



VARIACIÓN DE LA EMISIÓN DE CO₂ TEMPORAL, CO₂ ACUMULADO Y MEJORA DE CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS A LA FERTILIDAD DE UN SUELO ÁCIDO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE BIOCHAR

Jannet RUPAY^{1*}, Wendy E. PÉREZ², Richard SOLÓRZANO-ACOSTA², José QUINTANILLA², JuanCarlos CRUZ², Roberto COSME³

¹ Universidad Nacional de Ingeniería - UNI, Av. Túpac Amaru 210, Lima 15333, Perú.

² Dirección de Supervisión y Monitoreo en las Estaciones Experimentales Agrarias, Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA, Av. La Molina N° 1981, Lima 15024, Perú.

³ Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario, Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA, Av. La Molina N° 1981, Lima 15024, Perú.

* Correo electrónico: jrupayc@uni.pe

RESUMEN

Tradicionalmente, para corregir la acidez del suelo se usa cal o dolomita agrícola, estos encalantes pueden tener como efecto secundario la disminución de materia orgánica del suelo (MOS), stock de carbono y emisión de gases de efecto invernadero (GEI). El biochar alcalino es una alternativa por su estabilidad y capacidad de obtener un balance positivo de carbono, mejorar los suelos agrícolas y generar menores emisiones de GEI. La emisión de CO₂ y las propiedades físicas y químicas de un suelo ácido al ser enmendado con biochar, cal, dolomita agrícola versus un testigo (sin enmienda) se evaluaron en invernadero. Sin cultivo, la cal agrícola y biochar tuvieron una rápida reacción elevando el pH cerca de 7; el biochar aumentó el contenido de materia orgánica (+23%), nitrógeno (+20%), fósforo disponible (+116%), CIC (+46%) y cationes intercambiables. La emisión de CO₂ temporal dentro de las 24 horas, aumentó con el biochar (+131%) y dolomita (+41%), aunque después disminuyó significativamente. Con el cultivo de maíz, el biochar mantuvo el valor deseado de pH, fueron mayores el fósforo (+109%) y potasio disponible (+224%), CIC (+6%) y cationes intercambiables; la emisión temporal dentro de las 24 horas fue mayor para el biochar (+314%), cal (+115%) y dolomita (+112%); y para el CO₂ acumulado, el biochar presentó el

mayor valor (+53%). Al día 56, las emisiones de CO₂ no fueron significativamente diferentes al testigo para las tres enmiendas, y menores a partir del día 75, lo cual significaría una reducción en las emisiones a largo plazo.

PALABRAS CLAVE: material pirolizado, enmiendas calcáreas, acidez, GEI, maíz

VARIATION OF THE TEMPORAL CO₂, ACCUMULATED CO₂ EMISSION AND IMPROVEMENT OF CHARACTERISTICS ASSOCIATED WITH THE FERTILITY OF AN ACID SOIL THROUGH THE APPLICATION OF BIOCHAR

ABSTRACT

Traditionally, to correct the acidity of soil, lime or agricultural dolomite is used, these conventional liming agents can bring as a secondary effect the decrease in soil organic matter (SOM), the carbon stock and the emission of greenhouse gases (GHG). Alkaline biochar is an alternative due to its stability and ability to obtain a positive carbon balance, improve agricultural soils and generate lower GHG emissions. We evaluated the CO₂ emission and the physical and chemical properties of an acid soil when amended with biochar, lime, and agricultural dolomite in a greenhouse. versus a control (without amendment). Without cultivation, agricultural lime and biochar had a rapid reaction raising the pH close to 7; biochar increased the content of organic matter (+23%), nitrogen (+20%), available phosphorus (+116%), CEC (+46%) and exchangeable cations. Temporal CO₂ emission within 24 hours increased with biochar (131%) and dolomite (+41%), although it decreased significantly afterwards. On the other hand, with the maize crop, the biochar maintained the desired pH value, and available phosphorus (+109%) and potassium (+224%), CEC (+6%) and exchangeable cations were higher; the temporary emission within 24 hours was higher for biochar (+314%), lime (+115%) and dolomite (+112%); and for the accumulated CO₂, biochar presented the highest value (+53%). At day 56, CO₂ emissions were not significantly different from the control for the three amendments, and even lower from day 75, which would mean a reduction in long-term emissions.

KEYWORDS: pyrolyzed material, calcareous amendments, acidity, GHG, maize

INTRODUCCIÓN

En el mundo, alrededor del 50% de los suelos cultivables se clasifican como ácidos (Wang *et al.*, 2021). La acidez del suelo es reconocida como un desafío para la producción agrícola, en particular en los países en desarrollo (Yu *et al.*, 2019). Una de las causales se da cuando la precipitación excede la evapotranspiración, y lixivia cantidades apreciables de bases intercambiables del suelo (Desalegn *et al.*, 2023). El pH, indicador de acidez, es resultado de las características del suelo, la cobertura vegetal, la acumulación de materiales que acidifican y el clima; por tal, es referente de la solubilidad y disponibilidad nutricional, resultando clave para la disponibilidad de Ca, Mg y K intercambiable, así como de micronutrientes (Arévalo-Gardini *et al.*, 2015).

Las enmiendas tradicionales pueden promover la mineralización de la materia orgánica, lo que se evidencia por un incremento de la emisión de CO₂ (Wu *et al.*, 2021), esto se explica por las condiciones de pH que se vuelven favorables para la actividad biológica, se estimula la respiración del suelo y por tal podría disminuir el stock de carbono (Yang *et al.*, 2022). Sin embargo, se tendrían mayores entradas de carbono y protección física de la materia orgánica por mejoras en la estructura, que revertiría el proceso (Paradelo *et al.*, 2015). En consecuencia, además del efecto directo sobre el pH, el encalado aumentaría el carbono orgánico del suelo (COS), favorece los ciclos de nutrientes y disminuiría las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como el N₂O y CH₄ del suelo (Wang *et al.*, 2021).

Entre las formas directas de eliminación del CO₂ atmosférico se encuentran la mayor persistencia de la biomasa pirolizada en comparación con la no pirolizada; el mayor crecimiento de plantas en suelos en los que se agregó biochar;

cuando esta biomasa se convierte a su vez en biochar u otros productos de larga duración; mineralización reducida del carbono orgánico del suelo (COS) con una mayor retención de nuevos aportes de residuos vegetales; y almacenamiento y captura de carbono de gases y líquidos de la pirólisis (Lehmann *et al.*, 2021).

Por otro lado, la tasa de emisión de CO₂ por la aplicación de enmiendas orgánicas, depende de muchos factores: condiciones ambientales, las características y la cobertura del suelo; sin embargo, principalmente de los tipos y sus tasas de aplicación (Ray *et al.*, 2020). Las enmiendas orgánicas como el biochar han probado tener potencial para incrementar el contenido de materia orgánica en el suelo (MOS) (Hu *et al.*, 2023), al ser un producto con alto contenido de carbono, obtenido por tratamiento térmico de material orgánico como los residuos vegetales, bajo un suministro limitado de oxígeno (O₂) y a temperaturas relativamente bajas (<700 °C) (Shetty *et al.*, 2021). Por tal razón, el uso de biochar alcalino se presenta como una alternativa interesante para elevar el pH de suelos ácidos y a la vez aumentar el stock de carbono (Bolan *et al.*, 2022)

Si bien la aplicación de biochar puede incrementar la emisión de CO₂, esta sería dependiente de la temperatura de pirólisis en su elaboración; se ha visto que, producido a 300 °C se incrementaron las emisiones, en cambio a 450 °C y 600 °C disminuyeron; además, depende de la antigüedad en el suelo, siendo mayor la emisión después de un año de incorporación (Yang *et al.*, 2022). También, se han encontrado mayores emisiones con el biochar producido a 300 °C, en contraste con el producido a 700 °C, donde la tasa de calentamiento en la pirólisis también se señala como influyente en este proceso (Shi *et al.*, 2022).

El biochar elaborado a partir de diversas fuentes de biomasa puede tener reacciones dife-

rentes, debido al tamaño de las partículas, la composición, la temperatura de pirólisis, el tiempo, y las proporciones de C:N y C:O en la fase lábil del biochar (Šlapáková *et al.*, 2018). Después de la incorporación de biochar alcalino con alta concentración de cationes básicos, puede darse su liberación en la solución del suelo y la acidez se puede reducir a través de reacciones de consumo de protones (Chintala *et al.*, 2014).

Con la finalidad de evaluar el impacto ambiental de la incorporación de enmiendas, se ha convenido realizar la medición de parámetros como la variación de la emisión de CO₂ temporal, CO₂ acumulado y las características asociadas a la fertilidad de un suelo ácido posterior a la aplicación de enmiendas tradicionales y un biochar alcalino producido a más de 700 °C. El uso de biochar en cultivos anuales se prevé que sea la aplicación futura más extendida, por tal, se consideró el uso del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) como parte del estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

CARACTERIZACIÓN DEL SUELO ÁCIDO

El suelo fue obtenido de la capa arable de un pastizal (0 a 20 cm de profundidad), en el distrito de Campo Verde, provincia de Coronel Portillo y departamento de Ucayali-Perú (8°32'11" S 74°53'18" O) (Figura 1). Se realizó un pretratamiento de secado al aire, tamizado con malla N°10 (2 mm), homogenizado y cuarteado (ISO 11464:2006). Luego, se analizó en los laboratorios de la Universidad Nacional Agraria La Molina y La Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Se analizaron los siguientes parámetros: pH (U.S.EPA SW-846-9045D), conductividad eléctrica (CE) (ISO 11265:1994), materia orgánica (MO), nitrógeno total (N) y carbono total (C) se estimaron mediante combustión seca (ISO 13878), el carbono orgánico total (CO) se estimó después de la corrección de

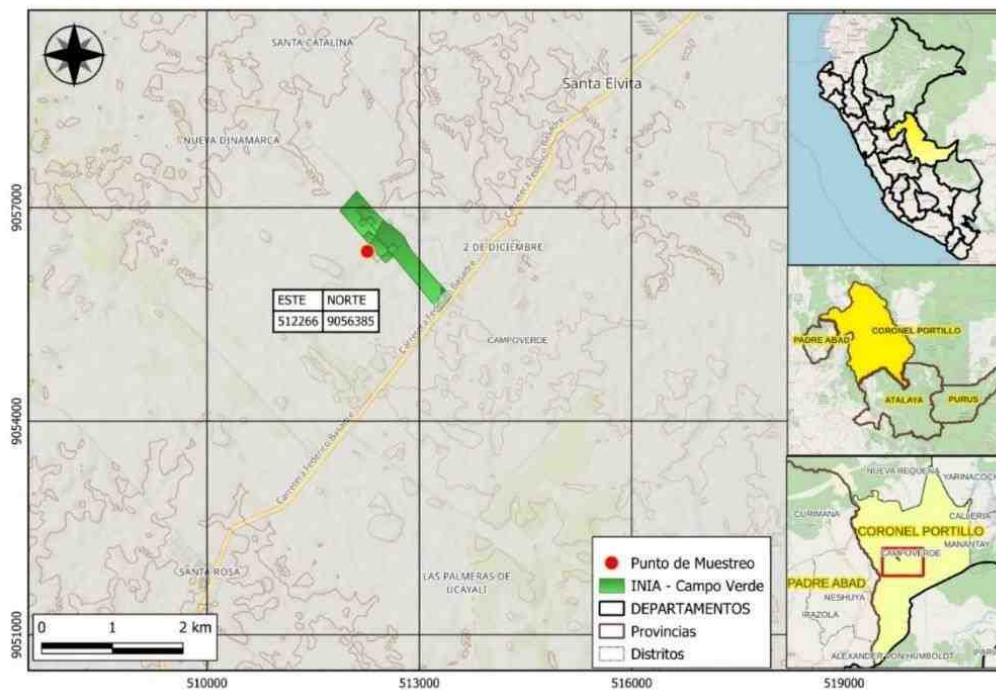


Figura 1. Ubicación del suelo ácido utilizado en el ensayo.

los carbonatos presentes en la muestra (ISO 10694:1995 (E)), fósforo disponible (Pd) (NOM-021-RECNAT, 2000), potasio disponible (Kd), capacidad de intercambio catiónico (CIC), cationes intercambiables Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Al³⁺ (Bazán, 2017).

CARACTERIZACIÓN DEL BIOCHAR

El biochar fue adquirido de la empresa IN-KAN NEGRO S.A.C. producido de restos de podas municipales y residuos agrícolas; sometidos a un proceso de pirólisis a más de 700 °C y luego molido para pasar a través de un tamiz de malla N°10 (2 mm). El análisis físico-químico mostró un contenido de materia orgánica (MO) de 18,81%, nitrógeno (N) 1,32%, P₂O₅ 3,07%, K₂O 3,14%, CaO 7,14, MgO 1,7%, pH 8,32, C.E. 18,3 dS.m⁻¹, humedad 11,28%.

CARACTERIZACIÓN DE LAS ENMIENDAS DE CALCIO

La dolomita agrícola presentó la composición química de CaO 29-32% y MgO 18-21%, donde el 50% de las partículas fue retenido en malla N°100 (150 µm). En tanto, la cal agrícola presentó NaOH 39,53% y CaCO₃ 60%, el tamaño de partícula mostró que el 100% de partículas fueron menores a 2 mm (malla N°10), el 70% fue menor a 850 µm (malla N°20) y el 50% fue menor a 300 µm (malla N°50).

ENSAYO DE ENMIENDA EN SUELO SIN CULTIVO

La cal, dolomita agrícola y biochar se utilizaron para corregir la acidez del suelo y elevar el pH. Se realizó el requerimiento de encalado del suelo ácido con 6,48 Mg CaCO₃.ha⁻¹ (Sadzawka *et al.*, 2006). Para la neutralización, se consideró alcanzar un valor de pH ideal de 6,5 para

lo que se aplicaron 0,019 g de cal agrícola, 0,063 g de dolomita agrícola y 40 g de biochar por 1 kg de suelo ácido.

Se colocaron 5 kg de suelo en cada maceta de polipropileno (5 L) (unidad experimental), se agregó cada enmienda y se homogeneizó con el suelo. Después se incubaron por 135 días, a una humedad constante de 80% de la capacidad de campo. Al término de este período, se midieron los siguientes parámetros: emisión de CO₂ temporal y acumulada (Bloem *et al.*, 2005), pH (U.S.EPA SW-846-9045D), conductividad eléctrica (CE) (ISO 11265:1994), materia orgánica (MO), fósforo disponible (Pd) (NOM-021-RECNAT, 2000), potasio disponible (Kd), capacidad de intercambio catiónico (CIC), cationes intercambiables Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Al³⁺ (Bazán, 2017) y nitrógeno (N) (ISO 11261, 1995).

MEDICIÓN DE LA EMISIÓN DE CO₂ TEMPORAL Y ACUMULADA

Para esta determinación se siguió la metodología propuesta por Bloem *et al.* (2005), según la cual se pesaron 40 g de suelo y llevaron a una capacidad de retención de agua del 60 %, en un recipiente de plástico. Al interior del recipiente se colocó un vial con NaOH (1 N). En cada evaluación, se removió el vial de absorción y se agregó BaCl₂ (1 N) a fin de precipitar el BaCO₃ formado; luego, se agregaron unas gotas de indicador fenolftaleína y se tituló con HCl 0,5 N hasta el punto de equivalencia. Las mediciones se realizaron a las 24 horas y los días 1, 27, 42, 56, 75, 104, 119 y 135.

ENSAYO DE ENMIENDA EN SUELO CON CULTIVO

Se utilizó el maíz híbrido PM-213 (*Zea mays* L.) como cultivo indicador, a fin de observar la dinámica originada con la presencia de microor-

ganismos rizosféricos sobre la emisión de CO₂; además, de los efectos sobre el suelo, el crecimiento y desarrollo del cultivo.

Previamente, el suelo ácido fue secado al aire, se molió y tamizó con una malla N°10 (2 mm). Finalizados 35 días de incubación con la aplicación de los tratamientos, se realizó la siembra. A los 30 días después de la siembra (DDS) se realizó la primera fertilización aplicando en cada unidad experimental 0,5 g de úrea, 1 g superfosfato triple (SPT) y 0,5 g de cloruro de potasio (KCl). Luego a los 36 DDS, se realizó la segunda fertilización (1 g de úrea, 2 g SPT y 1 g de KCl). A los 43 DDS se aplicaron 1 g de úrea, 2g SPT y 1g de KCl. Finalmente, se agregaron 200 mL de solución nutritiva (Solución A (5mL/L): nitrato de potasio (11%), nitrato de amonio (5%) y superfosfato triple de calcio (3,6%), y Solución B (2mL/L): sulfato de magnesio (11%), quelato de hierro (0,85%) y micronutrientes: ácido bórico (0,3%), sulfato de zinc (0,17%), sulfato de manganeso (0,5%), sulfato de cobre (0,1%), molibdato de amonio (0,02%). La cosecha se realizó aproximadamente a los 100 DDS. Además de las emisiones de CO₂ y los parámetros físicos y químicos del suelo, los parámetros agronómicos evaluados fueron: área foliar (AF), diámetro de tallo (Dt), peso fresco de planta (PF), peso fresco de mazorca (PFm), peso fresco de hojas (PSh), peso fresco de tallo (PSt), peso seco de planta (PS), peso seco de mazorca (PSm), peso seco de hojas (PSh), peso seco de tallo (PSt) número de hojas (Hoj), altura de planta (Alt) (CIMMYT, 1995).

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos tanto del suelo como del cultivo de maíz se procesaron conforme al Análisis de Varianza para un Diseño Completo al Azar (DCA) al 95% de confiabilidad. Se ejecutó

la prueba de Duncan donde se hallaron diferencias significativas entre tratamientos. Con la finalidad de observar las interacciones e implicancias de los parámetros evaluados, se realizó el análisis de componentes principales (PCA). Se empleó el software estadístico R (R Core Team, 2022).

RESULTADOS

CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Al inicio, el suelo presentó un pH de 4.47 (1:1), siendo fuertemente ácido, de textura franca, bajo contenido de Pd (3 mg.Kg⁻¹) y Kd (51 mg.Kg⁻¹). Presentó alta acidez cambiante (2,2 mg.Kg⁻¹) y por ende bajo contenido de los siguientes cationes intercambiables: Ca⁺² (2,52 cmol.Kg⁻¹), Mg⁺² (1,20 cmol.Kg⁻¹), K⁺ (0,22 cmol. Kg⁻¹) y Na⁺ (0,10 cmol.Kg⁻¹). El contenido de materia orgánica resultó ser bajo (1,52%).

CAMBIOS EN LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL SUELO SIN CULTIVO CON LA APLICACIÓN DE LAS ENMIENDAS

Los tratamientos con cal agrícola y biochar tuvieron una rápida reacción con el suelo ácido, elevando el pH cerca de 7. Sin embargo, el tratamiento con dolomita fue menor a 6, siendo el pH deseado 6,5. En los siguientes cuatro meses, los tratamientos de dolomita estuvieron alrededor al valor deseado de pH, al igual que el biochar; sin embargo, los tratamientos que contenían cal agrícola disminuyeron su valor. Fueron significativamente mayores en el tratamiento con biochar: MO (+23%), N (+20%), Pd (+116%), CIC (+46%) y los cationes cambiables como el Ca⁺²(+54%), Mg⁺²(+64%), K⁺(+507%); y con la dolomita, el Mg⁺²(+79%). Todos los tratamientos con enmiendas disminuyeron la cantidad de Al⁺³: la dolomita y biochar en 80% y la cal en 73% (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica asociada a la fertilidad del suelo sin cultivo luego de la aplicación de enmiendas.

Trata- miento	pH	CE dS.m ⁻¹	MO (%)	N	P	K	CIC	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³
				mg.Kg ⁻¹				cmol.Kg ⁻¹				
Testigo	4,80 d	0,15 d	1,95 b	0,10 b	29,59 b	138,40 a	8,39 bc	4,01 b	2,93 b	0,14 b	0,13 a	1,18 a
Dolomita	6,64 a	0,37 b	2,01 b	0,10 b	16,49 b	105,50 b	10,05 b	4,40 b	5,24 a	0,11 b	0,07 a	0,23 c
Cal	5,46 c	0,27 c	1,98 b	0,10 b	29,59 b	107,22 b	7,73 c	4,73 b	2,46 b	0,12 b	0,11 a	0,32 b
Biochar	6,34 b	0,73 a	2,40 a	0,12 a	63,78 a	132,40 a	12,21 a	6,18 a	4,80 a	0,85 a	0,15 a	0,23 c

*Promedios con la misma letra representan tratamientos estadísticamente similares (p < 0,05) según la prueba de Duncan. N, P y K en su forma disponible.

VARIACIÓN DE LA EMISIÓN DE CO₂ TEMPORAL, CO₂ ACUMULADO Y CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS A LA FERTILIDAD DEL SUELO LUEGO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS SIN CULTIVO

Para el suelo sin cultivo, las emisiones de CO₂ temporales, dentro de las primeras 24 horas, muestran una significativa alta emisión con la aplicación de biochar (+131%) y dolomita (+41%), respecto al testigo; a partir de las evaluaciones del día 27, se observó una importante disminución en las emisiones de CO₂ respecto a la primera medición: biochar (-70%), dolomita (-62%), cal agrícola (-81%), testigo (-74%) (Figura 2A). Al día 56 no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos; aunque; al término de la evaluación se observó un aumento en las emisiones de biochar y dolomita. En la emisión de CO₂ acumulada, presentaron valores significativamente más altos respecto al testigo, el biochar (+53%) y la dolomita (+17%) (Figura 2B).

Se realizaron los análisis de correlaciones de Pearson (Figura 3) y componentes principales (PCA) (Figura 4) con los parámetros del suelo sin y con cultivo de maíz. En el suelo sin cultivo, se observó una correlación positiva fuerte de la emisión de CO₂ acumulada con el Pd, C.E. y K⁺; mientras que, la emisión temporal del día 1 presentó una correlación positiva fuerte con

MO, N, CE y Kd (Figura 3A).

Por otra parte, en el suelo con cultivo y los parámetros agronómicos, se obtuvo una correlación positiva fuerte de la emisión de CO₂ acumulada con el Al, y una correlación negativa fuerte con el pH; en tanto que, la emisión temporal del día 1 presentó una correlación positiva fuerte con los parámetros Pd, Kd, CE, Hoj y PS (Figura 3B).

El análisis de componentes principales (PCA) de los parámetros se visualiza en la Figura 4. Para el suelo sin cultivo, el primer y segundo componente explicaron la mayoría de las variaciones de los parámetros, con 53,8% y 19%; la mayoría de los parámetros están ubicados en el lado negativo del primer componente donde también se ubican los individuos con el tratamiento de biochar (16, 17, 18, 19 y 20) (Figura 4A). En tanto que, para el suelo con cultivo, el primer y segundo componente explicaron la mayoría de las variaciones de los parámetros, con 45,3% y 14,9%, donde los individuos con el tratamiento de biochar, estuvieron más asociados con los parámetros agronómicos, tales como, el PF, PS, Hoj, Dt (Figura 4B).

CAMBIOS EN LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL SUELO CON CULTIVO CON LA APLICACIÓN DE LAS ENMIENDAS

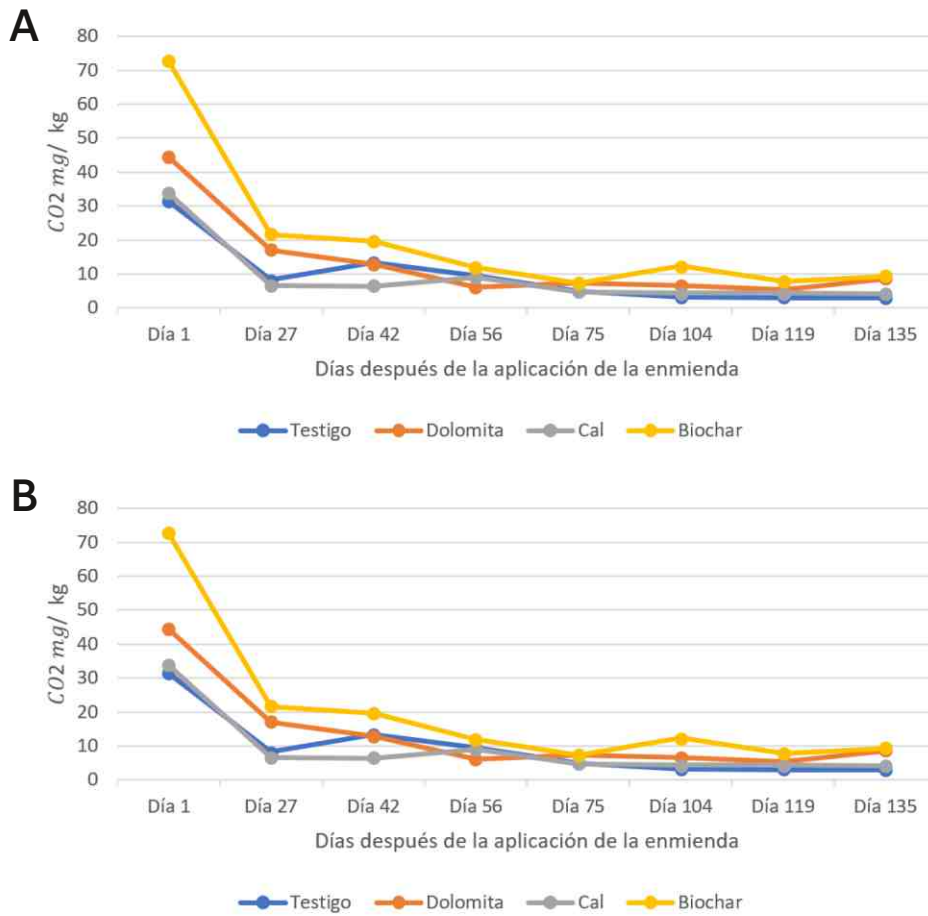


Figura 2. Emisiones de CO₂ de un suelo ácido sin cultivo luego de la incorporación de enmiendas. A) CO₂ temporal. B) CO₂ acumulado.

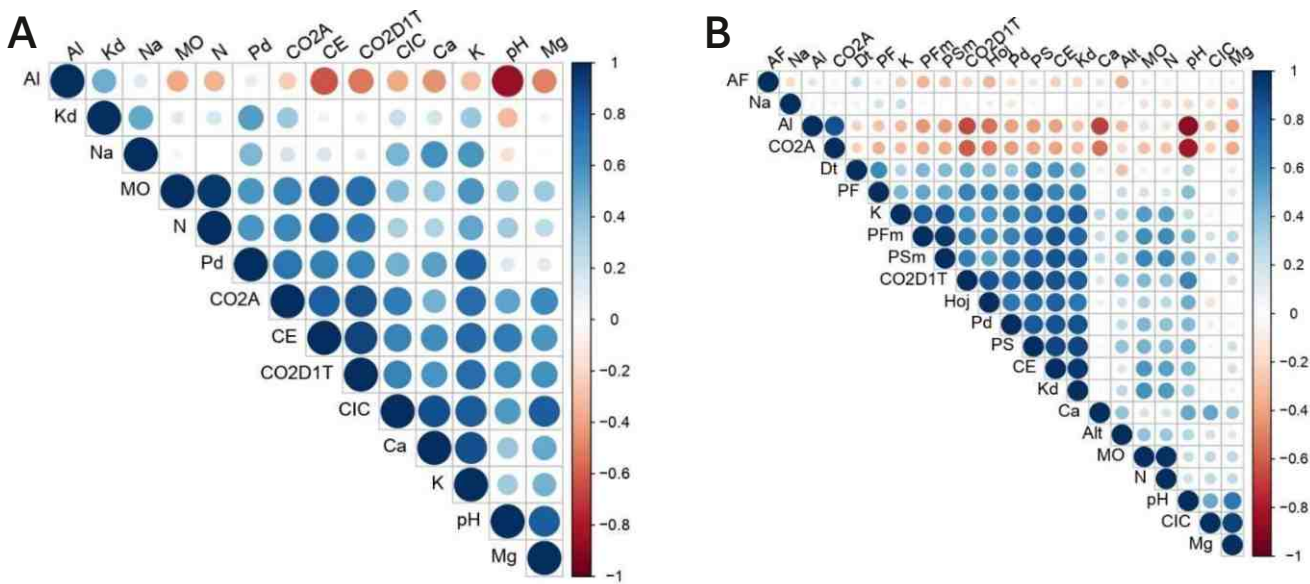


Figura 3. Análisis de correlaciones de Pearson. A) Parámetros en suelo sin cultivo. B) Parámetros en el suelo con cultivo y agronómicos.

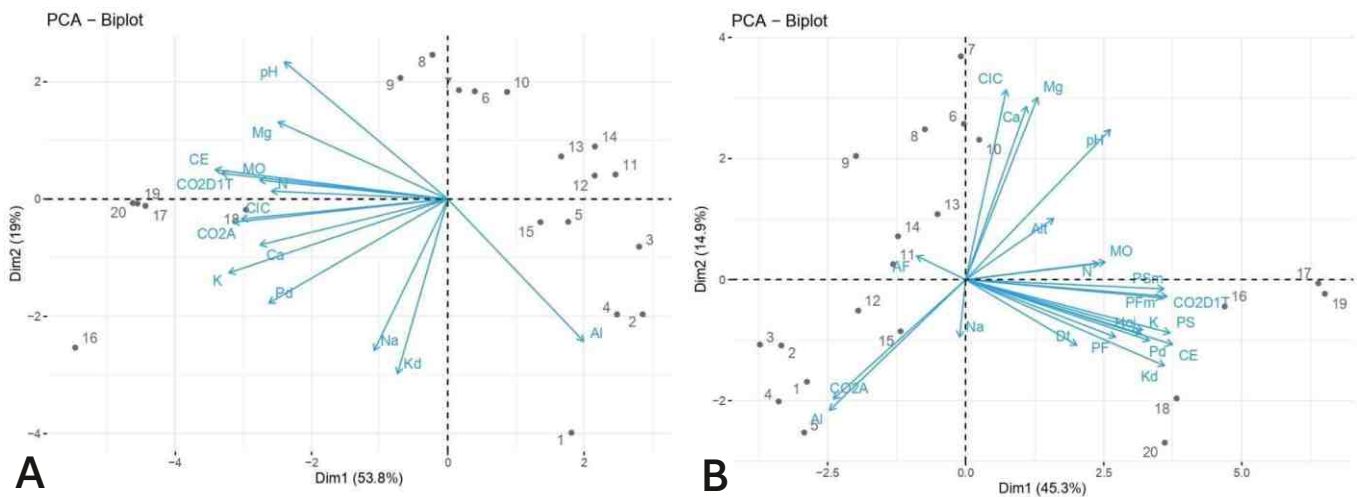


Figura 4. Análisis de componentes principales. A) Parámetros en suelo sin cultivo. B) Parámetros en el suelo con cultivo y agronómicos. Individuos testigo: 1, 2, 3, 4 y 5; con dolomita: 6, 7, 8, 9 y 10; con cal: 11, 12, 13, 14 y 15; con biochar: 16, 17, 18, 19 y 20.

Durante la primera medición se pudo observar que, los tratamientos con cal agrícola y biochar tuvieron una rápida reacción con el suelo ácido, elevando su pH cerca de 7. En cambio, los tratamientos que contenían dolomita fueron menores a 6, no alcanzando el pH de 6,5. En los dos meses siguientes, los tratamientos de dolomita estuvieron alrededor del valor deseado de pH, al igual que el biochar. Sin embargo, los tratamientos que contenían cal agrícola disminuyeron su valor. En el cuarto mes, el testigo que contenía solo suelo ácido aumentó su pH, presuntamente debido a la aplicación de fertilizantes (úrea, SPT y KCl). En cambio, observamos una disminución de pH en los tratamientos de dolomita, cal y biochar. En el séptimo mes, se fertilizó el suelo con solución nutritiva (dosis según proveedor) a fin de no disminuir el pH, con lo cual el testigo tuvo una ligera disminución; por el contrario, ocurrió un aumento significativo de pH en los tratamientos con enmiendas. Fueron significativamente mayores en el tratamiento con biochar, el Pd (+109%) y Kd (+224%), CIC (+6%) y cationes intercambiables: Ca⁺² (+29%), Mg⁺² (+64%), K⁺ (+111%); el Ca⁺² y Mg⁺² con la dolomita (+44% y +171%) y el Ca⁺² con la

cal agrícola (+52%). Además, todos los tratamientos con enmiendas disminuyeron la cantidad de Al⁺³: el biochar en 87%, la dolomita en 86 % y la cal agrícola en 84% (Tabla 2).

VARIACIÓN DE LA EMISIÓN DE CO₂ TEMPORAL, CO₂ ACUMULADO Y CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS A LA FERTILIDAD DEL SUELO LUEGO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS CON CULTIVO DE MAÍZ

Cuando el suelo tenía el cultivo de maíz, la emisión temporal dentro de las 24 horas fue significativamente mayor para las tres enmiendas: biochar (+314%), cal agrícola (+115%), dolomita (+112%), respecto al testigo. Se llegó a observar que la emisión de CO₂ temporal disminuyó a partir del día 27, y llegó a ser significativamente menor que el testigo a partir de la medición hecha al día 56: biochar (-44%), cal agrícola (-58%), dolomita (-30%); lo cual nos mostraría un posible menor impacto en la generación de GEI con el uso de enmiendas en evaluaciones a largo plazo (Figura 5A). Para el CO₂ acumulado, el biochar presentó el mayor valor (+53%) (Figura 5B). En la Figura 5A, se observa esta dismi-

nución en las emisiones de CO₂ a partir de las evaluaciones del día 27. En las evaluaciones agronómicas hechas al cultivo de maíz, se halló un mayor Hoj con el tratamiento de biochar (+23%) y cal agrícola (+9%); un mayor Dt (+13%); Pft (+36%), Pfm (+477%), PF (+26%); PSh (+14%), PSt (+48%), PSm (+861%), PS (+40%) con el biochar (Tabla 3, Figura 5).

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica asociada a la fertilidad del suelo con cultivo de maíz luego de la aplicación de enmiendas.

Trata- miento	pH	CE dS.m ⁻¹	MO (%)	mg.Kg ⁻¹			CIC	cmol.Kg ⁻¹				
				N	P	K		Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³
Testigo	4,48 d	0,18 b	2,07 bc	0,10 ab	28,01 b	62,22 b	6,88 b	2,81 b	1,91 c	0,09 b	0,08 a	1,99 a
Dolomita	6,72 a	0,20 b	2,09 bc	0,10 ab	31,11 b	50,43 b	9,64 a	4,05 a	5,19 a	0,08 b	0,04 a	0,28 b
Cal	5,60 c	0,19 b	2,01 c	0,10 b	32,86 b	56,79 b	6,22 b	4,28 a	1,40 c	0,11 b	0,11 a	0,31 b
Biochar	6,42 b	0,42 a	2,45 a	0,12 a	58,63 a	201,76 a	7,27 b	3,61 a	3,14 b	0,19 a	0,07 a	0,26 b

*Promedios con la misma letra representan tratamientos estadísticamente similares (p < 0,05) según la prueba de Duncan. N, P y K en su forma disponible.

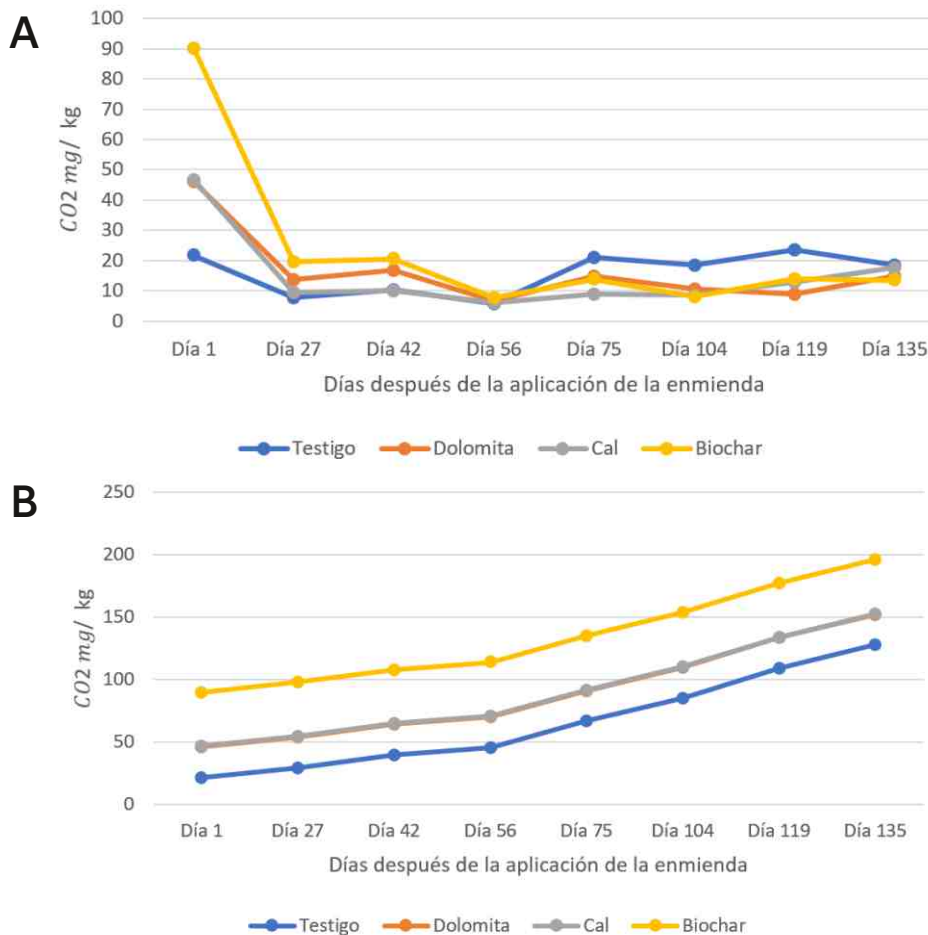


Figura 5. Emisiones de CO₂ de un suelo con cultivo luego de la incorporación de enmiendas en un suelo ácido. A) CO₂ temporal. B) CO₂ acumulado.

Tabla 3. Características agronómicas del maíz luego de la aplicación de enmiendas.

Tratamiento	Altura (cm)	Nº de hojas	Diámetro de tallo (mm)	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Área foliar (cm ²)
				fresco de hojas	fresco de tallo	fresco de fruto	seco de hojas	seco de tallo	seco de mazorca	
Testigo	204,88 a	12,8 c	19,58 b	79,22 a	158,09 b	07,33 b	19,83 b	25,87 b	0,71 b	10,00 a
Dolomita	192,42 a	13,4 bc	19,7 b	85,45 a	172,77 b	14,63 b	20,60 ab	27,34 b	2,05 b	10,64 a
Cal	196,30 a	14 b	19,05 b	81,06 a	166,69 b	11,96 b	18,77 b	27,99 b	1,33 b	8,17 a
Biochar	204,88 a	15,8 a	22,1 a	81,21 a	215,65 a	42,26 a	22,52 a	38,24 a	6,82 a	8,37 a

*Promedios con la misma letra representan tratamientos estadísticamente similares (p < 0,05) según la prueba de Duncan. N, P y K en su forma disponible.

DISCUSIÓN

El biochar, aunque estable por naturaleza puede liberar algunos compuestos volátiles o materia orgánica lábil; así también, en el subsuelo es susceptible a los procesos microbianos, lo cual depende de la estabilidad de los agregados formados con su incorporación; en este sentido, estudios previos han mostrado incrementos significativos en la respiración del suelo en conjunto con abonos orgánicos respecto a la fertilización inorgánica (Ge *et al.*, 2009).

En cuanto a los factores que median la emisión de GEI en los suelos, posterior a la aplicación de biochar, se deben considerar la biomasa utilizada, la temperatura y duración de la pirólisis, el tipo de suelo, las condiciones climáticas y propiedades físicas del suelo. Durante las primeras horas, en algunos casos, puede aumentar la emisión de CO₂; sin embargo, algunos autores han argumentado que la pérdida de C durante una emisión de CO₂ a corto plazo es insignificante en comparación con la cantidad de C almacenado dentro del propio biochar a largo plazo. Sin embargo, entre el 17% y el 23% del C del biochar puede mineralizarse y generar emisión de CO₂ (Mukherjee & Lal, 2013). Así mismo, se han reportado incrementos del 12% en la emisión de CO₂, al aplicar 40 t.ha⁻¹ de biochar

en suelos sin fertilización (Zhang *et al.*, 2012). Así también, otras investigaciones mencionan una alta tasa de emisión de CO₂ en los primeros días de incubación con la aplicación de biochar y dolomita en un suelo ácido (Oo *et al.*, 2018).

En un cultivo anual, en una primera etapa, desde la semana uno a la tres, ocurre la disolución de compuestos orgánicos y minerales solubles del biochar por el agua de riego; la alta emisión de CO₂ dentro de las primeras 24 horas con el biochar, se explicaría por el incremento de materia orgánica disuelta, la cual es rápidamente mineralizada; así también, un incremento en la conductividad eléctrica y el pH, puesto que estos solutos aumentan los cationes y aniones en la solución suelo, y reducen el Eh (potencial de oxidación). Además, la elevación del pH intensifica la actividad microbiana (Joseph *et al.*, 2021); sobre esto último se ha señalado un incremento en individuos copiótrofos frente a los oligótrofos, los cuáles al encontrarse en mayor número incrementarían la emisión de CO₂ (Yang *et al.*, 2022).

Sin embargo, en una segunda etapa, del primer al sexto mes, las raíces de las plantas interceptan e interactúan con el biochar envolviéndolo. Se da un aumento del área de superficie y de la porosidad, formándose grupos funcionales, los poros pueden llenarse de materia orgánica y minera-

les, protegiendo la primera de la descomposición microbiana (Joseph *et al.*, 2021), mejorando su estabilidad, la disponibilidad de agua y nutrientes a los cultivos, y disminuyendo el riesgo de erosión (Mukherjee & Lal, 2013).

En cuanto a las emisiones de CO₂ por la aplicación de las enmiendas tradicionales, se halló ser dependiente de la humedad en un estudio donde las emisiones por dolomita fueron significativamente mayores a una humedad del 90% (Wu *et al.*, 2020), condición similar a la del presente estudio. En la mayoría de los casos, la aplicación de cal agrícola aumentaría la respiración del suelo; sin embargo, una vez instalado un cultivo, el aumento de la respiración se compensa con un aumento de la producción de biomasa vegetal (Page *et al.*, 2009).

Dados los resultados observados con las evaluaciones agronómicas hechas al cultivo de maíz, se evidenció un efecto considerable del uso de biochar en el cultivo de maíz, obteniéndose un aumento en el rendimiento del cultivo y por ende de rentabilidad, mediante la estrategia de reducir la cantidad de fertilizante, debido a que el costo del biochar es mucho menor al costo del fertilizante nitrogenado sintético (Ladd *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES

La aplicación de biochar ocasionó una alta emisión de CO₂ dentro de las primeras 24 horas. También mejoró la fertilidad del suelo sin cultivo a través del incremento de la materia orgánica, N, P disponible, CIC y cationes intercambiables (Ca⁺², Mg⁺², K⁺). En presencia de cultivo, la aplicación de biochar mejoró el contenido de P y K disponible, CIC y cationes intercambiables, los cuales fueron significativamente mayores en el tratamiento con biochar; el Ca⁺² en todos los tratamientos con enmienda, el Mg⁺² con la dolomita; además todos los tratamientos

con enmiendas disminuyeron la cantidad de Al⁺³. El biochar y la dolomita generaron valores significativamente más altos de CO₂ acumulado en ausencia de cultivo mientras que en el suelo cultivado lo generó el biochar. En el suelo con cultivo, la emisión llegó a disminuir respecto al testigo en todos los tratamientos. Adicionalmente, se observó un mejor crecimiento y desarrollo a través de los parámetros agronómicos evaluados, donde se denota un efecto significativo con el uso de biochar.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el PI Pro Suelos y Aguas con número de subvención CUI 2487112 del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) del Gobierno Peruano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arévalo-Gardini, E.; Canto, M.; Alegre, J.; Loli, O.; Julca, A.; Baligar, V. 2015. Changes in soil physical and chemical properties in long term improved natural and traditional agroforestry management systems of cacao genotypes in Peruvian Amazon. *PLoS ONE*, 10(7). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132147>
- Bazán, R. 2017. *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego*. Instituto Nacional de Innovación Agraria, Lima, Perú. 89pp.
- Bloem, J.; Hopkins, D. W.; Benedetti, A. 2005. *Microbiological methods for assessing soil quality*. CABI Publishing, Wallingford, UK. 307pp.
- Bolan, N.; Hoang, S. A.; Beiyuan, J.; Gupta, S.; Hou, D.; Karakoti, A.; ...; Van Zwieten, L. 2022. Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *International*

- Materials Reviews*, 67(2): 150-200. DOI: <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1922047>
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.789870>
- CIMMYT. 1995. *Manejo de los ensayos e informe de los datos para el Programa de Ensayos Internacionales de Maíz*. CIMMYT, México D.F. 20pp.
- Desalegn, M. Y.; Miheretu, B. A.; Gobezie, T. 2023. Impact of land use/land cover changes on soil erosion risk in upper Mile River sub-watershed, North Eastern highlands of Ethiopia. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1080/24749508.2023.2206063>
- Ge, S.; Zhu, Z.; Jiang, Y. 2018. Long-term impact of fertilization on soil pH and fertility in an apple production system. *Journal of soil science and plant nutrition*, 18(1): 282-293. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005001002>
- Hu, L.; Huang, R.; Zhou, L.; Qin, R.; He, X.; Deng, H.; Li, K. 2023. Effects of magnesium-modified biochar on soil organic carbon mineralization in citrus orchard. *Frontiers in Microbiology*, 14. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1109272>
- 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.; ... ; 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.
- Ladd, B.; Dumler, S.; Loret de Mola, E.; Anaya de la Rosa, R.; Borchard, N. 2017. Increasing profitability in maize production in Peru: N-fertiliser and biochar. *The Biologist (Lima)*, 15(2): 351-358.
- Lehmann, J.; Cowie, A.; Masiello, C. A.; Kammann, C.; Woolf, D.; Amonette, J. E.; ... Whitman, T. 2021. Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 14(12): 883-892.
- Mukherjee, A.; Lal, R. 2013. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 3(2): 313-339. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy3020313>
- Oo, A. Z.; Sudo, S.; Akiyama, H.; Win, K. T.; Shibata, A.; Yamamoto, A.; Sano, T.; Hirono, Y. 2018. Effect of dolomite and biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from acidic tea field soil. *PLoS ONE*, 13(2). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192235>
- Page, K. L.; Allen, D. E.; Dalal, R. C.; Slattery, W. 2009. Processes and magnitude of CO₂, CH₄, and N₂O fluxes from liming of Australian acidic soils: A review. *Australian Journal of Soil Research*, 47 (8): 747-762. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR09057>
- Paradelo, R.; Virto, I.; Chenu, C. 2015. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 202: 98-107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.005>
- R Core Team 2022. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (<https://www.R-project.org/>)
- Ray, R. L.; Griffin, R. W.; Fares, A.; Elhassan, A.; Awal, R.; Woldesenbet, S.; Risch, E. 2020. Soil CO₂ emission in response to organic amendments, temperature, and rainfall. *Scientific Reports*, 10(1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62267-6>
- Sadzawka R., A.; M.A. Carrasco R.; R. Grez Z.; M.L. Mora G.; H. Flores P.; A. Nearnan. 2006. *Métodos de Análisis de recomendados para los suelos de Chile. Revisión*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas

- INIA No 34, Santiago, Chile. 164pp.
- Shetty, R.; Vidya, C. S. N.; Prakash, N. B.; Lux, A.; Vaculík, M. 2021. Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review. *Science of the Total Environment*, 765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142744>
- Shi, Y.; Liu, X.; Zhang, Q.; Li, G.; Wang, P. 2022. Biochar rather than organic fertilizer mitigated the global warming potential in a saline-alkali farmland. *Soil and Tillage Research*, 219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105337>
- Šlapáková, B.; Jeřábková, J.; Voříšek, K.; Tejnecký, V.; Drábek, O. 2018. The biochar effect on soil respiration and nitrification. *Plant, Soil and Environment*, 64(3): 114–119. DOI: <https://doi.org/10.17221/13/2018-PSE>
- Wang, Y.; Yao, Z.; Zhan, Y.; Zheng, X.; Zhou, M.; Yan, G.; Wang, L.; Werner, C.; Butterbach-Bahl, K. 2021. Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. *Global Change Biology*, 27(12): 2807–2821. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15607>
- Wu, H.; Hao, X.; Xu, P.; Hu, J.; Jiang, M.; Shaaban, M.; Zhao, J.; Wu, Y.; Hu, R. 2020. CO₂ and N₂O emissions in response to dolomite application are moisture dependent in an acidic paddy soil. *Journal of Soils and Sediments*, 20(8): 3136–3147. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02652-w>
- Wu, H.; Hu, J.; Shaaban, M.; Xu, P.; Zhao, J.; Hu, R. 2021. The effect of dolomite amendment on soil organic carbon mineralization is determined by the dolomite size. *Ecological Processes*, 10(1): 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00278-x>
- Yang, Y.; Sun, K.; Liu, J.; Chen, Y.; Han, L. 2022. Changes in soil properties and CO₂ emissions after biochar addition: Role of pyrolysis temperature and aging. *Science of the Total Environment*, 839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156333>
- Yu, H.; Zou, W.; Chen, J.; Chen, H.; Yu, Z.; Huang, J.; Tang, H.; Wei, X.; Gao, B. 2019. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *Journal of environmental management*, 232, 8-21.
- Zhang, A.; Liu, Y.; Pan, G.; Hussain, Q.; Li, L.; Zheng, J.; Zhang, X. 2012. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. *Plant and Soil*, 351(1-2): 263–275. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0957-x>

Recibido: 16 de junio de 2023 **Aceptado para publicación:** 11 de octubre de 2023