

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

**Impacto del biochar en el pH del suelo y en el crecimiento del
apio (*Apium graveolens*) en el sector rural La Borreguera, San
Cristóbal, Galápagos**

Jade Mabel Pionce Tasipanta
Gestión Ambiental

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Licenciatura en Gestión Ambiental

Puerto Baquerizo Moreno, 21 de mayo de 2025

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Impacto del biochar en el pH del suelo y en el crecimiento del apio (*Apium graveolens*) en el sector rural La Borreguera, San Cristóbal, Galápagos

Jade Mabel Pionce Tasipanta

Nombre del profesor, Título académico

**Víctor Herrera, PhD
Camila Espinoza, Ingeniera Ambiental**

Puerto Baquerizo Moreno, 21 de mayo de 2025

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Jade Mabel Pionce Tasipanta

Código: 00326549

Cédula de identidad: 2000106514

Lugar y fecha: Puerto Baquerizo Moreno, 21 de mayo de 2025

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

Los suelos volcánicos de la isla San Cristóbal, en Galápagos, presentan limitaciones como acidez y baja disponibilidad de nutrientes, lo que dificulta la producción agrícola local y contribuye a una elevada dependencia de alimentos importados. Aunque el biochar ha demostrado efectos positivos en diversos contextos agrícolas, en el ámbito insular aún existe escasa información sobre su aplicación, lo que motivó esta investigación. Se evaluó el efecto del biochar sobre el crecimiento del apio (*Apium graveolens*) y el pH del suelo en el sector rural La Borreguera, mediante un ensayo con tres tratamientos (Control, Biochar 1 y Biochar 2) en parcelas de 5×4 metros. Se aplicaron 100 kg de biochar por parcela y se sembraron 120 plantas (40 por parcela). Cada 30 días se registraron la altura de la planta y el número de hojas, y al finalizar el ciclo se evaluaron el peso fresco y las características químicas del suelo. Las muestras se recolectaron al finalizar el ciclo mediante recorrido en zigzag. Los datos fueron analizados mediante ANOVA de dos factores para las variables de crecimiento y ANOVA de un factor con corrección de Welch para el peso fresco, con pruebas post-hoc de Tukey y Games-Howell. En altura, Biochar 1 y Biochar 2 superaron al control en 4,45 cm y 5,26 cm, respectivamente. En número de hojas, superaron al control en 6,54 y 10,56 hojas, y Biochar 2 también superó a Biochar 1 ($p = 0,007$). En peso fresco, ambos tratamientos con biochar duplicaron al control sin diferenciarse entre sí. Finalmente, el pH aumentó de 6,49 a 8,06; el carbono orgánico total se duplicó; la disponibilidad de macronutrientes mejoró, y disminuyó levemente el contenido de aluminio. Se concluyó que el biochar es una herramienta eficaz para mejorar la fertilidad del suelo y la productividad agrícola en las islas Galápagos.

Palabras clave: biochar, apio, pH del suelo, productividad agrícola, islas Galápagos.

ABSTRACT

The volcanic soils of San Cristóbal Island, in the Galápagos, present limitations such as acidity and low nutrient availability, which hinder local agricultural production and contribute to a high dependence on imported food. Although biochar has shown positive effects in various agricultural contexts, there is still limited information about its application in island environments, which motivated this research. The effect of biochar on celery (*Apium graveolens*) growth and soil pH was evaluated in the rural area of La Borreguera, through an experiment with three treatments (Control, Biochar 1, and Biochar 2) in 5×4 meter plots. A total of 100 kg of biochar was applied per plot, and 120 plants were sown (40 per plot). Plant height and number of leaves were recorded every 30 days, and at the end of the cycle, fresh weight and soil chemical characteristics were evaluated. Soil samples were collected at the end of the cycle using a zigzag pattern. Data were analyzed using two-way ANOVA for growth variables and one-way ANOVA with Welch's correction for fresh weight, followed by Tukey and Games-Howell post-hoc tests. In terms of height, Biochar 1 and Biochar 2 exceeded the control by 4.45 cm and 5.26 cm, respectively. Regarding the number of leaves, they surpassed the control by 6.54 and 10.56 leaves, and Biochar 2 also outperformed Biochar 1 ($p = 0.007$). In fresh weight, both biochar treatments doubled the control, with no difference between them. Finally, soil pH increased from 6.49 to 8.06; total organic carbon doubled; macronutrient availability improved; and aluminum content slightly decreased. It was concluded that biochar is an effective tool to improve soil fertility and agricultural productivity in the Galápagos Islands.

Key words: biochar, celery, soil pH, agricultural productivity, Galápagos Islands.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	12
1.1	Definiciones claves.....	15
1.2	Antecedentes.....	17
1.3	Justificación.....	18
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	Objetivo general	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3	METODOLOGÍA	20
3.1	Área de estudio.....	20
3.2	Recolección de datos	21
3.3	Observaciones del crecimiento del apio (<i>Apium graveolens</i>)	24
3.4	Método de muestreo del suelo	27
3.5	Tratamiento estadístico de los datos.....	29
4	RESULTADOS.....	32
5	DISCUSIÓN.....	41
6	CONCLUSIÓN	46
7	RECOMENDACIONES	47
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
9	ANEXOS.....	53
9.1	Anexo A. Mediciones de la altura de las plantas de apio (<i>Apium graveolens</i>) por tratamiento y fecha	53

9.1.1	Altura de las plantas - medición del 1 de noviembre de 2024.	53
9.1.2	Altura de las plantas de apio - medición 30 de noviembre de 2024.....	54
9.1.3	Altura de las plantas de apio - medición 30 de diciembre de 2024.....	55
9.1.4	Altura de las plantas de apio - medición 29 de enero de 2025.....	56
9.2	Anexo B. Mediciones del número total de hojas por planta de apio (<i>A. graveolens</i>) por tratamiento y fecha.....	57
9.2.1	Número total de hojas por planta de apio - medición del 1 de noviembre de 2024.	57
9.2.2	Número total de hojas por planta de apio - medición del 30 de noviembre de 2024.	58
9.2.3	Número total de hojas por planta de apio - medición del 30 de diciembre de 2024.	59
9.2.4	Número total de hojas por planta de apio - medición del 29 de enero de 2025.	60
9.3	Anexo C. Peso fresco de las plantas de apio por tratamiento y fecha de cosecha.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades químicas del biochar y su impacto en el suelo. Elaborado a partir de Khan et al. (2024).....	15
Tabla 2. Análisis de Varianza (ANOVA) para la altura de las plantas (cm)	32
Tabla 3. Comparaciones múltiples de Tukey para la altura de las plantas de apio (cm) entre tratamientos	33
Tabla 4. Resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) para el impacto de los tratamientos (Control, Biochar1 y Biochar2) sobre el número de hojas.....	34
Tabla 5. Comparaciones múltiples de Tukey para el número de hojas entre tratamientos	35
Tabla 6. Resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor Welch para el impacto de los tratamientos (Control, Biochar 1 y Biochar 2) sobre el peso de las plantas de apio	37
Tabla 7. Comparación entre tratamientos para el peso fresco (g) de plantas de apio según la prueba de Games-Howell.....	37
Tabla 8. Comparación de los parámetros químicos del suelo entre el tratamiento Control y el tratamiento con Biochar. Datos obtenidos del análisis de suelo realizado por Core Lab de Ciencias Ambientales, 2025	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio. A) Vista general de la isla San Cristóbal, Galápagos. B) Se muestra la Finca Teresita, ubicada a aproximadamente 8,2 km de Puerto Baquerizo Moreno	20
Figura 2. Parcela experimental delimitada en donde se aplicaron tratamientos con biochar y se estableció una parcela de control	22
Figura 3. Desarrollo inicial del apio (<i>A. graveolens</i>): (A) crecimiento en semillero y (B) preparación para el trasplante.....	24
Figura 4. Desarrollo del apio (<i>A. graveolens</i>) en cuatro fechas: (A) 1 de noviembre de 2024, (B) 30 de noviembre de 2024, (C) 30 de diciembre de 2024 y (D) 29 de enero de 2025	26
Figura 5. Deshierbe manual en la parcela de apio.....	26
Figura 6. Medición del peso fresco de las plantas utilizando una balanza, seleccionando el 50 % más representativo de los tratamientos: (A) con biochar y (B) sin biochar	27
Figura 7. Muestreo de suelo en zigzag para análisis de laboratorio. Las trayectorias de la piola fueron remarcadas manualmente para facilitar su visualización.....	28
Figura 8. Pesaje de las muestras de suelo: (A) Suelo 1 (control) y (B) Suelo 2 (biochar).....	28
Figura 9. Riego manual con manguera en las parcelas	29
Figura 10. Evolución de la altura del apio a lo largo del tiempo para los tratamientos Control, Biochar 1 y Biochar 2. Los puntos representan el valor promedio de 40 plantas por tratamiento en cada fecha de medición. Las barras de error corresponden a ± 1 desviación estándar (DE).....	34
Figura 11. Evolución del número total de hojas por planta durante el periodo experimental para los tratamientos Control, Biochar 1 y Biochar 2. Los puntos representan el promedio de 40 plantas por tratamiento en cada fecha de medición. Las barras de error corresponden a ± 1 desviación estándar (DE).	36

Figura 12. Distribución del peso fresco de las plantas de apio según el tratamiento (Control, Biochar 1 y Biochar 2), al final del ciclo de cultivo. El gráfico de cajas muestra la mediana (línea central), el rango intercuartílico (caja), los valores mínimos y máximos sin considerar atípicos (bigotes) y los valores atípicos (puntos)	38
Figura 13. Comparación de suelos: (A) suelo con biochar y (B) suelo control	40

1 INTRODUCCIÓN

La agricultura ha sido, desde tiempos ancestrales, una actividad fundamental para la subsistencia humana y el desarrollo de las sociedades. En zonas con ecosistemas frágiles como las islas Galápagos, consideradas un sistema socioecológico único, la agricultura local cumple un papel clave al proveer alimentos y disminuir la dependencia de importaciones, lo que contribuye a mitigar impactos ambientales asociados, como la introducción de especies invasoras y las emisiones de CO₂ derivadas del transporte de productos (Sampedro et al., 2020). No obstante, este sector enfrenta desafíos específicos debido a las condiciones ambientales del archipiélago y a las exigencias del régimen de conservación, que requieren prácticas agrícolas alineadas con los objetivos de sostenibilidad. Esta situación ha planteado un reto para la adopción de tecnologías adecuadas al contexto insular, lo que ha llevado a niveles de productividad bajos y pérdidas económicas (Barrera et al., 2021).

En las islas Galápagos, solo una pequeña parte del territorio se destina a actividades humanas, ya que cerca del 97 % está protegido por el Parque Nacional. De estas tierras, cerca de 19.000 hectáreas se utilizan para actividades agrícolas y ganaderas (Barrera et al., 2021). Desde la década de 1960, la agricultura ha tenido un crecimiento progresivo en el archipiélago, especialmente en las islas Santa Cruz y San Cristóbal (Gerzabek et al., 2019). Según el censo del Consejo de Gobierno del Régimen Especial de Galápagos, en 2014 se registraron 755 Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) activas en todo el archipiélago, concentradas principalmente en estas dos islas (Barrera et al., 2021).

La producción agrícola actual se orienta al abastecimiento local y está compuesta por una diversidad de cultivos. Entre los más destacados se encuentran frutales como café, cítricos (naranja, mandarina, limón), plátano, banano y piña; granos como maíz y fréjol; raíces y rizomas como yuca; así como hortalizas como tomate, pimiento, lechuga, repollo y apio (Barrera et al., 2021; Viteri & Vergara Sobarzo, 2017). El café, además de cultivarse en

huertos familiares, es el único producto agrícola de la zona que ha sido exportado, especialmente a Japón (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2019). Por su parte, las hortalizas, aunque no se exportan, son muy importantes para la alimentación local y para el sustento de las familias agricultoras.

En la isla San Cristóbal, donde aproximadamente el 17,7 % del territorio se dedica a actividades agrícolas, los suelos presentan múltiples limitaciones físicas y químicas que afectan su fertilidad (Lasso & Espinosa, 2022). Se han registrado niveles de pH muy bajos (promedio de 5,6), lo que favorece la toxicidad del aluminio y reduce la disponibilidad de nutrientes como el fósforo. Además, el suelo tiene poca capacidad para retener nutrientes esenciales como calcio, magnesio, potasio y sodio, debido a una baja proporción de estos elementos y a su continua pérdida por lixiviación. También se han identificado bajos niveles de carbono orgánico y nitrógeno, elementos fundamentales para el ciclo natural de nutrientes (Balón Rodríguez & Vera Balladares, 2018; Strahlhofer et al., 2021). En cuanto a sus propiedades físicas, predominan suelos arcillosos con una densidad relativamente alta, lo que puede dificultar la entrada de aire al suelo y el desarrollo de las raíces (Balón Rodríguez & Vera Balladares, 2018; Strahlhofer et al., 2021). A pesar de la variedad de cultivos en las islas Galápagos, la baja productividad de los sistemas agrícolas ha llevado a una considerable dependencia de alimentos importados, que representan hasta el 75% del suministro del archipiélago (Barrera et al., 2021). Lo mencionado justifica la implementación de prácticas sostenibles para mejorar la calidad del suelo en las zonas agrícolas de la isla.

Para enfrentar estas limitaciones del suelo, se han propuesto distintas estrategias para evitar su deterioro y mejorar su capacidad de producción agrícola. Entre ellas, el biochar ha ganado relevancia como una opción viable para restaurar suelos degradados. Su aplicación ha demostrado ser eficaz para aumentar la retención de agua, fortalecer la estructura del suelo y regular su pH, lo que puede contribuir a mejorar la productividad agrícola. En el contexto de

las islas Galápagos, la Fundación Charles Darwin ha incorporado el biochar en ensayos de restauración ecológica en islas como Española, y ha propuesto nuevas aplicaciones en South Plaza y Baltra. Aunque los resultados aún están en desarrollo, esta tecnología se considera prometedora para mejorar la fertilidad del suelo y favorecer la supervivencia de especies nativas como *Opuntia* (Jaramillo Díaz et al., 2024).

En línea con estas iniciativas, el presente estudio evaluará el efecto del biochar sobre el pH del suelo y su relación con el desarrollo del cultivo de apio (*Apium graveolens*) en el sector rural La Borreguera, San Cristóbal. El apio fue seleccionado por su sensibilidad a las condiciones del suelo, especialmente al pH, y por su ciclo corto, lo que permite observar los efectos del tratamiento en un tiempo reducido. Se trata de una planta herbácea de ciclo bianual que, en cultivos hortícolas, puede completar su desarrollo en 60, 120 o 150 días.

Prefiere suelos bien drenados, con buena aireación, estructura porosa y un pH entre 6,8 y 7,2 (Del Pino, 2022; Morales Garcés, 2022). Sin embargo, se ha demostrado que el apio también puede crecer adecuadamente en suelos con pH de hasta 8,5, como se evidenció en condiciones controladas durante un ensayo experimental (Consentino et al., 2020), por lo que se considera un cultivo útil para monitorear variaciones en el pH del suelo tras la aplicación de biochar.

Además, tolera ciertos niveles de salinidad y desarrolla su crecimiento en tres fases: germinación, desarrollo vegetativo y floración (Del Pino, 2022). Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo evaluar el uso del biochar como enmienda en suelos ligeramente ácidos, analizando su efecto en el pH del suelo y en el crecimiento del apio. Los resultados obtenidos podrían contribuir a promover prácticas agrícolas más sostenibles en las islas Galápagos, orientadas a la recuperación de la fertilidad y la eficiencia productiva en zonas agrícolas afectadas por la acidez.

1.1 Definiciones claves

Biochar: El biochar es un material carbonoso, rico en carbono, que se produce mediante la pirólisis de biomasa (residuos de plantas, desechos agrícolas, madera, etc.) en condiciones controladas y con limitación de oxígeno en la atmósfera de reacción. Este proceso genera un material altamente poroso, con gran capacidad de adsorción y retención de nutrientes, que al ser aplicado al suelo mejora su estructura, reduce la compactación, aumenta la capacidad de intercambio catiónico y beneficia la fertilidad (ver Tabla 1) (Khan et al., 2024).

Tabla 1. Propiedades químicas del biochar y su impacto en el suelo. Elaborado a partir de Khan et al. (2024)

Propiedad química	Descripción
pH y alcalinidad	Debido a su alta alcalinidad, puede aumentar el pH del suelo y ayuda a neutralizar suelos ácidos
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Aumenta la CIC del suelo gracias a su carga superficial negativa y su reacción con el agua y el oxígeno.
Liberación de cationes	Libera nutrientes como K, Mg, Ca y Na desde su estructura al suelo, mejorando su disponibilidad para las plantas.
Mitigación de salinidad y sodicidad	Regula el equilibrio de iones en suelos salinos o sódicos, ayudando a reducir el estrés salino y mejorar la salud del suelo.
Presencia de grupos funcionales básicos	Contiene grupos funcionales como carboxilos e hidroxilos, permitiendo la adsorción de metales pesados y contaminantes.

pH del suelo: El pH del suelo es una propiedad fundamental que mide su acidez o alcalinidad y que influye en la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas, afectando su crecimiento, desarrollo y salud. Se mide en una escala de 0 a 14, donde valores menores a 7 indican acidez, 7 es neutro y mayores a 7 representan alcalinidad. La mayoría de los suelos agrícolas tienen un pH entre 4 y 8, aunque puede variar por factores geológicos, climáticos y antropogénicos. El pH regula la solubilidad de los nutrientes y la actividad microbiana, impactando directamente la fertilidad y la productividad agrícola (Neina, 2019).

Productividad agrícola: La productividad agrícola es la relación entre la producción obtenida y los insumos utilizados en un sistema agrícola. Este indicador mide la eficiencia del sistema y está influenciado por factores como la fertilidad del suelo, las prácticas agronómicas, las condiciones climáticas, la tecnología y el capital. La productividad puede ser parcial (un solo insumo) o total (todos los insumos) (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018).

Biomasa: La biomasa, también conocida como recurso biorrenovable, es un material orgánico de origen biológico reciente, como plantas cultivadas, residuos agrícolas, algas y otros materiales provenientes de la biosfera. Se diferencia de los combustibles fósiles (como el petróleo, el gas natural o el carbón), que se formaron hace millones de años a partir de organismos enterrados, mientras que la biomasa se regenera constantemente y puede utilizarse por generaciones futuras. Esta materia almacena energía solar en forma de enlaces químicos, los cuales pueden utilizarse como fuente de carbono y energía renovable para la producción de bioenergía y productos biobasados (Brown & Brown, 2014).

Pirólisis: La pirólisis es un proceso térmico en el que la biomasa se calienta entre 200 y 900 °C en ausencia o con una marcada escasez de oxígeno. Este proceso descompone la biomasa, evitando la combustión, y genera tres productos principales: bio-aceite (bio-oil, constituido por compuestos que se condensan a temperatura ambiente), gas de síntesis (gases no

condensables en condiciones atmosféricas normales) y biochar (producto sólido) (Salih, 2021).

1.2 Antecedentes

Fiallos-Ortega et al. (2015) realizaron un estudio sobre la restauración ecológica del suelo mediante la aplicación de biochar en la provincia de Chimborazo, Ecuador, evaluando su efecto en la producción de alfalfa (*Medicago sativa*). Los resultados mostraron que la aplicación de biochar mejoró significativamente las características del suelo, incluyendo el contenido de carbono orgánico y el pH del suelo, lo que generó condiciones más favorables para el desarrollo del cultivo. Asimismo, se registró un aumento en la altura de la planta y en la cantidad de hojas por tallo, variables directamente relacionados con el crecimiento y el rendimiento de la alfalfa. Estos resultados reflejan que la aplicación de biochar no solo contribuye a la restauración de suelos degradados, sino que también genera condiciones favorables para el crecimiento de las plantas.

Por su parte, Curaqueo et al. (2014) evaluaron los efectos del biochar en dos suelos volcánicos del sur de Chile, un Inceptisol y un Utisol, utilizando dosis de hasta 20 Mg/ha en el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare*). Los resultados mostraron que la aplicación de biochar mejoró significativamente el pH del suelo, la capacidad de intercambio catiónico, la estructura del suelo, la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes esenciales. Además, se registraron incrementos en la altura de las plantas y en el rendimiento del grano en ambos tipos de suelo, en comparación con las parcelas sin biochar. Se concluye que el biochar presenta un alto potencial para mejorar suelos volcánicos con limitaciones edáficas y que podría aplicarse en zonas agrícolas con suelos deteriorados que limitan el rendimiento de los cultivos.

Además de los estudios realizados en Ecuador y Chile, también se ha reunido información a nivel internacional sobre el uso del biochar en la agricultura. Un análisis global reciente que

recopiló resultados de 891 experimentos en 37 países confirmó los beneficios del biochar en diversos contextos agrícolas. Según Li et al. (2024), el uso de biochar elevó el carbono orgánico del suelo entre un 12 % y un 102 %, y mejoró variables clave como el pH, el nitrógeno disponible, la actividad microbiana y la capacidad de retención de nutrientes. En términos de rendimiento, los incrementos oscilaron entre un 5 % y un 51 %, dependiendo del tipo de suelo, el clima y las características del biochar aplicado. Estas mejoras se atribuyen principalmente a sus propiedades físicas y químicas, las cuales permiten una mayor retención de agua y nutrientes y una reducción de la pérdida de nitrógeno. En este sentido, se espera que su aplicación en los suelos de San Cristóbal genere beneficios similares, particularmente en cultivos como el apio.

1.3 Justificación

En los últimos años, el biochar ha sido ampliamente investigado por sus beneficios en la mejora de las propiedades del suelo, especialmente en contextos agrícolas con suelos ácidos o degradados. Sin embargo, en la isla San Cristóbal, Galápagos, aún no se cuenta con estudios experimentales que evalúen sus efectos en el contexto agrícola de la isla. Esta falta de evidencia local limita la toma de decisiones sobre el uso de esta enmienda en suelos volcánicos, donde los niveles de acidez y la pérdida de nutrientes representan desafíos para la productividad y contribuyen a una creciente dependencia de productos importados. Por ello, el presente estudio busca aportar conocimiento específico sobre el uso del biochar en un sistema productivo de San Cristóbal, evaluando tanto el comportamiento del suelo como la respuesta de un cultivo representativo.

En este marco, el apio (*Apium graveolens*) fue seleccionado como cultivo modelo porque responde fácilmente a cambios en las condiciones del suelo, especialmente al pH, y por su ciclo de vida corto, lo que facilita observar los efectos del biochar en un periodo reducido.

Además, se trata de un alimento de consumo frecuente en las islas Galápagos y forma parte de

la producción de hortalizas, por lo que su estudio puede aportar soluciones útiles para los agricultores locales. Evaluar este cultivo bajo condiciones específicas de la isla permitirá generar información aplicable que contribuya a mejorar el manejo del suelo. Asimismo, el estudio podría fortalecer la transición hacia prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes en territorios con limitaciones edáficas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Determinar los efectos del biochar en el pH del suelo y en el desarrollo del cultivo de apio (*Apium graveolens*) en el sector rural La Borreguera, San Cristóbal, Galápagos.

2.2 Objetivos específicos

1. Comparar el crecimiento del cultivo de apio con y sin biochar, considerando variables como altura de las plantas, número de hojas y peso fresco.
2. Analizar el efecto del biochar en la variación del pH del suelo tras su aplicación en el sector rural La Borreguera.

3 METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio.

El estudio se llevó a cabo en la Finca Teresita, ubicada en la parte alta de la Isla San Cristóbal, Galápagos (Figura 1), específicamente en el sector conocido como "La Borreguera" (coordenadas: 0°54'06"S, 89°33'06"O; altitud: 335 m. s. n. m.). Esta zona se encuentra en una altitud entre 300 y 410 m. s. n. m., caracterizada por precipitaciones anuales de 800 a 1,200 mm y temperaturas que oscilan entre 21 y 22 °C. Los suelos en la zona son de tipo Alfisol con características vérticas (*Vertic Hapludalfs*), los cuales presentan una fertilidad natural relativamente alta, pero con limitaciones en la retención de nutrientes y problemas de drenaje debido a su textura arcillosa (Lasso & Espinosa, 2022).



Figura 1. Ubicación del área de estudio. A) Vista general de la isla San Cristóbal, Galápagos.

B) Se muestra la Finca Teresita, ubicada a aproximadamente 8,2 km de Puerto Baquerizo Moreno

Entre los principales cultivos que se producen en la finca se encuentran: plátano (*Musa × paradisiaca* L.), papaya (*Carica papaya*), yuca (*Manihot esculenta*), cebolla blanca (*Allium fistulosum*), cilantro (*Coriandrum sativum*), apio (*Apium graveolens*), maíz (*Zea mays* L.), tomate (*Solanum lycopersicum*), naranja (*Citrus sinensis*), piña (*Ananas comosus* L.), rábano (*Raphanus sativus*) y zapallo (*Cucurbita moschata*). Esta diversidad agrícola evidencia la importancia del sector productivo en la zona y su potencial para implementar estrategias de manejo sostenible como el uso de biochar.

3.2 Recolección de datos

El experimento se llevó a cabo en un terreno plano de 15 m × 4 m, dividido en tres parcelas de 5 m × 4 m. Dos de estas parcelas fueron tratadas con biochar y una se mantuvo como control. En septiembre de 2024, se aplicaron 100 kg de biochar en cada parcela tratada, lo que equivale a una dosis de 5 kg/m² (50 t/ha) (Figura 2). Esta cantidad fue determinada con base en la literatura científica. Por ejemplo, en suelos ácidos de Madagascar, la aplicación de entre 10 y 50 t/ha de biochar mejoró el crecimiento y rendimiento de cultivos como maíz y fréjol (Khan et al., 2024). Aunque la dosis utilizada en este estudio supera el promedio global reportado para aplicaciones sin fertilizantes (27,42 t/ha), se encuentra dentro del amplio rango de dosis utilizadas en investigaciones previas, que va desde 0,04 hasta 900 t/ha (Li et al., 2024). Por tanto, la dosis empleada en este estudio es adecuada para el contexto experimental, ya que permite observar efectos medibles en un área reducida y en un periodo limitado.

El biochar utilizado fue producido a partir de chips de madera en una unidad de procesamiento de biochar (Biochar Processing Unit) de ARTi, con una temperatura representativa de reactor de 450°C. Este tipo de biochar ha demostrado mejorar la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes en suelos agrícolas. Sin embargo, los efectos del biochar pueden variar según el tipo de biomasa, la temperatura de pirólisis y las condiciones del suelo donde se aplica, por lo que es necesario evaluarlo bajo condiciones locales

específicas. En este estudio, se utilizó bajo condiciones reales de campo para observar sus efectos en un contexto agroecológico propio de la isla San Cristóbal.

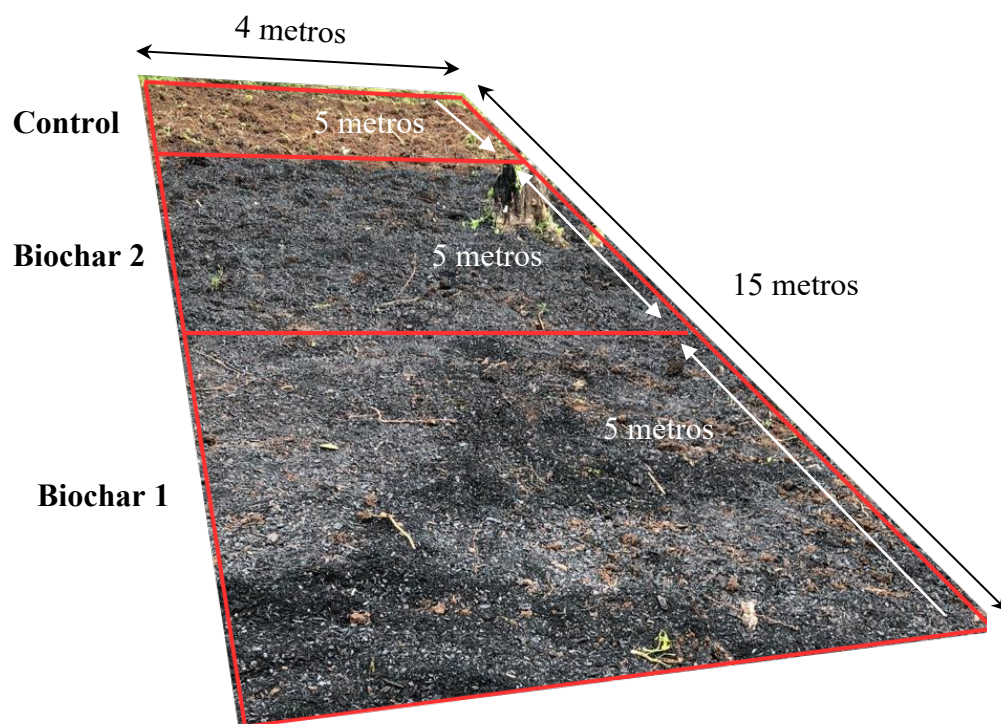


Figura 2. Parcela experimental delimitada en donde se aplicaron tratamientos con biochar y se estableció una parcela de control

Dos meses después de la aplicación del biochar, se sembró el apio (*Apium graveolens*), permitiendo un período de integración del material en el suelo antes del establecimiento del cultivo. Esta espera tuvo como objetivo asegurar que el biochar se incorporara adecuadamente al suelo antes de la siembra, favoreciendo la estabilización de sus propiedades y su interacción con los nutrientes y microorganismos del suelo. La integración del biochar en el suelo no ocurre de manera inmediata, sino que pasa por tres fases: disolución (1-3 semanas), desarrollo de superficie reactiva (1-6 meses) y envejecimiento (>6 meses) (Joseph et al., 2021). Durante este tiempo, el biochar desarrolla superficies activas que pueden mejorar la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes para el cultivo. No obstante, debido a la duración del proyecto, se optó por un tiempo de espera de dos meses, lo que permitió evaluar los efectos iniciales del biochar sin comprometer el cronograma experimental.

La siembra de semillas de apio (*A. graveolens*) se realizó el 20 de septiembre de 2024 en semilleros ubicados en el sector rural La Borreguera. Las semillas se distribuyeron de manera uniforme y se cubrieron ligeramente con una capa fina de sustrato. Durante los primeros 15 días, los semilleros se mantuvieron cubiertos con plástico transparente para conservar la humedad y favorecer la germinación. Transcurrido ese periodo, se retiró la cobertura y se continuó con un riego diario por la mañana, así como con una exposición controlada a la luz solar (Figura 3A). Finalmente, después de 50 días, las plántulas alcanzaron el tamaño adecuado para el trasplante (Figura 3B).

El trasplante se realizó en noviembre de 2024, sembrándose 120 plantas distribuidas en 40 plantas por parcela. En ese momento, la gran mayoría de las plántulas tenían alturas entre 10 y 12 cm, rango recomendado para el trasplante según las guías técnicas del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA, 1986), aunque solo cuatro plantas alcanzaron los 13 cm. El trasplante se realizó una vez que el suelo estuvo preparado y bajo condiciones de humedad adecuadas para evitar daños en las raíces, conforme a lo sugerido por la literatura especializada. El ciclo completo del cultivo, desde la siembra en semillero hasta la cosecha, duró 143 días, lo que se encuentra dentro del rango esperado para este cultivo. En este punto, las plantas habían alcanzado su desarrollo óptimo y estaban listas para la evaluación. Un tiempo de cultivo mayor habría llevado a la fase de floración, lo cual podría afectar la calidad y la comparación entre tratamientos.

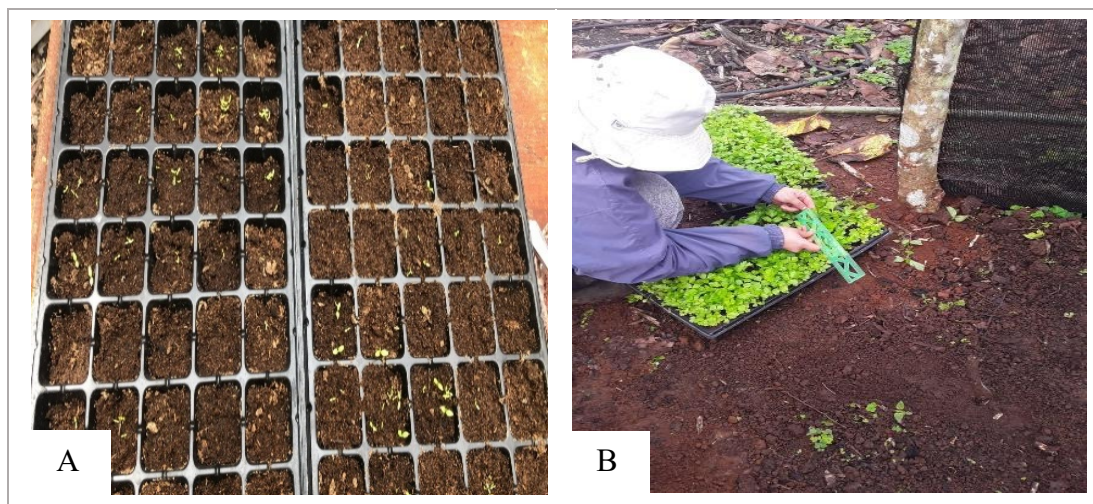


Figura 3. Desarrollo inicial del apio (*A. graveolens*): (A) crecimiento en semillero y (B) preparación para el trasplante

3.3 Observaciones del crecimiento del apio (*Apium graveolens*)

Durante el ciclo del cultivo, se realizaron observaciones periódicas centradas en el crecimiento y desarrollo del apio en el área de estudio (Figura 4). Estas incluyeron la medición de la altura de las plantas y del número de hojas, registradas cada 30 días según el cronograma de visitas de campo. Los datos correspondientes a estas mediciones se presentan en los Anexos A y B, respectivamente. Con base en esta información, se compararon las diferencias entre las plantas tratadas con biochar y las de la parcela control. Para llevar a cabo las mediciones, se utilizó una regla y una cinta métrica. Finalmente, para asegurar la validez de las observaciones, se realizó limpieza manual de malezas cuando fue necesario, evitando que interfirieran en el desarrollo de las plantas (Figura 5).



A



B



C





Figura 4. Desarrollo del apio (*A. graveolens*) en cuatro fechas: (A) 1 de noviembre de 2024, (B) 30 de noviembre de 2024, (C) 30 de diciembre de 2024 y (D) 29 de enero de 2025



Figura 5. Deshierbe manual en la parcela de apio

Al finalizar el ciclo de cultivo, se midió el peso fresco de las plantas en las parcelas tratadas con biochar (tratamientos 1 y 2) y en las parcelas con suelo control (Figura 6), utilizando una balanza. El propósito de esta medición fue evaluar el impacto de la aplicación de biochar sobre el rendimiento del cultivo. Para este análisis, se seleccionó un 50 % de las plantas con mejor desarrollo y salud general dentro de cada parcela, considerando criterios como altura, estado general y apariencia uniforme de tallos y hojas. En total, se evaluaron 20 plantas por parcela, seleccionadas según estos criterios, con el fin de asegurar que la muestra fuera

proporcional y representativa de los tratamientos. Los datos obtenidos para este análisis se encuentran detallados en el Anexo C.

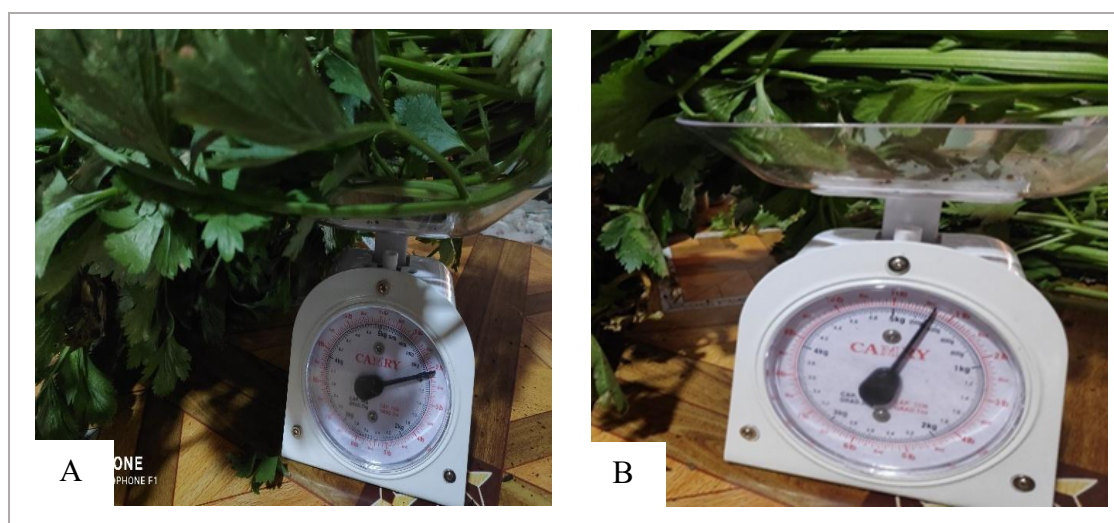


Figura 6. Medición del peso fresco de las plantas utilizando una balanza, seleccionando el 50 % más representativo de los tratamientos: (A) con biochar y (B) sin biochar

3.4 Método de muestreo del suelo

Para la recolección de muestras de suelo se utilizó el método de recorrido en zigzag (Figura 7), recomendado por su practicidad y facilidad de aplicación en terrenos planos y homogéneos (Mendoza & Espinoza, 2017). Para guiar el recorrido, se instalaron estacas y se utilizó una piola como referencia visual para delimitar las trayectorias de muestreo dentro del área experimental. Las submuestras se recolectaron caminando aproximadamente 8 a 10 pasos entre cada punto de muestreo, adaptando el procedimiento al tamaño reducido del terreno ($15\text{ m} \times 4\text{ m}$). Posteriormente, las submuestras se mezclaron homogéneamente en un recipiente limpio y se realizó el cuarteo hasta obtener 1 kg de suelo de la parcela de control y 1 kg combinado de las dos parcelas tratadas con biochar (Figura 8). El muestreo se efectuó a una profundidad de 0 a 20 cm, de acuerdo con el estándar recomendado para cultivos comerciales y con el objetivo de evaluar adecuadamente la zona donde se desarrolla el cultivo. Durante todo el proceso, se tomaron precauciones para evitar la contaminación de las

muestras, como el uso de guantes limpios, palas de muestreo y recipientes plásticos limpios.

No se realizó ningún tratamiento adicional al suelo previo al análisis de laboratorio.



Figura 7. Muestreo de suelo en zigzag para análisis de laboratorio. Las trayectorias de la piola fueron remarcadas manualmente para facilitar su visualización



Figura 8. Pesaje de las muestras de suelo: (A) Suelo 1 (control) y (B) Suelo 2 (biochar)

El riego se realizó de forma manual utilizando una manguera, asegurando una distribución uniforme del agua en las parcelas. Se aplicaron aproximadamente 40 litros de agua por día (Figura 9), manteniendo una humedad adecuada en el suelo para el desarrollo del cultivo. La frecuencia de riego fue diaria, suspendiéndose únicamente en días de lluvia para optimizar el uso del recurso hídrico. Esta estrategia se implementó debido a las condiciones de sequía que afectaron al archipiélago durante la temporada de cultivo. De acuerdo con EFE & Redacción

Primicias (2024), una severa sequía impactó al 70 % de los pastizales en las islas Galápagos, afectando a varios cultivos y obligando a implementar medidas de emergencia, como la entrega de agua dulce en islas como San Cristóbal e Isabela.



Figura 9. Riego manual con manguera en las parcelas

3.5 Tratamiento estadístico de los datos

El análisis estadístico de los datos experimentales se realizó utilizando el software Jamovi (versión 2.6.26). Jamovi es un programa de análisis estadístico de uso libre, diseñado para facilitar el procesamiento y análisis de datos científicos (De la Torre Rodríguez et al., 2023). Este software ofrece múltiples funcionalidades, incluyendo la importación y exportación de datos en diversos formatos, y ha sido ampliamente adoptado en la investigación científica por su facilidad de uso. En el presente estudio, Jamovi se empleó para realizar análisis de varianza (ANOVA) y pruebas post-hoc necesarias para la comparación entre tratamientos.

Con los datos recolectados de las mediciones periódicas de las variables de altura de planta y número de hojas, se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) de dos factores con interacción. El ANOVA factorial permite estudiar simultáneamente el efecto individual de cada factor sobre una variable dependiente y la posible interacción entre ellos, es decir, analizar si el efecto de un factor varía en función de los niveles del otro (Pardo et al., 2007).

En este caso, los factores considerados fueron los tratamientos (Control, Biochar 1 y Biochar

2) y las fechas de medición. Para identificar diferencias específicas entre grupos, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples Tukey HSD, adecuada cuando se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas (Lee & Lee, 2018). Adicionalmente, para facilitar la interpretación visual de los resultados, se elaboraron gráficos de líneas con marcadores utilizando Microsoft Excel, representando la altura promedio por tratamiento en cada fecha de medición. Esta metodología estadística permitió analizar de manera precisa la respuesta dinámica del cultivo de apio a lo largo del tiempo.

Para analizar el peso fresco de las plantas al final del ciclo de cultivo, se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) de un solo factor. Este análisis permite comparar las medias de varios grupos independientes para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas, incluso en condiciones de varianzas heterogéneas (López-Medina et al., 2023). En este caso, el único factor considerado fue el tratamiento aplicado (Control, Biochar 1 y Biochar 2), ya que la medición del peso fresco se realizó en una única fecha. Debido a que no se cumplió el supuesto de homogeneidad de varianzas entre tratamientos, es decir, que la dispersión de los datos fue diferente, se utilizó el ANOVA de Welch, un método que ajusta los grados de libertad y permite comparar medias entre grupos, aunque las varianzas no sean iguales (López-Medina et al., 2023). Posteriormente, dado que el ANOVA de Welch resultó significativo, se aplicó la prueba post-hoc de Games-Howell para identificar entre qué tratamientos existían diferencias específicas (López-Medina et al., 2023). Esta estrategia estadística permitió evaluar con precisión las diferencias en el peso fresco final de las plantas de apio. De manera complementaria, para la visualización de los datos de peso fresco, se elaboró un diagrama de cajas (boxplot) utilizando Jamovi, lo que permitió identificar y mostrar posibles valores atípicos de forma automatizada.

Para la interpretación de los resultados estadísticos, se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, siguiendo las prácticas comúnmente aceptadas en investigaciones agrícolas. Este

valor implica un 95 % de nivel de confianza, lo que significa que existe una probabilidad del 5 % de que las diferencias observadas sean producto del azar, es decir, un error tipo I (Sustainable Agriculture Research and Education (SARE), 2017). Además, el nivel de $\alpha = 0,05$ representa el umbral de significancia más utilizado en estudios agropecuarios y ecológicos, ya que proporciona un balance adecuado entre minimizar el riesgo de error tipo I y detectar efectos reales en los tratamientos evaluados (Antúñez et al., 2021).

Las muestras de suelo recolectadas en campo fueron enviadas al laboratorio Core Lab de Ciencias Ambientales de la Universidad San Francisco de Quito (USFQ), ubicado en la ciudad de Quito. En este laboratorio se realizaron los análisis físicos y químicos del suelo, siguiendo los protocolos estándar establecidos para la caracterización de propiedades edáficas relevantes. Entre los parámetros evaluados se incluyeron el pH, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la concentración de nutrientes esenciales.

4 RESULTADOS

Los resultados obtenidos del análisis de los datos se presentan a continuación, enfocándose en la evaluación del efecto de los tratamientos (Control, Biochar 1 y Biochar 2) y la fecha de medición sobre las variables de crecimiento del apio: altura de las plantas (Anexo A), número total de hojas por planta (Anexo B) y peso fresco (Anexo C). También se incluyen los resultados del análisis de suelo realizado al final del experimento, para evaluar cómo cambió la calidad del suelo tras aplicar biochar.

Primero, la Tabla 2 presenta los resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) donde se evaluó el efecto de los tratamientos (Control, Biochar 1 y Biochar 2) y las fechas de medición sobre la altura de las plantas de apio. El análisis estadístico mostró que hubo diferencias significativas en la altura según el tipo de tratamiento aplicado ($F = 57,4$; $gl = 2$; $p < 0,001$), según la fecha en que se midieron las plantas ($F = 1.684,6$; $gl = 3$; $p < 0,001$) y también en la interacción de ambos factores ($F = 28,1$; $gl = 6$; $p < 0,001$), lo que indica que el efecto del tratamiento varió a lo largo del tiempo.

Tabla 2. Análisis de Varianza (ANOVA) para la altura de las plantas (cm)

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Tratamiento	2.564	2	1.282,2	57,4	<0,001
Fecha	112.942	3	37.647,5	1.684,6	<0,001
Tratamiento * Fecha	3.763	6	627,1	28,1	<0,001
Residuos	10.459	468	22,3		

Nota. Se consideran diferencias significativas cuando $p < 0,05$. Valores de $p < 0,001$ indican alta significancia

Asimismo, la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (Tabla 3) indicó que las diferencias entre tratamientos se consideraron estadísticamente significativas cuando el valor p fue menor a 0,05. Las plantas tratadas con Biochar 1 y Biochar 2 presentaron alturas

significativamente mayores en comparación con el grupo control ($p < 0,001$). No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos Biochar 1 y Biochar 2 ($p = 0,280$), lo que sugiere que ambos tuvieron un efecto similar sobre la altura de las plantas de apio.

Tabla 3. Comparaciones múltiples de Tukey para la altura de las plantas de apio (cm) entre tratamientos

Comparación		Diferencia de Medias	EE	gl	t	p _{Tukey}
Tratamiento	Tratamiento					
Biochar 1	- Biochar 2	-0,806	0,529	468	-1,53	0,280
	- Control	4,450	0,529	468	8,42	<0,001
Biochar 2	- Control	5,256	0,529	468	9,95	<0,001

Nota. Las comparaciones se basan en medias marginales estimadas. Se consideran diferencias significativas cuando $p < 0,05$. Valores de $p < 0,001$ indican alta significancia

Para complementar, la Figura 10 muestra la evolución de la altura promedio de las plantas de apio a lo largo del tiempo para los tratamientos Control, Biochar 1 y Biochar 2. Se observó un incremento progresivo en la altura en todas las fechas de medición, con diferencias visibles entre tratamientos, especialmente en las etapas finales del experimento. Las plantas tratadas con Biochar 1 y Biochar 2 alcanzaron alturas mayores que las del grupo Control, siendo Biochar 2 el tratamiento con mayor efecto. Los puntos del gráfico representan los valores promedio de altura, y las barras de error muestran la desviación estándar, lo que permite visualizar la variabilidad entre plantas dentro de cada tratamiento. En los tratamientos con biochar se observó una menor dispersión, lo que sugiere un efecto más uniforme, mientras que en el control se evidenció una mayor variabilidad, lo cual refleja un crecimiento menos

regular entre plantas. Estas tendencias visuales coinciden con los resultados estadísticos previamente presentados (Tablas 2 y 3).

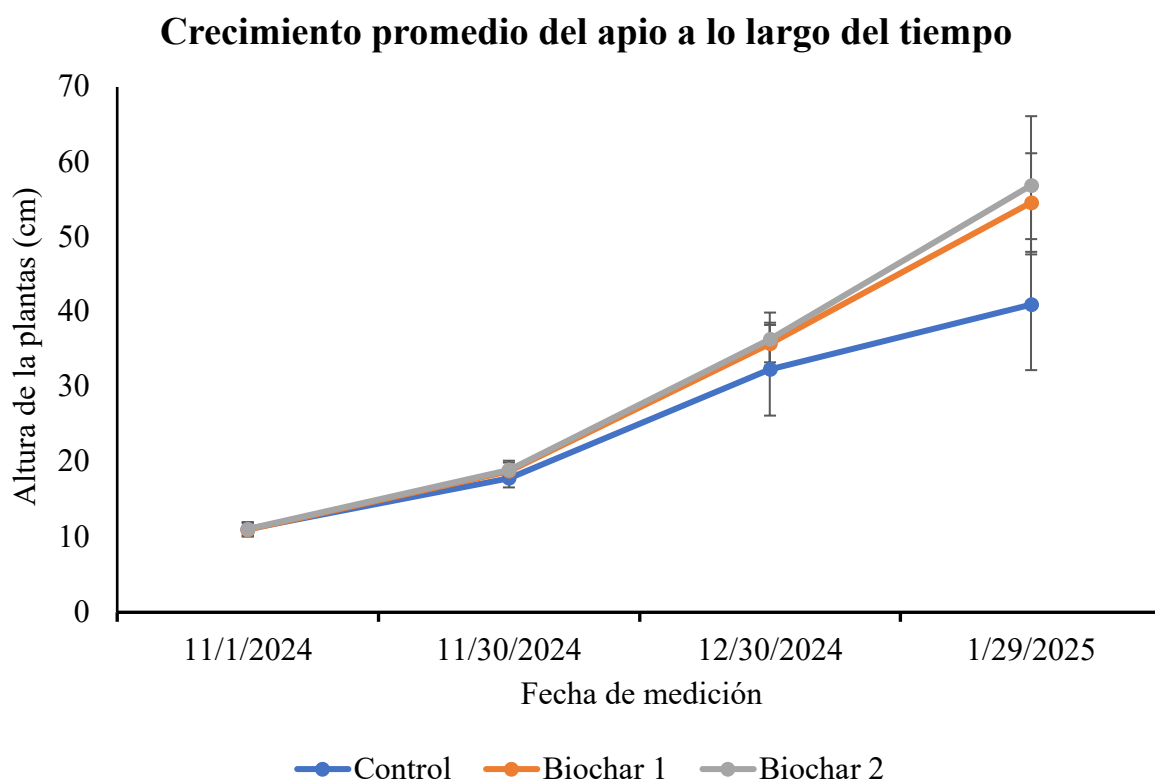


Figura 10. Evolución de la altura del apio a lo largo del tiempo para los tratamientos Control, Biochar 1 y Biochar 2. Los puntos representan el valor promedio de 40 plantas por tratamiento en cada fecha de medición. Las barras de error corresponden a ± 1 desviación estándar (DE)

Por otro lado, la Tabla 4 muestra los resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) para el número de hojas por planta de apio, considerando los efectos del tratamiento (Control, Biochar 1 y Biochar 2) y la fecha de medición. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas tanto entre tratamientos ($F = 32,5$; $gl = 2$; $p < 0,001$), como entre fechas ($F = 1.060,7$; $gl = 3$; $p < 0,001$), así como en la interacción entre ambos factores ($F = 12,6$; $gl = 6$; $p < 0,001$), lo que indica que la influencia de los tratamientos varió a lo largo del tiempo.

Tabla 4. Resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) para el impacto de los tratamientos (Control, Biochar1 y Biochar2) sobre el número de hojas

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Tratamiento	9.086	2	4543	32,5	<0,001
Fecha	444.761	3	148.254	1.060,7	<0,001
Tratamiento * Fecha	10.543	6	1.757	12,6	<0,001
Residuos	65.415	468	140		

Nota. Se consideran diferencias significativas cuando $p < 0,05$. Valores de $p < 0,001$ indican alta significancia

En adición, la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (Tabla 5) reveló diferencias estadísticamente significativas en el número de hojas por plantas entre tratamientos. Las plantas tratadas con Biochar 1 y Biochar 2 presentaron más hojas que las del grupo control ($p < 0,001$ en ambos casos). Además, se observó una diferencia significativa entre Biochar 1 y Biochar 2 ($p = 0,007$), indicando que Biochar 2 tuvo un mayor efecto; sin embargo, esta diferencia fue menos marcada que las observadas entre los tratamientos con biochar y el control.

Tabla 5. Comparaciones múltiples de Tukey para el número de hojas entre tratamientos

Comparación		Diferencia de Medias	EE	gl	t	p _{tukey}
Tratamiento	Tratamiento					
Biochar 1	- Biochar 2	-4,01	1,32	468	-3,04	0,007
	- Control	6,54	1,32	468	4,95	<0,001
Biochar 2	- Control	10,56	1,32	468	7,99	<0,001

Nota. Las comparaciones se basan en medias marginales estimadas. Se consideran diferencias significativas cuando $p < 0,05$. Valores de $p < 0,001$ indican alta significancia

Sumado a esto, la Figura 11 muestra la evolución del número total de hojas por planta de apio a lo largo del tiempo para los tratamientos Control, Biochar 1 y Biochar 2. Se observó un

aumento progresivo en todos los tratamientos, aunque con diferencias visibles entre ellos, especialmente en las fechas finales. Las plantas tratadas con Biochar 1 y Biochar 2 desarrollaron más hojas que las del grupo Control en las últimas mediciones, siendo Biochar 2 el tratamiento con mayor efecto. Los puntos representan los valores promedio y las barras de error muestran la desviación estándar, lo que permite apreciar la variabilidad entre plantas dentro de cada tratamiento. En los tratamientos con biochar se observó una menor dispersión, lo que sugiere una respuesta más uniforme y consistente. En cambio, en el tratamiento control hubo mayor variación entre plantas, lo que indica que su crecimiento fue más irregular y menos confiable para fines productivos. Estas tendencias visuales coinciden con los resultados estadísticos previamente presentados (Tablas 4 y 5).

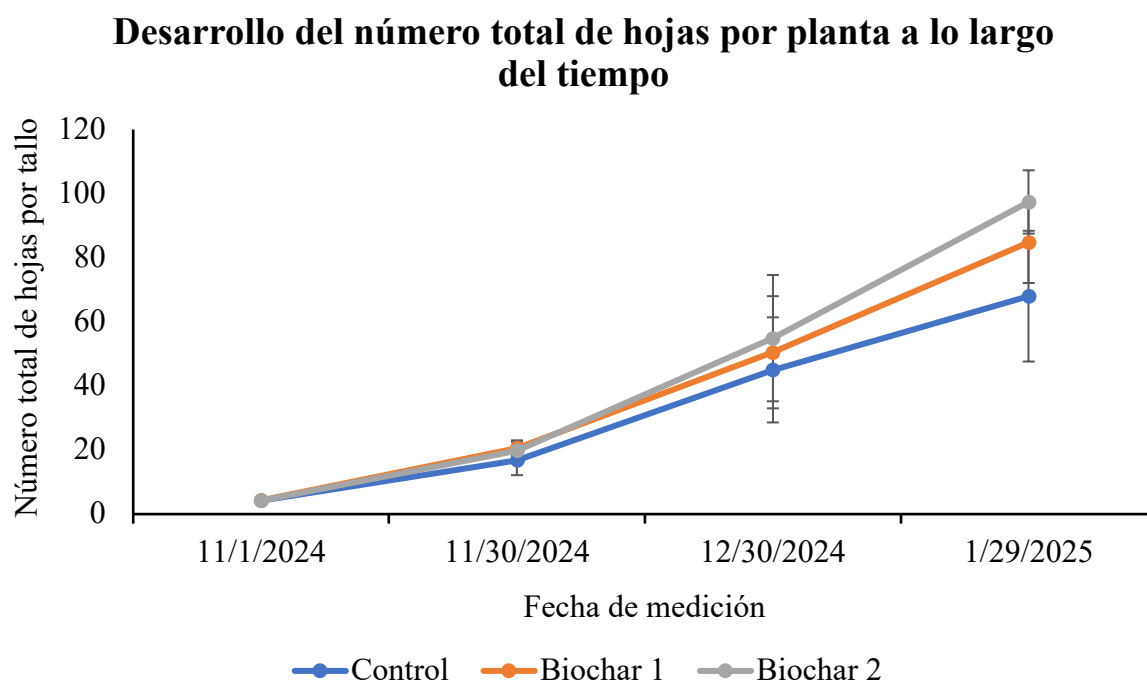


Figura 11. Evolución del número total de hojas por planta durante el periodo experimental para los tratamientos Control, Biochar 1 y Biochar 2. Los puntos representan el promedio de 40 plantas por tratamiento en cada fecha de medición. Las barras de error corresponden a ± 1 desviación estándar (DE)

Por otro lado, se evaluó el efecto de los tratamientos (Control, Biochar 1 y Biochar 2) sobre el peso fresco de las plantas de apio. El análisis de varianza de un factor (Welch) (Tabla 6) mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($F = 84,9$; $gl_1 = 2$; $gl_2 = 29,6$; $p < 0,001$). El promedio de peso fresco fue superior en ambos tratamientos con biochar, en comparación con el control.

Tabla 6. Resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor Welch para el impacto de los tratamientos (Control, Biochar 1 y Biochar 2) sobre el peso de las plantas de apio

	F	gl1	gl2	p
Peso fresco	84,9	2	29,6	<0,001

Nota. Se consideran diferencias significativas cuando $p < 0,05$. Valores de $p < 0,001$ indican alta significancia

Luego del ANOVA, se realizaron comparaciones múltiples mediante la prueba de Games-Howell (Tabla 7). Los resultados indicaron que tanto Biochar 1 como Biochar 2 generaron un mayor peso fresco en comparación con el grupo control ($p < 0,001$). No se observaron diferencias significativas entre ambos tratamientos con biochar ($p = 0,863$), lo que sugiere que produjeron efectos similares sobre esta variable.

Tabla 7. Comparación entre tratamientos para el peso fresco (g) de plantas de apio según la prueba de Games-Howell

Comparación	Diferencia de medias	Valor de p	Significancia
Biochar 1 vs Biochar 2	-41,3	0,863	ns
Biochar 1 vs Control	552	<0,001	***
Biochar 2 vs Control	593	<0,001	***

Nota. Se consideran diferencias significativas cuando $p < 0,05$. *** = $p < 0,001$; ns = no significativa

A su vez, la Figura 12 muestra la distribución del peso fresco de las plantas de apio según el tratamiento aplicado. En cada caja, la línea central representó la mediana, que fue más baja en el grupo Control y notablemente mayor en los tratamientos con biochar. La altura de las cajas fue mayor en los tratamientos con biochar, lo que reflejó una mayor dispersión en los valores de peso fresco. Asimismo, las líneas que salen de las cajas, llamadas bigotes, muestran hasta dónde llegan los valores sin ser considerados extremos. En Biochar 1 y Biochar 2 se observaron dos puntos por fuera de los bigotes, los cuales correspondieron a valores atípicos registrados en plantas que presentaron pesos considerablemente mayores al resto. En general, el gráfico evidenció que los tratamientos con biochar no solo aumentaron el peso fresco promedio, sino que también generaron una mayor dispersión en los resultados.

Distribución del peso fresco por tratamiento

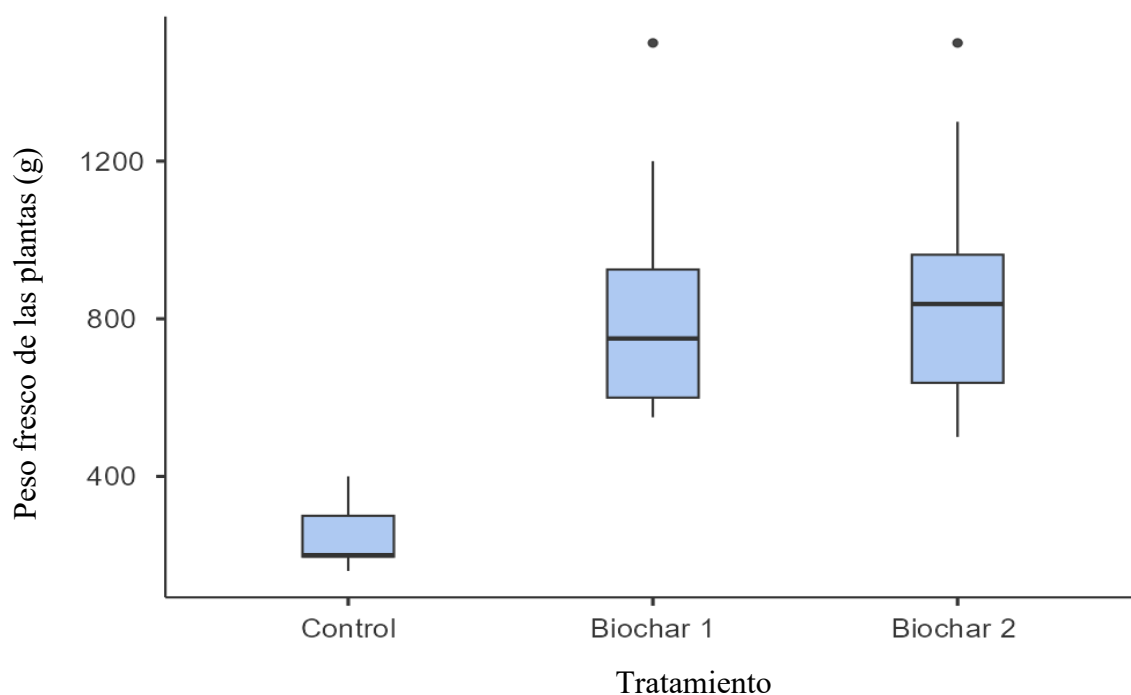


Figura 12. Distribución del peso fresco de las plantas de apio según el tratamiento (Control, Biochar 1 y Biochar 2), al final del ciclo de cultivo. El gráfico de cajas muestra la mediana

(línea central), el rango intercuartílico (caja), los valores mínimos y máximos sin considerar atípicos (bigotes) y los valores atípicos (puntos)

Finalmente, el análisis de las muestras de suelo reveló diferencias en el pH entre los tratamientos evaluados (Tabla 8). El pH del suelo en la parcela de control fue de 6,49, mientras que en la parcela tratada con biochar se observó un pH de 8,06. Esto indica un incremento en la alcalinidad del suelo tras la aplicación del biochar.

Además, se evaluaron otras características químicas del suelo que complementan la información sobre las condiciones de cada tratamiento. Se encontró que el contenido de carbono orgánico total (TOC) fue mayor en el suelo tratado con biochar (12,11 %) en comparación con el control (6,23 %). Asimismo, el contenido de nitrógeno total presentó un ligero aumento, pasando de 0,56 % en el control a 0,62 % en el suelo con biochar.

En cuanto a los elementos presentes en el suelo, se observó un incremento en los niveles de fósforo (P), magnesio (Mg), sodio (Na), calcio (Ca) y potasio (K) en el suelo tratado con biochar en comparación con el control. Por el contrario, el contenido de hierro (Fe) y aluminio (Al) fue menor en la parcela tratada con biochar.

Tabla 8. Comparación de los parámetros químicos del suelo entre el tratamiento Control y el tratamiento con Biochar. Datos obtenidos del análisis de suelo realizado por Core Lab de Ciencias Ambientales, 2025

Parámetro	Suelo control	Suelo biochar
pH	6,49	8,06
Nitrógeno Total (%)	0,56	0,62
Carbono Orgánico Total (%)	6,23	12,11
Fe (mg/kg)	93.618,15	80.722,99
P (mg/kg)	1.010,26	1.905,48

Mg (mg/kg)	1.314,27	2.043,01
Na (mg/kg)	186,36	235,26
Ca (mg/kg)	3.816,59	19.034,12
Al (mg/kg)	53.053,31	52.475,12
K (mg/kg)	445,73	1.537,21

Además, ninguna planta murió durante el experimento. No obstante, se observó que algunas plantas en la parcela de control presentaron un desarrollo limitado, manteniéndose pequeñas y sin alcanzar la altura del resto de las plantas de esa misma parcela. Además, se notó que las parcelas tratadas con biochar conservaban mayor humedad en el suelo en comparación con la parcela de control. Asimismo, el suelo con biochar retiene más humedad y es más suelto (Figura 13), mientras que el suelo sin biochar está más compacto y agrietado, lo que indica menor retención de agua.

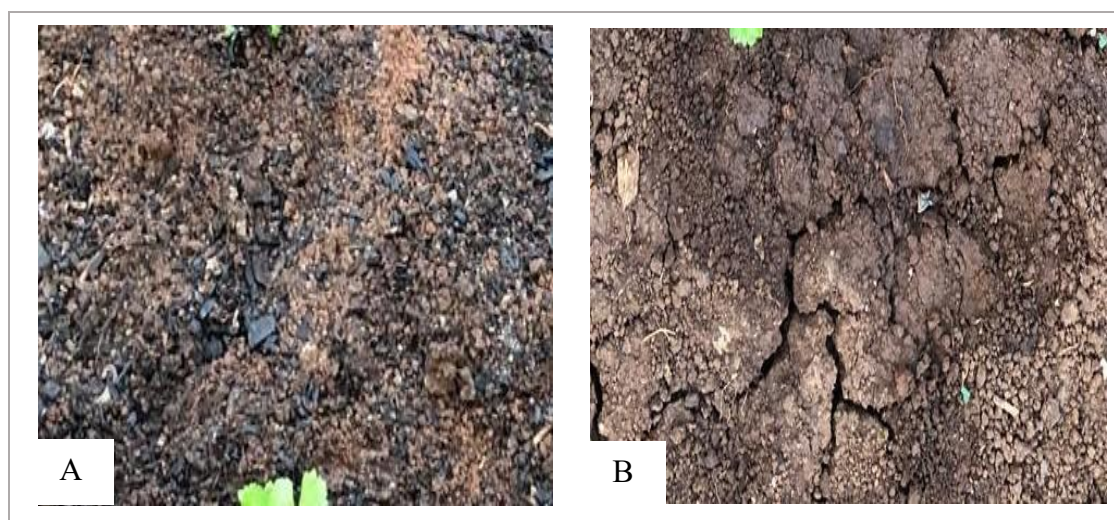


Figura 13. Comparación de suelos: (A) suelo con biochar y (B) suelo control

5 DISCUSIÓN

Esta sección discute los efectos de la aplicación de biochar sobre el crecimiento del apio y las propiedades químicas del suelo. Para ello, se parte de los resultados obtenidos en la finca “Teresita”, ubicada en la isla San Cristóbal. En este contexto, se examinan las principales variables de respuesta vinculadas al desarrollo vegetal y la fertilidad del suelo. Finalmente, los resultados se interpretan desde una perspectiva agronómica y se contrastan con estudios previos para destacar su utilidad en el manejo sostenible de suelos volcánicos insulares.

En primer lugar, las plantas tratadas con biochar alcanzaron una altura significativamente mayor que las del grupo control. Biochar 1 y Biochar 2 presentaron incrementos promedio de 4,45 cm y 5,26 cm, respectivamente, lo que sugiere un efecto positivo del tratamiento en el desarrollo del cultivo. La interacción entre tratamiento y tiempo indica que estas diferencias entre los grupos se hacen más notorias a medida que el cultivo avanza. Resultados similares fueron documentados en Curaqueo et al. (2014), quienes observaron un incremento del 24 % en la altura de plantas de cebada con la dosis más alta de biochar (20 Mg/ha). Asimismo, en un estudio con alfalfa (*Medicago sativa*) se registró una altura máxima de 95,42 cm en plantas tratadas con biochar, frente a 78,46 cm en las plantas del grupo control (Fiallos-Ortega et al., 2015). En conjunto, estos hallazgos respaldan el potencial del biochar para promover el crecimiento vegetal en distintos contextos agroecológicos.

En segundo lugar, las plantas tratadas con biochar desarrollaron un número significativamente mayor de hojas en comparación con el grupo control. Biochar 1 y Biochar 2 superaron al control con incrementos promedio de 6,54 y 10,56 hojas, respectivamente. Aunque Biochar 2 mostró un valor más alto que Biochar 1, con una diferencia de 4,01 hojas ($p = 0,007$), esta fue menor que las diferencias observadas frente al control. Esto sugiere que ambos tratamientos favorecieron el crecimiento foliar, aunque Biochar 2 resultó ligeramente más eficaz, posiblemente por su mayor contenido de nutrientes o mejores propiedades físicas, como la

retención de agua. De manera similar, Fiallos-Ortega et al. (2015) observaron que, al finalizar el ciclo, las plantas de *Medicago sativa* con dosis de 10, 20 y 30 t/ha de biochar alcanzaron 97; 102,5; y 111 hojas por planta, respectivamente. En el presente estudio, aunque se aplicó una sola dosis (50 t/ha), las plantas alcanzaron hasta 120 hojas por tallo. Este resultado, en concordancia con lo señalado por Li et al. (2024), respalda que el biochar favorece el desarrollo foliar al mejorar la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana.

En tercer lugar, las plantas tratadas con biochar registraron un peso fresco significativamente mayor que las del grupo control. Biochar 1 superó al control con una diferencia promedio de 552 g por planta, mientras que Biochar 2 lo hizo con una diferencia de 593 g. Aunque ambos tratamientos mostraron efectos similares, estas diferencias reflejan una mejora sustancial en el desarrollo del cultivo. Además, se observaron valores atípicos en ambos tratamientos con biochar, correspondientes a plantas que alcanzaron pesos excepcionalmente altos, lo que reforzó visualmente la tendencia general observada. De manera similar, un estudio en Irán con rábano (*Raphanus raphanistrum*) registró que la aplicación de 2,5 t/ha de biochar aumentó el peso fresco total y el peso de la raíz, vinculando este efecto a un mayor contenido de nitrógeno y fósforo en el suelo (Diatla et al., 2020). Este aumento, en línea con los resultados previos, sugiere un crecimiento más robusto y una mejor absorción de agua y nutrientes, lo que respalda que el biochar puede mejorar el rendimiento del cultivo en términos de peso total de las plantas.

Uno de los cambios más relevantes en las propiedades del suelo fue el aumento del pH.

Aunque estudios previos reportan un valor promedio de pH 5,6 en suelos agrícolas de San Cristóbal (Strahlhofer et al., 2021), el suelo de la parcela control en este estudio presentó un valor de 6,49; considerado ligeramente ácido. Este valor, aunque no es extremo, puede limitar la disponibilidad de algunos nutrientes, por lo que aplicar biochar puede ser una estrategia

efectiva para corregir esta acidez. Tras su aplicación, el pH del suelo se elevó a 8,06; un valor alcalino que aún se encuentra dentro del rango tolerado por el apio (hasta pH 8,5), lo que se tradujo en resultados positivos para el cultivo. Resultados similares han sido documentados por Curaqueo et al. (2014), quienes observaron que la aplicación de biochar incrementó el pH en suelos volcánicos del sur de Chile, favoreciendo la absorción de nutrientes. De igual forma, Fiallos-Ortega et al. (2015) registraron un incremento de pH de 4,7 a 6,3 tras aplicar diferentes niveles de biochar en un estudio de restauración ecológica del suelo. De este modo, los resultados respaldan que el aumento del pH inducido por el biochar contribuye a mejorar la fertilidad del suelo en contextos volcánicos ligeramente ácidos como los de San Cristóbal. Otro cambio positivo fue el aumento en el contenido de carbono orgánico total (TOC), que en este estudio pasó de 6,23 % en el control a 12,11 % en los tratamientos con biochar. Resultados similares fueron reportados por Fiallos-Ortega et al. (2015), quienes observaron un aumento del TOC de 0,42 % a 1,05 % en suelos tratados con biochar en un cultivo con alfalfa. Este incremento refleja una mejora sustancial en la fertilidad del suelo, así como en su estructura y capacidad de retención de agua. Además, Diatta et al. (2020) señalan que el aumento del carbono orgánico también podría contribuir al almacenamiento de carbono en el suelo, lo cual representa un beneficio ambiental complementario en las islas Galápagos. Adicionalmente, se registró un incremento en los niveles de macronutrientes como fósforo, potasio, magnesio, calcio, sodio y nitrógeno en los suelos tratados con biochar. Estos elementos son esenciales para el desarrollo de los cultivos y el metabolismo de las plantas, y su aumento sugiere una mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo. Un estudio realizado en Tamil Nadu, India, con biochar de cáscara de arroz a 10 t/ha, también reportó aumentos similares en estos elementos (Khan et al., 2024). Por otra parte, se observó una ligera disminución en la concentración de aluminio en el suelo tratado en comparación con el suelo control (de 53.053,31 mg/kg a 52.475,12 mg/kg); aunque la diferencia no fue muy grande, el

biochar podría contribuir a reducir su toxicidad en suelos ácidos, conforme a lo descrito por Diatta et al. (2020). Por lo tanto, estos cambios reflejan una mejora en la calidad química del suelo que podría favorecer el crecimiento vegetal y reducir factores limitantes como la toxicidad por aluminio.

Durante el desarrollo del experimento, se notó que las parcelas con biochar mantenían mayor humedad en el suelo, a pesar de recibir la misma cantidad de agua que el suelo control. Este comportamiento también fue descrito por Curaqueo et al. (2014), quienes reportaron un aumento en la retención hídrica en suelos volcánicos tipo Ultisol tras aplicar biochar de cáscara de avena a dosis de 10 y 20 Mg/ha. Asimismo, Fiallos-Ortega et al. (2015) observaron que la humedad del suelo en cultivos de *Medicago sativa* aumentó del 3,07 % al 5,87 %. Estos resultados sugieren que el biochar mejora la capacidad del suelo para retener agua, posiblemente debido a su estructura porosa, lo que representa una ventaja agronómica en zonas con limitaciones hídricas.

Además de los resultados cuantitativos, se observaron diferencias visuales en el desarrollo de las plantas que refuerzan los beneficios del biochar. En la parcela control, algunas plantas mostraron un crecimiento más limitado, mientras que en las parcelas tratadas con biochar se observó un desarrollo más uniforme y robusto. Este comportamiento indica que el biochar no solo contribuye al tamaño y peso de las plantas, sino que también ayuda a que el cultivo sea más parejo, lo cual es importante para lograr una producción más eficiente y de mejor calidad. Un meta-análisis global realizado por Li et al. (2024) respalda estos resultados, señalando que el biochar puede aumentar el rendimiento agrícola entre un 5 % y un 51 %, mejorar el pH, incrementar el carbono orgánico y reducir la pérdida de nutrientes como nitrógeno y fósforo. Por tanto, estos hallazgos sugieren que el biochar no solo mejora variables puntuales de crecimiento, sino que también optimiza la uniformidad y calidad del cultivo, factores clave en sistemas agrícolas sostenibles.

Si bien los resultados obtenidos fueron positivos, este estudio también abre nuevas oportunidades de investigación para comprender mejor el impacto del biochar a lo largo del tiempo. Como las muestras de suelo se recolectaron cerca del final del ciclo del cultivo, se recomienda que futuras investigaciones realicen un seguimiento durante todo el ciclo productivo para evaluar la evolución dinámica de las propiedades del suelo. Además, incorporar variables complementarias como la compactación del suelo, la actividad microbiana y mediciones precisas de humedad permitiría obtener una visión más integral del efecto del biochar en los agroecosistemas. En conjunto, estos aportes contribuirían a fortalecer las bases científicas para su aplicación agrícola.

Finalmente, este estudio comprobó que el biochar tuvo un efecto positivo sobre la productividad del apio, reflejado en mayores valores de crecimiento, peso y formación foliar. También se observó una mejora en la fertilidad del suelo, la retención de agua, el pH y la disponibilidad de nutrientes. Estos resultados evidencian los beneficios del biochar en suelos volcánicos de las islas Galápagos, donde su uso ha sido poco investigado. En conjunto, refuerzan la necesidad de promover su aplicación en suelos con limitaciones edáficas similares, como una estrategia para fortalecer la agricultura local.

6 CONCLUSIÓN

El presente estudio demuestra que la aplicación de biochar mejora significativamente el crecimiento del cultivo de apio (*Apium graveolens*) en suelos volcánicos del sector rural La Borreguera, en San Cristóbal. Se registran diferencias cuantitativas importantes entre tratamientos, especialmente en altura, número de hojas y peso fresco. Estas mejoras reflejan una respuesta positiva del cultivo frente a la aplicación del biochar. En conjunto, estos resultados confirman que el biochar mejora el rendimiento del apio frente al manejo sin enmienda, al favorecer un crecimiento más uniforme y saludable del cultivo.

En cuanto a las propiedades químicas del suelo, se evidenció un incremento del pH de 6,49 a 8,06, un aumento del carbono orgánico total de 6,23 % a 12,11 %, y mejoras en la disponibilidad de macronutrientes. Además, se observó una ligera reducción en la concentración de aluminio, lo cual podría mitigar su toxicidad en suelos ácidos. Estos cambios reflejan una mejora evidente en la fertilidad del suelo y en la calidad de sus nutrientes. Así, se demuestra que el biochar mejora las propiedades químicas del suelo volcánico y contribuye a crear un entorno más favorable para el desarrollo de los cultivos.

Más allá de los resultados obtenidos sobre el crecimiento del apio y las propiedades del suelo, este estudio resalta el valor del biochar como una herramienta para fortalecer la sostenibilidad agrícola en entornos frágiles. En el contexto de Galápagos, un socio-ecosistema donde es esencial equilibrar la conservación ambiental y el bienestar humano, su aplicación puede aportar beneficios concretos. La incorporación de biochar contribuye a reducir la dependencia de insumos externos, fortalecer la producción local y avanzar hacia una mayor seguridad alimentaria con menor impacto ambiental.

7 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios a largo plazo que evalúen los efectos del biochar en la productividad del cultivo y en las propiedades químicas del suelo durante varios ciclos agrícolas.
- Es importante incluir nuevas variables en futuras investigaciones, como la actividad microbiana, la compactación del suelo y mediciones precisas de humedad, para lograr una comprensión más integral de su efecto en agroecosistemas volcánicos.
- Se sugiere estudiar el potencial del biochar como agente de captura de carbono en suelos volcánicos, considerando su posible aporte a la mitigación del cambio climático en el archipiélago.
- Se recomienda evaluar con mayor precisión el impacto del biochar sobre la retención de agua en el suelo, lo cual puede ayudar a mejorar el manejo del riego y enfrentar con mayor eficiencia condiciones de sequía.
- Se propone promover el uso práctico del biochar entre agricultores del sector rural de San Cristóbal, mediante programas de capacitación y proyectos piloto que utilicen residuos agrícolas locales para su producción y aplicación en otros cultivos representativos de la zona.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antúnez, P., Rubio-Camacho, E. A., & Kleinn, C. (2021). Prueba de hipótesis en la investigación forestal, agropecuaria y en la ecología: Retos y malentendidos sobre el uso de los niveles de significancia de 0.05 y 0.01. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(1). <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2616>
- Balón Rodríguez, K. F., & Vera Balladares, E. E. (2018). *Análisis de fertilidad de los suelos agrícolas de las Islas Galápagos—Santa Cruz, San Cristóbal, Isabela y Floreana* [Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador]. <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/cd03ffb8-f999-4982-b9ff-f8a89b7e8fad>
- Barrera, V., Monteros-Altamirano, Á., Valverde, M., Escudero, L., Allauca, J., & Zapata, A. (2021). Characterization and Classification of Agricultural Production Systems in the Galapagos Islands (Ecuador). *Agricultural Sciences*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.4236/as.2021.125031>
- Brown, R. C., & Brown, T. R. (2014). *Biorenewable resources* (Segunda). John Wiley & Sons.
- Consentino, B. B., Virga, G., La Placa, G. G., Sabatino, L., Roupheal, Y., Ntatsi, G., Iapichino, G., La Bella, S., Mauro, R. P., D'Anna, F., Tuttolomondo, T., & De Pasquale, C. (2020). Celery (*Apium graveolens* L.) Performances as Subjected to Different Sources of Protein Hydrolysates. *Plants*, 9(12), 1633. <https://doi.org/10.3390/plants9121633>
- Curaqueo, G., Meier, S., Khan, N., Cea, M., & Navia, R. (2014). Use of biochar on two volcanic soils: Effects on soil properties and barley yield. *Journal of soil science and plant nutrition*, 14(4), 911-924. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162014005000072>

- De la Torre Rodríguez, M., Junco Bringa, D., Marreno Pérez, M. D., & Rodríguez Soto, I. (2023). Software Jamovi en la docencia de la asignatura Metodología de la Investigación. *Educación Médica Superior*, 37(4), e3895.
- Del Pino, M. (2022). *Guía didáctica: Cultivo y producción de apio* (Curso de Horticultura y Floricultura) [Guía didáctica].
https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/101152/mod_folder/content/0/Guia%20apio%20y%20lechuga%202022.pdf?
- Diatta, A. A., Fike, J. H., Battaglia, M. L., Galbraith, J. M., & Baig, M. B. (2020). Effects of biochar on soil fertility and crop productivity in arid regions: A review. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 595. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05586-2>
- EFE, & Redacción Primicias. (2024). *Galápagos: Severa sequía afecta producción agrícola y se podría declarar la emergencia*.
https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/galapagos-severa-sequia-afecta-produccion-agricola/?utm_source=twitter&utm_medium=social
- Fiallos-Ortega, L. R., Flores-Mancheno, L. G., Duchi-Duchi, N., Flores-Mancheno, C. I., Baño-Ayala, D., & Estrada-Orozco, L. (2015). Restauración ecológica del suelo aplicando biochar (carbón vegetal), y su efecto en la producción de *Medicago sativa*. *Ciencia y Agricultura*, 12(2), 13. <https://doi.org/10.19053/01228420.4349>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *Guidelines for the measurement of productivity and efficiency in agriculture* [Guía].
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/82099501-b5b0-4bd6-8d78-d08083652a55/content>
- Gerzabek, M. H., Bajraktarevic, A., Keiblinger, K., Mentler, A., Rechberger, M., Tintner, J., Wriessnig, K., Gartner, M., Valenzuela, X. S., Troya, A., Couenberg, P. M., Jäger, H., Carrión, J. E., & Zehetner, F. (2019). Agriculture changes soil properties on the

- Galápagos Islands – two case studies. *Soil Research*, 57(3), 201.
- <https://doi.org/10.1071/SR18331>
- Jaramillo Díaz, P., Velasco, N., Chirman, D., & Calle-Loor, A. (2024). *Ecological Restoration And Species Recovery Plan for Baltra, South Plaza, Española, and North Isabela 2025–2029*. Charles Darwin Foundation.
- Joseph, S., Cowie, A. L, Van Zwieten, L, Bolan, N, Budai, A, Buss, W, Cayuela, M. L, Graber, E. R, Ippolito, J. A, Kuzyakov, Y, Luo, Y, Ok, Y. S, Palansooriya, K. N, Shepherd, J, Stephens, S, Weng, Z, & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13(9), 1731-1764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>
- Khan, S., Irshad, S., Mehmood, K., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Gul, S., Wahid, M. A., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., & Ibrar, D. (2024). Biochar Production and Characteristics, Its Impacts on Soil Health, Crop Production, and Yield Enhancement: A Review. *Plants*, 13(2), 166. <https://doi.org/10.3390/plants13020166>
- Lasso, L., & Espinosa, J. (2022). Suelos de las Islas Galápagos. En J. Espinosa, J. Moreno, & G. Bernal (Eds.), *Suelos del Ecuador: Clasificación, uso y manejo* (Primera, pp. 191-209). Instituto Geográfico Militar.
- Lee, S., & Lee, D. K. (2018). What is the proper way to apply the multiple comparison test? *Korean Journal of Anesthesiology*, 71(5), 353-360.
- <https://doi.org/10.4097/kja.d.18.00242>
- Li, X., Wu, D., Liu, X., Huang, Y., Cai, A., Xu, H., Ran, J., Xiao, J., & Zhang, W. (2024). A global dataset of biochar application effects on crop yield, soil properties, and greenhouse gas emissions. *Scientific Data*, 11(1), 57. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02867-9>

- López-Medina, S. E., Mostacero-León, J., Vásquez-Boyer, C. A., Gil-Rivero, A. E., Cruz-Castillo, A. J. D. L., Villena-Zapata, L., Rafael-Amaya, R., & Gonzáles-Pacheco, A. J. (2023). Efecto del ácido indolbutírico en la propagación de *Hylocereus undatus* “pitahaya” bajo condiciones de invernadero. *Manglar*, 20(4), Article 4.
<https://doi.org/10.57188/manglar.2023.039>
- Mendoza, R. B., & Espinoza, A. (2017). *Guía técnica para muestreo de suelos* (p. 52) [Guía técnica]. Universidad Nacional Agraria y Catholic Relief Services.
<https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2019). *Café de Galápagos se exporta a Japón*.
<https://www.agricultura.gob.ec/cafe-de-galapagos-se-exporta-a-japon/>
- Morales Garcés, C. E. (2022). *Biofortificación del cultivo de apio (Apium graveolens) mediante la utilización de yodo agrícola* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/1c22e55e-382f-4bea-bd30-f7babf077202/content>
- Neina, D. (2019). The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019(1), 1-9. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Pardo, A., Garrido, J., Ruiz, M. Á., & San Martín, R. (2007). La interacción entre factores en el análisis de varianza: Errores de interpretación. *Psicothema*, 19(2), 343-349.
- Salih, T. W. M. (2021). *Biomass Energy*. Mustansiriyah University.
https://www.researchgate.net/publication/355204245_Biomass_Energy
- Sampedro, C., Pizzitutti, F., Quiroga, D., Walsh, S. J., & Mena, C. F. (2020). Food supply system dynamics in the Galapagos Islands: Agriculture, livestock and imports. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 35(3), 234-248.
<https://doi.org/10.1017/S1742170518000534>

- Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). (1986). *El cultivo del apio* (Manual técnico No. Módulo No. 2: Mantengamos nuestra huerta, Unidad No. 17; Huerta Casera). SENA.
https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/2066/26873_14279.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Strahlhofer, M., Gerzabek, M. H., Rampazzo, N., Couenberg, P. M., Vera, E., Salazar Valenzuela, X., & Zehetner, F. (2021). Soil Fertility Changes With Climate and Island Age in Galápagos: New Baseline Data for Sustainable Agricultural Management. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.788082>
- Sustainable Agriculture Research and Education (SARE). (2017). *How to Conduct Research on Your Farm or Ranch*.
- Viteri, C., & Vergara Sobarzo, L. A. (Eds.). (2017). *Ensayos económicos del sector agrícola de Galápagos*. Conservación Internacional Ecuador y Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.

9 ANEXOS

9.1 Anexo A. Mediciones de la altura de las plantas de apio (*Apium graveolens*) por tratamiento y fecha

9.1.1 Altura de las plantas - medición del 1 de noviembre de 2024.

Altura (cm)			
Fecha	Control	Biochar 1	Biochar 2
1/11/2024	11	12	12
	12	10	12
	11	13	12
	12	10	12
	10	11	12
	10	10	10
	10	10	11
	13	11	11
	11	12	11
	10	11	10
	12	10	12
	11	12	12
	10	11	11
	10	11	10
	10	11	12
	11	11	12
	12	12	10
	12	10	10
	12	10	10
	10	10	10
	10	12	11
	10	12	11
	11	10	11
	12	10	10
	11	11	12
	10	11	11
	10	12	11
	12	13	12
	12	11	11
	12	10	10
	12	10	12
	12	10	12
	12	12	11
	12	12	11
	11	11	11
	10	10	10
	11	11	13
	12	12	10
	11	11	11
	12	12	12

9.1.2 Altura de las plantas de apio - medición 30 de noviembre de 2024.

Altura (cm)			
Fecha	Control	Biochar 1	Biochar 2
30/11/2024	17	19	17
	17	18	18
	18	17	19
	18	18	19
	17	18	19
	17	19	17
	17	19	20
	14	18	20
	19	20	20
	19	20	20
	17	17	19
	18	17	20
	17	18	14
	18	18	18
	18	19	18
	19	19	19
	19	19	19
	19	20	20
	16	20	20
	15	20	20
	19	15	20
	19	20	18
	19	20	19
	18	20	18
	17	20	18
	17	20	18
	17	20	19
	18	18	19
	17	18	19
	17	18	20
	18	20	20
	17	18	19
	19	18	19
	19	18	19
	19	20	19
	20	18	20
	18	19	20
	19	19	20
	19	19	20
	20	19	20

9.1.3 Altura de las plantas de apio - medición 30 de diciembre de 2024.

Altura (cm)			
Fecha	Control	Biochar 1	Biochar 2
30/12/2024	35	32	35
	34	34	35
	34	33	36
	34	33	38
	35	34	38
	35	35	37
	36	35	39
	15	34	37
	34	32	38
	26	35	37
	24	35	38
	33	35	.7
	28	36	17
	35	34	37
	25	37	37
	25	37	38
	34	38	38
	35	38	37
	16	35	37
	19	25	38
	36	36	37
	35	37	38
	37	36	36
	37	37	29
	38	36	37
	37	36	36
	38	38	37
	38	37	36
	29	38	37
	39	37	36
	37	37	37
	38	37	36
	27	38	37
	38	38	36
	37	38	36
	37	37	38
	29	38	38
	38	37	38
	30	38	39
	30	38	39

9.1.4 Altura de las plantas de apio - medición 29 de enero de 2025.

Altura (cm)			
Fecha	Control	Biochar 1	Biochar 2
29/01/2025	42	54	47
	46	64	49
	47	60	52
	38	52	48
	43	50	51
	43	49	48
	15	54	49
	50	57	49
	48	64	61
	37	69	60
	36	49	60
	35	49	31
	34	57	51
	34	54	48
	31	48	52
	35	62	51
	33	49	71
	20	45	70
	32	63	69
	24	35	71
	38	48	69
	45	62	70
	46	59	68
	46	63	65
	49	59	70
	54	49	65
	53	52	64
	49	57	61
	51	54	53
	43	55	49
	36	57	48
	49	58	55
	50	63	59
	39	52	57
	45	49	65
	45	49	59
	46	56	57
	43	55	56
	41	57	52
	48	48	45

9.2 Anexo B. Mediciones del número total de hojas por planta de apio (*A. graveolens*) por tratamiento y fecha

9.2.1 Número total de hojas por planta de apio - medición del 1 de noviembre de 2024.

Número de hojas			
Fecha	Control	Biochar 1	Biochar 2
01/11/2024	3	4	5
	5	4	4
	4	4	5
	3	5	4
	4	4	4
	4	5	4
	5	4	4
	4	3	4
	4	4	4
	5	5	3
	5	4	4
	4	4	5
	4	4	6
	3	3	4
	4	4	3
	4	6	5
	5	5	3
	4	3	4
	6	5	4
	4	6	5
	3	4	5
	5	4	4
	4	4	5
	3	5	4
	4	4	4
	4	5	4
	5	4	4
	4	3	4
	4	4	4
	5	5	3
	5	4	4
	4	4	5
	4	4	6
	3	3	4
	4	4	3
	4	6	5
	5	5	3
	4	3	4
	6	5	4
	4	6	5

9.2.2 Número total de hojas por planta de apio - medición del 30 de noviembre de 2024.

Número de hojas			
Fecha	Control	Biochar 1	Biochar 2
30/11/2024	13	18	20
	20	24	23
	20	22	18
	19	20	16
	5	19	21
	18	25	20
	7	19	19
	21	18	22
	15	19	16
	14	20	15
	21	21	22
	15	20	22
	17	19	21
	13	19	22
	24	17	22
	16	19	21
	18	20	24
	19	24	16
	21	23	17
	19	25	18
	13	18	20
	20	24	23
	20	22	18
	19	20	16
	5	19	21
	18	25	20
	7	19	19
	21	18	22
	15	19	16
	14	20	15
	21	21	22
	15	20	22
	17	19	21
	13	19	22
	24	17	22
	16	19	21
	18	20	24
	19	24	16
	21	23	17
	19	25	18

9.2.3 Número total de hojas por planta de apio - medición del 30 de diciembre de 2024.

Número de hojas			
Fecha	Control	Biochar 1	Biochar 2
30/12/2024	48	55	62
	56	56	55
	54	54	67
	50	47	72
	59	54	71
	60	65	68
	7	34	81
	62	73	78
	10	35	90
	70	89	86
	59	67	89
	42	43	76
	50	65	79
	59	80	77
	57	75	59
	64	76	67
	71	74	68
	82	68	71
	73	79	65
	63	87	82
	36	36	37
	35	37	38
	37	36	36
	37	37	29
	38	36	37
	37	36	36
	38	38	37
	38	37	36
	29	38	37
	39	37	36
	37	37	37
	38	37	36
	27	38	37
	38	38	36
	37	38	36
	37	37	38
	29	38	38
	38	37	38
	30	38	39
	30	38	39

9.2.4 Número total de hojas por planta de apio - medición del 29 de enero de 2025.

Número de hojas			
Fecha	Control	Biochar 1	Biochar 2
29/01/2025	65	83	110
	79	67	92
	68	82	95
	70	73	96
	78	72	98
	10	81	89
	68	87	91
	15	130	90
	75	80	101
	62	83	103
	75	80	120
	75	79	110
	68	78	90
	72	83	97
	85	84	84
	91	89	101
	65	90	105
	82	91	98
	84	98	87
	88	88	101
	65	83	110
	79	88	92
	68	82	95
	70	73	96
	78	72	98
	10	81	89
	68	87	91
	15	130	90
	75	80	101
	62	83	103
	75	80	126
	75	79	110
	68	78	90
	72	83	97
	85	84	84
	91	89	101
	65	90	105
	82	91	98
	84	98	87
	60	65	75

9.3 Anexo C. Peso fresco de las plantas de apio por tratamiento y fecha de cosecha

Peso fresco (g)			
Fecha	Control	Biochar 1	Biochar 2
01/2/2025	200	600	650
	400	1000	850
	300	800	900
	200	850	700
	250	900	500
	350	1000	550
	250	600	900
	200	1500	1500
	350	1200	1300
	300	600	800
	400	550	825
	200	550	750
	180	600	1000
	160	650	950
	185	700	900
	160	900	1000
	185	1000	600
	200	600	550
	200	800	600
	300	600	1000