https://doi.org/10.69639/arandu.v13i3.2628

Efecto del carbón vegetal molido y la ceniza de bagazo de caña, con y sin herculizado, sobre la condición del sistema radical del banano (Musa spp., grupo AAA)

Effect of ground charcoal and sugarcane bagasse ash, with and without subsoiling, on banana root-system condition (Musa spp., AAA group)

Carlos Andrés Cely Mendoza
ccely1@utmachala.edu.ec
https://orcid.org/0009-0007-2684-6310
Universidad Técnica de Machala
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Machala - Ecuador

Diego Villaseñor Ortiz
dvillasenor@earth.ac.cr
https://orcid.org/0000-0001-5646-4451
Universidad Técnica de Machala, Ecuador
EARTH University, Costa Rica

Artículo recibido: 10 septiembre 2026- Aceptado para publicación:16 octubre 2026
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.

RESUMEN

La compactación limita la exploración radical del banano. Se evaluó el efecto del carbón vegetal molido y la ceniza de bagazo de caña, con y sin herculizado, sobre la condición del sistema radical en un suelo con antecedentes de compactación. Se utilizó un arreglo factorial 3 × 2 en bloques completos al azar, con cuatro repeticiones y 10 plantas por parcela. La resistencia a la penetración disminuyó de 2.340 a 1.580 kPa después del herculizado, registro interpretado como evidencia operativa y no como prueba experimental del mecanismo. Para corregir las diferencias basales, se aplicó ANCOVA a las 24 medias de parcela, con el valor inicial como covariable y el bloque en el modelo. La interacción enmienda × herculizado fue significativa en raíces vivas, semivivas, muertas y masa radical total secada al aire ($p < 0,0001$). El carbón vegetal molido más herculizado (T4) presentó la mayor media de raíces vivas (28,18 g) y la menor media de raíces muertas (21,13 g); la ceniza más herculizado (T6) ocupó el segundo lugar (27,37 y 24,59 g). La masa radical total disminuyó en todos los tratamientos; por tanto, el hallazgo principal fue una modificación de la condición del sistema radical y no un aumento general de masa. Los mecanismos físicos, químicos o nutricionales requieren confirmación mediante mediciones edáficas y caracterización de las enmiendas.

Palabras clave: carbón vegetal molido, condición radical, descompactación mecánica, residuos agroindustriales, resistencia a la penetración

ABSTRACT

Soil compaction limits banana root exploration. Ground charcoal and sugarcane bagasse ash, with and without subsoiling, were evaluated in a soil with a history of compaction. A 3 × 2 factorial arrangement was established in a randomized complete block design with four replications and 10 plants per plot. Penetration resistance decreased from 2,340 to 1,580 kPa after subsoiling; this was treated as operational evidence rather than an experimental test of mechanism. ANCOVA was applied to the 24 plot means, with baseline as covariate and block included in the model. The amendment × subsoiling interaction was significant for live, partially living, and dead roots and total air-dried root mass ($p < 0.0001$). Ground charcoal plus subsoiling (T4) had the greatest live-root mass (28.18 g) and the lowest dead-root mass (21.13 g), followed by ash plus subsoiling (T6; 27.37 and 24.59 g). Total root mass decreased in every treatment; therefore, the main finding was a change in root-system condition rather than a general increase in mass. Physical, chemical, and nutritional mechanisms require confirmation through soil measurements and amendment characterization.

Keywords: agro-industrial residues, ground charcoal, mechanical decompaction, penetration resistance, root-system condition

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Atribution 4.0 International.

INTRODUCCIÓN

El banano constituye uno de los cultivos perennes de mayor relevancia para la economía ecuatoriana por sus producción y contribución al sector agroexportador. En 2025, la producción nacional alcanzó 9,3 millones de toneladas en una superficie cosechada de 210.518 ha, lo que confirma su importancia estratégica para el desarrollo agrícola del país (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2025; Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2025). Al mismo tiempo, la sostenibilidad del cultivo enfrenta presiones asociadas con el cambio climático, eventos meteorológicos extremos, enfermedades emergentes como Fusarium oxysporum f. sp. cubense Raza 4 Tropical y degradación progresiva del suelo (FAO, 2025).

En este contexto, la funcionalidad del sistema radical condiciona la absorción de agua y nutrientes y, por tanto, la productividad del banano. La compactación incrementa la resistencia mecánica y altera el espacio poroso; la densidad aparente (ρb) y la porosidad total (Pt) son indicadores físicos relacionados, aunque no se midieron en este estudio (Hamza & Anderson, 2005; Frene et al., 2024). Estas condiciones pueden restringir la elongación y la ramificación de las raíces e inducir respuestas morfológicas y fisiológicas de estrés (Bengough et al., 2011; Correa et al., 2019). La recuperación del crecimiento radical también depende de la capacidad de ajuste fisiológico de la planta (Colombi & Keller, 2019).

En plantaciones sometidas a tránsito frecuente de maquinaria y a labores realizadas con humedad inadecuada pueden desarrollarse zonas de elevada resistencia a la penetración (Peralta Ogorek et al., 2025). La resistencia depende de la textura, la estructura y el contenido de agua al momento de medirla (Bengough et al., 2011; Frene et al., 2024).

En este sentido, el subsolado, denominado herculizado en este ensayo, rompe mecánicamente capas resistentes y puede modificar temporalmente el entorno radical (Schneider et al., 2017; Huang et al., 2023). Su eficacia depende de la profundidad de trabajo, la humedad, la textura y la reconsolidación posterior (Colombi & Keller, 2019; Vanderhasselt et al., 2024). Las respuestas varían entre sitios, por lo que deben comprobarse la existencia de capas restrictivas y la persistencia del efecto (Schneider et al., 2017). Por lo que, la exploración del subsuelo puede ampliar el acceso de las raíces al agua y a los nutrientes, pero esa función requiere mediciones específicas relacionadas a características físicas del suelo (Kautz et al., 2013).

Las enmiendas a base de carbón (C), caracterizadas como biocarbón pueden modificar la densidad aparente (ρb) y la porosidad total (Pt) del suelo (Mukherjee & Lal, 2013; Blanco-Canqui et al., 2021). También se han observado cambios en la agregación y en las propiedades hidrológicas (Omondi et al., 2016). La respuesta de la retención de agua varía según el suelo y el producto aplicado (Razzaghi et al., 2020; Zanutel et al., 2024). Los mecanismos y su magnitud dependen de la dosis, la materia prima y las condiciones de pirólisis (Spokas et al., 2012; Joseph et al., 2021). Asimismo, se han comunicado respuestas variables de la biota del suelo y de la

productividad vegetal (Jeffery et al., 2011; Lehmann et al., 2011). Estas propiedades no pueden atribuirse directamente al carbón vegetal molido artesanal evaluado aquí, porque no se caracterizaron su proceso térmico ni su composición fisicoquímica.

En ambientes tropicales se han comunicado respuestas agronómicas favorables a biochars caracterizados, aunque su magnitud varía según el material y el contexto edáfico (Jeffery et al., 2017). En banano también se han descrito respuestas a materiales carbonizados caracterizados (Barrezueta-Unda et al., 2022; Nagula et al., 2021). Otro estudio en banano encontró que la respuesta depende de la dosis de biocarbón y de la fertilización aplicada (Barrezueta-Unda et al., 2023). Sin embargo, permanece poco estudiado si una intervención mecánica modifica la respuesta del sistema radical a materiales de naturaleza contrastante, como el carbón vegetal molido y la ceniza de bagazo de caña.

Los subproductos de la industria azucarera pueden aportar elementos minerales al suelo, aunque su composición depende del proceso que los origina (Dotaniya et al., 2016). En particular, la ceniza de bagazo puede contener K, P, Ca, Mg y Si, pero la disponibilidad de estos elementos cambia con la combustión y el manejo posterior (Dombinov et al., 2022; Ferreira et al., 2023). En este estudio, el contacto previo con agua y vinaza, seguido de sedimentación y secado, impide asumir que el material conservó la composición típica de una ceniza recién generada.

En consecuencia, el vacío de conocimiento abordado fue la respuesta conjunta del sistema radical del banano a una intervención mecánica y a dos enmiendas no equivalentes. El interés se centró en determinar si el efecto del herculizado cambiaba dentro de cada condición de enmienda, sin atribuir de antemano la respuesta a mecanismos físicos, químicos o nutricionales no medidos.

El objetivo fue evaluar el efecto del carbón vegetal molido y la ceniza de bagazo de caña, con y sin herculizado, sobre la masa y la condición de raíces vivas, semivivas y muertas del banano en un suelo con antecedentes de compactación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se ejecutó en una plantación comercial de banano ubicada en la parroquia San Carlos, del cantón Balao, provincia del Guayas, Ecuador, aproximadamente a 20 m s. n. m. La zona presentó una temperatura media anual de 26,1 °C, humedad relativa ambiental media de 84,6 % y precipitación acumulada de 812 mm entre enero y julio (INAMHI, 2026; NASA POWER, 2026).

El suelo presentó 5,4 % de materia orgánica, pH 6,7, capacidad de intercambio catiónico de 17,9 cmol(+) kg^{-1}, saturación de bases de 70 % y conductividad eléctrica (CE) de 0,10 mS cm^{-1}. Para diagnosticar su condición física, la resistencia a la penetración se evaluó en campo con un penetrómetro manual de cono, equipado con una punta de 30° y 12,83 mm de diámetro. Se realizaron 100 mediciones distribuidas sistemáticamente en el área experimental, desde la superficie hasta 30 cm de profundidad, con una humedad del suelo de 76 %. La resistencia

promedio disminuyó de 2.340 a 1.580 kPa después del herculizado, una reducción de 760 kPa (32,48 %). Debido a que no se determinaron la densidad aparente (ρb) ni la porosidad total (Pt), esta reducción se consideró evidencia complementaria de la labor mecánica y no una demostración del mecanismo responsable de la respuesta radical. Por ello, el sitio se describió como un suelo con antecedentes de compactación.

Se empleó un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 3 × 2: tres niveles de enmienda (sin enmienda, carbón vegetal molido y ceniza de bagazo de caña) y dos niveles de herculizado (sin y con labor). Se establecieron seis tratamientos y cuatro bloques. Cada parcela estuvo constituida por 10 plantas, con distancia de 2,5 × 3,0 m. Las plantas fueron unidades de muestreo dentro de cada parcela; la parcela fue la unidad experimental (n = 4 parcelas por tratamiento; N = 24). Los seis tratamientos y sus dosis se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1

Tratamientos evaluados y dosis de aplicación.

Tratamiento	Enmienda	Dosis	Herculizado
T1	Sin enmienda	0	No
T2	Sin enmienda	0	Sí
T3	Carbón vegetal molido	0,5 kg planta^{-1} mes^{-1} × 4	No
T4	Carbón vegetal molido	0,5 kg planta^{-1} mes^{-1} × 4	Sí
T5	Ceniza de bagazo	0,5 kg planta^{-1} mes^{-1} × 4	No
T6	Ceniza de bagazo	0,5 kg planta^{-1} mes^{-1} × 4	Sí

El carbón vegetal molido procedió de madera de pino y fue elaborado artesanalmente en Saquisilí, Ecuador. No se dispuso de registros de temperatura, tiempo de residencia, disponibilidad de oxígeno, rendimiento del proceso ni análisis de pH, conductividad eléctrica, cenizas, carbono, nutrientes, superficie específica o contaminantes. En consecuencia, el material se denominó consistentemente carbón vegetal molido y no biocarbón; la literatura sobre biochar se empleó únicamente como referencia de mecanismos hipotéticos, sin asumir equivalencia entre materiales.

La ceniza de bagazo de caña utilizada se obtuvo del Ingenio Agro-Azúcar como subproducto de la combustión de bagazo de Saccharum officinarum L. Durante la zafra fue transportada por canales hacia piscinas de oxidación, donde entró en contacto con agua y vinaza, residuo líquido generado durante la producción de etanol de caña de azúcar, que puede contener materia orgánica y nutrientes, entre ellos K (Carpanez et al., 2022); posteriormente se sedimentó, se secó naturalmente, se recolectó y se almacenó hasta su aplicación. Este manejo pudo lixiviar, concentrar o transformar fracciones solubles y modificar el pH y la salinidad respecto de una ceniza fresca. Al no disponerse de caracterización química del material aplicado, no se infirieron aportes específicos de nutrientes.

Las enmiendas se distribuyeron superficialmente en forma de media luna frente a la planta hija, a razón de 0,5 kg planta^{-1} mes^{-1} durante cuatro meses, equivalente a una dosis acumulada de 2,0 kg planta^{-1}, de acuerdo con el esquema de aplicación descrito por Barrezueta-Unda et al. (2022). El programa convencional de fertilización se mantuvo uniforme en todas las parcelas. El herculizado se realizó a 60 cm de la planta hija mediante un implemento conocido como Hércules de 45 cm de ancho, provisto de cuatro cinceles de 30 cm de longitud. Se efectuaron tres pasadas por planta, siguiendo una disposición en forma de media luna frente a esta, bajo una condición de humedad del suelo de 76 %. La profundidad efectiva de trabajo osciló entre 25 y 30 cm.

En cada evaluación se extrajo un monolito de suelo de 30 × 15 × 30 cm, hasta una profundidad efectiva de 30 cm. En el muestreo inicial, el monolito se ubicó frente a la planta hija, en su lateral derecho y a 10 cm del pseudotallo, tomando como referencia el eje formado entre la planta madre y la planta hija. Cuatro meses después, el segundo monolito se extrajo en el lateral izquierdo de la misma planta, en un volumen de suelo no intervenido previamente, manteniendo la distancia de 10 cm y las mismas dimensiones y profundidad de muestreo.

Fotografía del procedimiento de extracción del monolito de suelo de 30 × 15 × 30 cm.

Las raíces recuperadas se lavaron y clasificaron morfológicamente como vivas cuando presentaron coloración blanca o crema, turgencia, flexibilidad y tejidos íntegros; semivivas cuando mostraron coloración amarillenta o café claro y pérdida parcial de turgencia; y muertas cuando exhibieron coloración café oscura o negra, fragilidad, necrosis y pérdida de integridad tisular. Después del lavado, las raíces de cada categoría se colocaron por separado en recipientes identificados y se almacenaron durante una semana dentro de un galpón, protegidas de la radiación solar directa y la lluvia, para su secado al aire. Posteriormente, cada categoría se pesó por separado y los resultados se expresaron como masa de raíces secadas al aire por monolito (g). Esta variable no corresponde a peso fresco ni a materia seca determinada en horno hasta masa constante. Para cada parcela se calculó el promedio de las 10 plantas evaluadas. La estandarización de las dimensiones, la distancia y la profundidad de extracción permitió reducir la variabilidad asociada con la distribución espacial de las raíces del banano (Coelho et al., 2022).

Debido a las diferencias iniciales, la inferencia principal se realizó mediante ANCOVA sobre las medias de parcela (N = 24), estrategia apropiada para comparar valores finales cuando se dispone de una medición basal (Vickers & Altman, 2001). El valor final fue la variable dependiente, la condición inicial correspondiente fue la covariable, y se incluyeron bloque, enmienda, herculizado y enmienda × herculizado. Las 10 plantas de cada parcela se promediaron y se consideraron submuestras, no réplicas independientes. Los efectos simples del herculizado se estimaron dentro de cada nivel de enmienda a partir del modelo ($\alpha = 0,05$). Los cambios porcentuales se conservaron solo como descripción biológica. En el modelo factorial, los cinco grados de libertad de los seis tratamientos se descomponen en enmienda (2), herculizado (1) e interacción (2); la prueba global de tratamiento no es un efecto adicional a estos componentes. Se

presentan la prueba global y el contraste de interacción; las pruebas de los efectos principales no se informan por separado.

RESULTADOS

Las mediciones iniciales difirieron entre tratamientos, por lo que el cambio porcentual no se utilizó para corregir el desequilibrio basal. En el ANCOVA basado en 24 medias de parcela, el valor inicial fue significativo para raíces vivas ($F_{1,14}$ = 53,50; $p < 0,0001$), semivivas ($F_{1,14}$ = 362,41; $p < 0,0001$), muertas ($F_{1,14}$ = 26,55; $p = 0,0001$) y masa radical total secada al aire ($F_{1,14}$ = 95,09; $p < 0,0001$). La Tabla 2 muestra las medias iniciales observadas usadas como referencia descriptiva.

Tabla 2

Masa radical inicial secada al aire por tratamiento (media observada ± EE de cuatro parcelas; g por monolito)

Trat.	Vivas (g)	Semivivas (g)	Muertas (g)	Total (g)
T1	15,40 ± 0,20	15,38 ± 0,30	44,02 ± 0,41	74,80 ± 0,67
T2	14,96 ± 0,33	15,81 ± 0,12	43,12 ± 0,99	73,88 ± 1,21
T3	17,66 ± 0,23	37,13 ± 0,35	47,46 ± 0,56	102,25 ± 0,70
T4	17,65 ± 0,30	38,93 ± 1,51	48,39 ± 0,44	104,96 ± 2,05
T5	18,97 ± 0,22	31,23 ± 0,39	44,05 ± 0,83	94,25 ± 0,86
T6	19,62 ± 0,28	31,44 ± 0,20	46,05 ± 1,16	97,11 ± 1,12

La prueba global de los seis tratamientos fue significativa para raíces vivas ($F_{5,14}$ = 257,56), semivivas ($F_{5,14}$ = 212,97), muertas ($F_{5,14}$ = 257,60) y masa radical total ($F_{5,14}$ = 145,53; $p < 0,0001$ en las cuatro variables). Esta prueba de cinco grados de libertad reúne enmienda, herculizado e interacción, sin sustituir sus pruebas individuales (Tabla 5). Las medias finales ajustadas por el valor inicial y el bloque se presentan en la Tabla 3. T4 presentó la mayor media ajustada de raíces vivas (28,18 g) y la menor de raíces muertas (21,13 g); T6 ocupó el segundo lugar (27,37 y 24,59 g). Para masa radical total, T4 y T6 registraron las medias ajustadas más bajas (68,01 y 73,29 g).

Tabla 3

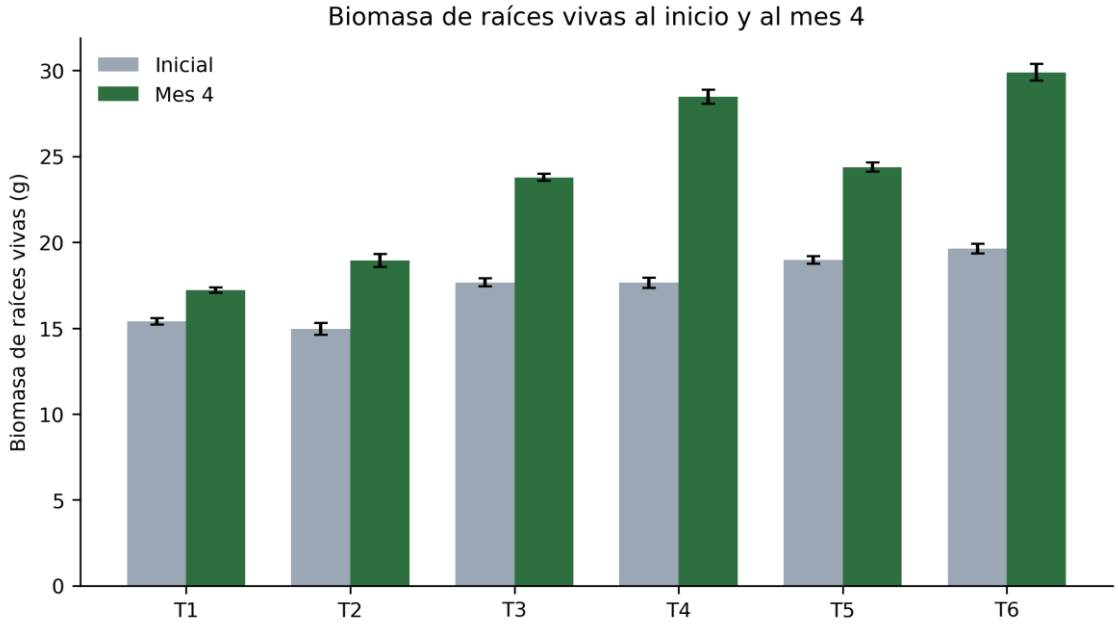
Medias finales ajustadas mediante ANCOVA sobre las medias de parcela, con control del valor inicial y del bloque (media ajustada ± EE; g por monolito)

Trat.	Vivas (g)	Semivivas (g)	Muertas (g)	Total (g)
T1	19,44 ± 0,34	26,35 ± 0,65	40,31 ± 0,39	84,83 ± 1,49
T2	21,67 ± 0,41	25,25 ± 0,63	33,60 ± 0,46	79,35 ± 1,57
T3	23,46 ± 0,17	22,77 ± 0,45	32,82 ± 0,42	79,43 ± 1,05
T4	28,18 ± 0,17	18,36 ± 0,54	21,13 ± 0,50	68,01 ± 1,27
T5	22,58 ± 0,29	24,88 ± 0,19	34,58 ± 0,39	83,02 ± 0,49
T6	27,37 ± 0,38	20,58 ± 0,20	24,59 ± 0,35	73,29 ± 0,66

La Figura 1 presenta las medias observadas de raíces vivas al inicio y al cuarto mes. Los valores aumentaron en los seis tratamientos; los incrementos descriptivos fueron mayores en T4 y T6. Estas barras no representan las medias ajustadas de la Tabla 3.

Figura 1

Masa de raíces vivas secadas al aire al inicio y al cuarto mes (medias observadas)

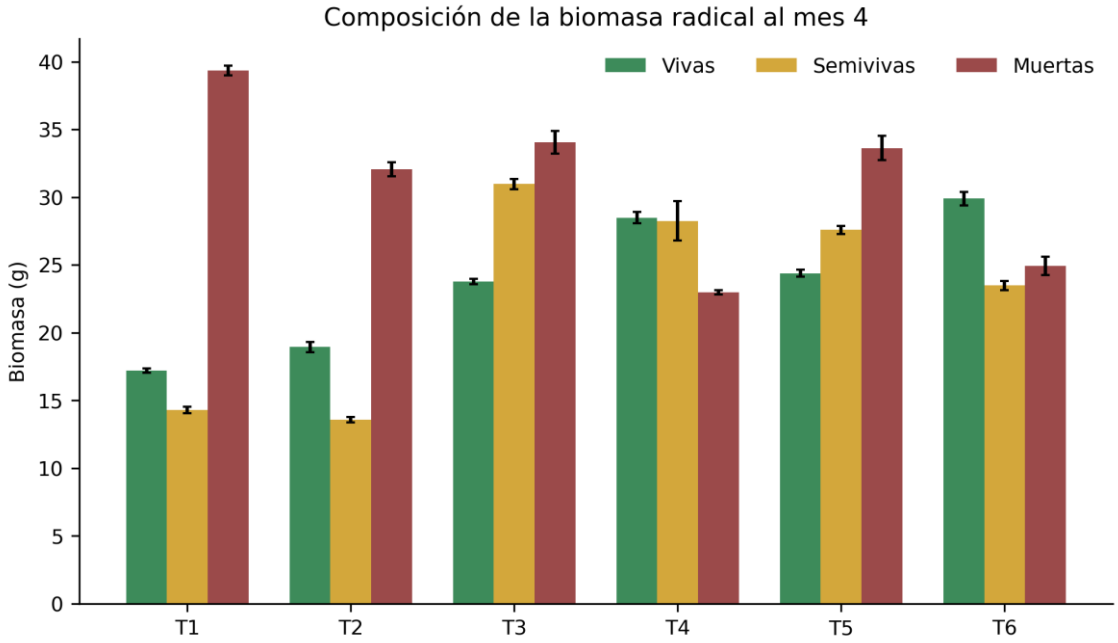


Barras: media observada ± EE de cuatro parcelas, en g por monolito. Comparación descriptiva; la inferencia se basa en el ANCOVA de los valores finales.

La Figura 2 desglosa las medias finales observadas de raíces vivas, semivivas y muertas. T4 y T6 mostraron descriptivamente mayor componente vivo y menor componente muerto que los tratamientos sin herculizado del mismo nivel de enmienda. Para la comparación inferencial ajustada deben consultarse la Tabla 3 y las Figuras 3 y 4.

Figura 2

Componentes de la masa radical secada al aire al cuarto mes (medias observadas)



Barras: media observada ± EE de cuatro parcelas, en g por monolito; no son medias ajustadas por ANCOVA.

Como medida descriptiva, los cambios porcentuales respecto de la evaluación inicial se presentan en la Tabla 4. En todos los tratamientos aumentó la masa de raíces vivas, con incrementos entre 11,82 y 61,45 %, mientras que las raíces semivivas y muertas disminuyeron en todos los casos. T4 y T6 mostraron los mayores incrementos de raíces vivas (61,45 y 52,34 %, respectivamente) y las mayores reducciones de raíces muertas (−52,50 y −45,85 %), así como disminuciones de raíces semivivas de −27,54 y −25,31 %. La masa radical total también disminuyó en los seis tratamientos, con reducciones entre −5,27 % en T1 y −24,07 % en T4. Estos porcentajes facilitan la interpretación biológica, pero no sustituyen el ajuste por covariable ni constituyen la prueba inferencial principal.

Los contrastes de las medias ajustadas indicaron que el herculizado aumentó las raíces vivas sin enmienda (T2−T1: +2,23 g), con carbón vegetal molido (T4−T3: +4,72 g) y con ceniza (T6−T5: +4,78 g; $p < 0,0001$ en los tres contrastes). También redujo las raíces muertas en 6,70; 11,68 y 9,99 g, respectivamente ($p < 0,0001$). La diferencia de medias ajustadas fue mayor cuando la labor se combinó con carbón vegetal molido o ceniza de bagazo de caña.

Tabla 4

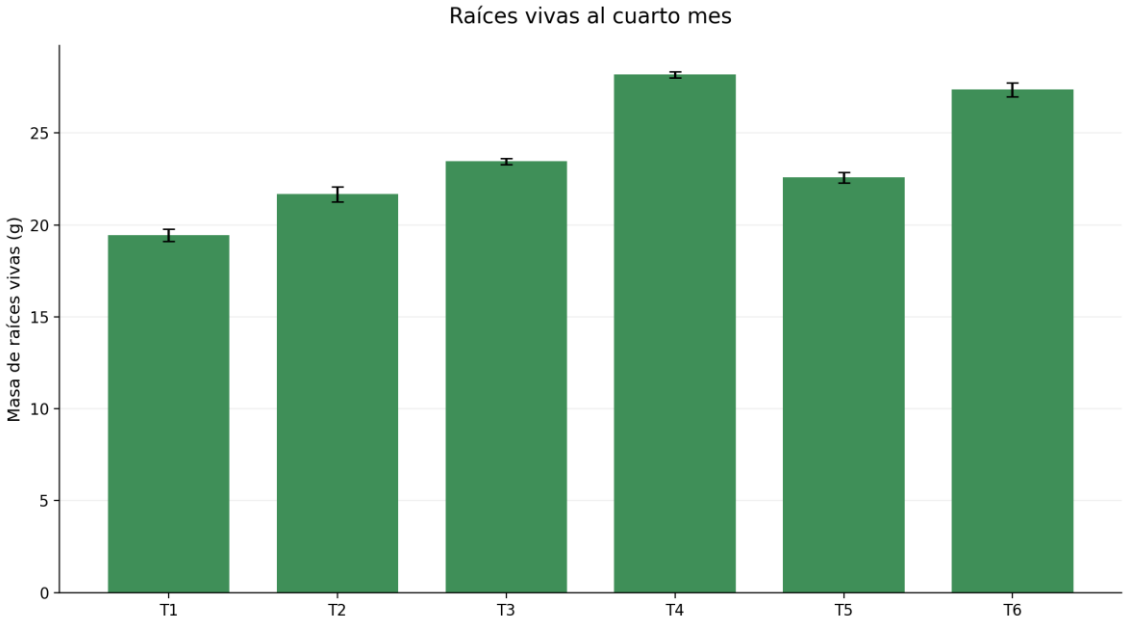
Cambio porcentual de las medias observadas respecto de la evaluación inicial (media ± EE; descripción complementaria, no inferencia principal)

Trat.	Vivas (%)	Semivivas (%)	Muertas (%)	Total (%)
T1	+11,82 ± 0,52	-7,03 ± 0,67	-10,61 ± 0,80	-5,27 ± 0,52
T2	+26,72 ± 0,60	-14,03 ± 0,58	-25,60 ± 0,73	-12,54 ± 0,38
T3	+34,68 ± 1,26	-16,56 ± 0,38	-28,30 ± 1,00	-13,16 ± 0,53
T4	+61,45 ± 0,60	-27,54 ± 0,95	-52,50 ± 0,27	-24,07 ± 0,49
T5	+28,49 ± 0,22	-11,65 ± 0,59	-23,67 ± 0,73	-9,17 ± 0,45
T6	+52,34 ± 1,27	-25,31 ± 0,65	-45,85 ± 0,56	-19,35 ± 0,41

Las medias ajustadas de raíces vivas al cuarto mes se muestran en la Figura 3. T4 presentó la mayor (28,18 g), seguido de T6 (27,37 g), mientras que T1 registró 19,44 g. La inferencia corresponde al modelo de ANCOVA y no a una comparación directa de barras observadas.

Figura 3

Raíces vivas al cuarto mes: medias ajustadas por ANCOVA

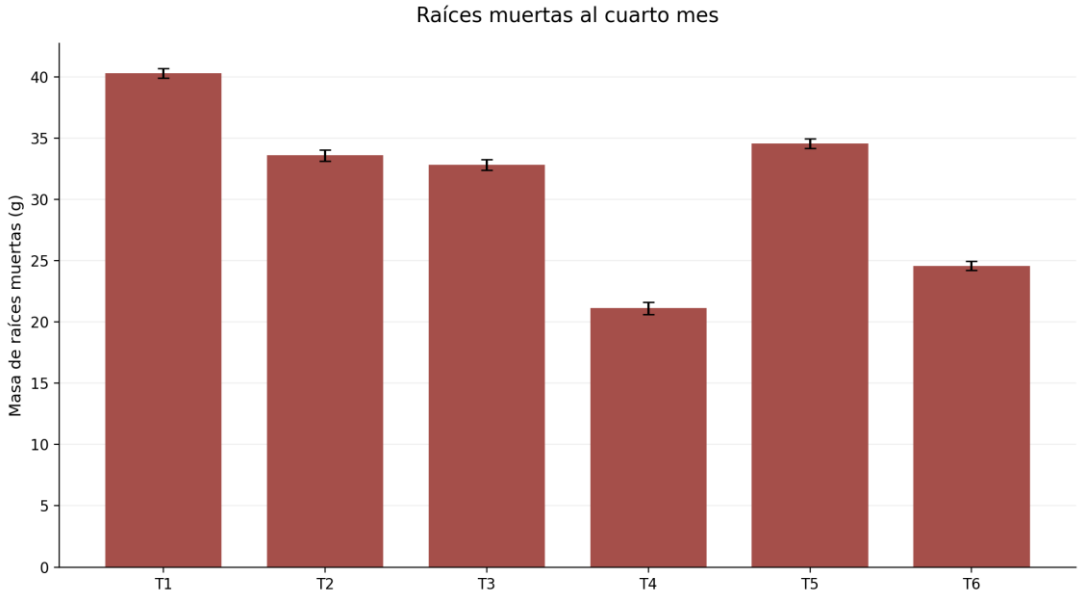


Barras: media ajustada ± EE sobre medias de parcela, en g por monolito, con control del valor inicial y del bloque.

Las medias ajustadas de raíces muertas al cuarto mes se muestran en la Figura 4. T4 presentó la menor (21,13 g), seguido de T6 (24,59 g), mientras que T1 registró 40,31 g.

Figura 4

Raíces muertas al cuarto mes: medias ajustadas por ANCOVA



Barras: media ajustada ± EE sobre medias de parcela, en g por monolito, con control del valor inicial y del bloque.

La interacción enmienda × herculizado fue significativa para raíces vivas ($F_{2,14} = 34,91$; $p < 0,0001$), semivivas ($F_{2,14} = 100,42$; $p < 0,0001$), muertas ($F_{2,14} = 23,74$; $p < 0,0001$) y masa radical total ($F_{2,14} = 23,80$; $p < 0,0001$; Tabla 5). Por ello, la interpretación se concentró en los contrastes del herculizado dentro de cada nivel de enmienda.

Tabla 5

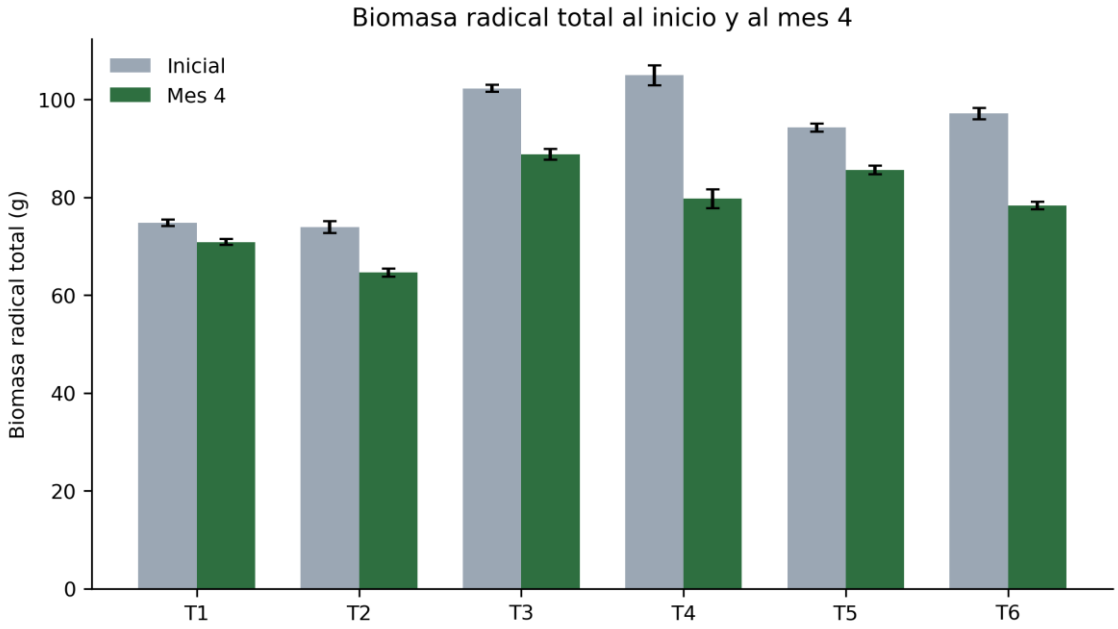
ANCOVA de las medias finales de parcela, con ajuste por el valor inicial y el bloque. La prueba global de tratamiento (5 gl) engloba enmienda (2 gl), herculizado (1 gl) e interacción (2 gl); no debe sumarse a la interacción. Las pruebas de los efectos principales no se presentan por separado

Variable	Fuente	gl	F	p
Raíces vivas	Valor inicial	1	53,50	< 0,0001
Raíces vivas	Tratamiento global	5	257,56	< 0,0001
Raíces vivas	Enmienda × herculizado	2	34,91	< 0,0001
Raíces semivivas	Valor inicial	1	362,41	< 0,0001
Raíces semivivas	Tratamiento global	5	212,97	< 0,0001
Raíces semivivas	Enmienda × herculizado	2	100,42	< 0,0001
Raíces muertas	Valor inicial	1	26,55	0,0001
Raíces muertas	Tratamiento global	5	257,60	< 0,0001
Raíces muertas	Enmienda × herculizado	2	23,74	< 0,0001
Masa radical total	Valor inicial	1	95,09	< 0,0001
Masa radical total	Tratamiento global	5	145,53	< 0,0001
Masa radical total	Enmienda × herculizado	2	23,80	< 0,0001

La Figura 5 presenta las medias observadas de masa radical total al inicio y al cuarto mes. Esta masa disminuyó en los seis tratamientos; la mayor reducción descriptiva ocurrió en T4 y la menor, en T1. Las barras no representan las medias ajustadas de la Tabla 3.

Figura 5

Masa radical total secada al aire al inicio y al cuarto mes (medias observadas)



Barras: media observada ± EE de cuatro parcelas, en g por monolito. La figura describe un descenso neto de masa; la inferencia ajustada se presenta en las Tablas 3 y 5.

DISCUSIÓN

La interacción enmienda × herculizado fue significativa en los cuatro componentes radicales. Los contrastes de medias ajustadas mostraron mayor masa de raíces vivas y menor masa de raíces muertas con herculizado dentro de cada nivel de enmienda, con diferencias más amplias al combinarlo con carbón vegetal molido o ceniza. El ajuste consideró las 24 parcelas y sus valores iniciales; las 240 plantas fueron submuestras, no réplicas independientes.

El carbón vegetal molido más herculizado (T4) presentó la mayor media ajustada de masa de raíces vivas y la menor media ajustada de masa de raíces muertas. Este resultado concuerda con Singh et al. (2022), quienes determinaron mediante un metaanálisis que la incorporación de biochar puede mejorar las propiedades físicas del suelo, principalmente mediante la reducción de la densidad aparente y el incremento de la porosidad, condiciones que pueden favorecer el entorno para el desarrollo radical.

También se han descrito modificaciones en la retención y dinámica del agua, cuya magnitud depende de las características del suelo y del material carbonizado, según Omondi et al. (2016) y Razzaghi et al. (2020). Estos efectos pueden estar relacionados con cambios en la estructura física del suelo (Zanutel et al., 2024); sin embargo, su magnitud depende de las

propiedades fisicoquímicas del biochar y de las condiciones edáficas (Joseph et al., 2021). En banano, Nagula et al. (2021) observaron que la aplicación de biochar derivado de cáscara de coco incrementó la retención de agua y la porosidad del suelo y redujo la densidad aparente, mientras que Barrezueta-Unda et al. (2022) reportaron respuestas favorables en el desarrollo de plantas de banano tratadas con biocarbón. Estos resultados concuerdan parcialmente con la respuesta observada en T4. No obstante, el carbón vegetal utilizado en este estudio fue de elaboración artesanal y careció de caracterización fisicoquímica y de registros de las condiciones de carbonización, por lo que no puede equipararse directamente con los biochars evaluados en dichos estudios ni atribuirse la respuesta radical a los mismos mecanismos.

La ceniza de bagazo de caña más herculizado (T6) presentó la segunda mayor masa de raíces vivas y la segunda menor masa de raíces muertas. Dombinov et al. (2022) observaron que la aplicación de ceniza de bagazo de caña incrementó la fertilidad del sustrato y favoreció el crecimiento, la biomasa y la absorción de P y K en soya, aunque su eficiencia dependió de la composición mineralógica y de la disponibilidad de los nutrientes presentes en la ceniza. Asimismo, Ferreira et al. (2023) encontraron que la incorporación de ceniza de bagazo modificó propiedades químicas del suelo, como el pH y los contenidos de materia orgánica, P y K, con respuestas dependientes de la dosis aplicada. Estos antecedentes concuerdan parcialmente con la respuesta favorable observada en el presente estudio y evidencian que el efecto agronómico de la ceniza depende de sus características y manejo. Sin embargo, el contacto previo del material utilizado con agua y vinaza, seguido de sedimentación y secado, pudo modificar sus fracciones solubles, pH y conductividad. Por tanto, al no disponer de una caracterización química de la ceniza aplicada, no es posible atribuir la respuesta radical observada a K, P u otro componente específico ni asumir los mismos mecanismos descritos en dichos estudios.

La masa radical total secada al aire disminuyó en los seis tratamientos. En consecuencia, T4 y T6 no estimularon una producción general de masa durante el periodo evaluado; su respuesta consistió en una composición aparentemente más favorable, con mayor componente vivo y menor componente deteriorado. La masa total y la condición funcional no son indicadores intercambiables, y una masa total menor puede coexistir con una proporción mayor de tejido vivo (Crespo-Clas et al., 2023; Torres-Asuaje et al., 2023). Además, el secado al aire no permite interpretar los valores como materia seca estricta, porque no se utilizó horno ni se verificó masa constante.

La resistencia a la penetración promedio disminuyó de 2.340 a 1.580 kPa tras el herculizado. Aunque se efectuaron 100 lecturas de campo con una humedad del suelo de 76 %, los datos no se estructuraron como una respuesta factorial replicada por tratamiento. Por ello, la reducción aporta evidencia operativa de la labor, pero no permite relacionar estadísticamente el cambio de resistencia con la respuesta radical. Tampoco se determinaron densidad aparente (ρb), porosidad total (Pt), infiltración, pH, conductividad eléctrica (CE) ni nutrientes disponibles

después de los tratamientos. Los mecanismos físicos, químicos y nutricionales permanecen como hipótesis.

Finalmente, una respuesta radical favorable no constituye todavía una recomendación productiva, porque no se evaluaron vigor aéreo, peso del racimo, rendimiento ni rentabilidad. La validación futura deberá abarcar varios ciclos y sitios, caracterizar ambos materiales y relacionar las propiedades del suelo con la respuesta radical y productiva del cultivo de banano.

CONCLUSIONES

El ANCOVA de las 24 medias de parcela mostró efectos significativos del valor inicial, de la prueba global de tratamiento y de la interacción enmienda × herculizado en las cuatro variables radicales.

El carbón vegetal molido más herculizado (T4) presentó la mayor media estimada mediante ANCOVA de raíces vivas (28,18 g) y la menor de raíces muertas (21,13 g); la ceniza más herculizado (T6) ocupó el segundo lugar (27,37 y 24,59 g). Dentro de cada nivel de enmienda, el herculizado aumentó las raíces vivas y redujo las muertas, con diferencias de mayor magnitud en presencia de carbón o ceniza.

La masa radical total secada al aire disminuyó en todos los tratamientos. Por tanto, el hallazgo principal fue un cambio en la condición o composición del sistema radical —más tejido vivo y menos tejido deteriorado— y no un incremento general de la masa radical. Debido al protocolo de secado al aire, los valores no deben interpretarse como materia seca determinada hasta masa constante.

La reducción registrada de resistencia a la penetración, de 2.340 a 1.580 kPa, constituye evidencia operativa de la labor, pero no demuestra el mecanismo causal porque las lecturas no se analizaron como una respuesta factorial replicada por tratamiento y no se midieron otras propiedades físicas complementarias. La interpretación también está limitada por la ausencia de caracterización del carbón vegetal molido y de la ceniza expuesta a agua y vinaza. Antes de recomendar estas combinaciones se requiere caracterizar los materiales y evaluar propiedades edáficas, rendimiento y rentabilidad en varios ciclos y sitios.

REFERENCIAS

Barrezueta-Unda, S., Condoy-Gorotiza, A., & Sánchez-Pilcorema, S. (2022). Efecto del biocarbón en el desarrollo de las plantas de banano (Musa AAA) en fincas a partir de un manejo orgánico y convencional. Enfoque UTE, 13(3), 29–44. https://doi.org/10.29019/enfoqueute.815

Barrezueta-Unda, S. A., Azuero-Caamaño, H., & Goottman-Jadan, I. R. (2023). Development of banana (Musa AAA) under different doses of biochar and chemical fertilizers. Bionatura, 8(3), 1–10. https://doi.org/10.21931/RB/2023.08.03.85

Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. Journal of Experimental Botany, 62(1), 59–68. https://doi.org/10.1093/jxb/erq350

Blanco-Canqui, H., Laird, D. A., Heaton, E. A., Rathke, S., & Acharya, B. S. (2021). Does biochar application alleviate soil compaction? Review and data synthesis. Geoderma, 404, 115317. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115317

Carpanez, T. G., Moreira, V. R., Assis, I. R., & Amaral, M. C. S. (2022). Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: Opportunities and environmental risks. Science of the Total Environment, 832, 154998. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154998

Coelho, E. F., Santos, M. R. dos, Souza, E. A. de, Melo, D. M., & Campos, M. S. (2022). Root distribution and its relations with soil chemical attributes and yield of banana under fertigation with and without soil covering. Acta Scientiarum. Agronomy, 44, e53296. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.53296

Colombi, T., & Keller, T. (2019). Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. Soil and Tillage Research, 191, 156–161. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.008

Correa, J., Postma, J. A., Watt, M., & Wojciechowski, T. (2019). Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. Journal of Experimental Botany, 70(21), 6019–6034. https://doi.org/10.1093/jxb/erz383

Crespo-Clas, Á. M., Canchignia-Martínez, H. F., & Garcés-Fiallos, F. R. (2023). Nematodes and root system are affected by rhizobacterial consortium in the third generation of commercial banana plants. Revista de Agricultura Neotropical, 10(3), e7725. https://doi.org/10.32404/rean.v10i3.7725

Dombinov, V., Herzel, H., Meiller, M., Müller, F., Willbold, S., Zang, J. W., da Fonseca-Zang, W. A., Adam, C., Klose, H., Poorter, H., Jablonowski, N. D., & Schrey, S. D. (2022). Sugarcane bagasse ash as fertilizer for soybeans: Effects of added residues on ash composition, mineralogy, phosphorus extractability and plant availability. Frontiers in Plant Science, 13, 1041924. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1041924

Dotaniya, M. L., Datta, S. C., Biswas, D. R., Dotaniya, C. K., Meena, B. L., Rajendiran, S., Regar, K. L., & Lata, M. (2016). Use of sugarcane industrial by-products for improving sugarcane productivity and soil health. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 5(3), 185–194. https://doi.org/10.1007/s40093-016-0132-8

Ferreira, T. C., Guimarães, M. L. C. S., Silva, A. V., dos Santos, A. R. P., Zabotto, A., Guerra, S. P. S., & Broetto, F. (2023). The use of the ash from the burning of sugarcane bagasse is associated with biosolid application for soil fertility. International Journal of Plant & Soil Science, 35(22), 589–604. https://doi.org/10.9734/IJPSS/2023/v35i224169

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). Banana market review: Preliminary results 2024 and outlook 2025. FAO.

Frene, J. P., Pandey, B. K., & Castrillo, G. (2024). Under pressure: Elucidating soil compaction and its effect on soil functions. Plant and Soil, 502, 267–278. https://doi.org/10.1007/s11104-024-06573-2

Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research, 82(2), 121–145. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009

Huang, S., Islam, M. U., & Jiang, F. (2023). The effect of deep-tillage depths on crop yield: A global meta-analysis. Plant, Soil and Environment, 69(3), 105–117. https://doi.org/10.17221/373/2022-PSE

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2025). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) 2025: Boletín técnico. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/2025/Boletin_tecnico_ESPAC_2025.pdf

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2026). Boletines y registros climatológicos 2025–2026. https://www.inamhi.gob.ec/

Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A. C., van Groenigen, J. W., Hungate, B. A., & Verheijen, F. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. Environmental Research Letters, 12(5), 053001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa67bd

Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 144(1), 175–187. https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015

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. H., & 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(11), 1731–1764. https://doi.org/10.1111/gcbb.12885

Kautz, T., Amelung, W., Ewert, F., Gaiser, T., Horn, R., Jahn, R., Javaux, M., Kemna, A., Kuzyakov, Y., Munch, J.-C., Pätzold, S., Peth, S., Scherer, H. W., Schloter, M., Schneider, H., Vanderborght, J., Vetterlein, D., Walter, A., Wiesenberg, G. L. B., & Köpke, U. (2013). Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: A review. Soil Biology and Biochemistry, 57, 1003–1022. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.09.014

Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—A review. Soil Biology and Biochemistry, 43(9), 1812–1836. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2025). Sistema de Información Pública Agropecuaria (SIPA): Banano. https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/bananos

Mukherjee, A., & Lal, R. (2013). Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. Agronomy, 3(2), 313–339. https://doi.org/10.3390/agronomy3020313

Nagula, S., Usha, P. B., Thampatti, M., & Joseph, B. (2021). Tender coconut husk derived biochar impact on soil properties, yield and fruit quality of banana. Journal of the Indian Society of Soil Science, 69(3), 334–338. https://doi.org/10.5958/0974-0228.2021.00050.5

NASA Prediction of Worldwide Energy Resources. (2026). NASA POWER Data Access Viewer. https://power.larc.nasa.gov/

Omondi, M. O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P. K., & Pan, G. (2016). Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. Geoderma, 274, 28–34. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.029

Peralta Ogorek, L. L., Gao, Y., Farrar, E., & Pandey, B. K. (2025). Soil compaction sensing mechanisms and root responses. Trends in Plant Science, 30(5), 565–575. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2024.10.014

Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. Geoderma, 361, 114055. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055

Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O., & Seidel, S. J. (2017). The effect of deep tillage on crop yield—What do we really know? Soil and Tillage Research, 174, 193–204. https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.005

Singh, H., Northup, B. K., Rice, C. W., & Prasad, P. V. V. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. Biochar, 4, 8. DOI: 10.1007/s42773-022-00138-1.

Spokas, K. A., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Archer, D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., Boateng, A. A., Lima, I. M., Lamb, M. C., McAloon, A. J., Lentz, R. D., & Nichols, K. A. (2012). Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. Journal of Environmental Quality, 41(4), 973–989. https://doi.org/10.2134/jeq2011.0069

Torres-Asuaje, P. E., Cotes-Prado, A. M., Echeverría-Beirute, F., Blanco-Rojas, F. A., Sandoval-Fernández, J. A., Segura-Mena, R. A., & Palomares-Rius, J. E. (2023). Ensilaged biostimulants promoting root health and control of Radopholus similis in banana (Musa AAA) cv. Grande Naine. European Journal of Plant Pathology, 165(3), 465–474. https://doi.org/10.1007/s10658-022-02617-4

Vanderhasselt, A., Steinwidder, L. K., D'Hose, T., & Cornelis, W. (2024). Opening up the subsoil: Subsoiling and bio-subsoilers to remediate subsoil compaction in three fodder crop rotations on a sandy loam soil. Soil and Tillage Research, 237, 105956. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105956

Vickers, A. J., & Altman, D. G. (2001). Analysing controlled trials with baseline and follow up measurements. BMJ, 323(7321), 1123–1124. https://doi.org/10.1136/bmj.323.7321.1123

Zanutel, M., Garré, S., Sanglier, P., & Bielders, C. (2024). Biochar modifies soil physical properties mostly through changes in soil structure rather than through its internal porosity. Vadose Zone Journal, 23, e20301. https://doi.org/10.1002/vzj2.20301