberts, K., Whitman, T., Wilson, K. y Lehmann, J. (2014). *Biochar systems for smallholders in developing countries*.
- Sharef, T. M. y Zhao, B. (2017). Review paper: The fundamentals of biochar as a soil amendment tool and management in agriculture scope: an overview for farmers and gardeners. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 6, 38-61. DOI: <https://doi.org/10.4236/jacen.2017.61003>.

- Souza, L., Gonçalves, E. M., Ferreira, C., Arruda, D., Fernandes, E., Mendes, M., Almeida, L. y Arnaldo, L. (2023). Biochar as an alternative to improve the in vitro environment for Pitaya (*Hylocereus undatus* Haw) and strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch) growing. *African Journal of Agricultural Research*, 19(3), 226-234. DOI: 10.5897/AJAR2022.16255
- Spooner, D. y Knapp, S. (20 de noviembre de 2013). *Solanum tuberosum*. *Solanaceae Source*. <https://solanaceaesource.myspecies.info/content/solanum-tuberosum>.
- Tadesse, B., Tolemariam, T., Hassen, W. (2022). Effect of different levels of biochar and inorganic fertilizer application on the growth of two grass species (*Chloris gayana* and *Panicum coloratum*). *Ethiopian Journal of Applied Science and Technology*, 13(1), 1-11. DOI: https://www.researchgate.net/publication/362033620_Effect_of_different_levels_of_biochar_and_inorganic_fertilizer_application_on_the_growth_of_two_grass_species_Chloris_gayana_and_Panicum_coloratum
- Taramuel, X. (2017). Evaluación del peso del tubérculo y densidad de siembra en la producción de semilla registrada de papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad “Superchola” en la granja Yuyucocha, Ibarra. [Tesis de Grado. Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7447/1/03%20AGP%2022%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Timilsina, S., Khanal, B., Shah, S., Shrivastav, C. y Khanal, A. (2007). Effects of biochar application on soil properties and production of radish (*Raphanus sativus* L.) on loamy sand soil. *Journal of Agriculture and Forestry University*, 1, 103-111. https://www.researchgate.net/publication/320685833_EFFECTS_OF_BIOCHAR_APPLICATION_ON_SOIL_PROPERTIES_AND_PRODUCTION_OF_RADISH_Raphanus_sativus_L_ON_LOAMY_SAND_SOIL
- Upadhyay, K., Dharmi, N., Sharma, P., Neupane, J. y Shrestha, J. (2020). Growth and yield responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to biochar. *Journal of Agricultural Science*, 2(31), 1-9. https://agrt.emu.ee/pdf/2020_2_upadhyay.pdf

- Upadhyay, K. Vista, S. y Khatri, B. (2017). Performance of potato influenced by biochar and irrigation scheduling in a pot trial in Khumaltar, Lalitpur. *National Potato Working Group Workshop*.
- Vignola, R., Watler, W., Vargas, A. y Morales, M. (2017). *Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de papa en Costa Rica*. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8214.pdf>
- Villanueva, R. (2017). *Manual del cultivo de papa para pequeños productores en la sierra norte del Perú*. Asociación Patay. <https://www.poderosa.com.pe/Content/descargas/libros/manual-del-cultivo-de-papa.pdf>
- Youseef, M. Al-Easily, I., Dalia, A. y Nawar, S. (2017). Impact of biochar addition on productivity and tubers quality of some potato cultivars under sandy soil conditions. *Egyptian Journal of Horticulture*, 44(2), 199-217.
- Zhou, Y., Qin, S., Verna, S., Sar, T., Sarsaiya, S., Ravindran, B., Liu, T., Sindhu, R., Kumar, P., Binod, P., Varjani, S., Singhnia, R., Zhang, Z., Kumar, M. (2021). Production and beneficial impact of biochar for environmental application: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 337, 1-14. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125451

5.4. Anexos

Anexo 1. Preparación de explantes



Explantes preparados para la siembra en diferentes sustratos



Preparación de sustratos en combinación para los tratamientos

Anexo 2. Siembra de explantes

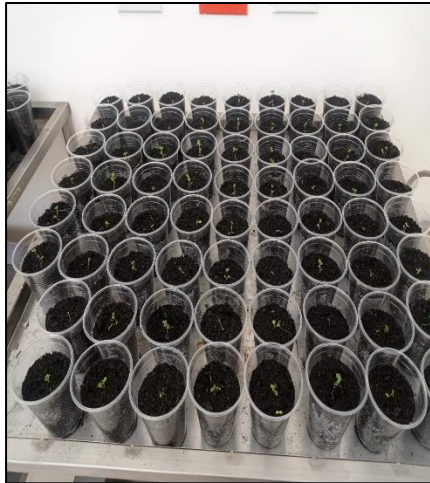


Corte de explantes



Proceso de siembra de explantes

Anexo 3. Crecimiento de los explantes



Tratamiento 1

Tratamiento 2



Tratamiento 3



Tratamiento 4



Tratamiento 5

Anexo 4. Medición del pH



Anexo 5. Análisis de la morfología de la planta



Longitud de la raíz



Cálculo del área foliar



Cálculo peso en fresco



Proceso para obtención de materia seca