



Evaluación fisicoquímica del suelo y características morfofisiológicas de *Morus alba* y *Sorghum bicolor*, en presencia de biocarbón enriquecido con el bioproducto IHPLUS® BF

Physicochemical Evaluation of the Soil and Morphophysiological Characteristics of *Morus Alba* and *Sorghum Bicolor*, in the Presence of Biochar Enriched with the Bioproduct IHPLUS® BF

Gertrudis Pentón Fernández*¹ <https://orcid.org/0000-0002-4253-9317>

Yania Susnay Oropesa Scull¹ <https://orcid.org/0009-0001-4498-8992>

Esther B. Norda Castro¹ <https://orcid.org/0000-0002-9011-9544>

Milianys Pérez Reyes¹ <https://orcid.org/0000-0002-9019-5600>

Pierre Christen² <https://orcid.org/0000-0003-0414-1401>

¹Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey, Universidad de Matanzas, Cuba

²IMBE, Aix Marseille Univ, Avignon Univ, CNRS, IRD, Marseille, France
Autor de correspondencia: tulypenton@gmail.com

Recepción: 23 de marzo de 2023

Aceptado: 5 de junio de 2023

Resumen

Objetivo. Evaluar el efecto del biocarbón enriquecido con bioproducto IHPLUS® BF en indicadores físico-químicos del suelo y morfofisiológicos de morera (*Morus alba*) y sorgo (*Sorghum bicolor*). **Materiales y métodos.** Se evaluaron sustratos basados en suelo mezclado con biocarbón de morera, marabú (*Dicrostachys cinerea*) o bagazo de caña de azúcar (*Sacharum officinarum*), embebidos en agua o en IHPLUS® BF *versus* suelo sin biocarbón

Abstract

Objective. To evaluate the effect of biochar enriched with IHPLUS® BF bioproduct, on soil physicochemical and morphophysiological indicators of mulberry (*Morus alba*) and sorghum (*Sorghum bicolor*). **Materials and methods.** Substrates based on soil mixed with: mulberry biochar, marabou (*Dicrostachys cinerea*) or sugarcane bagasse (*Sacharum officinarum*), soaked in water or in IHPLUS® BF *versus* soil without biochar as negative control, were eva-

como control negativo y su efecto en el vivero de morera y sorgo. El diseño experimental fue totalmente al azar. **Resultados.** pH, conductividad eléctrica, potencial redox y contenido de sólidos solubles en los biocarbón variaron al ser enriquecidos con IHPLUS® BF; se observó mayor incidencia en el de bagazo (6.09; 363.67 $\mu\text{S}/\text{m}$; 341.90 mV; 0.37 °brix, respectivamente). En el sustrato de biocarbón de bagazo con IHPLUS® BF mejoró el almacenamiento y la retención de humedad ($\geq 0.7 \text{ g/g}$; $0.5 \text{ g} \leq X \leq 0.6 \text{ g/g}$, respectivamente), seguido del biocarbón de morera embebido en agua ($\geq 0.6 \text{ g/g}$, almacenamiento). En el cultivo de sorgo hubo efectos significativos del biocarbón de bagazo con IHPLUS® BF y de morera embebido en agua. Existió una correlación alta entre la biomasa aérea y la clorofila (0.84), el NBI en las hojas (0.83) y el pH del sustrato (-0.84). En el cultivo de morera fueron mejores el biocarbón de bagazo con agua y el de morera con IHPLUS® BF. Se correlacionó más la altura de las plantas con la biomasa aérea (0.86), los flavonoles (0.85), la antocianina en las hojas (-0.82) y el pH del sustrato (-0.80). **Conclusiones.** El uso del biocarbón de bagazo de caña enriquecido con IHPLUS®BF y el biocarbón de morera mejoraron el pH, el potencial redox, la conductividad eléctrica, el almacenamiento y la retención de agua en el suelo; así como la respuesta morfofisiológica de sorgo y morera cultivados en vivero.

Palabras clave

Carbón vegetal, fertilización orgánica del suelo, marabú, morera, bagazo de caña, sorgo.

luated; in addition to its effect on the mulberry and sorghum nursery. The experimental design was totally randomized. **Results.** pH, electrical conductivity, redox potential and soluble solids content in the biochars varied when they were enriched with IHPLUS® BF; there was a higher incidence in bagasse (6.09; 363.67 $\mu\text{S}/\text{m}$; 341.90 mV; 0.37 °brix, respectively). In the bagasse biochar substrate with IHPLUS® BF, storage and moisture retention improved ($\geq 0.7 \text{ g/g}$; $0.5 \text{ g} \leq X \leq 0.6 \text{ g/g}$, respectively), followed by water-embedded mulberry biochar ($\geq 0.6 \text{ g/g}$, storage). In the sorghum crop there were significant effects of bagasse biochar with IHPLUS® BF and mulberry soaked in water. There was a high correlation between aerial biomass and chlorophyll (0.84), NBI in leaves (0.83) and substrate pH (-0.84). In the mulberry crop, bagasse biochar with water and mulberry biochar with IHPLUS® BF were better. The height of the plants was more correlated with the aerial biomass (0.86), the flavonols (0.85), the anthocyanin in the leaves (-0.82) and the pH of the substrate (-0.80). **Conclusions.** The use of sugarcane bagasse biochar enriched with IHPLUS®BF and mulberry biochar improved the pH, redox potential, electrical conductivity, storage and retention of water in the soil; as well as the morphophysiological response of sorghum and mulberry grown in nurseries.

Keywords

Biochar, organic soil fertilization, marabou, mulberry, sugarcane bagasse, sorghum.

Introducción

El biocarbón (biochar en idioma inglés) es un sustrato agrícola sólido, producto de la descomposición térmica (por debajo de los 700 °C) de la materia orgánica y en un ambiente limitado en oxígeno o pirólisis. Esto hace que sea diferente del carbón activado y del carbón como combustible (Joseph *et al.*, 2021). Se aplica al suelo, fundamentalmente, como enmienda, sumidero de carbono, para incrementar la retención de iones por

su alta porosidad y capacidad de intercambio catiónico, y en la mejora de la capacidad de retención de agua (Schmidt *et al.*, 2021; Cuthbertson, 2018).

La materia prima para fabricar biocarbón se podría garantizar en Cuba a partir de los residuos de la producción del arroz, *Jatropha curcas*, los cultivos forestales, las podas en los silvopastoreos, lodos de digestores biológicos, bagazo de caña de azúcar y el aprovechamiento de plantas invasoras como *Dichrostachys cinerea* (Curbelo *et al.*, 2022), entre otros. La adición del bioproducto IHPLUS® BF al biocarbón pudiera mejorar las características del sustrato y el desarrollo de las plantas de cultivo y, al respecto, se comprobó que este activa los procesos de compostajes, mejora la estructura, la composición, el pH, el potencial redox del suelo e incrementa la productividad vegetal (Pentón *et al.*, 2022).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del biocarbón enriquecido con el bioproducto IHPLUS® BF en indicadores físico-químicos del suelo y morfo-fisiológicos del cultivo en vivero de *Morus alba* y *Sorghum bicolor*.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en la Estación Experimental Indio Hatuey (22°, 48' y 7" de latitud norte y 81° y 2' de longitud oeste), a 19.90 m s.n.m., en el municipio Perico, provincia Matanzas, Cuba.

Las condiciones agrometeorológicas se caracterizaron por diferencias estacionales típicas entre febrero a abril, correspondiente a la época poco lluviosa, y de mayo a junio, pertenecientes a la época lluviosa. Fue común en todo el período el comportamiento de lluvias caídas por debajo de la media histórica, mientras que las temperaturas extremas medias estuvieron por encima de la norma climatológica de 1979-2008 (INSMET, 2023).

Entre los meses de febrero a abril, el valor medio de lluvia caída representó: 49.1, 21.3 y 56.7% del promedio histórico. Las temperaturas mínimas medias oscilaron entre 12 y 15 °C (febrero), 16 y 19 °C (marzo) y en abril estuvieron por encima de 22.0 °C, con una anomalía de +3.0 y +2.3 °C para las temperaturas máxima y mínima media histórica, respectivamente.

Los meses de mayo y junio, acumularon lluvias superiores a 100 mm cada mes, con eventos severos. Las temperaturas mínimas medias fueron de 23.0 y 24.0 °C, respectivamente; con una anomalía de las temperaturas máxima y mínima media histórica equivalente a +0.4 y +1.1 °C en mayo y +0.6 y +0.9 °C en junio.

Los sustratos estudiados tuvieron como base un suelo del tipo Ferralítico Rojo (FR), según Hernández *et al.* (2015), que se clasificó como Nitisol Ferralítico Ródico, Lítico y Eutrítico. El mismo se analizó previo al inicio de los experimentos, en el laboratorio de agroquímica del Instituto Nacional de Ciencia Agrícola (INCA), con las técnicas siguientes: pH en H₂O, potenciometría, relación suelo: agua 1:2.50 (ONN, 1999d); MO según la metodología de Walkley y Black (ONN, 1999c); cationes intercambiables por extracción con NH₄Ac 1 mol L⁻¹ a pH 7, determinación por complejometría de calcio y magnesio (ONN, 1999a); fósforo por el método de Oniani (ONN, 1999b) de extracción con H₂SO₄ 0.1N y determinación por espectrometría UV-visible. Con este

análisis químico y las tablas de interpretación de Paneque y Calaña (2001) se constató que el pH del suelo fue de neutro a ligeramente básico (7.90), con alta concentración de magnesio (Mg) intercambiable (3.50 Cmol(+)/kg), valor medio (13 Cmol(+)/kg) de calcio (Ca), fósforo de 103 Ppm y baja concentración (1.95%) de materia orgánica (MO).

Procedimiento experimental

El experimento se desarrolló entre los meses de febrero a junio 2021, las especies vegetales involucradas en la obtención del biocarbón fueron: morera (*Morus alba*), marabú (*Dicrostachys cinerea*) y bagazo de caña de azúcar (*Sacharum officinarum*). Las especies cultivadas fueron morera (*M. alba*) y sorgo (*Sorghum bicolor*). Los ensayos se realizaron en bolsas de 1 kg de capacidad de sustrato, que se obtuvieron de mezclar suelo con biocarbón, en una proporción volumétrica 2:1; semejando la técnica de aplicación en la rizosfera de los cultivos *versus* suelo solo.

Se conformaron cuatro agrupamientos experimentales:

- Estudio sobre capacidad de almacenamiento y retención de humedad al sol.
- Estudio sobre capacidad de almacenamiento y retención de humedad a la sombra.

Estos experimentos abarcaron 42 días, equivalentes a seis semanas (divididas en tres semanas de establecimiento en el mes de marzo y tres semanas de evaluación en abril).

- Estudio del cultivo de sorgo. Abarcó 30 días del mes mayo.
- Estudio del cultivo de morera. Abarcó 105 días entre los meses de marzo a junio.

Cada agrupamiento contó de 70 bolsas, se aplicó riego con tres frecuencias semanales en los grupos experimentales para el cultivo de sorgo y de morera.

El biocarbón se obtuvo mediante un proceso de pirolisis lenta, en un horno en el suelo. Se utilizó para ello la tecnología de Kon-Tiki (Pentón *et al.*, 2021). El material carbonoso resultante se sumergió durante 24 horas en H₂O o en solución de IHPLUS® BF a 50% de concentración según el tratamiento. La cantidad de solución para embeber fue fija según el origen del biocarbón y se correspondió con 1.75g/g de biocarbón de morera, 1g/g de biocarbón de marabú y 3.5g/g de biocarbón de bagazo de caña.

IHPLUS® BF es un producto constituido por una mezcla de diferentes organismos, tanto aerobios como anaerobios, compatibles desde el punto de vista fisiológico, que se complementan mutuamente. Esta solución tiene un pH entre 3.2 y 3.8. Se utilizó en forma de inóculo líquido, potenciado a partir de la mezcla de 1 kg de miel final de *Saccharum officinarum* L. y 1 kg de madre líquida y 20 kg de agua sin cloro. Su fermentación se realizó durante 10 días (Mílera-Rodríguez *et al.*, 2020).

Las evaluaciones de capacidad de almacenamiento y retención se realizaron al sol y a la sombra, sin cultivo. Las correspondientes a los indicadores morfofisiológicos del sorgo y de la morera se realizaron al sol.

Se utilizó un diseño totalmente al azar con 10 repeticiones para todos los grupos experimentales.

Los tratamientos evaluados consistieron en los siguientes sustratos:

- T1- Suelo con biocarbón de morera embebido en agua (MOR-H₂O)
- T2- Suelo con biocarbón de marabú embebido en agua (MAR-H₂O)
- T3- Suelo con biocarbón de bagazo de caña de azúcar embebido en agua (BAG-H₂O)
- T4- Suelo con biocarbón de morera enriquecido con IHPLUS® BF (MOR-IH-PLUS)
- T5- Suelo con biocarbón de marabú enriquecido con IHPLUS® BF (MAR-IH-PLUS)
- T6- Suelo con biocarbón de bagazo enriquecido con IHPLUS® BF (BAG-IHPLUS)
- T7- Suelo sin biocarbón (control negativo).

Mediciones físicas y químicas en el sustrato para el cultivo

Se midió al inicio del experimento el pH, potencial redox [Eh(pH7)] (mV), conductividad eléctrica EC ($\mu\text{S}/\text{m}$) y el contenido de sólidos solubles (°brix) en el biocarbón con agua o con IHPLUS® BF; además, se evaluó el pH y el potencial redox [Eh(pH7)] (mV) en los sustratos obtenidos, con o sin biochar incorporado, a los 42 días.

Los sensores utilizados consistieron en pH-metro digital con una precisión de ± 0.05 ExStik® de EXTECH, sensor de temperatura GREISINGER, Typ K (NiCr-Ni), sensor de potencial redox (ORP METER Model: YK-23RP, LUTRON ELECTRONIC) y refractómetro portátil digital.

Se utilizó la siguiente ecuación para ajustar el potencial redox [Eh(pH7)] (mV), según Husson *et al.* (2016):

$$\text{Eh (pH7)} = \text{Eh} + (225,84 - [0,7282 \times \text{temperatura del sustrato}]) - 59 \times (7-\text{pH})$$

Se evaluó el almacenamiento y la retención de agua durante 42 días; para ello se realizó el pesaje inicial de las bolsas con los sustratos previamente secados en estufa a 70 °C durante 72 horas y se obtuvo un valor promedio de peso seco en cada tratamiento, como referencia para calcular el índice de almacenamiento y retención del agua en el tiempo.

A continuación, por seis semanas, fueron embebidas las bolsas a capacidad de campo, se dejaron escurrir y después de una hora se evaluó el índice de humedad almacenada. Pasados siete días, se evaluó el índice de humedad retenida (IHR g humedad/g sustrato seco).

$$\text{Índice de humedad retenida (g humedad/g sustrato seco)} = \frac{(\text{peso húmedo} - \text{peso seco})}{\text{peso seco}}$$

Mediciones fisiológicas en las plantas

Tanto en el sorgo como en la morera, se midió en el haz de las hojas el contenido de clorofila ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$), flavonoles y antocianinas (absorbancia relativa) y contenido relativo de nitrógeno (NBI®). Las mediciones se realizaron a los 15 y 45 días en el cultivo de sorgo y de morera, respectivamente. Se utilizó el sensor de clip de hojas Dualex, diseñado para estudios de estrés abiótico (Goulas *et al.*, 2004).

Mediciones morfológicas en las plantas

Se realizaron mediciones diferentes para cada especie evaluada, considerando sus características específicas distintivas entre la gramínea macollosa (sorgo) y especie arbustiva de hoja ancha (morera); para ello se utilizó el pie de rey (vernier), la regla milimetrada y la balanza técnica digital.

En el cultivo de sorgo se evaluó la altura apical h (cm) y diámetro de la macolla \emptyset (cm) a los 15 días, y el peso fresco (PF) de la biomasa fresca aérea (g) a los 30 días.

En el cultivo de morera se evaluó la altura apical h (cm) y el PF de la biomasa aérea (g) a los 105 días.

Procesamiento estadístico

Se realizó un análisis de varianza ANOVA, donde se compararon las medias estadísticas y se utilizó la dócima de Tukey ($p \leq 0.05$). Se analizaron las relaciones de interdependencia entre variables a través de matrices de correlación, con el coeficiente de *Pearson*. Se utilizó el programa estadístico Infostat 2008 (Di Rienzo *et al.*, 2008).

Resultados

Los biocarbón se distinguieron tanto por su origen como por el tratamiento con agua o el bioproducto IHPLUS® BF. El biocarbón obtenido de marabú se diferenció por un mayor pH, tanto embebido en agua como enriquecido con el bioproducto; aunque todos tendieron a disminuir el pH al ser enriquecido con el IHPLUS® BF. El biocarbón de bagazo de caña fue el que más varió (cuadro 1).

Cuadro 1

Características de los biocarbón embebido en agua o enriquecido con IHPLUS® BF

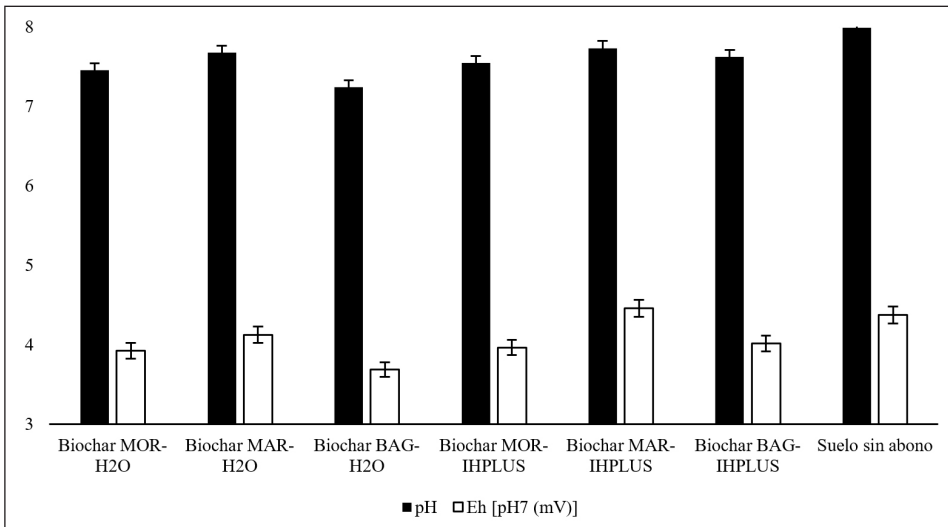
Tratamientos	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{m}$)	Eh (pH7) (mV)	Sólidos solubles (brix)
T1 MOR-H ₂ O	9.56b	142.47c	465.90cd	0.00c
T2 MAR-H ₂ O	11.55a	147.30c	577.68a	0.00c
T3 BAG-H ₂ O	9.77b	206.50b	546.12b	0.00c
T4 MOR-IHPLUS	8.34d	157.63c	372.75f	0.23ab
T5 MAR-IHPLUS	8.93c	162.67c	457.54de	0.20b
T6 BAG-IHPLUS	6.09e	363.67a	341.90g	0.37a
CV	1.46	4.43	1.93	40.50
EE \pm	0.74	34.66	37.8	0.06
P	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

T1- Suelo con biocarbón de morera embebido en agua; T2- Suelo con biocarbón de marabú embebido en agua; T3- Suelo con biocarbón de bagazo de caña de azúcar embebido en agua; T4- Suelo con biocarbón de morera enriquecido con IHPLUS® BF; T5- Suelo con biocarbón de marabú enriquecido con IHPLUS® BF; T6- Suelo con biocarbón de bagazo enriquecido con IHPLUS® BF.

La figura 1 muestra que las características de pH y potencial redox de los sustratos suelo con biocarbón embebido en agua o con IHPLUS® BF, no difirieron del suelo sin biocarbón. Los valores de pH fueron medianamente básicos y el potencial redox osciló entre 350 y 450mV.

La conductividad eléctrica (EC) aumentó por efecto del bioproducto IHPLUS® BF en el biocarbón de bagazo. El potencial redox Eh (pH7) de los biocarbón disminuyó con el IHPLUS® BF, aunque se mantuvo en todos los casos por encima de 300 mV. El biocarbón de bagazo de caña mostró la mayor variación [en 200 unidades de Eh (pH7)]; mientras que en marabú y morera la disminución fue en 100 unidades. Los sólidos totales no fueron detectados en los biocarbón embebidos en agua, pero alcanzaron valores superiores de 0.20 brix por efecto del enriquecimiento con el bioproducto. Los valores mayores se alcanzaron en biocarbón de bagazo de caña, seguido de morera.

Figura 1
Características de los sustratos con o sin biocarbón



Suelo con biocarbón de morera embebido en agua (MOR-H₂O); suelo con biocarbón de marabú embebido en agua (MAR-H₂O); suelo con biocarbón de bagazo de caña de azúcar embebido en agua (BAG-H₂O); suelo con biocarbón de morera enriquecido con IHPLUS® BF (MOR-IHPLUS); suelo con biocarbón de marabú enriquecido con IHPLUS® BF (MAR-IHPLUS); suelo con biocarbón de bagazo enriquecido con IHPLUS® BF (BAG-IHPLUS); suelo sin biocarbón (control negativo).

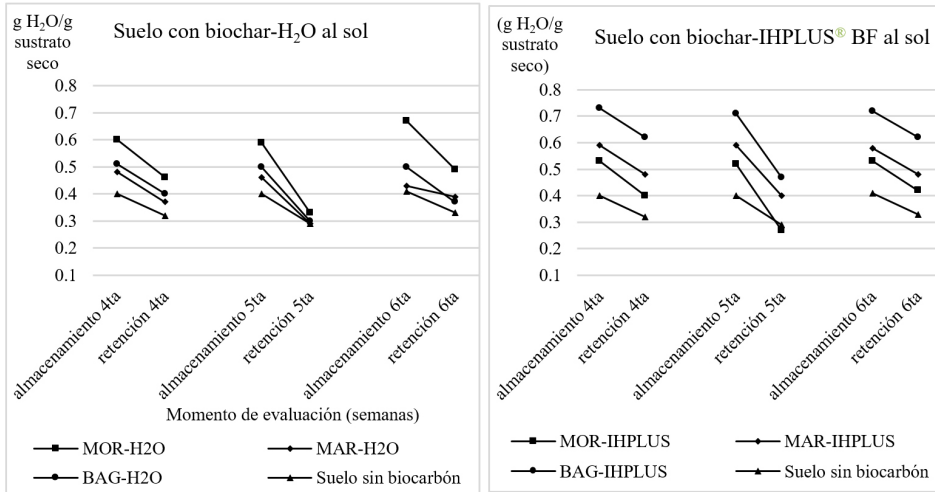
La capacidad de almacenamiento y retención de humedad en el suelo mejoró al incorporar biocarbón enriquecido con IHPLUS® BF.

Al sol (figura 2), el suelo con biocarbón de bagazo de caña con IHPLUS® BF fue el que más humedad almacenó (≥ 0.7 g/g del sustrato seco), a la vez que retuvo entre 0.5 g y 0.6 g al séptimo día posterior a la imbibición. Este mismo biocarbón con agua almacenó sólo 0.5 g y retuvo humedad por debajo de 0.4 g/g del sustrato seco. El biocarbón de morera embebido en agua, propició un almacenamiento mayor de humedad

en el sustrato (≥ 0.6 g/g del sustrato seco), comparado con los restantes biocarbón. El suelo sin biocarbón estuvo entre los sustratos con menor almacenamiento y retención de humedad.

Figura 2

Almacenamiento y retención de humedad hasta siete días en suelo con biocarbón al sol



Suelo con biocarbón de morera embebido en agua (MOR-H₂O); suelo con biocarbón de marabú embebido en agua (MAR-H₂O); suelo con biocarbón de bagazo de caña de azúcar embebido en agua (BAG-H₂O); suelo con biocarbón de morera enriquecido con IHPLUS® BF (MOR-IHPLUS); suelo con biocarbón de marabú enriquecido con IHPLUS® BF (MAR-IHPLUS); suelo con biocarbón de bagazo enriquecido con IHPLUS® BF (BAG-IHPLUS); suelo sin biocarbón (control negativo).

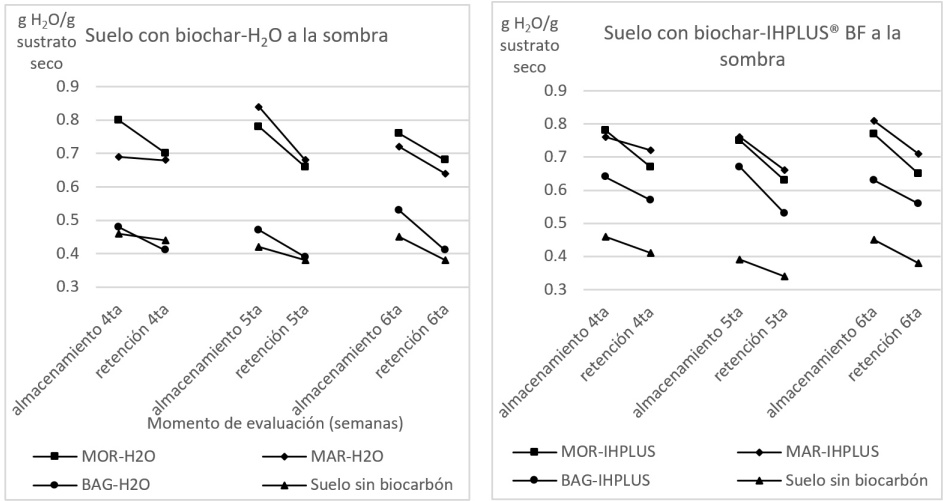
A la sombra se evidenció mayor almacenamiento y retención de humedad en el suelo con biocarbón de morera y de marabú, tanto con agua como IHPLUS® BF, llegando a alcanzar valores superiores a 0.8 y 0.6 g de humedad por cada g del sustrato seco, respectivamente (figura 3). El suelo sin biocarbón estuvo entre los sustratos con menor almacenamiento y retención de humedad.

La matriz de correlaciones a través del coeficiente de *Pearson* permitió identificar una relación inversa significativa y estrecha entre el pH y el contenido de sólidos solubles; también el potencial redox se correlacionó con el contenido de sólidos solubles en el mismo sentido del pH (cuadro 2).

La correlación entre la capacidad de almacenamiento y retención de humedad en el sustrato fue altamente significativa y positiva. A su vez, fue inversa entre estas variables y el pH del biocarbón.

Figura 3

Almacenamiento y retención de humedad hasta siete días en suelo con biocarbón a la sombra



Suelo con biocarbón de morera embebido en agua (MOR-H₂O); suelo con biocarbón de marabú embebido en agua (MAR-H₂O); suelo con biocarbón de bagazo de caña de azúcar embebido en agua (BAG-H₂O); suelo con biocarbón de morera enriquecido con IHPLUS® BF (MOR-IHPLUS); suelo con biocarbón de marabú enriquecido con IHPLUS® BF (MAR-IHPLUS); suelo con biocarbón de bagazo enriquecido con IHPLUS® BF (BAG-IHPLUS); suelo sin biocarbón (control negativo).

Cuadro 2

Correlaciones entre las características del biocarbón y los sustratos, y la capacidad de almacenamiento y retención de humedad

	Biocarbón				Sustrato			
	pH	EC	Eh (pH7)	°brix	pH	Eh (pH7)	Humedad	
							Almacén	Retención
pH _{biocarbón}	1.00							
EC _{biocarbón}	-0.79 _{ns}	1.00						
Eh(pH7) _{biocarbón}	0.92*	-0.55 _{ns}	1.00					
°brix _{biocarbón}	-0.90*	0.69 _{ns}	-0.89*	1.00				
pH _{sustrato}	-0.12 _{ns}	0.03 _{ns}	-0.26 _{ns}	0.48 _{ns}	1.00			
Eh(pH7) _{sustrato}	-0.01 _{ns}	-0.16 _{ns}	-0.10 _{ns}	0.33 _{ns}	0.90*	1.00		
Almacenamiento _{sustrato}	-0.85*	0.71 _{ns}	-0.75 _{ns}	0.67 _{ns}	-0.32 _{ns}	-0.20 _{ns}	1.00	
Retención _{sustrato}	-0.82*	0.80 _{ns}	-0.68 _{ns}	0.73 _{ns}	-0.12 _{ns}	-0.03 _{ns}	0.96**	1.00

Los valores numéricos corresponden al coeficiente de Pearson. Los índices: *, **, ns, indican significación P ≤ 0,01; 0,05; no significación.

El efecto de la incorporación de biocarbón en el cultivo de sorgo fue mejor en el sustrato con biocarbón de bagazo de caña enriquecido con IHPLUS® BF, tanto en contenido de clorofila, de flavonoides y de antocianina a los 15 días, como en acumulación de biomasa fresca a los 30 días. Le siguió el sustrato con biocarbón de morera embebido en agua (cuadro 3).

Cuadro 3

Respuesta morfofisiológica del cultivo de sorgo al abonado con biocarbón enriquecido

Tratamientos	h (cm)	Ø (cm)	Clorofila (µg/cm ²)	NBI®	Flavonol Antocianina (absorbancia relativa)		PF aéreo (g)
					15 días		
T1	22.60abc	0.21bc	28.54a	24.25a	1.23ab	0.14a	6.94a
T2	22.70ab	0.20bc	24.70ab	25.81a	0.97b	0.15ab	4.78a
T3	26.30a	0.26ab	23.71b	24.98a	0.97b	0.16ab	7.63a
T4	19.60abc	0.15c	26.86ab	27.01a	1.05ab	0.15ab	6.11a
T5	24.66a	0.31a	27.04ab	26.97a	1.02b	0.15ab	6.05a
T6	16.80bc	0.14c	28.58a	24.20a	1.21ab	0.14a	7.37a
T7	20.70abc	0.17bc	18.49c	14.61b	1.32a	0.16b	0.33b
EE±	0.60	0.01	0.45	0.67	0.02	0.0017	0.32
P	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0005	0.0065	0.0001

Altura: h (cm); diámetro de la macolla: Ø (cm); clorofila: Chl (µg/cm²); contenido relativo de nitrógeno: NBI®; flavonol: Flav (absorbancia relativa); antocianina: Ant; peso fresco de la biomasa aérea: PF aéreo (g).

T1- Suelo con biocarbón de morera embebido en agua; T2- Suelo con biocarbón de marabú embebido en agua; T3- Suelo con biocarbón de bagazo de caña de azúcar embebido en agua; T4- Suelo con biocarbón de morera enriquecido con IHPLUS® BF; T5- Suelo con biocarbón de marabú enriquecido con IHPLUS® BF; T6- Suelo con biocarbón de bagazo enriquecido con IHPLUS® BF; T7- Suelo sin abonar (control negativo).

El contenido de antocianina en las hojas de sorgo fue inverso a la capacidad de almacenamiento de humedad en el suelo (cuadro 4); además, existió una correlación estrecha y significativa entre el peso fresco de la biomasa aérea, el contenido de clorofila y NBI en las hojas, y el pH del suelo.

En el cultivo de morera, el biocarbón de la propia especie (morera) con IHPLUS® BF estimuló significativamente la acumulación de biomasa aérea sin diferencia con el biocarbón de bagazo de caña con agua (cuadro 5). A su vez, estos tratamientos estuvieron entre los de mejor respuesta en contenido de flavonoles, antocianinas y altura de las plantas.

Cuadro 4

Correlaciones entre los indicadores morfofisiológicos de sorgo *versus* las características del biocarbón y el suelo, y su capacidad de almacenamiento y retención de humedad

	Sorgo						
	h	Ø	Clorofila	NBI®	Flavonol	Antocianina	PF aéreo
pH _{biocarbón}	0.71 _{ns}	0.42 _{ns}	-0.66 _{ns}	0.21 _{ns}	0.46 _{ns}	0.46 _{ns}	-0.58 _{ns}
EC _{biocarbón}	-0.61 _{ns}	-0.43 _{ns}	0.31 _{ns}	-0.52 _{ns}	-0.32 _{ns}	-0.32 _{ns}	0.56 _{ns}
Eh(pH7) _{biocarbón}	0.80 _{ns}	0.54 _{ns}	-0.78 _{ns}	0.004 _{ns}	0.57 _{ns}	0.57 _{ns}	-0.35 _{ns}
⁰ brix _{biocarbón}	-0.75 _{ns}	-0.41 _{ns}	0.58 _{ns}	0.13 _{ns}	-0.40 _{ns}	-0.40 _{ns}	0.19 _{ns}
pH _{sustrato}	-0.38 _{ns}	-0.22 _{ns}	-0.48 _{ns}	-0.62 _{ns}	0.50 _{ns}	0.14 _{ns}	-0.84*
Eh(pH7) _{sustrato}	-0.10 _{ns}	0.18 _{ns}	-0.29 _{ns}	-0.34 _{ns}	0.25 _{ns}	0.10 _{ns}	-0.64 _{ns}
Almacenada _{sustrato}	-0.38 _{ns}	-0.06 _{ns}	0.86*	0.46 _{ns}	0.14 _{ns}	-0.83*	0.72 _{ns}
Retenida _{sustrato}	-0.45 _{ns}	-0.08 _{ns}	0.73 _{ns}	0.34 _{ns}	0.17 _{ns}	-0.77*	0.57 _{ns}
h _{sorgo}	1.00						
Ø _{sorgo}	0.88*	1.00					
Clorofila _{sorgo}	-0.18 _{ns}	0.04 _{ns}	1.00				
NBI® _{sorgo}	0.21 _{ns}	0.32 _{ns}	0.79*	1.00			
Flavonol _{sorgo}	-0.56 _{ns}	-0.51 _{ns}	-0.22 _{ns}	-0.76*	1.00		
Antocianina _{sorgo}	0.49 _{ns}	0.27 _{ns}	-0.86*	-0.42 _{ns}	-0.22 _{ns}	1.00	
PF aéreo _{sorgo}	0.14 _{ns}	0.23 _{ns}	0.84*	0.83*	-0.47 _{ns}	-0.52 _{ns}	1.00

Altura: h (cm); diámetro de la macolla: Ø (cm); clorofila: Chl (µg/cm²); contenido relativo de nitrógeno: NBI®; flavonol: Flav (absorbancia relativa); antocianina: Ant; peso fresco de la biomasa aérea: PF aéreo (g).

Cuadro 5

Respuesta morfofisiológica del cultivo de morera al abondo con biocarbón enriquecido

Tratamientos	Chl (%)	NBI®	Flav Ant		h (cm)	PF aéreo (g)
			(absorbancia relativa)			
			45 días			
T1	14.24	17.18ab	0.85ab	0.15ab	36.40b	6.34bc
T2	12.74	12.35b	1.03a	0.15ab	44.00ab	6.58bc
T3	13.72	15.37ab	0.92a	0.14a	47.90a	8.28ab
T4	15.03	16.62ab	0.94a	0.14a	46.92a	10.54a
T5	13.72	15.56ab	0.90ab	0.14a	34.00b	5.52bc
T6	14.10	17.57ab	0.80ab	0.14a	41.00ab	6.46bc
T7	11.74	19.75ab	0.59b	0.17b	19.80c	3.59c
EE±	0.33	0.52	0.03	0.0029	1.56	0.4
P	0.2475	0.0199	0.0155	0.0234	0.0001	0.0001

Clorofila: Chl (µg/cm²); contenido relativo de nitrógeno: NBI®; flavonol: Flav (absorbancia relativa); antocianina: Ant; altura: h (cm); peso fresco de la biomasa aérea: PF aéreo (g).

T1- Suelo con biocarbón de morera embebido en agua; T2- Suelo con biocarbón de marabú embebido en

agua; T3- Suelo con biocarbón de bagazo de caña de azúcar embebido en agua; T4- Suelo con biocarbón de morera enriquecido con IHPLUS® BF; T5- Suelo con biocarbón de marabú enriquecido con IHPLUS® BF; T6- Suelo con biocarbón de bagazo enriquecido con IHPLUS® BF; T7- Suelo sin abonar (control negativo).

Existió una correlación significativa entre la altura de las plantas y los valores más bajos de pH en el suelo (cuadro 6). La altura de las plantas fue un indicador confiable de la producción de biomasa foliar, a la vez que estuvo correlacionado positivamente con el contenido de flavonoides y de manera inversa con el contenido de antocianinas.

Cuadro 6

Correlaciones entre los indicadores morfofisiológicos de morera *versus* las características del biocarbón y el suelo, y su capacidad de almacenamiento y retención de humedad

	h _{morera}	Clorofila _{morera}	NBI® _{morera}	Flavonol _{morera}	Antocianina _{morera}	PF aéreo _{morera}
pH _{biocarbón}	0.13 _{ns}	-0.62 _{ns}	-0.82*	0.82*	0.65 _{ns}	-0.07 _{ns}
EC _{biocarbón}	0.07 _{ns}	0.10 _{ns}	0.45 _{ns}	-0.65 _{ns}	-0.47 _{ns}	-0.14 _{ns}
Eh(pH7) _{biocarbón}	0.16 _{ns}	-0.78 _{ns}	-0.82*	0.69 _{ns}	0.51 _{ns}	-0.22 _{ns}
°brix _{biocarbón}	-0.14 _{ns}	0.47 _{ns}	-0.54 _{ns}	-0.54 _{ns}	-0.66 _{ns}	0.06 _{ns}
pH _{sustrato}	-0.80*	-0.65 _{ns}	0.37 _{ns}	-0.58 _{ns}	0.68 _{ns}	-0.69 _{ns}
Eh(pH7) _{sustrato}	-0.73 _{ns}	-0.51 _{ns}	0.18 _{ns}	-0.37 _{ns}	0.44 _{ns}	-0.67 _{ns}
Almacenada _{sustrato}	0.28 _{ns}	0.66 _{ns}	0.10 _{ns}	0.12 _{ns}	-0.62 _{ns}	0.14 _{ns}
Retenida _{sustrato}	0.17 _{ns}	0.46 _{ns}	0.09 _{ns}	0.03 _{ns}	-0.54 _{ns}	-0.03 _{ns}
h _{morera}	1.00					
Clorofila _{morera}	0.68 _{ns}	1.00				
NBI® _{morera}	-0.66 _{ns}	-0.11 _{ns}	1.00			
Flavonol _{morera}	0.85*	0.49 _{ns}	-0.91***	1.00		
Antocianina _{morera}	-0.82*	-0.82 _{ns}	0.46 _{ns}	-0.70 _{ns}	1.00	
PF aéreo _{morera}	0.86*	0.79*	-0.34 _{ns}	0.65 _{ns}	-0.69 _{ns}	1.00

Altura: h (cm); clorofila: Chl (µg/cm²); contenido relativo de nitrógeno: NBI®; flavonol: Flav (absorbancia relativa); antocianina: Ant; peso fresco de la biomasa aérea: PF aéreo (g).

Discusión

Las diferencias obtenidas en las características de los biocarbón por enriquecimiento con agua o IHPLUS® BF confirmaron las consideraciones de autores como Pentón *et al.* (2022) y Lehmann y Joseph (2021), respecto a los valores altos de potencial redox (Eh), pH y conductividad eléctrica (CE) en los biocarbón; y la posibilidad de llevarlos a tenores considerados por Husson (2013) como adecuados para el cultivo agrícola cuando estos son enriquecidos con lactofermentos. Al respecto, este autor defendió el criterio de que el pH óptimo para la mayoría de las plantas cultivadas es 6.5 a 7.0, y las condiciones favorables se encuentran entre 5.5 y 8.0. El Eh óptimo para el crecimiento probablemente está en el rango de +400 a +450 mV.

Los resultados se corresponden con resultados de Pentón *et al.* (2023b), quienes diferenciaron los biocarbón de *Vitex parviflora*, *Acacia auriculiformis* y *Bambusa vulgaris* filtrados con agua o con IHPLUS® BF, en términos de conductividad (0.27 *versus* 0.40mS/cm), potencial redox (626.71 *versus* 572.33 mV) y pH (8.26 *versus* 6.34). Los autores relacionaron estos indicadores con mayores niveles de sólidos solubles, ácidos orgánicos, DQO y nitrato N-NO₃- en biocarbón con IHPLUS® BF comparado con biocarbón embebido en agua.

La disminución significativa del pH en el biocarbón de bagazo de caña, al ser enriquecido con IHPLUS® BF, estuvo relacionado con un mayor contenido de sólidos solubles retenido en su estructura; por el contrario, el aumento notable de la conductividad eléctrica puede explicarse porque los biocarbón producidos a partir de madera presentan menor contenido de cenizas que los producidos a partir de especies fibrosas (como es el caso del origen bagazo de caña), herbáceas, estiércoles y biosólidos (Milesi *et al.*, 2020). Es conocido que la conductividad eléctrica se correlaciona estrechamente tanto con la disponibilidad de nutrientes minerales como con la salinidad; siendo un parámetro importante que determina el valor de la enmienda orgánica de los suelos, por su efecto determinante en la calidad biológica de los mismos (Husson, 2013).

El comportamiento del potencial redox en los biocarbón enriquecidos coincidió con resultados obtenidos por Pentón *et al.* (2022); y la disminución más notable por efecto de IHPLUS® BF, en el de bagazo de caña comparado con el de marabú y de morera, pudiera indicar que existió una mayor retención de lactofermentos en este biomaterial.

Las características favorables de pH y redox en el sustrato al incorporar biocarbón se correspondieron con las ventajas de este tipo de abonado, referenciados por Schmidt *et al.* (2021). Al respecto, Hegemann *et al.* (2017) al evaluar biocarbón beneficiado con materia orgánica (lo que en nuestro caso significaría el enriquecimiento por imbibición con IHPLUS® BF), identificaron un revestimiento orgánico complejo y rico en nutrientes que cubre las superficies exteriores e interiores (poros) de las partículas de biocarbón; y demostraron que este recubrimiento agrega hidrofilia, fracciones redox activas y mesoporosidad adicional, lo que fortalece las interacciones biocarbón-agua y, por lo tanto, mejora la retención de nutrientes. Ello implica que el funcionamiento del biocarbón en el suelo está determinado por la formación de una capa orgánica, en lugar de la oxidación de la superficie del biocarbón.

La inclusión de biocarbón al suelo resultó en características de pH y potencial redox similares a su no inclusión, y estuvo en el rango adecuado, según Husson (2013) permitió considerar como adecuado la proporción 2:1 suelo: biocarbón, utilizada en la obtención de los sustratos.

Por su parte, Pentón *et al.* (2023a) mostraron los mayores beneficios de mezclar 25% de biocarbón con 75% de suelo, comparado con proporciones de 50-50 o 75-25% para el aviveramiento de cultivos.

La correlación inversa existente entre el pH y el contenido de sólidos solubles, determinado por la imbibición de los biocarbón en IHPLUS® BF y a su vez entre los sólidos solubles con el potencial redox, se explica porque los lactofermentos, como es

el caso de IHPLUS® BF, tienen la capacidad de disminuir el pH del biocarbón hasta valores cercanos a la neutralidad (Pentón *et al.*, 2022). Es conocido que estos contienen una mezcla de diferentes microorganismos, aerobios y anaerobios (bacterias fotosintéticas, bacterias ácido-lácticas, actinomicetos, levaduras y hongos) que cohabitan en un pH entre 3.2 y 3.8, con una alta carga de grupos funcionales ácidos (IHPLUS® BF, 2020).

Por el contrario, el biocarbón embebido en agua mantiene las características que resultan del proceso de pirólisis, como son la evaporación de numerosos protones H⁺ y aumento de grupos OH⁻ y carboxilos. La descomposición durante la pirólisis de la biomasa remueve los grupos funcionales ácidos e incrementa el contenido de ceniza (Novak *et al.*, 2016), causando la hidrólisis de sales de calcio, potasio y magnesio, en presencia de agua, que conlleva a la alcalinidad. En tal circunstancia, el aumento del pH en el biocarbón también está relacionado con el contenido mineral de la materia prima (Schmidt *et al.*, 2021).

Con respecto al almacenamiento y retención de humedad hasta siete días en suelo con biocarbón; los resultados a favor de la mayor eficiencia en el suelo con biocarbón corroboraron las demostraciones de numerosos autores, cuyos resultados fueron compilados por Schmidt *et al.* (2021), quien planteó que la capacidad de retención de agua en el biocarbón puede variar desde menos de 50% de su peso seco hasta más del 500%, según el peso a granel, la estructura de los poros y la química de la superficie; lo cual, junto con la estructura y la agregación del suelo, determina principalmente la capacidad de retención de agua. Según Forero y Navarro (2017), las propiedades orgánicas del biocarbón incorporado en el suelo, permitirían una modificación estructural condicionante de la reducción de la infiltración de agua y la disminución de la densidad aparente del suelo de 0.92 g/cc a 0.69 g/cc.

Meyer *et al.* (2022) llamó la atención sobre la importancia de aplicar el biocarbón de forma concentrada en la zona de las raíces; ya que puede proporcionar mayor disponibilidad de agua durante las primeras etapas de crecimiento de las plantas, cuando estas aún son especialmente vulnerables a la sequía y otros estreses. Este aspecto, fue demostrado en el presente trabajo a través de los indicadores fisiológicos en el cultivo de sorgo y morera, en los sustratos con biocarbón comparado con suelo sin biocarbón.

En el suelo sin biocarbón el contenido de antocianina fue mayor, indicando que las plantas sufrieron estrés oxidativo a consecuencia de factores ambientales como pudieran ser el déficit de humedad, la insuficiente disponibilidad de nutrientes o la salinidad en el suelo. Las antocianinas están estrechamente relacionadas con la eliminación del oxígeno reactivo (EROs), constituyendo una forma de atenuar el impacto de estos radicales reactivos sobre los componentes celulares Pérez *et al.* (2016). En tal sentido, estos autores observaron en plántulas de henequén (*Agave fourcroydes*), que en condiciones de estrés hídrico disminuyeron los contenidos de clorofila; mientras aumentaron las antocianinas. El contenido de clorofila y de flavonol fue menor, como expresión de posibles insuficiencias de nutrientes.

Otros elementos que corroboran la tesis de Schmidt *et al.* (2021), consisten en la correlación inversa detectada entre el contenido de antocianina en las hojas de sorgo con

respecto a la capacidad de almacenamiento y retención de humedad en el sustrato. El contenido de flavonoles en las hojas de morera mostró una correlación positiva con la altura de las plantas.

Los sustratos con biocarbón de morera y de bagazo de caña enriquecidos con IHPLUS® BF estuvieron entre los de mejor respuesta en el cultivo de sorgo (diámetro de la macolla, contenido de clorofila, de flavonol, de NBI® y peso fresco aéreo) y de morera (contenido de clorofila, de flavonol, de antocianina, de NBI®, altura y peso fresco aéreo). Al respecto, Hegemann *et al.* (2017) demostraron que el biocarbón promueve el crecimiento de las plantas, especialmente cuando se combina con materia orgánica rica en nutrientes, por ejemplo, biocarbón co-compostado; y la promoción del crecimiento se explica por la liberación lenta de nutrientes en el suelo que, en el presente trabajo, pudo ser garantizado por los metabolitos presentes en el bioproducto de enriquecimiento del biocarbón.

Otro aspecto a considerar es que el bagazo de caña de azúcar y la morera, y por consiguiente el biocarbón que de ello se obtiene, contienen potasio (K) como macronutriente esencial. El bagazo de caña de azúcar también concentra nitrógeno, silicio, calcio, azufre, fósforo y magnesio; y parte de estos nutrientes quedan disponibles en las estructuras del material pirolizado y en la ceniza generada. Según Joseph *et al.* (2021), los análisis de extracción en biocarbón de Si, Fe, S, P, Mg y Ca, sugieren que algunas fracciones de estos nutrientes pueden ser accesibles rápidamente para las plantas y los microorganismos. Los autores observaron en sus metanálisis de investigaciones de 20 años, que el biocarbón pueden catalizar reacciones bióticas y abióticas, particularmente en la rizosfera, que aumentan el suministro y la absorción de nutrientes por parte de las plantas y, a su vez, la adsorción de exudados de raíces por biocarbón puede causar la disolución de compuestos minerales en los poros de este, que aumentan la disponibilidad de nutrientes y puede resultar en sitios de adsorción adicionales para moléculas orgánicas.

El biocarbón de gramíneas como caña de azúcar, cascarilla de arroz, entre otros, contiene notables cantidades de biosilicatos (Joseph *et al.* 2021). La sílice (SiO_2) es importante en la solubilización del fósforo del suelo, ya que el anión silicato puede desplazar los aniones del ácido ortofosfórico (PO_4H^- , PO_4H^{2-}) de las posiciones en que este se encuentra retenido en el complejo de cambio del suelo.

El silicio (Si) constituye un nutriente ampliamente reconocido por promover el crecimiento y aliviar el estrés no biológico y biológico en las plantas; este se deposita en forma amorfa en las paredes celulares y contribuye con las propiedades mecánicas de la pared como son la rigidez y la elasticidad (Etesami, 2020).

Con respecto al aporte de fósforo y de calcio a través del biocarbón de bagazo de caña enriquecido con IHPLUS® BF, Pentón *et al.* (2022) determinó que el suelo abonado contenía 407ppm de P y 17 cmol+/kg de Ca, mientras que el suelo sin biocarbón solo tenía 103ppm y 13 cmol+/kg. Según los autores, los abonos con base de biocarbón de bagazo y de morera tienden a garantizar mayores concentraciones de potasio y fósforo asimilable en el suelo, comparado con el biocarbón de marabú.

Los efectos positivos de la aplicación de biocarbón en el suelo y los cultivos, radica en que el biocarbón incide de manera directa en el aumento de carbono e incorpora, en su matriz carbonada, formas oxidadas de nitrógeno, fósforo y azufre. La pirólisis de material de origen vegetal, a temperatura entre 550 °C y 700 °C, garantizó un contenido de carbono total entre 29.0 a 46.10 g/100 de biocarbón; más potasio, magnesio y capacidad de intercambio catiónico; un potencial redox (Eh) entre 400mV y 500mV; una densidad aparente óptima de 0.3 g/cm³, que se explica por la naturaleza porosa del biocarbón con un amplio rango de tamaño de los poros y una elevada área superficial (Schmidt *et al.*, 2021). El elemento más destacado resultó ser el incremento de la MO del suelo, de 1.95%, en el sustrato sin abono a 2.49, 2.69 y 3.57% en el suelo con biocarbón de bagazo, morera y marabú más bioproducto, respectivamente, lo que coincidió con los estudios de Pentón *et al.* (2020) y demostró la relevancia que se logra en la mejora del suelo con la incorporación de biocarbón más bioproducto.

Conclusiones

El uso del biocarbón de bagazo de caña enriquecido con IHPLUS® BF y el biocarbón de morera mejoraron el pH, el potencial redox, la conductividad eléctrica, el almacenamiento y la retención de agua en el suelo, así como la respuesta morfofisiológica de sorgo y morera cultivados en vivero.

Literatura citada

- Curbelo, A.; Valera, E.; Milián, D.; Damas, Ch.; González, A.; Rodríguez, A.; Sosa, R.; Suarez, Y.; Cepero, L.; Sotolongo, J.A.; Domínguez, A. (2022). Atlas de Bioenergía, Cuba. Editorial CUBAENERGÍA. 172 p. ISBN 978-959-7231-19-6
- Cuthbertson, D.M. (2018). The production of pyrolytic biochar for addition in value-added composite material (Doctoral dissertation, The University of Western Ontario (Canada).
- Etesami, H.; Jeong, B.R. y Rizwan, M. (2020). The use of silicon in stressed agriculture management: action mechanisms and future prospects. Chapter 19. In *Metalloids in Plants: Advances and Future Prospects*. Pp. 381-431. Print ISBN: 9781119487197 | Online ISBN: 9781119487210
- Forero, D. y Navarro, J.P. (2017) Implementación de alternativa de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos mediante el proceso de pirólisis lenta para la obtención de materiales de uso agrícola, tesis de grado, Univ. de La Salle, Bogotá, Colombia [en línea]. Disponible: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/364/
- Goulas, Y.; Cerovic, Z.G.; Cartelat, A. y Moya, I. (2004). Dualex: a new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence. *Appl Opt.* 43(23): 4488-96.
- Hernández, A.; Pérez, J.M.; Bosch, D. y Castro, N. (2015). Clasificación de los suelos de Cuba. Mayabeque, Cuba: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Instituto de Suelos. Ediciones INCA, Cuba. 89 p. ISBN: 978-959-7023-77-7. <http://ediciones.inca.edu.cu/> <http://www.inca.edu.cu>
- Husson, O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and Soil.* 362: 389-417. DOI: <http://10.1007/s11104-012-1429-7>.
- Husson, O.; Husson, B.; Brunet, A.; Babre, D.; Alary, K.; Sarthou, L.P.; Charpentier, H.; Durand, M.; Benada, J. y Marc, H. (2016) Practical improvements in soil redox potential (Eh) measurement for characterisation of soil properties. Application for comparison of conventional and conservation agriculture cropping systems. *Analytica Chimica Acta.* 906: 98-109. Journalhomepage: www.elsevier.com/locate/aca

- IHPLUS® BF. (2020), Dictamen de registro No. RCF 039/20. República de Cuba. Ministerio de la Agricultura /SP/
- INSMET. (2023) Tiempo Actual, Reportes de las Estaciones Meteorológicas. Copyright © 1997-2023. <https://www.google.com/url>
- Joseph, S.; Cowie, A.L.; Van Zwieten, L.; Bolan, N.; Budai, A.; Buss, W.; Cayuela, M.L.; Graber, E.; Ippolito, J.; Kuzyakov, Y.; Luo, Y.; Sik Ok, Y.; Palansooriya, K.; Shepherd, J.; Stephens, S.; Weng, Z 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.
- Lehmann, J. y Joseph, S. (2021). Biochar for Environmental Management Science, Technology and Implementation. Edited By Johannes Lehmann y Stephen Joseph. 2nd Edition. Taylor & Francis Limited. EUA. 944 p. ISBN: 0367779188/ 9780367779184
- Meyer zu Drewer, J.; Köster, M.; Abdulai, I.; Rötter, R.P.; Hagemann, N. y Schmidt, H.P. (2022) Impact of different methods of root-zone application of biochar-based fertilizers on young cocoa plants: Insights from a pot-trial. *Horticulturae*. 8(328).
- Milesi, L.; Ullé, J. y Andriulo, A. (2020). Aplicación de biochar en un suelo degradado bajo producción de batata. Efecto sobre propiedades edáficas. *Cienc. Suelo (Argentina)*. 38(1): 162-173.
- Novak, J.; Sigua, G.; Watts, D.; Cantrell, K.; Shumaker, P.; Szogi, A. y Spokas, K. (2016). Biochars impact on water infiltration and water quality through a compacted subsoil layer. *Chemosphere*. 142: 160-167.
- Oficina Nacional de Normalización [ONN]. (1999a). Calidad del suelo. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y de los cationes intercambiables del suelo. NC 652000. La Habana: Oficina Nacional de Normalización. 10 p.
- Oficina Nacional de Normalización [ONN]. (1999b). Calidad del Suelo. Determinación de las formas móviles de fósforo y potasio. NC 52. La Habana: Oficina Nacional de Normalización. 12 p.
- Oficina Nacional de Normalización [ONN]. (1999c). Calidad del suelo. Determinación del por ciento de MO. NC 51. La Habana: Oficina Nacional de Normalización. 10 p
- Oficina Nacional de Normalización [ONN]. (1999d). Calidad del suelo. Determinación de pH. NC ISO 10390. La Habana: Oficina Nacional de Normalización. 10 p
- Pentón, G.; Schmid, H.P.; Milera, M.D.L.C.; Martín, G.J.; Brea, O. y Brunet, J. (2020). Empleo de fertilizantes orgánicos basados en biochar, producidos a partir de residuos agropecuarios. En: Manejo agroecológico de los sistemas agropecuarios. Usos del suelo con abonos y biochar. Compilador: Milagros de la C. Milera Rodríguez. Matanzas, Cuba: EEPF Indio Hatuey. 66 p. ISBN: 978-959-7138-41-9.
- Pentón, G.; Milera, M.D.L.C. y Schmidt, H.P. (2021). Manual para la elaboración de biochar y microorganismos eficientes IHPLUS® BF. *Estación Experimental Indio Hatuey, Matanzas, Cuba*. 26 p. ISBN: 978-959-7138-41-9.
- Pentón, G.; Velázquez, M.; Brea, O.; Milera, M.; Martín, G.J. (2022) El biochar para optimizar el reciclaje de biomasa y su transformación en abonos de alta calidad. Memorias de la Convención de Producción Animal y Agrodesarrollo "AGROPAT", Pp. 1832-1836. ISBN 978-959-7171-86-7
- Pentón, G.; Martín, G.J.; Milera, M.; Brunet, J.C.; Oropesa, Y.S.; Norda, E.B.; Pérez, M.; Brunet, J.C.; Hernández, L.A.; Velázquez, M.; Oropeza, K.; Prieto, M.; Urguelles, J.; Armengol, N. (2023a). Nuevos abonos órgano-minerales para la nutrición de las plantas y la restauración de los suelos. Anexo 2. Informe final de proyecto. *Estación Experimental Indio Hatuey, Matanzas, Cuba*. FONCI. 94 p
- Pentón, G.; Norda, E.B.; Pérez, M.; Urguelles, J. y Christen, P. (2023b) Retention capacity of organic and mineral substances in biochar filtered with H₂O, chemical fertilizer and IHPLUS®BF. Abstract n° 448276. 7th International Symposium on Environmental Biotechnology and Engineering. May 22-26, 2023 Marseille, France. <https://7isebe.sciencesconf.org/>
- Schmidt, H.P.; Kammann, C.; Hagemann, N.; Leifeld, J.; Bucheli, T.D.; Sánchez Monedero, M.A. y Cayuela, M.L. (2021) Biochar in agriculture—A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy*. 13(11): 1708-1730.
- Rienzo Di, J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, Mónica G.; González, Laura. A.; Tablada, M.; Robledo, C.W. (2008) InfoStat, versión 2008. Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.