

Fracciones de carbono orgánico y propiedades físicas: interacción en dos suelos contrastantes

Organic Carbon Fractions and Physical Properties: Interaction in Two Contrasting Soils

 George Martín Gutiérrez^{1*},  Pablo Domingo Pablos Reyes² y  Juan Alejandro Villazón Gómez³

¹Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Holguín. Mayarí, Holguín, Cuba.

²Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar Santiago de Cuba. Palma Soriano, Santiago de Cuba, Cuba.

E-mail: pablo.pablos@inicasc.azcuba.cu

³Universidad de Holguín. Holguín, Holguín, Cuba. E-mail: villazon@uho.edu.cu

*Autor para correspondencia: George Martín Gutiérrez, e-mail: geomartin1974@gmail.com

RESUMEN: Las propiedades físicas del suelo influyeron en la dinámica del carbono orgánico y sus fracciones en distintos contextos edáficos. Este estudio evaluó dicha influencia (textura, porosidad, humedad y densidad aparente) en dos suelos contrastantes (Ferrítico Rojo Oscuro y Vertisol Crómico) bajo diferentes usos (bosque, pasto natural y caña de azúcar) en Cuba. Se recolectaron muestras a 0-20 cm para determinar las propiedades físicas. Mediante fraccionamiento físico granulométrico, se determinó el carbono orgánico total, el carbono particulado grueso, el fino y el asociado a minerales con el método de Walkley-Black. Los análisis de correlación y regresión mostraron que la textura arcillosa controló la estabilización del carbono, modulada por la mineralogía: el contenido de arcilla se correlacionó positivamente con el carbono asociado a minerales y el carbono orgánico total, y negativamente con las fracciones lábiles. El carbono particulado grueso y el asociado a minerales mejoraron la porosidad total, mientras que el carbono particulado fino la redujo. La densidad aparente mostró un comportamiento contrastante: en el Ferrítico, la estructura granular estable amortiguó el efecto del carbono, mientras que en el Vertisol el carbono redujo significativamente la densidad aparente con fuerte influencia de la humedad. Se concluye que la interacción entre textura, mineralogía y uso del suelo determinó la dinámica del carbono, y que la fracción arcillosa actuó como principal agente de protección del carbono a largo plazo, lo que destacó la necesidad de prácticas de manejo que incrementen las fracciones estables y lábiles para mejorar la calidad física y el secuestro de carbono.

Palabras clave: uso del suelo, fraccionamiento físico del carbono, ferrítico rojo oscuro y vertisol crómico, manejo sostenible.

ABSTRACT: Soil physical properties influenced the dynamics of organic carbon and its fractions in different soil contexts. This study evaluated this influence (texture, porosity, moisture, and bulk density) in two contrasting soils (Dark Red Ferritic and Chromic Vertisol) under different land uses (forest, natural pasture, and sugarcane) in Cuba. Samples were collected at a depth of 0-20 cm to determine physical properties. Total organic carbon, coarse particulate carbon, fine particulate carbon, and mineral-bound organic carbon were determined using the Walkley-Black method. Correlation and regression analyses showed that clay texture controlled carbon stabilization, which was modulated by mineralogy: clay content was positively correlated with mineral-bound carbon and total organic carbon, and negatively correlated with labile fractions. Coarse particulate carbon and mineral-bound organic carbon increased total porosity, while fine particulate carbon decreased it. Bulk density showed contrasting behavior: in the Ferritic soil, the stable granular structure buffered the effect of carbon, while in the Vertisol, carbon significantly reduced bulk density, with a strong influence from moisture. It is concluded that the interaction between texture, mineralogy, and land use determined carbon dynamics, and that the clay fraction acted as the main agent protecting carbon in the long term. This highlights the need for management practices that increase both stable and labile fractions to improve soil physical quality and carbon sequestration.

Keywords: land use, physical carbon fractionation, dark red ferritic and chromic vertisol, sustainable management.

Recibido: 08/11/2025

Aceptado: 12/04/2026

Conflictos de interés: Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Contribución de los autores: **Conceptualización:** George Martín Gutiérrez. **Curación de datos:** George Martín Gutiérrez, Juan Alejandro Villazón Gómez. **Análisis formal; Metodología; Supervisión; Redacción-borrador original:** George Martín Gutiérrez, Pablo Pablos Reyes. **Investigación:** George Martín Gutiérrez, Pablo Pablos Reyes, Juan Alejandro Villazón Gómez. **Redacción-revisión y edición:** Pablo Pablos Reyes, Juan Alejandro Villazón Gómez.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



INTRODUCCIÓN

El carbono orgánico del suelo (COS) resulta fundamental para la calidad y fertilidad del suelo, así como para la mitigación del cambio climático, al actuar como sumidero de carbono (FAO, 2022). Su contenido y distribución varían significativamente con la profundidad y el uso del suelo, e influyen en la biomasa vegetal y en el desarrollo radicular (Muñoz, 2023; Pulleman et al., 2024). Además, se reconoce que el COS mejora la sostenibilidad de los ecosistemas, pues aumenta la fertilidad, la retención hídrica y la biodiversidad microbiana (Khangura et al., 2023). En suelos como los ferríticos y vertisoles, el almacenamiento de COS presenta variaciones influidas por la vegetación y las prácticas agrícolas. Se identifican al menos dos fracciones principales del COS: una lábil y otra resistente, cuya proporción puede alterarse con el manejo del suelo (Luo et al., 2020), ya que modifica la cobertura vegetal, cambia la cantidad y calidad de los residuos orgánicos disponibles (Vaieretti et al., 2021) y, en consecuencia, afecta la actividad microbiana y la tasa de mineralización (Pérez et al., 2022).

Aunque se conoce la importancia del COS y de sus fracciones, no se comprende por completo cómo factores específicos como la textura, la porosidad, humedad y la densidad aparente del suelo influyen en su almacenamiento y dinámica en diferentes contextos edáficos. La variabilidad y diversidad de suelos, usos, manejos agrícolas y condiciones climáticas hacen que el comportamiento del suelo sea complejo y difícil de generalizar (Romaniuk et al., 2021; Pérez et al., 2022). Ello resalta la necesidad de estudios específicos que analicen la interacción de estos factores a lo largo del tiempo, especialmente en suelos como los ferríticos y vertisoles, donde las limitaciones de humedad, nutrientes o drenaje pueden afectar la acumulación y estabilidad del COS.

Se requiere, por tanto, cuantificar y comprender el papel del COS en la regulación climática y en la sostenibilidad de los ecosistemas, particularmente en estos suelos, donde las prácticas agrícolas y las propiedades del suelo pueden alterar su capacidad de almacenamiento (Xiang et al., 2021; Khangura et al., 2023). Dada la complejidad y variabilidad de los factores que afectan al COS, se necesita investigación específica para evaluar cómo influyen en su contenido y en sus fracciones. El objetivo de este trabajo consiste en evaluar la influencia de algunas propiedades físicas, como la textura, la porosidad total, la humedad gravimétrica y la densidad aparente sobre el carbono orgánico del suelo y sus fracciones, con el fin de aportar conocimientos para un manejo sostenible que optimice su almacenamiento y contribuya a la mitigación climática.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en los puntos de observación permanente (POP), establecidos en 2010 en la localidad de Pinares de Mayarí y Guaro, municipio Mayarí, provincia Holguín. Se llevó a cabo un estudio observacional longitudinal analítico de la dinámica temporal del COS

en diferentes usos de suelo, en el que se evaluó la influencia de variables climáticas y edáficas en dicha dinámica. De esta forma, las diferencias observadas se atribuyeron al uso de suelo y a las propiedades intrínsecas del sitio, en lugar de a factores externos regionales.

POP de Pinares de Mayarí: el suelo se clasificó como Ferrítico Rojo Oscuro (Hernández et al., 2015) y se estudiaron tres usos: Bosque de Pino (*Pinus cubensis* Griseb.), Pasto Natural (*Paspalum notatum* L.) y Caña de Azúcar (*Saccharum spp.*).

POP de Guaro: el suelo se clasificó como Vertisol Crómico (Hernández et al., 2015) y se estudiaron tres usos: Bosque de Neem (*Azadirachta indica* A. Juss), Pasto Natural (*Paspalum notatum* L.) y Caña de Azúcar (*Saccharum spp.*). En 2002 ocurrió una transición de uso: áreas de caña de azúcar se convirtieron en bosque de neem mediante aforestación, mientras que otras se destinaron a pasto natural mediante restauración.

Para la selección de los sitios de muestreo, se empleó el uso de suelo como estrato con el propósito de garantizar un ambiente homogéneo. Con la finalidad de asegurar la representatividad del área de estudio, se estableció una subparcela permanente de muestreo de 5 m × 5 m (25 m²), seleccionada de manera aleatoria dentro de una parcela de 25 m × 25 m (625 m²) en cada tipo de uso de suelo. En el interior de dicha subparcela se dispuso una estación de muestreo constituida por un triángulo equilátero de tres metros de lado; en sus vértices se recolectaron muestras georreferenciadas con una barrena holandesa, a una profundidad de 0 a 20 cm, con tres repeticiones por punto, lo que permitió obtener un total de 27 muestras. El muestreo se efectuó durante el mes de junio de cada año en la misma subparcela.

Además, se tomaron muestras no disturbadas por el método del anillo según la NC ISO 11272 (ININ & ONN, 2003), para determinar densidad aparente (DA) y la humedad del suelo por el método gravimétrico (HG) según la NR AG- 710 (ININ & ONN, 1982). La porosidad total a partir de la densidad volumétrica y la densidad real, de acuerdo con la NC - 20 (ININ & ONN, 2010). La textura se determinó mediante el método del análisis mecánico con agitador y pirofosfato de sodio (van Reeuwijk, 2002).

El fraccionamiento físico granulométrico se realizó mediante tamizado en seco, de acuerdo con la metodología establecida Galantini y Suñer (2008). Para ello, se emplearon tamices de 53 µm y 105 µm, con lo que se obtuvieron tres fracciones diferenciadas:

Fracción fina (< 53 µm): correspondió al carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM).

Fracción media (53 - 105 µm): correspondió al carbono orgánico particulado fino (COPF).

Fracción gruesa (> 105 µm): correspondió al carbono orgánico particulado grueso (COPG).

El contenido de carbono orgánico se determinó mediante el método de Walkley-Black, de acuerdo con la norma NC 51 (ININ & ONN, 1999), y los resultados se expresaron en gramos por kilogramo (g kg⁻¹).

Para validar los datos se emplearon las herramientas matemáticas adecuadas a cada situación. La normalidad se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk. La relación entre dos variables se determinó a través de la correlación lineal simple de Pearson (r); se consideró moderada cuando $r \geq 0,50$ y $< 0,70$ y alta cuando $r \geq 0,70$. Se aplicó un análisis de regresión entre los valores de los factores estudiados, la calidad de las regresiones se analizó a partir del estadígrafo coeficiente de determinación, R^2 ajustado con el fin de penalizar términos redundantes y optimizar la selección de los modelos (Rojo, 2007; López, 2013). Los análisis se ejecutaron en Statistica v.8.0 y Microsoft Excel 2019, lo que garantizó consistencia y reproducibilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Textura

El análisis de los resultados evidenció diferencias notables en la composición granulométrica entre los dos tipos de suelos estudiados, así como variaciones importantes asociadas al uso del suelo dentro de cada clase taxonómica (Figura 1). Estas diferencias se consideraron relevantes desde el punto de vista edafológico y agroecológico, ya que la textura influye directamente en propiedades como la retención de humedad, la aireación, la dinámica de la materia orgánica, la fertilidad y la calidad biológica de estos suelos bajo manejo antrópico y natural.

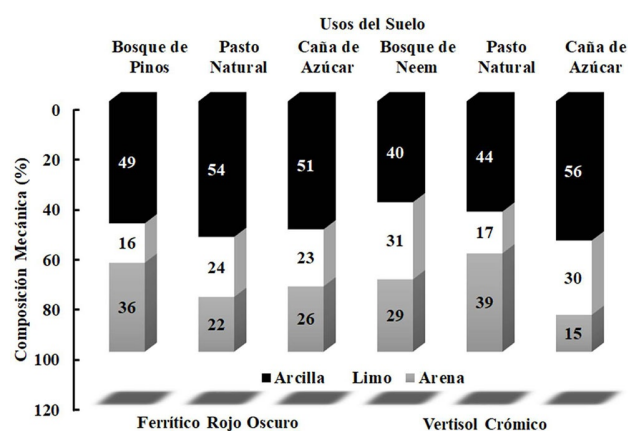


Figura 1. Variación de la composición mecánica en los diferentes usos de los suelos Ferrítico Rojo Oscuro y Vertisol Crómico a la profundidad de 0-20 cm.

Los resultados confirmaron las diferencias texturales intrínsecas de ambos suelos. El suelo ferrítico presentó, de manera general, un alto contenido de arcilla (promedio de $51.33 \% \pm 2.71$), con clasificación textural arcillosa, aunque con matices importantes según el uso. El bosque de pinos mostró el menor contenido de arcilla (48.72 %) y el mayor de arena (35.56 %), lo que sugirió una condición de menor evolución edáfica o un efecto de la cobertura forestal en la preservación de una estructura menos densa. En contraste, el pasto natural evidenció el mayor porcentaje de arcilla (54.14 %) y el menor de arena (21.91 %), lo que indicó una mayor expresión de las propiedades ferríticas y,

posiblemente, una mayor estabilidad estructural por efecto de la cobertura vegetal permanente. La caña de azúcar presentó valores intermedios (51.13 % de arcilla y 26.11 % de arena), lo que pudo interpretarse como un efecto del manejo agrícola sobre la distribución de partículas, aunque sin alterar drásticamente la textura arcillosa dominante.

En contraste, el vertisol evidenció una tendencia arcillosa aún más pronunciada (promedio de $46.63 \% \pm 7.97$), pero con una mineralogía dominada por arcillas expansivas (esmecticas). La alta proporción de arcilla en el vertisol bajo caña de azúcar implicó una elevada humedad aprovechable, pero también una limitada capacidad de aireación, con posibles afectaciones a la actividad microbiana y al desarrollo radicular. En contraste, el bosque de neem y el pasto natural presentaron condiciones texturales más equilibradas, que favorecieron una mejor relación entre retención de agua y aireación.

Los resultados evidenciaron que el uso del suelo modificó la distribución de las fracciones granulométricas, especialmente en el vertisol, donde el manejo agrícola intensivo (caña de azúcar) acentuó las características texturales extremas. En el suelo ferrítico, aunque las diferencias fueron menores, el reemplazo de la cobertura forestal por pastos o cultivos también influyó en la relación arcilla-arena, con posibles implicaciones en la fertilidad y el manejo del agua.

Las diferencias texturales observadas reflejan la naturaleza intrínseca de cada tipo de suelo. En el caso del suelo ferrítico, la literatura especializada (Hernández *et al.*, 2015, 2021) señala que, a pesar de su alta fracción arcillosa, estos suelos poseen una microagregación muy fuerte asociada a la presencia de sesquióxidos de hierro. Esta propiedad física resulta crucial, ya que modula el comportamiento biológico del suelo: la microagregación estable protege la materia orgánica de la descomposición microbiana rápida y favorece su acumulación. No obstante, la fracción arena, aunque variable, cumple un rol fundamental en la porosidad del suelo, pues crea macroporos que facilitan el drenaje rápido. Este drenaje rápido, sumado a la baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) típica de las arcillas de baja actividad (caolinita y óxidos de hierro), limita la retención de nutrientes y agua en la solución del suelo, lo que genera un ambiente estresante para las raíces y la microbiota, que depende de los ciclos rápidos de mineralización de la materia orgánica, como plantea Vindas (2023).

Por su parte, el vertisol presenta una mineralogía dominada por arcillas expansivas (esmecticas), lo que le confiere una dinámica biológica y física completamente diferente, tal como reflejan Hernández *et al.* (2015) y Kovda (2020). Esta composición le otorga una alta capacidad de retención de humedad, aunque propensa a la compactación, al encharcamiento y a la limitada aireación, condiciones que diversos autores señalan como restrictivas para el manejo agrícola (Cid *et al.*, 2016; Romaniuk *et al.*, 2021). Bajo el uso con caña de azúcar, estas características pueden afectar negativamente la actividad microbiana y el desarrollo radicular, además de aumentar el riesgo de procesos de desnitrificación y emisión de gases de efecto invernadero.

Asimismo, la presencia de arcillas expansivas incrementa el riesgo de formación de grietas y de salinización en condiciones de mal drenaje.

Los hallazgos de este estudio subrayan la necesidad de prácticas de manejo específicas para cada tipo de suelo y uso. En el suelo ferrítico, la conservación de la materia orgánica y la estructura resulta fundamental para mitigar los efectos del reemplazo de la cobertura forestal. En el vertisol, particularmente bajo manejo intensivo, se requiere un manejo que minimice la compactación y mejore la aireación, con el fin de preservar la actividad biológica y la fertilidad del suelo. En conjunto, los resultados confirman que, si bien la textura es una propiedad inherente al material parental y al grado de evolución edáfica, el uso del suelo actúa como un factor modulador que puede acentuar o atenuar sus implicaciones funcionales.

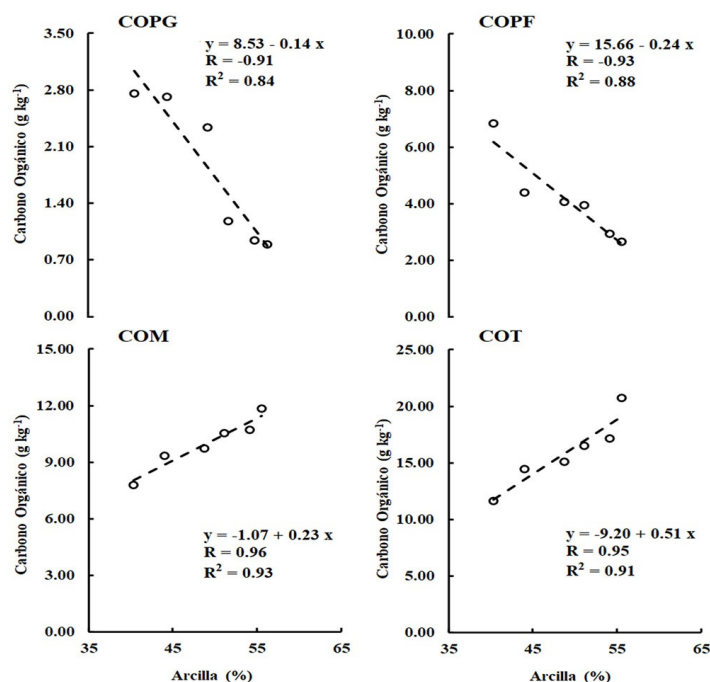
El análisis de la relación entre el contenido de arcilla, el COT y sus distintas fracciones en los suelos estudiados reveló patrones contrastantes que evidenciaron la complejidad de la estabilización de la materia orgánica en estos sistemas (Figura 2). De forma general, los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos para los modelos lineales fueron elevados (0,84 a 0,93), lo que indicó que la fracción arcillosa explicó una proporción sustancial de la varianza observada en las distintas fracciones de carbono. Sin embargo, la naturaleza de esta relación (positiva o negativa) y su magnitud variaron considerablemente entre fracciones, lo que sugirió que la textura no ejerció un control único sobre el destino del carbono orgánico, sino que actuó de forma diferenciada sobre las reservas de carbono según su mecanismo de protección y estabilidad.

El carbono orgánico particulado grueso (COPG) presentó una correlación negativa alta ($R = -0,91$, $R^2 = 0,84$) con el contenido de arcilla. Esta relación inversa sugirió que, en suelos con mayor fracción arcillosa, la disponibilidad de esta reserva de carbono rápidamente mineralizable se redujo. La pendiente negativa de la regresión indicó un efecto de estabilización temprana de estos compuestos en los sitios de mayor actividad mineral.

El carbono orgánico particulado fino (COPF) mostró una correlación negativa ($R = -0,93$, $R^2 = 0,88$), la más alta de todas las fracciones, lo que evidenció que esta fracción fue aún más sensible al incremento en el contenido de arcilla. La fuerte relación negativa sugirió que, en estos suelos, los procesos de agregación y la saturación de la fase mineral limitaron la acumulación de esta fracción, y favorecieron su rápida mineralización o su transferencia a fracciones más estables.

En contraste con las fracciones anteriores, el carbono orgánico asociado a minerales (COM) mostró una correlación positiva altamente significativa ($R = 0,96$, $R^2 = 0,93$). Este resultado confirmó el papel fundamental de la fracción arcilla como principal agente estabilizador del carbono en estos suelos: a medida que aumentó el contenido de arcilla, se incrementó proporcionalmente la cantidad de carbono estabilizado por asociación directa con la fase mineral. La interceptación negativa (-1,07) sugirió que, en contenidos de arcilla muy bajos, esta fracción fue prácticamente inexistente, lo que reforzó la dependencia directa de la fase mineral.

Por último, el COT presentó también una correlación positiva significativa con la arcilla ($R = 0,95$, $R^2 = 0,91$).



COT: Carbono orgánico total; COPG: Carbono orgánico particulado grueso;
COPF: Carbono orgánico particulado fino; COM: Carbono orgánico asociado a la fracción mineral.

Figura 2. Relación del contenido de carbono orgánico total y sus fracciones con los niveles de arcilla a la profundidad de 0-20 cm. Los círculos corresponden a los usos del suelo de ambos puntos de observación permanente del año 2015.

Este comportamiento indicó que el aumento del COT en suelos más arcillosos estuvo determinado principalmente por el incremento en la fracción COM. La alta pendiente (0,51) reflejó que el COT fue altamente dependiente de la capacidad de protección que ofreció la matriz arcillosa.

La textura influye en diversos procesos y características físicas, químicas y biológicas del suelo, por lo que se constituye en una propiedad esencial para su calidad. Favorece la formación de complejos órgano-minerales, los cuales limitan la accesibilidad de los microorganismos a los sustratos orgánicos, reducen su mineralización y aumentan las reservas de carbono orgánico a largo plazo.

Los resultados obtenidos para el COPG y el COPF son consistentes con la teoría de que los suelos de textura fina, si bien ofrecen protección física, pueden presentar una menor tasa de renovación de compuestos lábiles. Esto se debe, en el caso específico del suelo ferrítico, a la fijación de fosfatos y la estabilización de agregados, que limitan el ingreso de residuos frescos en formas no protegidas. La fuerte relación negativa del COPF sugiere que esta fracción es particularmente sensible a la saturación de la fase mineral, lo que favorece su rápida mineralización o su transferencia hacia fracciones más estables.

Por el contrario, la correlación positiva del COM confirma el papel de la fracción arcilla como sumidero funcionalmente relevante. Esta reserva representa el carbono que ha escapado a la descomposición microbiana debido a su estrecho vínculo con las arcillas. En el suelo ferrítico, la presencia de minerales de tipo 1:1 y óxidos de hierro promueve la formación de complejos órgano-minerales estables. En el vertisol, los minerales de tipo 2:1 (esmeclitas) ofrecen una alta superficie específica y capacidad de intercambio catiónico, lo que facilita la adsorción de la materia orgánica.

El comportamiento del COT refleja el balance neto de las dinámicas opuestas observadas en las fracciones lábiles y estables. El análisis permite evidenciar que, a pesar de las diferencias mineralógicas entre estos suelos (óxidos frente a esmeclitas), la capacidad de acumular carbono está determinada principalmente por la cantidad de arcilla disponible para formar asociaciones físicas y químicas que confieran recalcitrancia, especialmente en condiciones donde la actividad microbiana podría ser alta debido a un clima favorable.

Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas. Resultados similares sobre el papel de la fracción arcilla en la estabilización del carbono son reportados por Xia *et al.* (2020), Kleber *et al.* (2021) y Hemingway *et al.* (2019). Asimismo, estudios como los de Yost y Hartemink (2019) y Quiñones (2022) confirman que suelos con mayor proporción de arcilla y limo retienen más carbono orgánico del suelo, lo que se atribuye a la asociación del carbono con los minerales y a su oclusión en agregados.

Porosidad Total

Los análisis de regresión lineal mostraron asociaciones estadísticamente fuertes entre la porosidad total y cada

una de las fracciones de carbono. Los coeficientes de correlación oscilaron entre 0,86 y 0,92, mientras que los coeficientes de determinación explicaron entre el 73% y el 85% de la variabilidad observada (Figura 3). Estas elevadas correlaciones indicaron que la materia orgánica, en sus distintas fracciones, ejerció un control significativo sobre la estructura porosa de estos suelos, aunque la dirección y la magnitud del efecto variaron según la fracción. Esta divergencia reflejó que no todas las fracciones de carbono contribuyeron de igual manera a la estructura porosa del suelo.

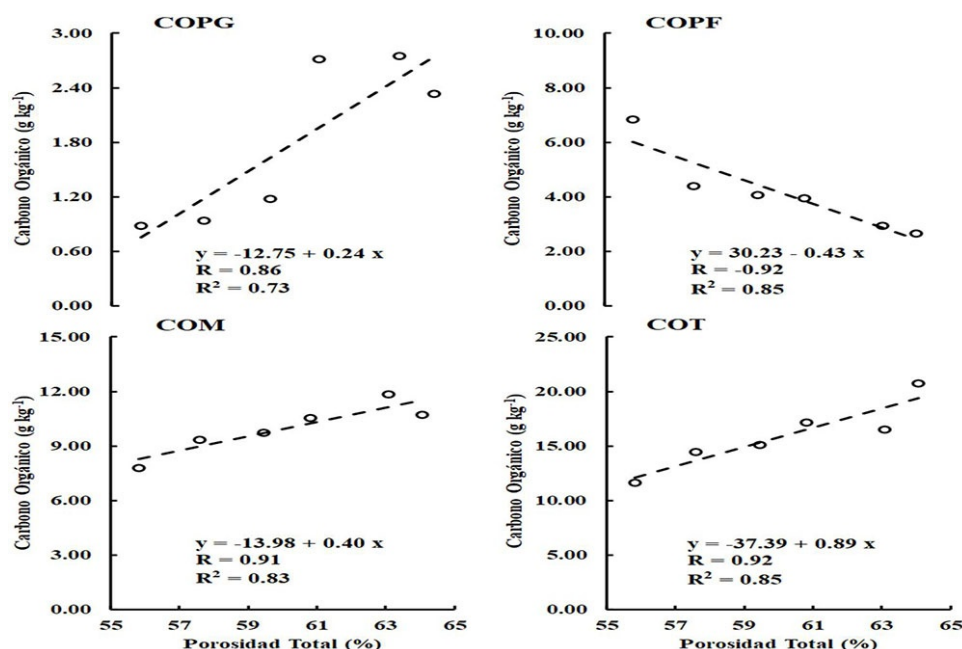
En el caso del COPG, se observó una correlación positiva y significativa ($R = 0,86$; $R^2 = 0,73$) con la porosidad total. Esta fracción, constituida por compuestos fácilmente degradables, favoreció la formación de agregados temporales y la macroporosidad. Por su parte, la fracción de COPF mostró una correlación negativa muy fuerte con la porosidad total ($R = -0,92$; $R^2 = 0,85$): a medida que aumentó el contenido de COPF, la porosidad total disminuyó. En contraste, el COM presentó una correlación positiva y significativa ($R = 0,91$; $R^2 = 0,83$) con la porosidad total. Finalmente, el COT mostró la correlación positiva más alta con la porosidad total ($R = 0,92$; $R^2 = 0,85$) y presentó la pendiente más pronunciada (0,89).

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el COPG actúa como sustrato energético para la microbiota del suelo, estimula la actividad biológica y la producción de agentes cementantes, y favorece la formación y estabilización de agregados, lo que a su vez propicia el desarrollo de poros de diferentes tamaños. Este hallazgo es consistente con estudios previos que destacan el papel del carbono lábil en la mejora de la estructura del suelo.

En contraste, la relación negativa entre el COPF y la porosidad total sugiere que esta fracción, constituida por partículas de materia orgánica de pequeño tamaño asociadas a limo o arcilla, se vincula predominantemente a microagregados. Si bien estos contribuyen a la estabilidad estructural, pueden ocupar espacios porosos y reducir el volumen de poros, o bien asociarse a una mayor densidad aparente. Este comportamiento se asemeja a lo observado en Vertisoles, donde el alto contenido de arcillas genera una matriz densa que limita la porosidad total, incluso en presencia de COPF. Esta relación negativa subraya la necesidad de no considerar la materia orgánica como un todo homogéneo, sino de evaluar sus fracciones por separado.

Por otro lado, la correlación positiva del COM con la porosidad total indica que esta fracción, fuertemente ligada a la fracción mineral (arcillas y limos), contribuye a la formación de microagregados estables mediante complejos órgano-minerales. Este proceso mejora la estabilidad estructural y genera una red de poros de distintos tamaños que favorece la circulación de aire y agua.

Dado que el COT integra todas las fracciones, su alta correlación con la porosidad total confirma que, en términos globales, un mayor contenido de materia orgánica se traduce en una mejor estructura porosa,



COT: Carbono orgánico total; COPG: Carbono orgánico particulado grueso; COPF: Carbono orgánico particulado fino; COM: Carbono orgánico asociado a la fracción mineral.

Figura 3. Relación del contenido de carbono orgánico total y sus fracciones con la porosidad total a la profundidad de 0-20 cm. Los círculos corresponden a los usos del suelo de ambos puntos de observación permanente del año 2015.

probablemente a través de mecanismos como la agregación, la reducción de la densidad aparente y el aumento de la estabilidad estructural. Sin embargo, la comparación entre fracciones revela que no todas contribuyen de igual manera: mientras el COPG y el COM potencian la porosidad, el COPF la disminuye. Este comportamiento diferencial pone de relieve la importancia de analizar la calidad de la materia orgánica más allá de su cantidad total.

Desde una perspectiva de manejo, las prácticas que incrementen el COT, y especialmente las fracciones COPG y COM, tenderán a mejorar la porosidad del suelo y, con ello, propiedades como la infiltración, el intercambio gaseoso y la resistencia a la compactación. En cambio, el COPF, aunque importante para otras funciones (CIC o el secuestro de carbono a largo plazo), no constituye un indicador directo de mejoras en la porosidad total. Se recomienda complementar estos análisis con estudios de distribución de tamaños de poros y estabilidad de agregados para una interpretación más precisa.

La porosidad total se encuentra bidireccionalmente vinculada al COT: los suelos porosos favorecen la acumulación de carbono, mientras que los suelos ricos en carbono desarrollan una mejor estructura. La textura del suelo es fundamental en la distribución de las partículas y del espacio poroso, y controla la formación de los agregados, en especial la arcilla (Wang et al., 2023). Asimismo, la porosidad está estrechamente vinculada a la capacidad de retención del carbono orgánico (Wang et al., 2023). Asimismo, la porosidad está estrechamente vinculada a la capacidad de retención del carbono orgánico del suelo, ya que mejora las interacciones órgano-minerales y el desarrollo de la estructura del suelo (Zhou et al., 2020).

En este contexto, para que un suelo presente una buena aireación y retención de agua, condiciones favorables para las plantas, la porosidad total debe situarse entre 40 % y 60 %, lo que facilita el enraizamiento y un mejor intercambio entre las raíces y el suelo (Spera et al., 2004). Una mayor cantidad de raíces, a su vez, implica una mayor actividad microbiana por la disponibilidad de nutrientes y materia orgánica (Zieher et al., 2013). Asimismo, la porosidad está estrechamente vinculada a la capacidad de retención del carbono orgánico).

Densidad Aparente

El análisis estadístico evidenció correlaciones lineales altamente significativas entre las variables COT, DA y HG, con coeficientes de correlación que oscilaron entre -0,97 y 0,90. Los modelos de regresión lineal ajustados mostraron, en general, altos coeficientes de determinación, con valores entre 0,79 y 0,93. Esto indicó que una proporción considerable de la variabilidad de la DA y la humedad pudo ser explicada por el contenido de carbono orgánico, aunque con diferencias notables entre ambos tipos de suelo, las cuales estuvieron gobernadas por la composición mineralógica y la dinámica de la materia orgánica.

La DA presentó un comportamiento diferenciado entre ambos suelos, tanto en sus valores absolutos como en su relación con otras variables. En el suelo ferrítico, los valores de DA fueron más elevados (promedio de $1,33 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y mostraron una variación reducida (Figura 4), mientras que en el Vertisol los valores fueron menores (promedio de $1,09 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y presentaron una mayor variabilidad relativa asociada al contenido de carbono.

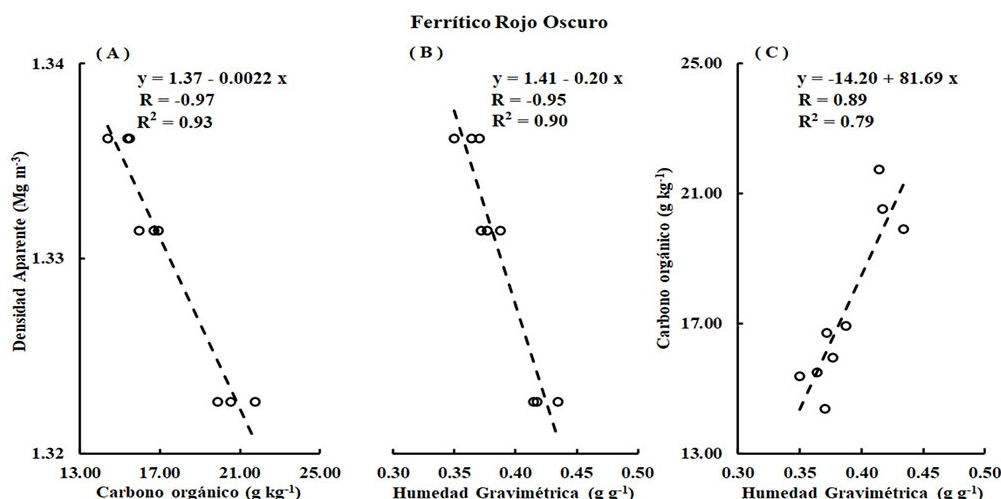


Figura 4. Relación entre los niveles de carbono orgánico total, la humedad gravimétrica y la densidad aparente en la profundidad de 0-20 cm, en el suelo Ferrítico Rojo Oscuro. Los círculos corresponden a los usos del suelo del punto de observación permanente del año 2015.

En ambos suelos, la DA estuvo fuertemente condicionada por el contenido de carbono orgánico y la HG. Estos factores permitieron explicar las diferencias observadas a partir del comportamiento en la morfología de los agregados, la naturaleza de los poros y la respuesta interna de cada suelo.

En el ferrítico, la baja pendiente de la relación COT vs. DA sugirió que la materia orgánica tuvo una capacidad limitada para contrarrestar la alta densidad, la cual estuvo más influenciada por la estructura típicamente granular y estable, derivada de la agregación por óxidos de hierro y caolinita. Este suelo, más evolucionado y con mineralogía dominada por óxidos, presentó un sistema de poros que, aunque estable, alcanzó un límite de densidad basal más alto. La correlación DA vs. HG, aunque menos sensible, evidenció que la humedad disminuyó al aumentar la DA, lo que confirmó el rol de la porosidad como nexo común entre ambas variables.

En cambio, en el Vertisol (**Figura 5**), la elevada pendiente de la relación COT vs. DA evidenció que este suelo fue más sensible a la acumulación de materia orgánica como factor reductor de la densidad, asociado a la estructura: cuando el contenido de carbono orgánico fue alto, la DA disminuyó. La presencia de arcillas expansivas generó un sistema de poros más dinámico, con una alta macroporosidad estructural en condiciones húmedas. La alta pendiente en la correlación entre DA y carbono orgánico ($y = 1,43 - 0,021x$) sugirió que la materia orgánica resultó esencial para estabilizar la porosidad inducida por los procesos de contracción-expansión, al estabilizar la estructura y evitar que el suelo alcanzara estados de densidad extremadamente altos durante los periodos secos. La fuerte pendiente de la relación DA vs. HG reflejó, además, que en este suelo la humedad fue un factor determinante de la compactación, probablemente debido a los procesos de contracción-expansión propios de las arcillas 2:1 (montmorillonita).

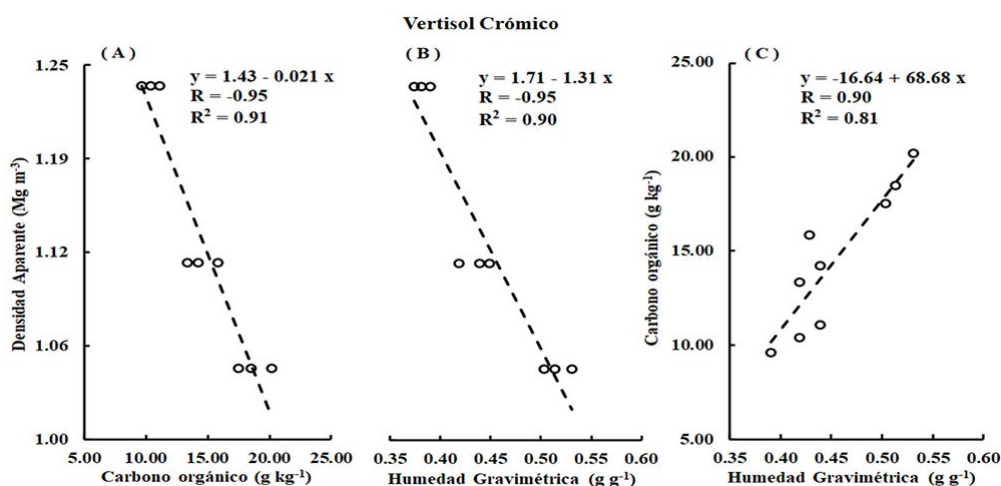


Figura 5. Relación entre los niveles de carbono orgánico total, la humedad gravimétrica y la densidad aparente en la profundidad de 0-20 cm, en el suelo Vertisol Crómico. Los círculos corresponden a los usos del suelo del punto de observación permanente del año 2015.

En conjunto, los resultados demuestran que el comportamiento de la DA no solo depende del efecto modulador del carbono orgánico y la retención de humedad, sino también de la interacción específica de estos factores con la mineralogía y la organización estructural de cada tipo de suelo. En el ferrítico, la mayor estabilidad estructural conferida por los óxidos de hierro amortigua la respuesta de la DA ante cambios en el COT y la HG. En cambio, en el Vertisol, la naturaleza expansiva y la alta actividad de la fracción arcilla confieren una estrecha relación entre la materia orgánica, la porosidad y la DA, con implicaciones directas sobre la calidad física y la funcionalidad hidrológica de estos suelos en los primeros 20 cm de profundidad. Estas diferencias tienen importantes implicaciones para el manejo agronómico y la conservación de los suelos, ya que la capacidad de mejorar la calidad física mediante el incremento de la materia orgánica varía sustancialmente entre ambos órdenes edáficos.

Los resultados coinciden con lo señalado por Gómez et al. (2021), quienes encuentran que la densidad del suelo se relaciona inversamente con el contenido de humedad y la materia orgánica, y que al aumentar la DA disminuyen el espacio poroso total y la macroporosidad. Esta condición favorece el deterioro de la estructura del suelo, lo que a su vez limita el desarrollo radicular (Campos et al., 2021) y la capacidad de las plantas para absorber agua y nutrientes (Urinovsky et al., 2021). Asimismo, Quintero et al. (2022) observan en bosques de la Sierra de Manantlán que una menor DA y mayor humedad se asocian con un mayor contenido de carbono en la biomasa radicular.

La relación entre DA y carbono orgánico también ha sido documentada por Gómez et al. (2021) en suelos Luvic Feozems, donde la biomasa de raíces se correlaciona estrechamente con la DA y esta con el carbono orgánico. Ferrero et al. (2018), en Córdoba (Argentina), reportan que la DA disminuye $0,19 \text{ g cm}^{-3}$ por cada aumento de $16,21 \text{ g kg}^{-1}$ de carbono orgánico, lo que resalta la sensibilidad de este parámetro a cambios en el uso del suelo. Duval (2015) señala que, en suelos de texturas medias y finas con bajo carbono orgánico total ($< 26 \text{ g kg}^{-1}$), valores críticos de DA pueden incrementarse por un manejo inadecuado, y que la adsorción de compuestos humificados modifica la porosidad intra-agregados, afectando la compactación y la retención hídrica.

Finalmente, Murillo et al. (2020) destacan que altos niveles de carbono orgánico favorecen la agregación del suelo, reducen la erosión y mejoran la infiltración, lo que contribuye a mitigar la compactación y a optimizar la disponibilidad de nutrientes. En conjunto, estos estudios respaldan la importancia del carbono orgánico como regulador de la densidad aparente y la estructura del suelo, y subrayan la necesidad de prácticas de manejo que mantengan o incrementen los contenidos de materia orgánica para preservar la calidad física del suelo.

CONCLUSIONES

- La calidad física y la dinámica del carbono estuvieron determinadas por la interacción entre la textura, la mineralogía y el uso del suelo. La fracción arcillosa actuó como el principal agente de protección del carbono a largo plazo, aunque su efecto sobre la porosidad y la densidad dependió del tipo de arcilla y del manejo, lo que subrayó la necesidad de evaluar tanto la cantidad como la calidad de la materia orgánica.
- La textura actuó como principal control sobre la estabilización del carbono orgánico, aunque modulada por la mineralogía. El uso del suelo modificó la distribución granulométrica, especialmente bajo manejo intensivo.
- La materia orgánica influyó sobre la porosidad total de manera diferencial según la fracción considerada, lo que evidenció una vinculación con la calidad de la materia orgánica más que con su cantidad total.
- La densidad aparente respondió de forma contrastante entre los suelos. En el ferrítico, la estructura granular estable por óxidos de hierro amortiguó el efecto del carbono orgánico; en el vertisol, el carbono orgánico redujo significativamente la densidad aparente, con una fuerte influencia de la humedad gravimétrica asociada a la mineralogía.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda priorizar prácticas que incrementen el carbono asociado a minerales y el carbono lábil para mejorar la porosidad y reducir la densidad aparente.
- En vertisoles, se aconseja evitar el uso intensivo sin manejo adecuado de la cobertura vegetal y la humedad; en los ferríticos, se sugiere conservar la cobertura permanente para preservar la microagregación.
- Se propone incorporar análisis de distribución de poros y estabilidad de agregados en futuros estudios, así como considerar estos criterios en estrategias de conservación y secuestro de carbono.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Campos, A., Cruz, L., & Rocha, S. (2021). Fine root density across soil profiles in tropical mountain cloud forest and adjacent managed fields in Veracruz (Mexico): Influence of soil properties. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(3), 91, doi: <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3647>.
- Cid Lazo, G.; Herrera Puebla, J.; López Seija, T.; & González Robaina, F. (2016). Resultados de algunas investigaciones en suelos Vérticos de Cuba. *Ingeniería Agrícola*, 6 (2): 51 -56.

- Duval, M. E. (2015). *Contenido, calidad y dinámica de las fracciones orgánicas como indicadores de calidad de los suelos bajo diferentes manejos en siembra directa* [Tesis en opción al grado de Doctor en Agronomía, Universidad Nacional del Sur]. 177 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2022). Día mundial del suelo 2022: la FAO publica el primer informe mundial sobre suelos negros. *News and Press Release*.
- Ferrero, M.R., Basanta, M., & Alvarez, C. (2018). Stock de carbono y nitrógeno en un haplustol éntico bajo diferentes usos del suelo en Córdoba. *XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Instituto Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad Nacional de Villa María, San Miguel de Tucumán, Córdoba. Argentina. ISBN 978-987-46870-0-5.
- Galantini, J.A., & Suñer, L. (2008). Las Fracciones Orgánicas del Suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia (online)*, 25(1), 41-55. ISSN 1668-298X
- Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Campo, J., Paustian, K., & Asencio, C. (2021). Carbono orgánico del suelo y su relación con la biomasa radical de *Quercus* sp. *Madera y Bosques*, 27(4), e2742445, doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742445>
- Hemingway, J.D., Rothman, D.H., Grant, K.E., Rosengard, S.Z., Eglinton, T.I., Derry, L.A., & Galy, V. V. (2019) Mineral protection regulates long-term global preservation of natural organic carbon. *Nature*, 570, 228-231.
- Hernández Jiménez, A. (2021). Área que ocupan los agrupamientos y tipos genéticos de los suelos en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 2021, vol. 42, no. 3, e13. julio-septiembre. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. La Habana, Cuba. pp. 45-53 ISSN: 0258-5936
- Hernández, A., Pérez, J.M., Bosch, D., & Castro, N. (2015). *Clasificación de los suelos de Cuba*. Ed. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. 91 pp. ISBN 978-959-7023-77-7.
- ININ & ONN (1982). *Pronóstico del momento del Riego. Método Gravimétrico*. NR AG- 710. Oficina Nacional de Normalización, Instituto de Investigaciones en Normalización. La Habana. Cuba.
- ININ & ONN (2003). *Calidad del suelo. Análisis físico. Determinación de la densidad aparente o peso volumétrico base suelo seco*. NC 11272. Oficina Nacional de Normalización, Instituto de Investigaciones en Normalización. La Habana. Cuba.
- ININ & ONN. (1999). *Calidad del suelo. Análisis químico. Determinación del porcentaje de materia orgánica*. NC 51. Oficina Nacional de Normalización, Instituto de Investigaciones en Normalización. La Habana. Cuba.
- ININ & ONN. (2010). *Calidad del suelo. Análisis físico. Determinación de la porosidad*. NC 20. Oficina Nacional de Normalización, Instituto de Investigaciones en Normalización. La Habana. Cuba.
- Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., & Bowyer, J. (2023). Regenerative Agriculture-A Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health. *Sustainability*, 15(3), 2338, doi: <https://doi.org/10.3390/su15032338>
- Kleber, M., Bourg, I.C., Coward, E.K., Hansel, C.M., Myneni, S.C.B., & Nunan, N. (2021) Dynamic interactions at the mineral-organic matter interface. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2, 402-421 pp.
- Kovda, I. (2020). Vertisols: Extreme features and extreme environment. *Geoderma Regional*, 22, 2-3, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00312>
- López, P. G. (2013). *Análisis de Regresión para la Estimación del Secuestro de Carbono Orgánico en Suelos*. [Tesis para obtener el título de: Lic. en Matemáticas Aplicadas. Universidad Autónoma de Puebla]. 64 pp.
- Luo, Z., R. A. Viscarra Rossel, & Z. Shi. (2020). Distinct controls over the temporal dynamics of soil carbon fractions after land use change. *Global Change Biology* 26(8):4614-4625. Doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.15157>.
- Muñoz Iglesias, B. R. (2023). Efecto de la agricultura regenerativa para disminuir las emisiones de carbono en el ambiente [Universidad Técnica de Babahoyo]. <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/14766/E-UTB-FACIAGR0N-000065.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Murillo Montoya, S., Mendoza Mora, A., & Fadul Vásquez, C. (2020). La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. En: *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales* 7.1, 58-68.
- Pérez Harguindeguy, N. P., Cingolani, A. M., Enrico, L., Vaieretti, M. V., & Giorgis, M. A. (2022). How human-induced transitions from forest to treeless ecosystems affect litter decomposition. *Ecología Austral* 32(2bis):716-733, doi: <https://doi.org/10.25260/EA.22.32.2.1.1887>.
- Pulleman, M. M., Rahn, E., & Valle, J. F. (2024). *Agricultura regenerativa para sistemas cafeteros resilientes y con bajas emisiones de carbono: Una guía práctica. Versión 1.0*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). <https://hdl.handle.net/10568/141572>
- Quintero Gradilla, S. D., Muñoz, A., & Castillo Parra, V. M. (2022). Estimación de carbono en las raíces en bosques de la Sierra de Manantlán, México. *Madera y Bosques* vol. 28, núm. 2, e2822431 Verano 2022, doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822431>
- Quiñones Sánchez, E. (2022). *Contenido de carbono orgánico del suelo en ecosistemas forestales y sistemas agroforestales*. Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de maestra en ciencias Montecillo, Texcoco, Estado De México, México. pp 71.
- Rojo, A. J. M. (2007). *Regresión lineal múltiple*. Instituto de Economía y Geografía. Madrid. 31 p.

- Romaniuk, R. I., Venece, M., Cosentino, V. R. N., Alvarez, C. R., Ciarlo, E. A., Korsakov, H. R., Steinbach, H. S., & Lupi, A. M. (2021). Dinámica del carbono lábil del suelo en sistemas forestales Dinámica del carbono lábil suelo en sistemas forestales de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden en la Mesopotamia Argentina. *SciELO*, 42(3), 343- 351, doi: <https://doi.org/10.4067/S0717-92002021000300343>
- Spera, S. T., Santos H. P., Fontaneli, R. S., & Tømm, G. O. (2004). Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 533-542.
- Urinovsky Irigoyen, K., D. Toledo, S. Arzuaga, M. Acosta, & S. Contreras Leiva. (2021). Indicadores de calidad física en suelos del Chaco semiárido bajo distintos sistemas. *Agrotecnia* 31: 5-13.
- Vaieretti, M. V., Giorgis, M. A., Cingolani, A. M., Enrico, L., & Tecco, P. A. (2021). Variación de los caracteres foliares en comunidades vegetales del centro de la Argentina bajo diferentes condiciones climáticas y de uso del suelo. *Ecología Austral* 31(2):372-389, doi: <https://doi.org/10.25260/EA.21.31.2.0.1237>.
- van Reeuwijk, L. P. (2002). *Technical Paper 09: Procedures for Soil Analysis* [Internet]. 6th Edition. Wageningen, The Netherlands: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC); 101 p. Available from: <https://www.isric.online/documents/document-type/technical-paper-09-proceduressoil-analysis-6th-edition>
- Vindas Quesada, E. J. (2023). *Caracterización, clasificación y mapeo de los suelos altamente meteorizados derivados de abanicos aluviales antiguos en Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica*. Tesis para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos. Universidad de Costa Rica. 303 p.
- Wang, P., Su, X., Zhou, Z., Wang, N., Liu, J., & Zhu, B. (2023). Differential effects of soil texture and root traits on the spatial variability of soil infiltrability under natural revegetation in the Loess Plateau of China. *Catena*, 220, 2-8, doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106693>.
- Xia, Q., Ruffy, T., & Shi, W. (2020). Soil microbial diversity and composition: Links to soil texture and associated properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 149, doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107953>
- Xiang Y., Liu Y., Yue X., Yao B., Zhang L., He J., Luo Y., Xu X., & Zong J. (2021). Factors controlling soil organic carbon and total nitrogen stocks following afforestation with *Robinia pseudoacacia* on cropland across China. *Forest Ecology and Management* 494, 119274.
- Yost, J. L., & Hartemink, A. E. (2019). Soil organic carbon in sandy soils: A review. *Advances in Agronomy*, 158, 217-310, doi: <https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2019.07.004>
- Zhou, M., Liu, C., Wang, J., Meng, Q., Yuan, Y., Ma, X., Liu, X., Zhu, Y., Ding, G., Zhang, J., Zeng, X., & Du, W. (2020). Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. *Scientific Reports*, 10(1), 265.
- Zieher López, X., Vivanco, L., & Yahdjian, L. (2013). La invasión de especies exóticas acelera la respiración del suelo en pastizales sucesionales de la Pampa interior. *Congresos y Reuniones científicas. CONICET*.