

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**BIOCARBÓN EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y CURVA DE
DESECAMIENTO EN DOS TIPOS DE SUELOS**

POR

MATÍAS IGNACIO CANALES ADROVE

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN, CHILE
2025**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**BIOCARBÓN EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y CURVA DE
DESECAMIENTO EN DOS TIPOS DE SUELOS**

POR

MATÍAS IGNACIO CANALES ADROVE

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

CONCEPCIÓN, CHILE

2025

Aprobada por:

Profesor Asistente, Walter Valdivia C.
Ing. Agrónomo, Dr. Ingeniería Agrícola

Guía

Profesor Asociado, Cristina Muñoz V.
Ing. Agrónomo, Dr. Cs. Recursos Naturales

Asesor

Profesor Asociado, Marco Sandoval E.
Ing. Agrónomo, Mg.Cs. Dr. Cs Ambientales

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Sc.

Decano

TABLA DE CONTENIDO

	Página
Resumen	1
Summary	1
Introducción	2
Materiales y métodos.....	4
Resultados y discusión.....	7
Conclusiones.....	25
Referencias.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		Página
Figura 1	pH de suelos con tratamientos de biocarbón aplicados.	8
Figura 2	Análisis químicos de suelo areno francoso con diferentes dosis de biocarbón. Nitratos (N-NO ₃), amonio (N-NH ₄), nitrógeno disponible, fósforo olsen, potasio disponible, potasio intercambiable	10
Figura 3	Análisis químicos de suelo franco arcilloso con diferentes dosis de biocarbón. Nitratos (N-NO ₃), amonio (N-NH ₄), nitrógeno disponible, fósforo olsen, potasio disponible, potasio intercambiable.....	11
Figura 4	Determinación porcentual de nitrógeno total y carbono total en suelo areno francoso.....	13
Figura 5	Determinación porcentual de nitrógeno total y carbono total en suelo franco arcilloso.....	13
Figura 6	Densidad aparente de los suelos con diferentes tratamientos de biocarbón.....	16
Figura 7	Efecto de los tratamientos de biocarbón en el contenido de humedad gravimétrica (%HBSS) en suelo areno francoso.....	17
Figura 8	Efecto de los tratamientos de biocarbón en el contenido de humedad gravimétrica (%HBSS) en suelo franco arcilloso.....	18
Figura 9	Contenido volumétrico de agua (θ_v) de la repetición 1 de tratamientos en suelo areno francoso.....	20
Figura 10	Contenido volumétrico de agua (θ_v) de la repetición 1 de tratamientos en suelo franco arcilloso.....	21

Figura 11	Contenido volumétrico de agua (θ_v) promedio de tratamientos aplicado en periodo de secado en suelo areno francoso.....	24
Figura 12	Contenido volumétrico de agua (θ_v) promedio de tratamientos aplicado en periodo de secado en suelo franco arcilloso.....	24
Tabla 1	Biomasa producida de materia fresca y materia seca en diferentes etapas de crecimiento del cultivo a diferentes dosis de biocarbón en suelo areno francoso.....	15
Tabla 2	Biomasa producida de materia fresca y materia seca en diferentes etapas de crecimiento del cultivo a diferentes dosis de biocarbón en suelo franco arcilloso.....	15

BIOCARBÓN EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y CURVA DE DESECAMIENTO EN DOS TIPOS DE SUELOS

BIOCHAR IN THE PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES AND DRYING CURVE OF TWO SOIL TYPES

Palabras índices adicionales: Ballica anual, textura del suelo, curvas de retención hídrica, producción de biomasa.

RESUMEN

El biocarbón derivado de la pirolisis de biomasa, puede mejorar la fertilidad del suelo, retiene agua y nutrientes y contribuye al secuestro de carbono para mitigar el cambio climático. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del biocarbón en las propiedades físicas, químicas y la curva de desecamiento de suelos areno francoso y franco arcilloso, así como su impacto en la producción de biomasa de *Lolium multiflorum*. Se aplicaron dosis de 0,5%, 0,75% y 1% de biocarbón, elaborado a partir de poda de cerezos mediante pirolisis lenta. En el suelo areno francoso, el biocarbón incrementó significativamente el pH, el carbono total y el fósforo olsen, mientras que en el suelo franco arcilloso redujo los nitratos y aumentó el carbono total. No se observaron efectos en la densidad aparente ni en las curvas de retención de humedad gravimétrica en ninguno de los suelos. Las curvas de desecamiento volumétricas revelaron que el biocarbón mejoró la retención hídrica en el suelo areno francoso durante periodos de secado, con un incremento significativo en la biomasa a una dosis del 1%. En el suelo franco arcilloso, aunque no hubo efecto en la biomasa debido a sus condiciones iniciales favorables, se observó un aumento en la retención hídrica a dosis del 1% durante el periodo de secado. Estos resultados subrayan el potencial del biocarbón para optimizar suelos de baja fertilidad y promover prácticas agrícolas sostenibles.

SUMMARY

Biochar, derived from biomass pyrolysis, can improve soil fertility, retain water and nutrients, and contribute to carbon sequestration to mitigate climate change. The

objective of this research was to evaluate the effect of biochar on the physical and chemical properties and the drying curve of sandy loam and clay loam soils, as well as its impact on the biomass production of *Lolium multiflorum*. Doses of 0.5%, 0.75%, and 1% of biochar, produced from cherry pruning residues through slow pyrolysis, were applied. In the sandy loam soil, biochar significantly increased pH, total carbon, and olsen phosphorus, while in the clay loam soil, it reduced nitrates and increased total carbon. No effects were observed on bulk density or gravimetric water retention curves in either soil. Volumetric drying curves revealed that biochar improved water retention in sandy loam soil during drying periods, with a significant increase in biomass at the 1% dose. In clay loam soil, although there was no effect on biomass due to its favorable initial conditions, an increase in water retention was observed at the 1% dose during the drying period. These results highlight the potential of biochar to optimize low fertility soils and promote sustainable agricultural practices.

INTRODUCCIÓN

Para aumentar la resiliencia del suelo frente al cambio climático es esencial incrementar el carbono orgánico del suelo (COS) y conservar su biodiversidad. El COS actúa como amortiguador, regulando el agua, reduciendo la erosión y mejorando la disponibilidad de nutrientes (FAO, 2015).

La degradación de suelo causada por cambios en su uso, agua y vegetación puede llevar a los agricultores a decisiones que afecten su rentabilidad y calidad de vida, como abandonar la agricultura o adoptar prácticas menos rentables. Esto impacta negativamente la producción, economía, medio ambiente y recursos naturales, por lo que se promueven prácticas agrícolas sostenibles para prevenir y mitigar la degradación del suelo (Morales & Parada, 2005).

Los suelos agrícolas, aunque representan una pequeña parte del carbono total del suelo a nivel mundial, contiene cantidades significativas. El biocarbón, producto de la estabilización térmica de la biomasa, puede almacenar el carbono en el suelo en grandes cantidades, mejorando la productividad al interactuar dinámicamente con nutrientes y minerales. Además, su uso se propone como estrategia para mitigar el cambio climático y aumentar la producción de alimentos. (Sohi et al., 2010). Según

Ojeda et al. (2021) el uso de biocarbón como enmienda orgánica ha demostrado ser efectivo para mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo. Se menciona la porosidad afectando la retención de agua y nutrientes, la capacidad de reacción química determinando la disponibilidad de nutrientes, la capacidad de enclavado manteniendo un pH equilibrado y la capacidad de absorción reteniendo elementos tóxicos (Guo et al., 2020). Su efecto en el suelo depende del tipo de biomasa y proceso de pirolisis realizado, por lo cual su impacto puede variar según las condiciones de producción y aplicación, siendo crucial considerar estos factores al evaluar su efectividad en el suelo (Ojeda et al., 2021).

La capacidad del suelo para mover y retener agua es esencial para suministrar nutrientes y mejorar la productividad de los cultivos. Una gestión adecuada del agua en el suelo favorece el crecimiento y desarrollo del cultivo, por lo que optimizar este aspecto es clave para maximizar su rendimiento (Liu et al., 2017).

Según Vandit et al. (2021) los cambios en la porosidad del suelo por el uso de biocarbón se deben a su estructura interna porosa, forma y cantidades aplicadas, los poros entre el biocarbón y las partículas del suelo, distribución del tamaño de partícula y propiedades de absorción del biocarbón (Zhang & You, 2013).

De acuerdo con Liu et al. (2017) el biocarbón mejora la retención de agua en suelos arenosos a través de dos mecanismos según el potencial hídrico. A bajos potenciales hídricos, el agua se retiene dentro de los poros internos del biocarbón (intraporos), mientras que, a altos potenciales, el agua se retiene en los espacios entre las partículas del suelo y el biocarbón (interporos). La forma alargada de las partículas de biocarbón aumenta estos espacios interporosos, facilitando una mayor disponibilidad de agua para las plantas cuando hay más humedad.

El estudio realizado por Abdulaziz et al. (2020), mostró que la adición de biocarbón con partículas menor a 0,1 mm en un suelo franco arenoso, aumentó el área de microporos hasta diez veces en comparación con el suelo sin biocarbón. Este incremento en microporos mejoró la capacidad de agua disponible (AWC) en el suelo, facilitando una mayor retención hídrica.

La adición de biocarbón al revestimiento de arcilla mejora su capacidad de retención de agua, manteniendo una alta succión matricial y reduciendo la formación de

grietas por desecación. Estas mejoras fortalecen la efectividad de la arcilla como barrera hidráulica (Wong et al., 2022). El estudio realizado por Libutti et al. (2021) en suelo franco arcilloso, utilizando curvas de Vang Genutchen, mostró que diferentes dosis de biocarbón aumentan la porosidad y reducen la densidad aparente del suelo, mejorando su capacidad de retención hídrica. Esto se reflejó en las curvas, donde el mayor contenido de biocarbón se asoció con un aumento en la fracción porosa y una mejor retención de agua

Para entender como el biocarbón influye en el agua del suelo y crecimiento de las plantas, se miden la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y el agua disponible para las plantas. La curva de retención de agua del suelo (SWRC) muestra la relación entre el agua del suelo y el potencial hídrico, proporcionando datos claves para modelar el flujo y almacenamiento de agua en el suelo (Zeitoun et al., 2021).

MATERIALES Y METODOS

Muestras de suelos. Los suelos utilizados en este estudio corresponden a texturas areno francoso (aF) y franco arcilloso (FA) recolectados de la capa superior de los suelos de 0 a 0,30 m. La muestra de suelo areno francoso se obtuvo en la localidad de Tricauco, ubicada en la comuna de Santa Juana, Región del Biobío, Chile. Por otro lado, el suelo de textura franco arcilloso fue recolectado en la Universidad de Concepción, situada en la comuna de Chillán, Región de Ñuble, Chile. Para cada suelo se utilizó un saco de 25 kilogramos para ser trasladado, estas muestras de suelo fueron colocadas en un mesón y se secaron a temperatura ambiente durante 2 días. Posteriormente, se tamizó a 2 mm de partícula. Una vez realizado el tamizado, se calculó la densidad aparente para ambos suelos.

Elaboración de biocarbón La materia prima utilizada para la producción de biocarbón fue residuos lignocelulósicos de poda de cerezos. El proceso de pirolisis lenta se llevó a cabo en el Laboratorio de Materiales Carbonosos de la Universidad de Concepción, Campus Chillán, utilizando una mufla Nabertherm Le/11/R7 a 600°C durante 90 minutos. Tras la pirolisis, se aplicó agua al contenedor para

reducir la temperatura de la biomasa y almacenarla. Finalmente, el biocarbón se tamizó a 2 mm de partícula.

Tratamientos y diseño experimental. Los suelos recibieron diferentes dosis de biocarbón correspondientes al 0,5%, 0,75% y al 1%, además de un Control sin biocarbón. Esta mezcla de suelo y biocarbón fue introducida en macetas cilíndricas de plástico de 1,3 L de capacidad, y se ubicaron en la comuna de Coronel (37°00'26.74"S y 73°08'26.83"O), Región del Biobío, bajo condiciones de temperatura ambiente y máxima exposición solar, siguiendo un diseño completamente aleatorizado. En cada maceta se sembraron 10 gramos de semillas de ballica anual (*Lolium multiflorum*), sometiénolas a diferentes criterios de riego mediante la aplicación de 500 ml de agua de grifo, manteniendo el contenido de agua a capacidad de campo y utilizando una probeta para lograr mayor precisión en dicha aplicación. Se registraron datos ambientales diarios, incluyendo temperaturas, humedad y precipitaciones. Se realizaron 4 repeticiones por tratamiento, con un total de 32 unidades experimentales.

Desinfección de semillas. Las semillas fueron desinfectadas en el Laboratorio de Fitopatología de la Universidad de Concepción Campus Chillán para eliminar posibles patógenos que pudieran afectar su crecimiento. El proceso comenzó con una inmersión de las semillas en 400 ml de alcohol al 70% durante 1 minuto. Luego, se filtraron con papel filtro y embudo para eliminar el alcohol. Después, se lavaron tres veces en 400 ml de agua destilada agitando durante 1 minuto cada vez para asegurar una distribución uniforme. Luego, se sumergieron en una solución de 0,21 g de ditiocarbamato (fungicida Mancozeb) disuelto en 400 ml de agua destilada, agitando por 1 minuto. Posteriormente, se repitió el lavado con agua destilada tres veces más para eliminar cualquier residuo de fungicida. Finalmente, las semillas se filtraron, se colocaron sobre una gaza en una bandeja y se secaron en un horno a 50°C durante 24 horas para asegurar que estuvieran completamente secas y listas para la siembra.

Mediciones de humedad. La humedad de los tratamientos se midió con sensores GS-1 conectados a un datalogger EM-50 Decagon Device, Pullman, Washington,

USA, que almacenó automáticamente los datos. Las mediciones se realizaron cada 5 minutos a una profundidad de 5 cm bajo distintos criterios de riego, con 8 unidades experimentales por repetición. Se aplicó un riego manual de 500 mL de agua de grifo por unidad experimental bajo tres criterios definidos por período: i) del 12 de enero al 12 de febrero, riego diario solo a la primera repetición de todos los tratamientos; ii) del 13 al 24 de febrero, riego durante tres días consecutivos, avanzando secuencialmente por repetición e incluyendo todos los tratamientos dentro de cada una; y iii) del 25 de febrero al 15 de marzo, riego solo el primer día de cada intervalo de cinco días, aplicado según el orden de tratamientos y considerando todas las repeticiones. Los registros fueron gestionados mediante el software ECHO20 Utility.

Medición de materias fresca y materia seca. Se realizaron dos cosechas para medir la materia fresca (MF) y la materia seca (MS). En la primera, 37 días después de iniciar las mediciones de humedad volumétrica se cortó el material vegetal de *Lolium multiflorum* a 8 cm de altura, asegurando un crecimiento homogéneo. Las muestras fueron pesadas para obtener los valores de MF y luego fueron almacenadas en sobres rotulados. En la segunda cosecha, 32 días después de la primera cosecha, se recolectó toda la materia vegetal al finalizar el experimento de mediciones de humedad, se pesó nuevamente para obtener los valores de MF y se almacenaron en sobres. Para medir la MS, los sobres con las muestras se secaron en un horno de convección forzada DK-500 DT a una temperatura de 64°C durante 72 horas, tras lo cual se procedió a pesar su MS.

Análisis de parámetros físicos y químicos del suelo. Las muestras de suelo de cada unidad experimental se enviaron al Laboratorio Químico y Físico de Suelos de la Universidad de Concepción, Campus Chillán, para realizar los análisis correspondientes. En primer lugar, se llevaron a cabo análisis químicos, incluyendo la determinación del contenido de nutrientes, el pH del suelo y los porcentajes de carbono y nitrógeno totales. Posteriormente, se realizaron análisis físicos para evaluar la densidad aparente y las curvas de retención de humedad del suelo gravimétricas.

Elaboración de curvas de retención hídrica. El proceso para elaborar las curvas de retención hídrica se llevó a cabo utilizando los datos recolectados por los sensores de humedad TDR. Estos datos fueron organizados y segmentados según la fecha, hora y los tratamientos específicos, así como los criterios de riego correspondientes. Posteriormente, se procesaron en Excel, donde se generaron las curvas de retención hídrica. El análisis de los datos se realizó observando los valores registrados en cada punto de medición.

Análisis estadístico de datos El análisis estadístico de los datos incluyó la evaluación de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Posteriormente, con base en un diseño completamente aleatorizado, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANDEVA) de una vía con prueba de comparación múltiple. Test LSD Fisher. Cuando los datos no fueron normales se aplicó la prueba Kruskal-Wallis y para comparar las medianas se realizó una prueba de contrastes pots-hoc (Dunn tets). El modelo estadístico consideró la adición de biocarbón con tres niveles (tres dosis de biocarbón) en diferentes texturas del suelo (areno franco y franco arcilloso), analizando por separado el efecto de la dosis de biocarbón en las dos texturas.

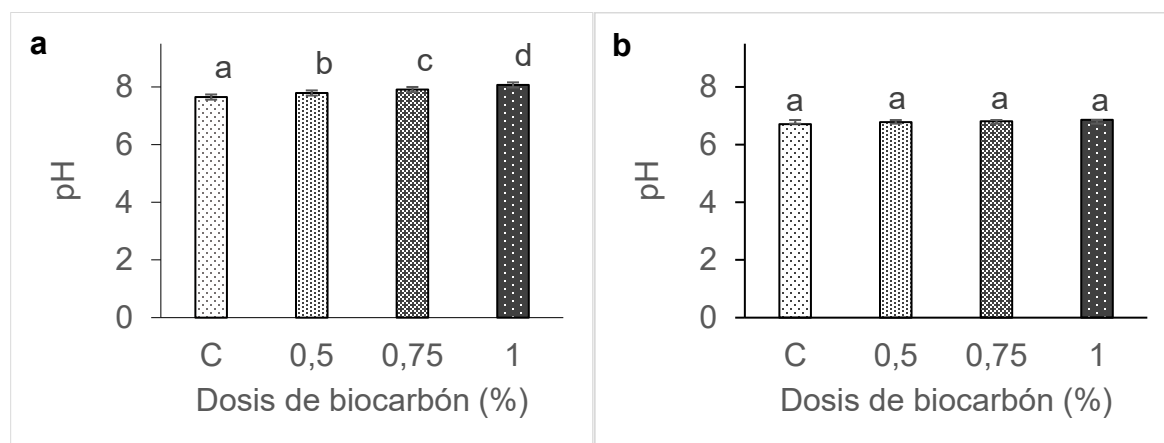
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros químicos del suelo

PH del suelo. Los valores de pH para ambos tipos de suelos resultaron distintos ante la adición de biocarbón entre los tratamientos. El estudio de Chintala et al. (2014) menciona que al incorporar biocarbón en los suelos puede generar impactos significativos corrigiendo su acidez y mejorando su capacidad de intercambio catiónico. No obstante, el rango de incremento depende del tipo de suelo. En el suelo areno franco, con un pH alcalino en el Control, los tratamientos con biocarbón mostraron un aumento progresivo del pH, siendo el tratamiento a 1% el más destacado, con un incremento de 0,42 unidades de 7,65 a 8,07 en comparación con el Control (P-valor 0,0004). Este efecto encalador del biocarbón está dado por el contenido de cenizas y su composición química destacando sus cationes básicos

(Domingues et al., 2017). Además, el pH del biocarbón tiende a ser mayor cuando la temperatura de pirolisis es más alta, dado que el contenido de cenizas se encuentra en mayor proporción (Oliveira et al., 2017). En cambio, el suelo franco arcilloso no presentó diferencias significativas. En general, la mayoría de los biocarbones tienen un pH alcalino, que oscila entre 7 y 11 teniendo un efecto positivo para aumentar el pH del suelo y neutralizar su acidez (Buss et al., 2018). Estos resultados sugieren que el biocarbón puede reducir la acidez de los suelos con baja capacidad de amortiguación a mayores dosis y actuar como encalador, contribuyendo a neutralizar el pH, pero su resultado puede variar dependiendo del tipo de suelo.

Figura 1. pH de suelos con tratamientos de biocarbón aplicados.



Letra a) suelo areno francoso, tratamientos con distinta letra sobre la barra junto a su desviación estándar, difieren significativamente por la prueba de LSD Fisher ($P \leq 0,05$). Letra b) suelo franco arcilloso, tratamientos con igual letra sobre la barra, no difieren significativamente por la prueba de LSD Fisher ($P > 0,05$). Donde C: Sin biocarbón, D1: 0,5%, D2: 0,75%, D3: 1%.

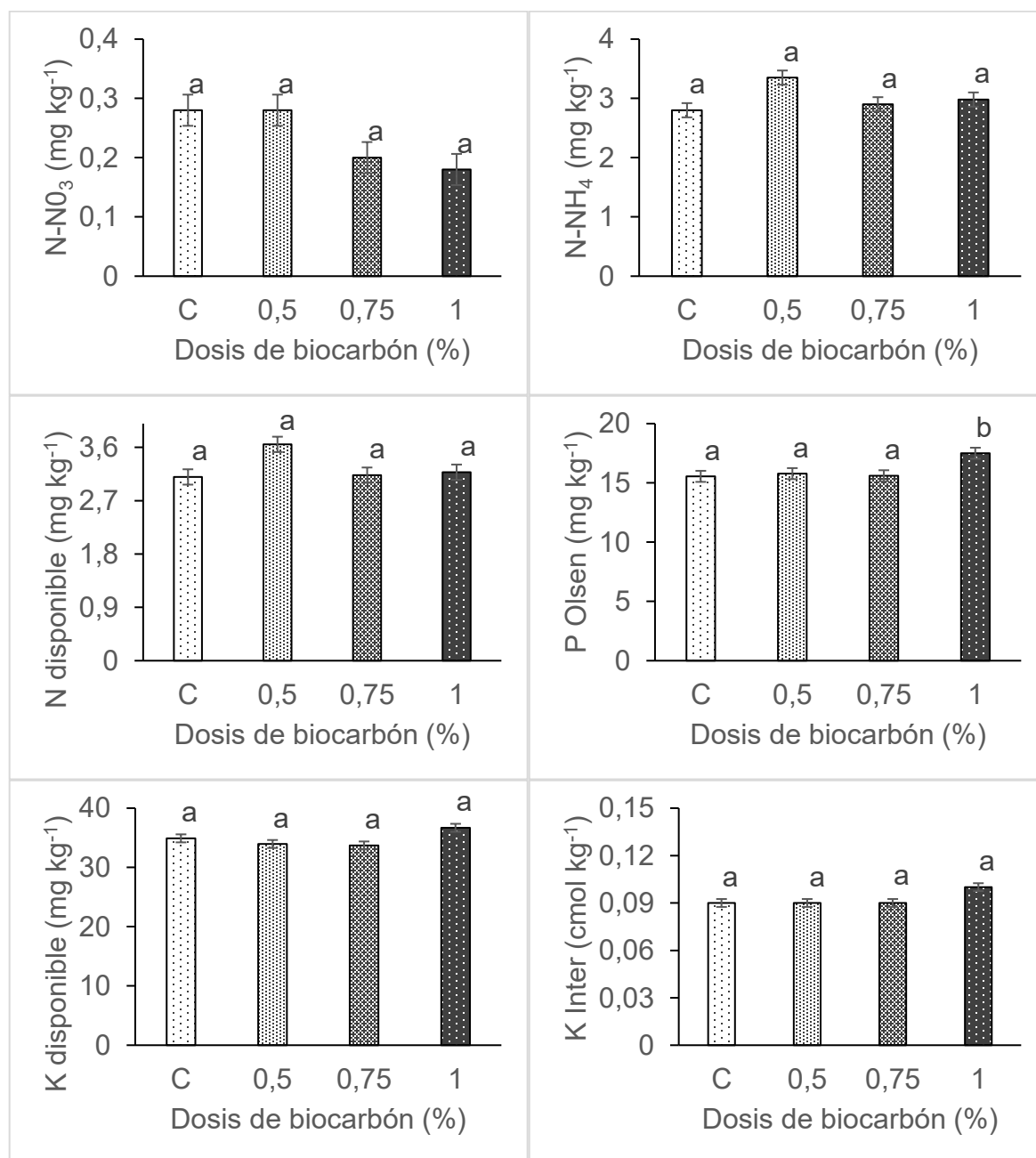
Análisis químico al suelo. Con respecto a la fertilidad en el suelo areno francoso, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en el contenido de nitratos. En contraste, el suelo franco arcilloso mediante la prueba de Kruskal Wallis presentó diferencias significativas entre los tratamientos (P-valor 0,0301), donde el tratamiento Control presentó mayor concentración de nitrato comparado con el tratamiento D2 y D3, con diferencias de $1,35 \text{ mg kg}^{-1}$ y $1,20 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente. El amonio no se vio afectado entre los tratamientos de ambos suelos. En el suelo areno francoso, no se observaron diferencias significativas en el nitrógeno disponible entre los tratamientos. En contraste, el suelo franco arcilloso

mostró diferencias significativas (P-valor 0,0334), con el Control presentando un valor mayor que los demás tratamientos, los cuales no difirieron entre sí. Hubo una reducción de $1,75 \text{ mg kg}^{-1}$ de este elemento entre el Control y D1. Para el fósforo olsen, el suelo areno francoso mostró un aumento significativo con mayores dosis de biocarbón (P-valor 0,0002), destacando el tratamiento D3, que incrementó en $1,95 \text{ mg kg}^{-1}$ en comparación con el Control, el cual presentó el valor más bajo. En el suelo franco arcilloso no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. El análisis de potasio disponible y potasio intercambiable no mostró diferencias significativas en los tratamientos de ambos suelos.

Los resultados muestran que el efecto del biocarbón varía según el tipo de suelo, respaldando la literatura que destaca esta variabilidad en la respuesta. Según Gao et al. (2016) la respuesta del suelo al biocarbón puede depender de la materia prima del biocarbón, tipo de cultivo, dosis de aplicación y características del suelo. Esto concuerda con estudios previos, como el de Luo et al. (2020), quienes observaron que, tras ocho años de aplicación de biocarbón, el contenido de nitrógeno amoniacal no cambió significativamente en suelos alcalinos debido a que el biocarbón, al tener una carga negativa, retiene iones y reduce la disponibilidad de nitrato. Este fenómeno podría explicar la disminución de nitratos observada en el suelo franco arcilloso. La mineralización de nitrógeno en formas inorgánicas (NO_3^- y NH_4^+), absorbibles por las plantas, parece reducir los nitratos disponibles en suelos tratados con biocarbón. Por otro lado, Adekiya et al. (2020) encontraron efectos distintos al aplicar biocarbón de madera dura en dos años consecutivos, en el primer año no hubo mejoras significativas en las propiedades químicas del suelo, pero en el segundo año, la acumulación de biocarbón aumentó la disponibilidad de nutrientes y mejoró la inmovilización del nitrógeno al retenerlo en formas menos móviles, principalmente mediante su fijación en compuestos orgánicos, lo que redujo su disponibilidad para ser lixiviado. En cuanto al fósforo olsen, el aumento en el suelo areno francoso con mayores dosis de biocarbón coincide con los hallazgos de Hossain et al. (2020), quienes señalaron que el biocarbón ayuda a retener fósforo al reducir su lixiviación. Sin embargo, el efecto del biocarbón en otros nutrientes, como el potasio, puede ser inconsistente, con resultados positivos o negativos

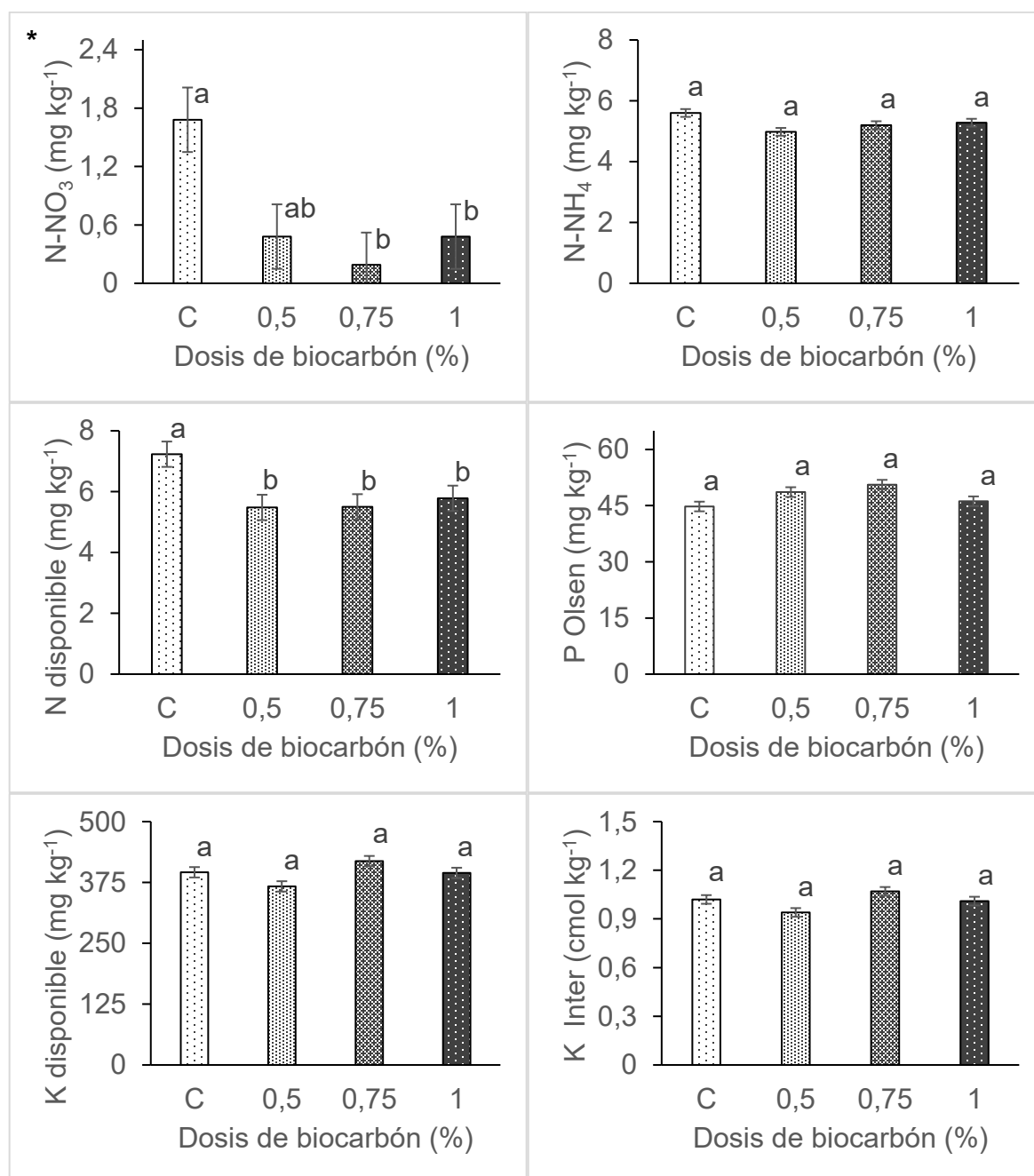
según la composición química del suelo y la interacción del tipo de biocarbón con los nutrientes. Dado esto es importante evaluar su impacto a largo plazo con el fin de optimizar su uso ante diferentes condiciones de suelo y agrícolas.

Figura 2. Análisis químicos de suelo areno francoso con diferentes dosis de biocarbón. Nitratos (N-NO_3^-), amonio (N-NH_4^+), nitrógeno disponible, fósforo olsen, potasio disponible, potasio intercambiable.



Tratamientos con igual letra sobre la barra, no difieren significativamente por la prueba de Dunn ($P > 0,05$). Donde C: Sin biocarbón, D1: 0,5%, D2: 0,75%, D3: 1%.

Figura 3. Concentración de nitratos en suelo franco arcilloso con diferentes dosis de biocarbón. Nitratos (N-NO₃), amonio (N-NH₄), nitrógeno disponible, fósforo olsen, potasio disponible, potasio intercambiable.

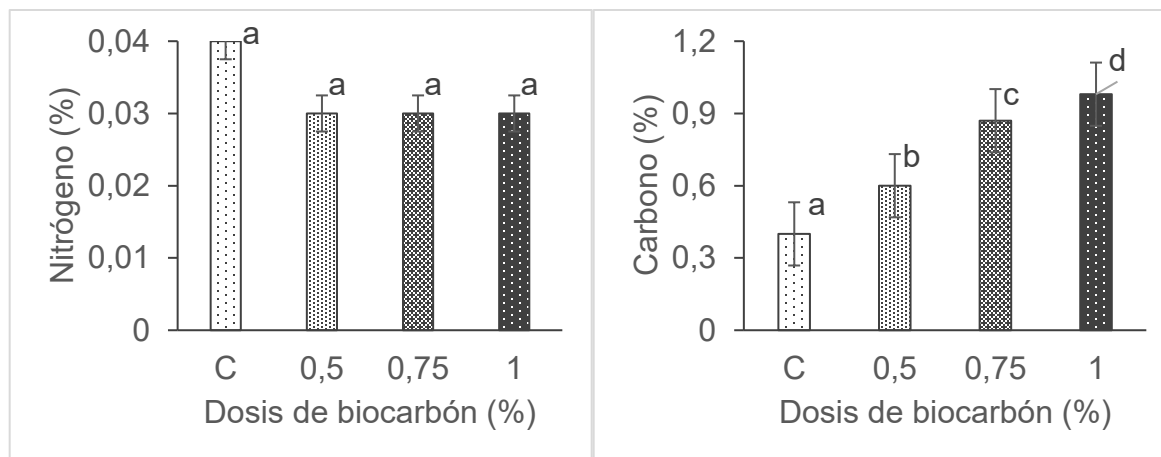


Los tratamientos marcados con (*) presentan diferencias significativas según la prueba de Kruskal-Wallis ($P \leq 0,05$). Letras iguales sobre las barras indican que no hay diferencias significativas según la prueba de Dunn ($P > 0,05$), mientras que letras diferentes indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$). Donde C: Sin biocarbón, D1: 0,5%, D2: 0,75%, D3: 1%.

Carbono y Nitrógeno total. La determinación de nitrógeno total no presentó diferencias significativas entre los tratamientos en ambos tipos de suelo. Con respecto al carbono total ambos suelos presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. En el suelo areno franco (P-valor < 0,0001), los tratamientos con biocarbón presentaron mayores incrementos, siendo el tratamiento D3 el que más aumentó, con 0,58% puntos porcentuales, seguido por D2 con 0,47% y D1 con 0,20%, en comparación al Control con 0,40%. En el suelo franco arcilloso (P-valor 0,0005), también se observaron valores superiores a mayores dosis de biocarbón, destacando el tratamiento D3 con un aumento del 0,76% puntos porcentuales, D2 con 0,50% y el D1 con 0,41% por sobre el Control con 2,80%. Estos resultados confirman el efecto positivo del biocarbón en la acumulación de carbono en los suelos, debido a su estabilidad térmica y estructura aromática recalcitrante que contribuye al secuestro de carbono. Esto le permite actuar como reservorio de carbono estable en el suelo absorbiendo y reteniendo el carbono de manera duradera evitando su liberación a la atmósfera como CO₂ (Shoudho et al., 2024). Un metaanálisis reveló un aumento relativo del 29% en el carbono orgánico del suelo en campo y del 75% en invernadero y laboratorio, destacando que el secuestro es más alto en suelos alcalinos, con residuos vegetales como materia prima del biocarbón y texturas finas (Gross et al., 2021). La iniciativa 4 por 1.000 promueve prácticas sostenibles de secuestro de carbono en suelos para mitigar el cambio climático. Un aumento del 0,4% anual en las reservas de carbono podría contrarrestar las emisiones antropogénicas, mejorar la seguridad alimentaria y adaptación al cambio climático (Chabbi et al., 2021). Limitando el calentamiento global por debajo de los 2°C y seguir el esfuerzo para limitar el aumento de la temperatura a no más de 1,5°C (Soussana et al., 2019). El biocarbón es clave en este proceso, permitiendo la participación en la compensación de carbono y mejorando la salud del suelo a través de créditos de carbono (Salma et al., 2024).

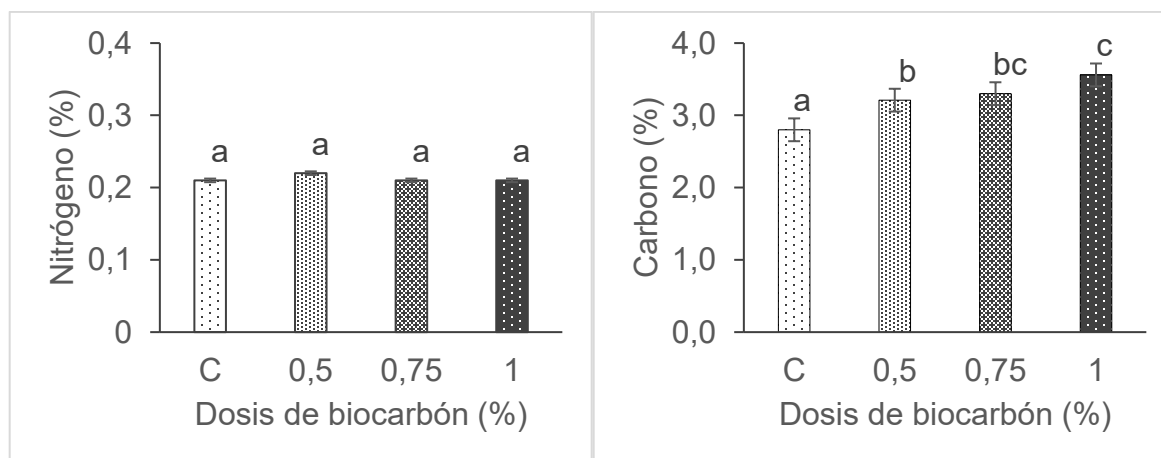
Estos resultados refuerzan la importancia del biocarbón como estrategia eficaz para el secuestro de carbono en suelos agrícolas, contribuyendo a la mitigación del cambio climático como a la mejora en la fertilidad del suelo, siendo necesario estudios a largo plazo para optimizar su aplicación.

Figura 4. Determinación porcentual de nitrógeno total y carbono total en suelo areno francoso.



Tratamientos con igual letra sobre la barra en Nitrógeno (%), no difieren significativamente según prueba de Dunn ($P > 0,05$). Tratamientos con diferente letra sobre la barra en Carbono (%), difieren significativamente por la prueba de LSD Fisher ($P \leq 0,05$). Donde C: Sin biocarbón, D1: 0,5%, D2: 0,75%, D3: 1%.

Figura 5. Determinación porcentual de nitrógeno total y carbono total en suelo franco arcilloso.



Tratamientos con igual letra sobre la barra en Nitrógeno (%), no difieren significativamente por la prueba de LSD Fisher ($P > 0,05$). Tratamientos con diferente letra sobre la barra en Carbono (%), difieren significativamente por la prueba de LSD Fisher ($P \leq 0,05$). Donde C: Sin biocarbón, D1: 0,5%, D2: 0,75%, D3: 1%.

Producción de biomasa. Los resultados de biomasa producida para cada suelo se presentan en la Tabla 1 y Tabla 2. En el suelo areno francoso, los tratamientos D2 y D3 resultaron en aumentos significativos en materia fresca (MF) y materia seca (MS) sobre los 8 cm de altura del cultivo, con incrementos de 113,04 y 221,7% para MF y, de 54,84% y 134,04% para MS en comparación con el Control (P -valor 0,0043

para MF y 0,0009 para MS). En cambio, el suelo franco arcilloso no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, sugiriendo que dosis mayores de biocarbón son más efectivas en suelos arenosos.

Estos resultados coinciden con estudios previos, Hussain et al. (2017) mencionan que el biocarbón puede mejorar el rendimiento de los cultivos, aunque su efectividad depende de factores como tipo y dosis de biocarbón, tipo de suelo y condiciones climáticas. Manka'abusi et al. (2024) en su investigación observaron que la adición de biocarbón de mazorca de maíz aumento en 32% la producción de repollo durante 4 años, con mejoras adicionales al aplicar una segunda dosis. Jeffery et al. (2011) reportaron incrementos significativos en la productividad de cultivos con dosis de biocarbón entre 10 y 100 ton ha⁻¹. Sin embargo, dosis entre 40 y 65 ton ha⁻¹, no mostraron efectos significativos, sugiriendo que no hay una relación clara entre la dosis de biocarbón y el aumento de la productividad. Singh et al. (2022) observaron que los cultivos en suelos de textura gruesa obtuvieron mayores impactos ante la adición de biocarbón en el suelo, alineándose con los resultados de este estudio. Esto sugiere que el impacto del biocarbón en la biomasa depende del tipo de suelo y características del cultivo, y que no existe una dosis óptima universal, sino que los efectos varían según el balance entre suelo, tipo de biocarbón y la dosis aplicada.

Lolium multiflorum se adapta a diversos suelos, prefiriendo suelos francos con un pH óptimo entre 6 a 7 y temperaturas entre 14°C y 30°C (CIREN, 2021). En este estudio, las temperaturas promedio oscilaron entre 12°C y 22°C, dentro del rango aceptable para su desarrollo. En el suelo areno francoso su aumento significativo en la producción de biomasa se puede relacionar a alguna mejora en la retención hídrica, un aumento leve en la disponibilidad de nutrientes siendo un suelo de baja fertilidad inicial y el incremento de su pH. Por otro lado, en el suelo franco arcilloso sus condiciones iniciales favorables, como su mayor capacidad de retención hídrica y fertilidad natural, pudieron limitar el efecto adicional del biocarbón. Esto demuestra la necesidad de ajustar las dosis de biocarbón según las características del suelo, ya que su impacto varía entre suelos de distinta textura y fertilidad.

Tabla 1. Biomasa producida de materia fresca y materia seca en diferentes etapas de crecimiento del cultivo a diferentes dosis de biocarbón en suelo areno francoso.

Tratamiento	MF 8cm (g)	MS 8cm (g)	MF Cosecha* (g)	MS Cosecha* (g)
C	5,75 a	0,93 a	5,8 a	3,70 a
D1	9,50 ab	1,04 ab	5,0 a	4,05 a
D2	12,25 b	1,44 b	6,0 a	4,60 a
D3	18,50 c	2,18 c	5,8 a	4,55 a

Tratamientos con igual letra en la columna, no difieren significativamente por la prueba de LSD Fisher ($p > 0,05$). (*) Tratamientos analizados con la prueba de Dunn. Donde C: Sin biocarbón, D1: 0,5%, D2: 0,75%, D3: 1%.

Tabla 2. Biomasa producida de materia fresca y materia seca en diferentes etapas de crecimiento del cultivo a diferentes dosis de biocarbón en suelo franco arcilloso.

Tratamiento	MF 8cm (g)	MS 8cm (g)	MF Cosecha (g)	MS Cosecha (g)
C	13,25 a	1,30 a	6,3 a	4,40 a
D1	14,50 a	1,96 a	6,8 a	4,93 a
D2	17,75 a	2,20 a	7,3 a	5,46 a
D3	19,25 a	2,48 a	8,0 a	5,86 a

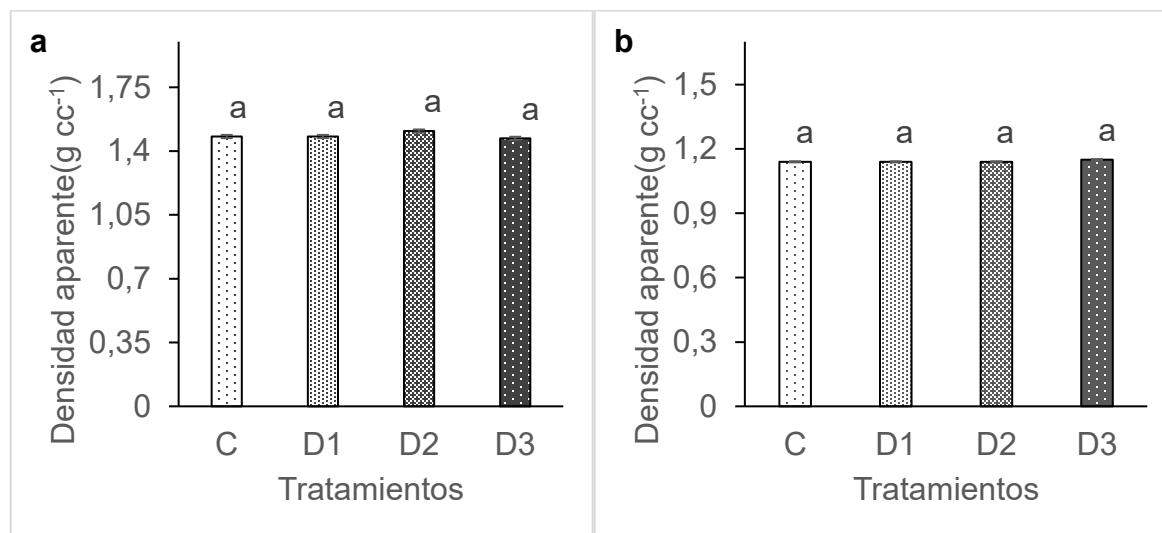
Tratamientos con igual letra en la columna, no difieren significativamente por la prueba de LSD Fisher ($p > 0,05$). Donde C: Sin biocarbón, D1: 0,5%, D2: 0,75%, D3: 1%.

Parámetros físicos del suelo

Densidad aparente. Para la densidad aparente, no se mostraron diferencias significativas en ambos suelos. Esto es relevante ya que valores elevados de densidad aparente se asocian con mayor compactación de suelo lo cual puede obstaculizar la expansión radicular y limitar el desarrollo del cultivo (Razzaghi et al., 2020). Estudios previos han mostrado resultados variables sobre el impacto del biocarbón en la densidad aparente. Moragues et al. (2017) no encontraron diferencias significativas ante la aplicación de biocarbón o ceniza de madera durante un periodo de 10 meses, lo que sugiere que el biocarbón podría no reducir la densidad aparente al corto plazo. Por otro lado, Zhang et al. (2020) observaron que una dosis de 50 ton ha⁻¹ de biocarbón redujo la densidad aparente en un suelo franco arcilloso, explicando que el biocarbón, al tener menor densidad y mayor

porosidad, mejora las propiedades físicas del suelo. Otro estudio destaca que la eficiencia del biocarbón para reducir la densidad aparente depende de factores como la composición del biocarbón, tipo de suelo y tasa de aplicación (Ahmad et al., 2022). Esto podría explicar las variaciones en los resultados observados entre los estudios.

Figura 6. Densidad aparente de los suelos con diferentes tratamientos de biocarbón.

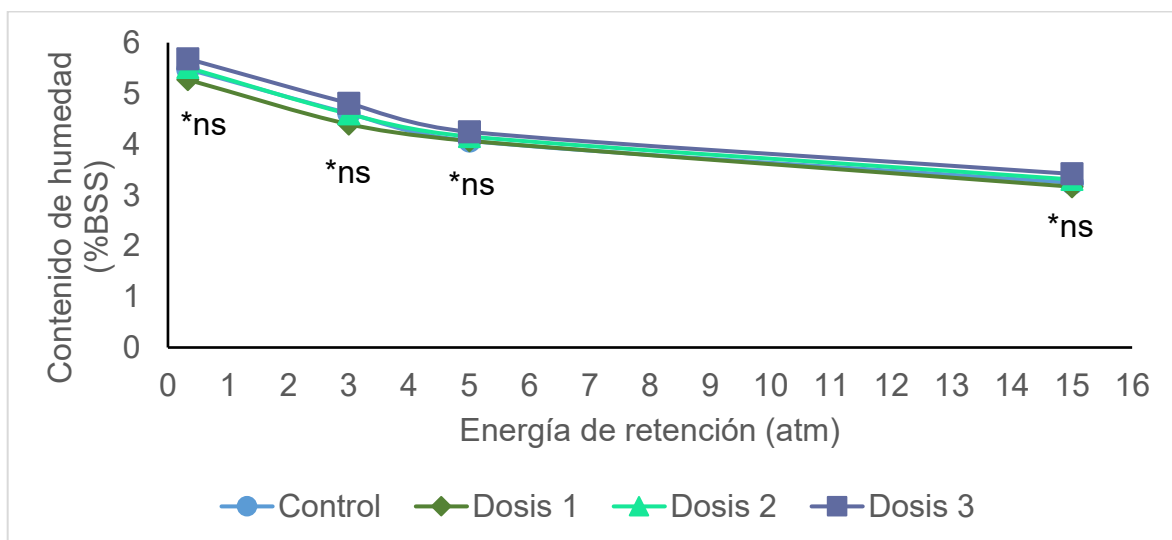


Letra a) suelo areno francoso, letra b) suelo franco arcilloso, tratamientos con igual letra sobre la barra, no difieren significativamente por la prueba de LSD Fisher ($P > 0,05$) en FA y Dunn en Fa. Donde C: Sin biocarbón, D1: 0,5%, D2: 0,75%, D3: 1%.

Retención hídrica. El biocarbón no mostró un impacto significativo en la retención de humedad gravimétrica entre los tratamientos en suelo areno francoso bajo diferentes tensiones. Con respecto al franco arcilloso, la adición de biocarbón no generó un efecto significativo probablemente debido a su alta capacidad de retención hídrica inicial. Abdulaziz et al. (2020) indicaron que el biocarbón aumenta la capacidad de retención de agua al mejorar la microporosidad del suelo, siendo más notorio en suelos con baja retención hídrica. Wang et al. (2019) reportaron que el impacto del biocarbón en la retención hídrica varía según el tipo de biocarbón, dosis y tamaño de partículas, donde el biocarbón de madera blanca no generó efecto a nivel de presión de capacidad de campo en suelos de marga arenosa muy fina y marga limosa, pero el biocarbón de cáscara de nuez al 1% incrementó a capacidad de campo en suelo arenoso fino, mientras que a mayor tamaño de

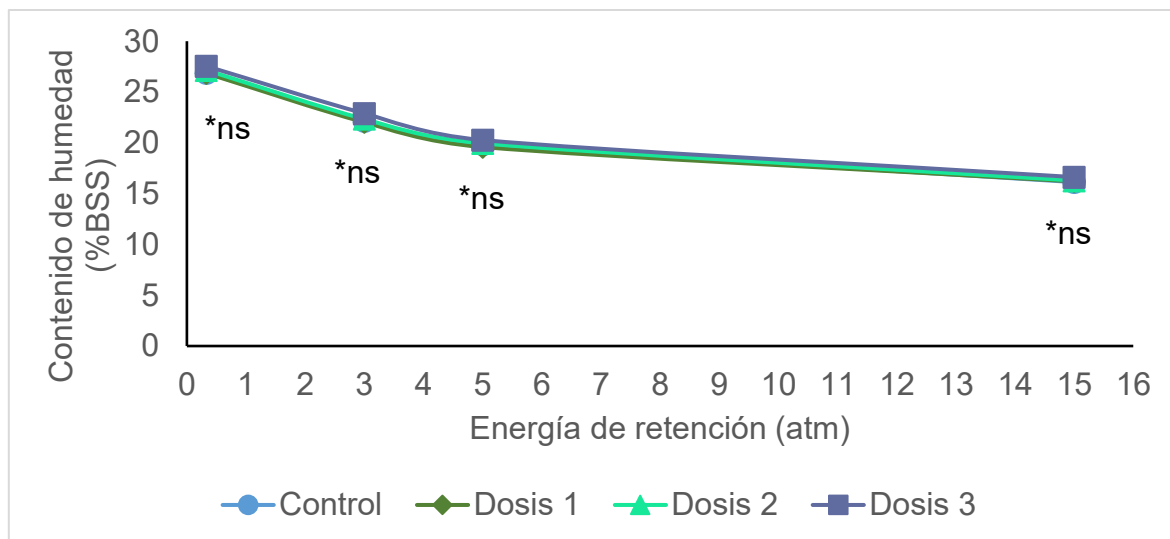
partículas (1-2 mm) a dosis de 0,5 y 1% mostró mejoras significativas en la capacidad de campo del suelo arenoso, pero no en su punto de marchitez permanente. Con respecto a los resultados del suelo franco arcilloso el estudio realizado por Zhang et al. (2021), demostró que el biocarbón mejora la retención de agua en suelos, especialmente en suelos arenosos con un aumento del 118% en agua disponible, mientras que los suelos limosos y arcillosos mostraron aumentos menores del 37% y 18%. Esto sugiere que la textura del suelo es el factor principal que influye en la retención de agua, aunque la dosis de biocarbón también juega un papel importante. En el estudio de Liu et al. (2017) se determinó como el biocarbón afecta la retención de agua en los suelos arenosos, destacando que el biocarbón aumenta la cantidad de agua disponible a capacidad de campo. Este efecto se debe a los intraporos, que retienen agua bajo presión, y los interporos que mejoran la retención a presiones más altas. Además, para maximizar la disponibilidad de agua para las plantas, se señala que el biocarbón debe tener alta porosidad interna, forma irregular y un proceso de elaboración estandarizado. Dado esto se aprecia la variabilidad del efecto del biocarbón debido a la textura de suelo.

Figura 7. Efecto de los tratamientos de biocarbón en el contenido de humedad gravimétrica (%HBSS) en suelo areno francoso.



Tratamientos con (*ns) no presentaron diferencias significativas por la prueba de LSD Fisher ($p \leq 0,05$). Donde C: Sin biocarbón, D1: 0,5%, D2: 0,75%, D3: 1%.

Figura 8. Efecto de los tratamientos de biocarbón en el contenido de humedad gravimétrica (%HBSS) en suelo franco arcilloso.



Tratamientos con (*ns) no presentaron diferencias significativas por la prueba de LSD Fisher ($p \leq 0,05$). Donde C: Sin biocarbón, D1: 0,5%, D2: 0,75%, D3: 1%.

Curvas de humedad de suelo

Absorción de agua con el ambiente. El déficit de presión de vapor (DPV) es la diferencia entre la presión de vapor de saturación del aire y la presión de vapor real, lo que indica la cantidad real de vapor presente en el aire (Song et al., 2022). Este parámetro afecta la transpiración de las plantas, ya que un DPV alto aumenta la demanda de agua en el ambiente, lo que puede generar estrés hídrico, reduciendo la tasa fotosintética y desarrollo de área foliar (Hsiao et al., 2019). Además, junto con precipitaciones impredecibles y las propiedades hidráulicas del suelo, el aumento de la demanda atmosférica puede limitar la disponibilidad de agua en el suelo, intensificando el déficit hídrico en las plantas (Koehler et al., 2023).

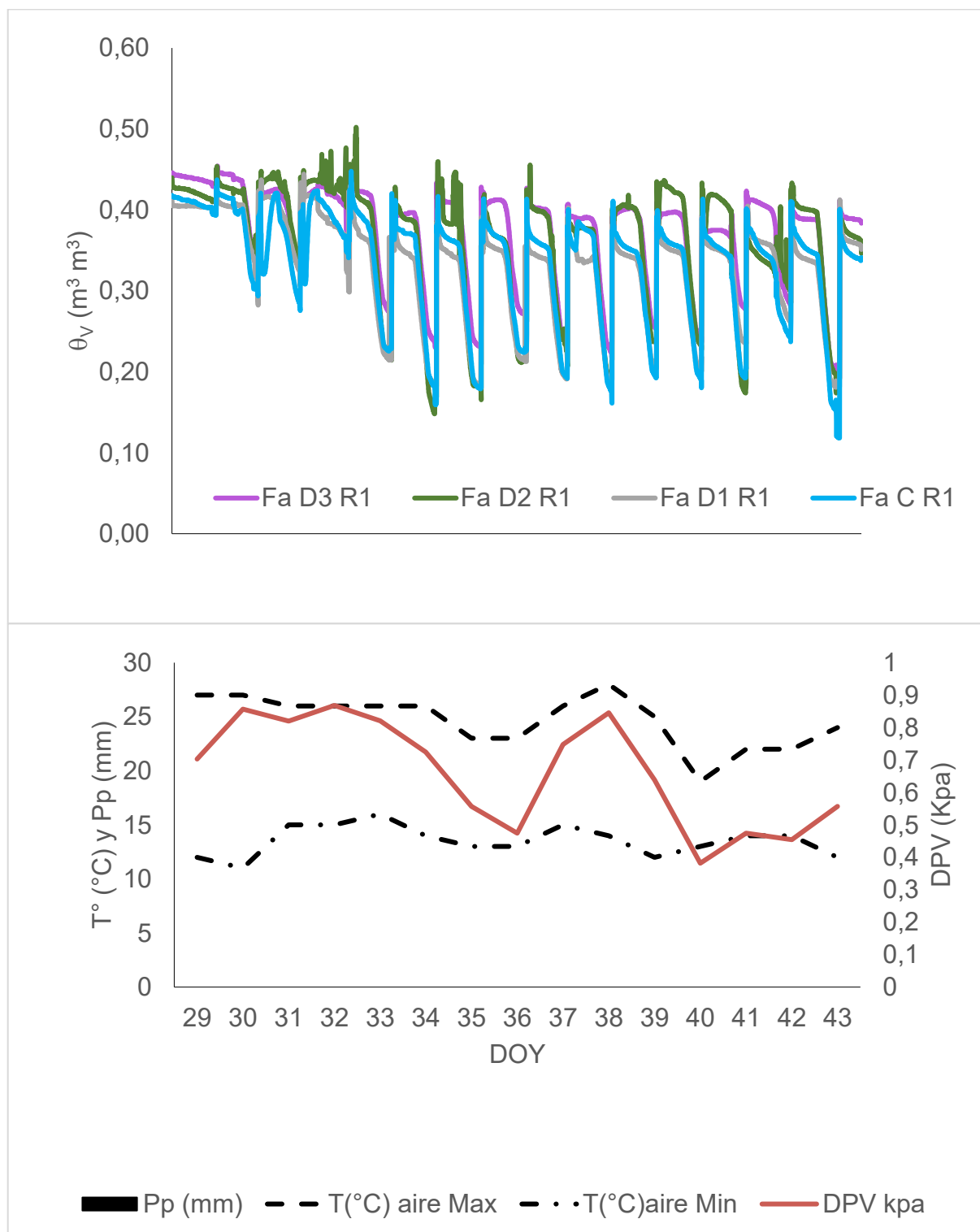
El análisis conjunto de los contenidos volumétricos de agua y los datos ambientales permite entender mejor la dinámica del suelo, identificando como las condiciones climáticas influyen en su capacidad para retener agua con respecto al DOY (día numérico del año). En el primer criterio de riego se aplicó riego diario solo a las repeticiones 1 de todos los tratamientos. En el suelo arenoso francoso, el tratamiento Control alcanzó una máxima retención hídrica de $0,341 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 32 con un DPV de 0,87 KPa, mientras que la mínima fue de $0,118 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 43 bajo

un DPV de 0,56 KPa. En los tratamientos con biocarbón, D1 mostró una retención máxima de $0,401 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 29 con un DPV 0,70 KPa y una mínima de $0,182 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ el DOY 34, DPV 0,72 KPa. En el tratamiento D2, la retención más alta fue de $0,380 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 31 con un DPV de 0,82 KPa, mientras que la más baja fue de $0,149 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 33 con el mismo DPV. Finalmente, D3 presentó el mayor almacenamiento de agua con $0,430 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 29 bajo un DPV de 0,70 KPa y el menor con $0,192 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 43 con un DPV de 0,56 KPa.

En el suelo franco arcilloso, el tratamiento Control registró la mayor retención de humedad con $0,409 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 28 y un DPV de 0,70 KPa, y la menor con $0,229 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 34 bajo un DPV de 0,72 KPa. En el tratamiento D1, la retención máxima fue de $0,426 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 29 con un DPV de 0,70 KPa, mientras que la mínima fue de $0,235 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 35 con un DPV de 0,56 KPa. Para el tratamiento D2, los valores oscilaron entre $0,418 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 29 ante un DPV 0,70 KPa y $0,203 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ el DOY 35 con DPV 0,56 KPa. En D3, la mayor retención se obtuvo en el DOY 29 con $0,443 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y un DPV de 0,70 KPa, mientras que la menor fue de $0,234 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 35 con un DPV de 0,56 KPa.

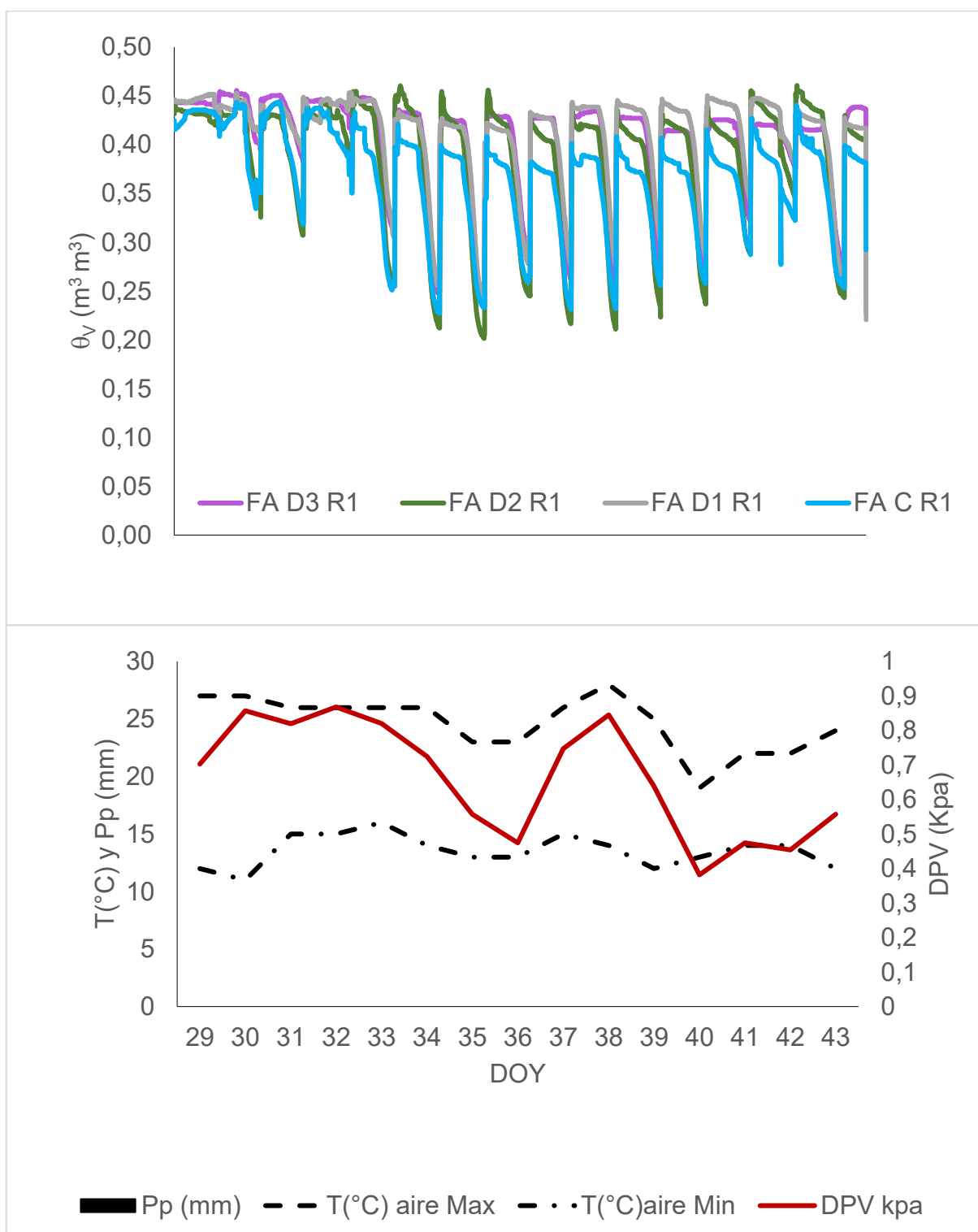
Estos resultados muestran que el biocarbón mejoró la retención hídrica en ambos tipos de suelo, con mayores incrementos en suelo areno franco, probablemente debido a su baja capacidad inicial de almacenamiento de agua. En el suelo franco arcilloso, aunque los valores fueron más altos, las diferencias entre tratamientos fueron menores, lo que podría atribuirse a su mayor capacidad natural de retención hídrica, lo cual se sugiere que su aplicación debe ajustarse según las propiedades específicas de da suelo ya que evidencia cómo el biocarbón, junto con las condiciones ambientales como el DPV, influye en la dinámica de agua en el suelo, siendo recomendable estudios a largo plazo para proporcionar información más detallada sobre la persistencia de estos efectos.

Figura 9. Contenido volumétrico de agua (θ_v) de la repetición 1 de tratamientos en suelo areno francoso.



Repeticiones 1 de todos los tratamientos en suelo areno francoso en función del DOY y las condiciones ambientales.

Figura 10. Contenido volumétrico de agua (θ_v) de la repetición 1 de tratamientos en suelo franco arcilloso.



Repeticiones 1 de todos los tratamientos en suelo franco arcilloso en función del DOY y las condiciones ambientales.

En el segundo criterio de riego, aplicando riego diariamente según cada tratamiento, el suelo areno franco en el tratamiento Control mostró una retención de agua de $0,274 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 46 con un DPV de $0,29 \text{ KPa}$. En contraste, el DOY 44, con un DPV de $0,66 \text{ KPa}$, registró una retención menor de $0,170 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, con una diferencia de $0,104 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ entre ambos días. En el tratamiento D1, el DOY 47 tuvo la mayor retención con $0,225 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,43 \text{ KPa}$, mientras que en el DOY 49, con un DPV de $0,68 \text{ KPa}$, disminuyó a $0,127 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, con una diferencia de $0,098 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Para el tratamiento D2, el menor contenido de humedad fue en el DOY 51 con $0,253 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,43 \text{ KPa}$, mientras que el DOY 52, con un DPV de $0,32 \text{ KPa}$, mostró una retención de $0,260 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, con una diferencia de $0,007 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. En el tratamiento D3, el DOY 53 registró la mayor retención con $0,263 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,50 \text{ KPa}$ y el DOY 55 la menor con $0,113 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,66 \text{ KPa}$, con una diferencia de $0,150 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. En el suelo franco arcilloso, el tratamiento Control mostró una retención de $0,359 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 46 con un DPV de $0,29 \text{ KPa}$. En cambio, en el DOY 44, el DPV de $0,66 \text{ KPa}$ redujo la retención a $0,239 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ con una diferencia de $0,120 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. En el tratamiento D1, el DOY 47 presentó una retención de $0,260 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,43 \text{ KPa}$, disminuyendo a $0,182 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 49 con un DPV de $0,68 \text{ KPa}$, con una diferencia de $0,078 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. En el tratamiento D2, el menor contenido fue en el DOY 52 con $0,358 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,32 \text{ KPa}$, y la mayor retención en el DOY 50 con $0,398 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,35 \text{ KPa}$, con una diferencia de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. En el tratamiento D3, el DOY 53 mostró la mayor retención con $0,389 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,50 \text{ KPa}$ y el DOY 55 la menor siendo $0,226 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,66 \text{ KPa}$, con una diferencia de $0,163 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

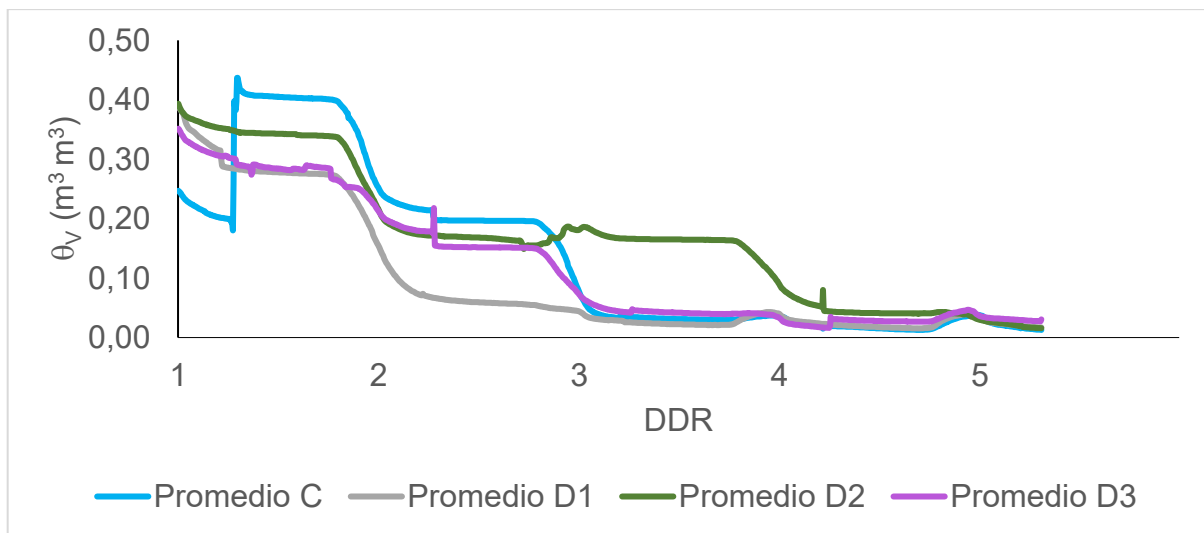
Durante el periodo de secado con un único riego y utilizando promedios de cada tratamiento, el suelo areno franco en el tratamiento Control mostró la mayor retención de agua el DOY 57 con $0,197 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,60 \text{ KPa}$ y una notable disminución el DOY 58 con $0,037 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,50 \text{ KPa}$, con una diferencia de $0,160 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. En el tratamiento D1, el valor inicial fue de $0,386 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ con DPV $0,62 \text{ KPa}$ en el DOY 61, que disminuyó a $0,073 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el DOY 62 con el DPV más alto con $0,78 \text{ KPa}$, mostrando una diferencia de $0,313 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. En el tratamiento D2, la retención máxima fue de $0,344 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ el DOY 66 con DPV $0,51 \text{ KPa}$, y disminuyó

a $0,177 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ el DOY 67 con un DPV de $0,38 \text{ KPa}$, con una diferencia de $0,167 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. En el tratamiento D3, la mayor retención fue el DOY 71 con $0,289 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ante un DPV $0,36 \text{ KPa}$, y la menor el DOY 72 con $0,152 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ con DPV $0,27 \text{ KPa}$, dando una diferencia de $0,137 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. En el suelo franco arcilloso, el tratamiento Control tuvo la mayor retención el DOY 56 con $0,363 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,62 \text{ KPa}$, bajando a $0,147 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ el DOY 59 con un DPV de $0,68 \text{ KPa}$, con una diferencia de $0,216 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. En el tratamiento D1, el DOY 61 presentó la mayor retención con $0,386 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,62 \text{ KPa}$, disminuyendo a $0,210 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ el DOY 62 con el DPV más alto $0,78 \text{ KPa}$, con una diferencia de $0,176 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Para el tratamiento D2, el DOY 66 mostró la mayor retención con $0,387 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,51 \text{ KPa}$ y el DOY 67 una menor con $0,231 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,38 \text{ KPa}$, dando una diferencia de $0,157 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. En el tratamiento D3, el DOY 71 alcanzó la mayor retención $0,373 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, DPV $0,36 \text{ KPa}$, mientras que el DOY 72 mostró una retención menor de $0,248 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ DPV $0,27 \text{ KPa}$, con una diferencia de $0,125 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Proceso de secado. En el periodo de secado, las unidades experimentales se regaron solo al inicio, lo que generó mayor retención de humedad al comienzo. En el suelo areno francoso, el tratamiento Control disminuyó su contenido volumétrico de agua de $0,197 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,009 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, dando una disminución total de $0,188 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. El tratamiento D1 bajó de $0,285 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,024 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ con una pérdida de $0,261 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, el tratamiento D2 de $0,344 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,016 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ con una disminución de $0,328 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, y el tratamiento D3 de $0,289 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,030 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ con una pérdida de $0,259 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. El tratamiento D2 tuvo la mayor retención inicial, pero D3 mantuvo mayor una retención más estable al final. En el suelo franco arcilloso, el tratamiento Control mostró una pérdida de agua de $0,233 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, iniciando con $0,363 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y finalizando con $0,130 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. El tratamiento D1 perdió $0,237 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, de $0,386 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,149 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. El tratamiento D2 tuvo una pérdida hídrica de $0,220 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, donde inicialmente tenía $0,387 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y finalizó con $0,167 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. El tratamiento D3 mostró la menor pérdida de agua, con $0,223 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, desde $0,386 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,163 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Esto sugiere que el tratamiento D3 es el tratamiento más eficiente en retención hídrica en este estudio. Estos resultados se alinean con el estudio realizado por Cai et al. (2024), el cual señala que los suelos arenosos disminuyen más rápido su

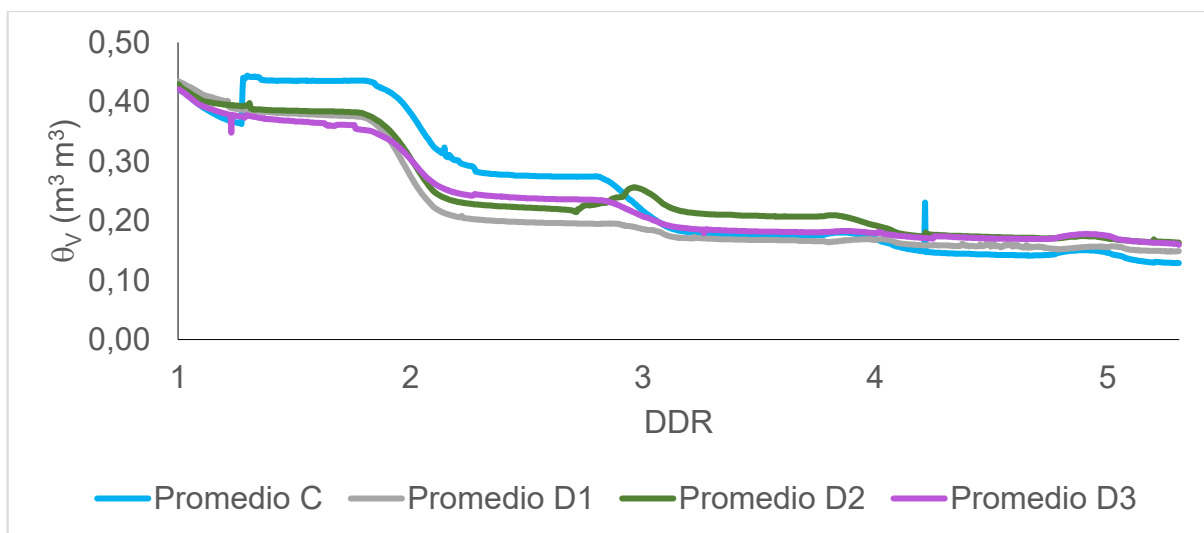
conductividad hidráulica en condiciones de alto DPV, impactando en la transpiración y el uso de agua en ambientes con baja disponibilidad hídrica.

Figura 11. Contenido volumétrico de agua (θ_v) promedio de tratamientos aplicado en periodo de secado en suelo areno francoso.



Cambio del contenido de humedad del suelo en m^3/m^3 en los diferentes tratamientos de aplicación de biocarbón en proceso de secado donde DDR: Días después de riego, C: Sin biocarbón, D1: 0,5%, D2: 0,75%, D3: 1%.

Figura 12. Contenido volumétrico de agua (θ_v) promedio de tratamientos aplicado en periodo de secado en suelo franco arcilloso.



Cambio del contenido de humedad del suelo en m^3/m^3 en los diferentes tratamientos de aplicación de biocarbón en proceso de secado donde DDR: Días después de riego, C: Sin biocarbón, D1: 0,5%, D2: 0,75%, D3: 1%.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que el biocarbón para el suelo areno francoso aumentó significativamente el pH y carbono total, mejorando la retención de fósforo olsen, pero sin cambios notables en potasio y nitrógeno total. En el suelo franco arcilloso, no se logró cambios significativos debido a su alta capacidad amortiguadora, presentando disminución en nitratos y aumento en carbono total. En los parámetros físicos no hubo efecto en ambos suelos.
2. El biocarbón mejoró la retención hídrica en el suelo areno francoso, especialmente a dosis del 1%, manteniendo mayor humedad en periodos de secado prolongado y en condiciones de alto déficit de presión de vapor (DPV). En el suelo franco arcilloso, las diferencias entre los tratamientos fueron en menor magnitud debido a que tiene mayor capacidad de retención hídrica inicial.
3. Se comprobó que la aplicación de biocarbón en suelo areno francoso incrementó significativamente la producción de biomasa en MF y MS en la primera cosecha a dosis del 1%. En cambio, suelo franco arcilloso no tuvo incremento de biomasa, dado que este suelo presenta mejores condiciones iniciales de fertilidad y retención hídrica, limitando el impacto el biocarbón en mayor producción del cultivo.

REFERENCIAS

1. Abdulaziz G. Alghamdi, A. A. (2020). Effect of biochar particle size on water retention and availability in a sandy loam soil. *Journal of Saudi Chemical Society*, 24, 1042-1050. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319610320301502>.
2. Abdulaziz, A., Arafat, A., & Hesham, M. I. (2020). Effect of biochar particle size on water retention and availability in a sandy loam soil. *Journal of Saudi Chemical Society*, 24, 1042-1050. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319610320301502>
3. Adekiya, A. O., Agbede, T. M., Olayanju, A., Ejue, W. S., Adekanye, T. A., Adenusi, T. T., & Ayeni, J. F. (2020). Effect of Biochar on Soil Properties, Soil Loss, and Cocoyam Yield on a Tropical Sandy Loam Alfisol. *The Scientific World Journal*. <https://doi.org/10.1155/2020/9391630>
4. Ahmad, S., Kuriqi, A., Dar, M. U., Bhat, O., Sammen, S. S., Towfiqul, A. R., . . . Heddad, S. (2022). Application of Biochar for Improving Physical, Chemical, and Hydrological Soil Properties: A Systematic Review. *Sustainability*, 14. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/17/11104>
5. Buss, W., Shepherd, J. G., Heal, K. V., & Mašek, O. (2018). Spatial and temporal microscale pH change at the soil-biochar interface,. *Geoderma*, 338, 50-52.
6. Cai, G., König, M., Carminati, A., Abdalla, M., Javaux, M., Wankmüller, F., & Ahmed, M. A. (2024). Transpiration response to soil drying and vapor pressure deficit is soil texture specific. *Plant and Soil*, 500, 129-145. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05818-2>
7. Chabbi, A., Kögel-Knabner, I., & Rumpel, C. (2021). Soil science in transition-(re)-defining its role under the global 4 per 1000 initiative. *Geoderma*, 385. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114891>
8. Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T. E., Malo, D. D., & Julson, J. L. (2014). Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(3), 393–404. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.789870>
9. CIREN. (2021). *Ficha Ballica Ciclo Corto*. Obtenido de <https://zonificacionmagallanes.ciren.cl/documents/199>
10. Domingues, R. R., Trugilho, P. F., Silva, C. A., Melo, I. C., Melo, L. C., Magriotis, Z. M., & Sánchez-Monedero, M. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PLOS ONE*, 1-19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884>
11. FAO. (2015). *Status of the World's Soil Resources*. Roma. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/>

12. Gao, S., Hoffman-Krull, K., Bidwell, A., & DeLuca, T. (2016). Locally produced wood biochar increases nutrient retention and availability in agricultural soils of the San Juan Islands, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 233, 43-54. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880916304315>
13. Gross, A., Bromm, T., & Glaser, B. (2021). Soil Organic Carbon Sequestration after Biochar Application: A Global Meta-Analysis. *Agronomy*, 11. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/12/2474>
14. Guo, M. (2020). The 3R Principles for Applying Biochar to Improve Soil Health. *Soil Systems*, 4(9). Obtenido de <https://www.mdpi.com/2571-8789/4/1/9>
15. Hossain, M. Z., Bahar, M. M., Sarkar, B., Donne, S. W., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., . . . 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-z>
16. Hsiao, J., Swann, A. L., & Kim, S.-H. (2019). Maize yield under a changing climate: The hidden role of vapor pressure deficit. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107692>
17. Hussain, M., Farooq, M., Nawaz, A., Al-Sadi, A. M., Solaiman, Z. M., Alghamdi, S. S., . . . Ok, Y. S. (2017). Biochar for crop production: potential benefits and risks. *Journal of Soils and Sediments*, 17, 685-716. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1360-2>
18. Jeffery, S., Verheijen, F., van der Velde, M., & Bastos, A. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144, 157-187. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880911003197#sec0110>
19. Koehler, T., Wankmüller, F. J., Sadok, W., & Carminati, A. (2023). Transpiration response to soil drying versus increasing vapor pressure deficit in crops: physical and physiological mechanisms and key plant traits. *Journal of Experimental Botany*, 74(16). <https://doi.org/10.1093/jxb/erad221>
20. Libutti, A. M. (2021). Hydrological Properties of a Clay Loam Soil as Affected by Biochar Application in a Pot Experiment. *Agronomy*, 11, 489. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/3/489>
21. Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C. A., & Gonnermann, H. M. (2017). Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *PLOS ONE*, 1-19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179079>
22. Luo, C., Yang, J., Chen, W., & Han, F. (2020). Effect of biochar on soil properties on the Loess Plateau: Results from field experiments. 369. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706119323699>

23. Manka'abusi, D., Zongo, N., Lompo, D. J., Steiner, C., Marschner, B., & Buerkert, A. (2024). Soil properties and agronomic effects of repeated biochar amendment and fertilization in an urban horticultural system of Burkina Faso. *European Journal of Agronomy*, 159. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030124001552>
24. Moragues, L., Arias, A., & Gartzia, N. (2017). Effects of biochar and wood ash on soil hydraulic properties: A field experiment involving contrasting temperate soils. *Geoderma*, 305, 144-152. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670611630458X>
25. Morales, C., & Parada, S. (2005). *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales*. CEPAL.
26. Ojeda, G., Mattana, S., Àvila, A., Alcañiz, J. M., Volkmann, M., & Bachmann, J. (2021). Are soil–water functions affected by biochar application? *Geoderma*, 249-250, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.02.014>
27. Oliveira, F. R., Patel, A. K., Jaisi, D. P., Sushil, A., Hui, L., & Khanal, K. S. (2017). Environmental application of biochar: Current status and perspectives. *Bioresouruce technology*, 246, 110-122.
28. Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706119322153>
29. Salma, A., Fryda, L., & Djelal, H. (2024). Biochar: A Key Player in Carbon Credits and Climate Mitigation. *Resources*, 13. <https://www.mdpi.com/2079-9276/13/2/31>
30. Shoudho, K. N., Khan, T. H., Ara, U. R., Khan, M. R., Shawon, Z. B., & Hoque, M. E. (2024). Biochar in global carbon cycle: Towards sustainable development goals. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666086524000146>
31. Singh, H., Northup, B. K., Rice, C. W., & Prasad, P. V. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. *Biochar*, 4, 8. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1>
32. Sohi, S., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol., R. (2010). *Advances in Agronomy* (Vol. 105).
33. Song, X., Miao, L., Jiao, X., Ibrahim, M., & Li, J. (2022). Regulating Vapor Pressure Deficit and Soil Moisture Improves Tomato and Cucumber Plant Growth and Water Productivity in the Greenhouse. *Horticulturae*, 8(2). <https://www.mdpi.com/2311-7524/8/2/147>

34. Soussana, J.-F., Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlík, P., . . . Lal, R. (2019). Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative. *Soil and tillage research*, 188, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.002>
35. Vandit, V., Sowmya, S., Komalkant, A., Sachin, P., Vandana, S., Girigan, G., . . . PV, A. (2021). Review of Large-Scale Biochar Field-Trials for Soil Amendment and the Observed Influences on Crop Yield Variations. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.710766>
36. Wang, D., Li, C., Parikh, S. J., & Scow, K. M. (2019). Impact of biochar on water retention of two agricultural soils – A multi-scale analysis. *Geoderma*, 185-191. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706118315829>
37. Wong, J. T., Chow, K. L., Chen, X. W., Ng, C. W., & Wong, M. H. (2022). Effects of biochar on soil water retention curves of compacted clay during wetting and drying. *Biochar*. <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00125-y>
38. Z, L., B, D., CA, M., & HM, G. (2017). Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *PLOS ONE*(1-19). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179079>
39. Zeitoun, R., Vandergeest, M., Vasava, H. B., Machado, P. V., Jordan, S., Parkin, G., . . . Biswas, A. (2021). In-Situ Estimation of Soil Water Retention Curve in Silt Loam and Loamy Sand Soils at Different Soil Depths. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s21020447>
40. Zhang, C., Li, X., Yan, H., Ullah, I., Zuo, Z., Li, L., & Yu, J. (2020). Effects of irrigation quantity and biochar on soil physical properties, growth characteristics, yield and quality of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377419319535>
41. Zhang, J., & You, C. (2013). Water Holding Capacity and Absorption Properties of Wood Chars. *Energy & Fuels*, 27, 2643-2648. <https://doi.org/10.1021/ef4000769>
42. Zhang, J., Amonette, J. E., & Flury, M. (2021). Effect of biochar and biochar particle size on plant-available water of sand, silt loam, and clay soil. *Soil and Tillage Research*, 212. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198721000623>