

# Matriz integral de buenas prácticas para la cuantificación del carbono orgánico en suelos forestales en el marco de REDD+

**Comprehensive best-practice matrix for the quantification of organic soil in forest soils under the REDD+ framework**

Víctor Meza-Picado<sup>1</sup>  • Cristina Chinchilla-Soto<sup>2</sup> 

Recibido: 8/4/2025

Aceptado: 1/7/2025

## Abstract

The accurate quantification of soil organic carbon (SOC) is critical for the issuance of soil-based carbon credits within the REDD+ framework. Nonetheless, methodological heterogeneity and systematic errors in the estimation of key parameters such as bulk density and coarse fragment content introduce significant uncertainties that undermine the robustness of SOC stock assessments. This study proposes an integrative evaluation matrix grounded in methodological rigor, statistical robustness, and soil management considerations to enhance the precision and reliability of SOC quantification for carbon credit accounting under REDD+ mechanisms. The framework integrates advanced correction protocols for bulk density estimation, refined procedures for quantifying coarse fragment volume, and optimization of experimental design through statistical replication and power analysis to reduce uncertainty and improve reproducibility. The application of this matrix supports the standardization of methodological quality across studies and projects, enabling more defensible SOC estimates and reinforcing their credibility in carbon markets and climate change mitigation strategies.

**Keywords:** soil organic carbon, bulk density, carbon credits, methodological framework, uncertainty reduction.

1. Instituto de Investigación y Servicios Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, [victor.meza.picado@una.ac.cr](mailto:victor.meza.picado@una.ac.cr)
2. Centro de Investigación en Contaminación Ambiental, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica, [cristina.chinchilla@ucr.ac.cr](mailto:cristina.chinchilla@ucr.ac.cr)

## Resumen

La cuantificación precisa del carbono orgánico del suelo (COS) es fundamental para la generación de créditos de carbono en suelos forestales bajo el marco de REDD+. Sin embargo, la variabilidad metodológica y los errores en la estimación de parámetros como la densidad aparente y la fracción gruesa pueden comprometer la fiabilidad de los resultados. Este estudio presenta una matriz integral de evaluación basada en criterios metodológicos, estadísticos y de manejo del suelo para garantizar la precisión en la determinación del COS para la generación de créditos de carbono en el marco de REDD+. La matriz incorpora enfoques avanzados de corrección de densidad aparente, medición de fracción rocosa y optimización del diseño experimental mediante replicación estadística y análisis de potencia. Su aplicación permite estandarizar la calidad de estudios y proyectos, promoviendo una cuantificación más robusta del COS y asegurando su validez en mercados de carbono y estrategias de mitigación climática.

**Palabras clave:** carbono orgánico del suelo, densidad aparente, créditos de carbono, evaluación metodológica, reducción de incertidumbre.

## Introducción

El carbono orgánico del suelo (COS) es un componente esencial en los esfuerzos globales para mitigar el cambio climático, desempeñando un papel central en estrategias como REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los Bosques) y en los mercados emergentes de carbono. Es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido [1]. Tradicionalmente, la investigación se ha enfocado en la biomasa aérea como principal reservorio de carbono; sin embargo, el COS constituye aproximadamente el 60 % del carbono terrestre, consolidándose como un sumidero estratégico y de largo plazo para la estabilización del clima global [2], [3]. Con cerca de 1,500 gigatoneladas (Gt) de carbono almacenadas hasta un metro (m) de profundidad, los suelos representan uno de los mayores reservorios de carbono del planeta [4]. Por tanto, un manejo sostenible de estos no solo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero [5], sino que también mejora servicios ecosistémicos fundamentales como la fertilidad del suelo y la resiliencia frente al cambio climático.

En el contexto de los mercados de carbono, los créditos derivados del secuestro de carbono en suelos agrícolas han ganado relevancia como un mecanismo para incentivar prácticas agrícolas sostenibles y la reducción de emisiones. Estos créditos son transados

en mercados voluntarios autorregulados, cada uno con protocolos o estándares distintos para evaluar cambios en las reservas de COS y convertirlos en créditos de carbono. Sin embargo, existen discrepancias significativas entre los protocolos en términos de principios contables y metodologías para calcular los cambios en el COS. Estudios recientes han evidenciado que algunas metodologías se basan en valores regionales en lugar de análisis *in situ*, lo que puede resultar en una sobreestimación de las reservas de carbono en hasta 2,5 veces [6]. En cambio, los costos y retornos asociados a los créditos de carbono varían según los estándares de evaluación, siendo más altos en esquemas como el Emissions Reduction Fund de Australia debido a requisitos de evaluación más rigurosos [7].

En paralelo, la investigación en COS no solo se enfoca en su potencial para mitigar el cambio climático, sino también en otros aspectos cruciales como la productividad del suelo y los riesgos ambientales asociados a un exceso de nutrientes, especialmente nitrógeno. En Alemania, por ejemplo, se han desarrollado metodologías basadas en experimentos de largo plazo para vincular la gestión del suelo con los balances de materia orgánica, permitiendo decisiones más informadas sobre la acumulación de carbono [8].

Así bien, las prácticas de manejo tienen efectos directos y acumulativos sobre las reservas de COS. En suelos agrícolas de Mollisoles en Wisconsin, se observaron pérdidas de carbono en sistemas de cultivos basados en granos y alfalfa, mientras que los sistemas de pastoreo y praderas restauradas conservaron los niveles de carbono [9]. En sistemas forestales, prácticas como el acolchado y la trituración favorecen la diversidad funcional microbiana, esencial para la salud del suelo [10]. Asimismo, la diversificación agrícola, como la rotación de pastizales en sistemas ganaderos, puede incrementar el secuestro de carbono al mejorar la dinámica del carbono en el suelo [11].

En el caso de Costa Rica que es reconocido por sus esfuerzos pioneros en conservación ambiental, el diseño de herramientas como la Matriz para la Evaluación de Estudios de Cuantificación de COS responde a la necesidad de evaluar rigurosamente las metodologías empleadas en este campo. Inspirada en enfoques de análisis de riesgos y respaldada por principios de transparencia y rigor científico [12], [13], esta matriz busca estandarizar la evaluación del COS, integrando parámetros clave como la densidad aparente, la fracción de fragmentos rocosos y las prácticas de manejo. Así, se pretende no solo mejorar la confiabilidad de las estimaciones, sino también apoyar políticas públicas basadas en datos locales que

promuevan prácticas sostenibles en suelos agrícolas y forestales.

Por tanto, este estudio tiene como objetivo analizar las metodologías existentes para cuantificar cambios en el COS, integrando análisis bibliométricos, estudios de caso y herramientas de evaluación. El propósito final es documentar estrategias metodológicas que aclaren los requisitos mínimos para determinar contenido de carbono en suelos tropicales, contribuyendo al desarrollo sostenible y a los compromisos globales de mitigación del cambio climático.

## Materiales y métodos

### Construcción de la matriz de evaluación de estudios de cuantificación de COS

La metodología para desarrollar la matriz de evaluación se fundamentó en un enfoque basado en la revisión de literatura científica, análisis de estándares internacionales y adaptación a las condiciones específicas de los suelos en Costa Rica. Este proceso incluyó las siguientes etapas:

#### a) Identificación de factores clave

A partir de la revisión bibliográfica, se identificaron los principales factores que afectan la cuantificación precisa del COS. Estos factores incluyen:

1. Inclusión de agregados gruesos (>2 mm): La relevancia de considerar esta fracción en suelos forestales y rocosos.
2. Metodología de muestreo en suelos rocosos: Aplicación de minicalicatas para garantizar representatividad.
3. Densidad aparente en suelos compactados: Exclusión de capas superficiales afectadas por compactación.
4. Fricción del cilindro de muestreo: La relación óptima entre diámetro y altura para minimizar errores.
5. Métodos analíticos validados: Uso de técnicas estandarizadas como combustión seca de DUMAS.
6. Representatividad de muestras: Importancia de incluir diferentes usos y tipos de suelo en estudios.
7. Control de calidad y replicabilidad: Verificación de datos y robustez estadística.

#### b) Desarrollo de criterios y ponderación

Los factores clave se tradujeron en criterios específicos para evaluar estudios de cuantificación de COS. Cada criterio fue ponderado en función de:

1. Impacto en la precisión de la cuantificación del COS: Factores con mayor impacto en la estimación precisa (ej. inclusión de agregados gruesos) recibirán mayor ponderación.
2. Frecuencia de reporte en la literatura: Factores ampliamente discutidos y documentados tendrán mayor peso.
3. Viabilidad técnica: Se consideró la factibilidad de implementar los criterios en contextos prácticos de investigación.

La ponderación total se distribuyó en un máximo de 16 puntos, asignando un peso proporcional a cada criterio.

#### c) Diseño de escalas de evaluación

Para cada criterio, se desarrollaron escalas de evaluación cualitativa que permitieran clasificar los estudios en términos de cumplimiento:

1. No cumple (0): El criterio no es considerado o está completamente ausente.
2. Cumplimiento parcial (1): El criterio está parcialmente implementado o presenta vacíos metodológicos significativos.
3. Cumplimiento total (2): El criterio está completamente integrado en el diseño del estudio, siguiendo las recomendaciones científicas.

## Resultados

### Parámetros que influyen en la determinación del COS

La cuantificación precisa del COS está profundamente influenciada por la metodología de muestreo, especialmente en suelos con altos contenidos de fragmentos rocosos. Los métodos de muestreo más comunes, como los cilindros y los muestreadores de núcleo, presentan desafíos técnicos que pueden introducir sesgos en las estimaciones. Por ejemplo, el uso de cilindros puede alterar el perfil del suelo durante su instalación y, en suelos pedregosos, omitir la fracción de rocas (>2 mm) puede llevar a sobreestimaciones significativas del COS [14]. Para minimizar estos errores, es crucial ajustar las técnicas de muestreo a las características físicas del suelo, ya que factores como la pedregosidad y la presencia de raíces vivas pueden introducir variabilidad en las estimaciones.

La determinación del COS depende de la medición precisa de tres parámetros fundamentales: el contenido de carbono orgánico, la densidad aparente del suelo y la fracción de fragmentos rocosos. La densidad aparente, en particular, es determinante porque establece la

masa de suelo por unidad de volumen y, por ende, afecta directamente las reservas de carbono. En suelos agrícolas, la variabilidad de la densidad aparente debido a prácticas de manejo como la labranza puede alterar las estimaciones de COS [3]. Estudios recientes, como los de [15], evidencian que el uso de valores promedio de densidad aparente puede comprometer la precisión de las estimaciones, recomendándose mediciones específicas para cada sitio, particularmente en iniciativas relacionadas con créditos de carbono.

#### *Métodos de corrección de densidad aparente y fracción rocosa*

La densidad aparente es una propiedad clave que influye en procesos como la infiltración de agua, la aireación, el crecimiento radicular y la acumulación de carbono. Es esencial para convertir las mediciones de carbono orgánico de masa a volumen o área, proporcionando la base para calcular las reservas de COS y los cambios en el tiempo [16]. Sin embargo, la precisión en su medición depende del método utilizado.

El método del cilindro es común en suelos tropicales, pero es necesario garantizar que el suelo no esté excesivamente húmedo o seco durante el muestreo para evitar compactaciones o alteraciones en su estructura [17]. Cilindros grandes ( $\geq 10$  cm de diámetro) diseñados para otros fines, como el muestreo de raíces o nutrientes, pueden introducir errores significativos y son menos precisos que cilindros más pequeños [18]. Para minimizar estos impactos, se recomienda utilizar cilindros más pequeños, que reduzcan el disturbio durante el muestreo, especialmente en suelos arcillosos o con raíces.

La fracción de fragmentos rocosos ( $>2$  mm) también tiene un impacto considerable en la precisión de las estimaciones, particularmente en suelos forestales [19]. Metodologías, que incorporan esta fracción en el cálculo del volumen y masa fina del suelo, han demostrado ser más confiables. Además, el método de masa equivalente de suelo (Equivalent Soil Mass, ESM) corrige variaciones temporales en la densidad aparente, facilitando comparaciones entre diferentes períodos o sistemas de manejo [20], [3].

#### *Determinación de la fracción gruesa del suelo*

Las estimaciones de COS deben basarse en el suelo fino ( $<2$  mm), ya que los fragmentos gruesos ( $>2$  mm), dependiendo del material parental, generalmente carecen de carbono orgánico [21]. Las raíces vivas ( $>2$  mm) se consideran parte de la biomasa vegetal y no deben incluirse en la fracción de suelo. El término "biomasa" corresponde a una definición común de la biomasa por encima del suelo y de la biomasa por

debajo del suelo [22]. En el caso de la biomasa por debajo del suelo, se considera toda la biomasa viva de las raíces vivas. Según [22] las raíces pequeñas de menos de 2 mm de diámetro están excluidas porque éstas a menudo no pueden distinguirse, de manera empírica, de la materia orgánica del suelo u hojarasca.

Aunque la fracción gruesa puede estimarse durante el muestreo de densidad aparente, los métodos tradicionales con cilindros no son adecuados para suelos muy pedregosos [23]. En estos casos, se propone un muestreo complementario mediante mini calicatas de 30 x 30 cm, donde se extrae todo el material para evaluar la proporción de fragmentos gruesos en dos profundidades (0-15 cm y 15-30 cm) y se pasa por un tamiz de 2 mm. El volumen del material que queda en el tamiz se estima por desplazamiento en agua [24]. Este enfoque permite ajustar las estimaciones de COS considerando el volumen efectivo del suelo disponible y evita errores derivados del uso de datos basados únicamente en peso [25].

#### **Relación de los parámetros con la matriz de evaluación de estudios de COS**

Se presenta la matriz sugerida para analizar los estudios de cuantificación de COS respaldando cada criterio con referencias bibliográficas.

##### *1. Inclusión de agregados gruesos ( $>2$ mm)*

**Descripción:** Los estudios deben incluir la fracción gruesa ( $>2$  mm) en suelos forestales o pedregosos ( $>30$  % de fragmentos), ajustando el volumen del suelo fino para evitar sobreestimaciones del COS.

##### *Evaluación:*

- **Criterio:** La omisión de fragmentos gruesos puede generar errores de hasta 100 % en suelos forestales con alta pedregosidad [14].
- **Referencia:** [19] destacan que el 68 %-87 % de los estudios revisados omitieron este componente, resultando en sesgos sistemáticos.
- **Ponderación:** 20 %.

##### *2. Uso de "minicalicatas" para suelos rocosos*

**Descripción:** La metodología de "minicalicatas" (30 x 30 x 30 cm) permite la evaluación de la fracción gruesa en suelos pedregosos con más del 30 % de fragmentos, mejorando la precisión del muestreo.

##### *Evaluación:*

- **Criterio:** Esta técnica asegura la inclusión adecuada

de fragmentos gruesos y minimiza errores asociados al uso de cilindros en suelos pedregosos [23].

- Referencia: [25] recomiendan métodos volumétricos que incluyan toda la fracción gruesa.
- Ponderación: 15 %.

### *3. Exclusión de los primeros 3-5 cm en suelos compactados para la determinación de la densidad aparente*

**Descripción:** En suelos compactados, la exclusión de los primeros 3-5 cm evita errores debido a la variabilidad en la densidad aparente causada por el manejo o el pisoteo del ganado.

#### Evaluación:

- Criterio: Estudios como [20] muestran que la compactación superficial afecta significativamente las estimaciones de COS en suelos agrícolas.
- Referencia: [3] enfatiza que los primeros centímetros del suelo presentan alta heterogeneidad en densidad y carbono.
- Ponderación: 15 %.

### *4. Relación D/h en cilindros de muestreo ( $\geq 8$ )*

**Descripción:** La relación entre el diámetro y la altura del cilindro de muestreo debe ser  $\geq 8$  para minimizar errores por fricción durante la extracción.

#### Evaluación:

- Criterio: Cilindros con una relación D/h equivocada pueden introducir compactación artificial o pérdida de suelo [18].
- Referencia: [26] recomiendan cilindros pequeños para minimizar distorsiones en suelos tropicales con alta densidad de raíces.
- Ponderación: 15 %.

### *5. Métodos analíticos validados*

**Descripción:** La aplicación de métodos validados para la medición del COS, como la combustión seca DUMAS o el método Walkley-Black, es crucial para asegurar precisión.

#### Evaluación:

- Criterio: La combustión seca DUMAS [27] se considera el estándar, mientras que Walkley-Black puede subestimar el COS en suelos ricos en carbono [3].

- Referencia: [15] recomiendan la calibración entre métodos para garantizar comparabilidad.
- Ponderación: 10 %.

### *6. Representatividad de muestras y diversidad de suelos*

**Descripción:** Los estudios deben incluir una representación adecuada de los tipos de suelos en Costa Rica (forestales, agrícolas, pasturas).

#### Evaluación:

- Criterio: La falta de representatividad limita la aplicabilidad de los resultados a nivel nacional [3].
- Referencia: [21] recomiendan diseños que reflejen la heterogeneidad de los paisajes tropicales.
- Ponderación: 10 %.

### *7. Calidad de los datos y replicabilidad*

**Descripción:** La inclusión de controles de calidad, replicación de muestras y análisis estadísticos asegura la confiabilidad de los resultados.

#### Evaluación:

- Criterio: Estudios con controles deficientes son menos confiables para monitoreos de largo plazo [19].
- Referencia: [16] destacan que la replicación estadística mejora la precisión de las estimaciones de carbono.
- Ponderación: 10 %.

### *8. Consideración de factores de variabilidad temporal*

**Descripción:** El análisis de la variabilidad temporal del COS o simulaciones bajo escenarios climáticos evalúa cambios en el tiempo.

#### Evaluación:

- Criterio: La variabilidad temporal es crítica para proyectar la respuesta del COS ante el cambio climático [3]
- Referencia: [19] sugieren incorporar escenarios climáticos para priorizar acciones de manejo.
- Ponderación: 5 %.

**Cuadro 1.** Matriz para la evaluación de estudios de cuantificación de COS.**Table 1.** Matrix for the evaluation of SOC quantification studies.

Criterio de Evaluación	Descripción	Ponderación (%)	Escala de Evaluación	Referencias
1. Inclusión de agregados gruesos (>2 mm)	Considera la fracción gruesa (>2 mm) en suelos pedregosos (>30 % de fragmentos).	20	0 = No; 1 = Parcial; 2 = Completa	[19]; [3]
2. Uso de "minicalicatas"	Utiliza minicalicatas 30x30x30 cm en suelos pedregosos.	15	0 = No; 1 = Parcial; 2 = Completa	[22]; [25]
3. Exclusión de los primeros 3-5 cm	Excluye los primeros centímetros en suelos compactados.	15	0 = No; 1 = Parcial; 2 = Completa	[3]; [20]
4. Relación D/h $\geq 8$	Relación D/h adecuada para evitar errores por fricción.	15	0 = No; 1 = Parcial; 2 = Completa	[18]; [26]
5. Métodos analíticos validados	Utiliza métodos validados como combustión seca.	10	0 = No; 1 = Parcial; 2 = Completa	[3]; [15]
6. Representatividad de muestras	Asegura diversidad de tipos de suelos en Costa Rica.	10	0 = No; 1 = Parcial; 2 = Completa	[3]; [21]
7. Calidad de datos y replicabilidad	Incluye controles de calidad y replicación estadística.	10	0 = No; 1 = Parcial; 2 = Completa	[16]; [19]
8. Variabilidad temporal	Considera escenarios climáticos o análisis temporal.	5	0 = No; 1 = Parcial; 2 = Completa	[19]; [3]

### **Matriz de evaluación de estudios de COS en la aplicación de buenas prácticas para la generación de créditos de carbono**

La matriz propuesta (cuadro 1) permite comparar metodologías y priorizar aquellas que mejor se ajusten a las necesidades específicas de los suelos forestales en miras de generar créditos de carbono. Al incorporar parámetros clave como la densidad aparente, la fracción de fragmentos rocosos y las características del uso del suelo, esta herramienta no solo mejora la calidad de las evaluaciones del COS, sino que también ofrece una base sólida para el diseño de políticas más efectivas y sostenibles. De esta manera, se asegura que las decisiones basadas en los estudios de COS sean más confiables, transparentes y alineadas con los objetivos de mitigación y adaptación al cambio climático.

#### a) Criterios de interpretación para la matriz de evaluación de estudios de COS

Los criterios de interpretación tienen como objetivo traducir la puntuación obtenida en la matriz en una evaluación cualitativa que permita identificar la calidad, aplicabilidad y áreas de mejora en los estudios de

COS. A continuación, se proponen tres niveles de interpretación:

#### 1. Puntuación total y clasificación general

Cada estudio evaluado puede obtener un puntaje máximo de 16, considerando las ponderaciones asignadas a cada criterio y la escala de evaluación (0, 1, 2). La interpretación de la puntuación global se clasifica en tres niveles de calidad (cuadro 2).

#### 2. Interpretación por criterio específico

Además de la puntuación global, es importante analizar el desempeño en cada criterio para identificar fortalezas y debilidades específicas:

#### Criterios clave con alta ponderación (>13)

- Inclusión de agregados gruesos (>2 mm): Una puntuación baja indica sobreestimación del COS en suelos forestales y pedregosos.
- Uso de "minicalicatas": Una puntuación baja sugiere problemas en la representatividad de suelos rocosos.
- Exclusión de los primeros 3-5 cm: Una

**Cuadro 2.** Criterios para la clasificación de estudios para determinar el COS.**Table 2.** Criteria for the classification of studies aimed at determining SOC.

Rango de puntuación	Clasificación general	Descripción
13-16	Alta calidad	El estudio cumple ampliamente con los criterios científicos, asegurando precisión y representatividad de los datos de COS.
9-12	Calidad moderada	El estudio cumple parcialmente con los criterios, pero presenta áreas clave de mejora, especialmente en técnicas de muestreo o análisis.
≤8	Baja calidad	El estudio carece de rigor metodológico en múltiples aspectos, lo que limita la confiabilidad y aplicabilidad de los resultados.

evaluación deficiente implica riesgo de errores en suelos compactados.

- Criterios complementarios con ponderación moderada (9-12)
- Relación D/h en cilindros: Una puntuación baja indica potenciales errores en la densidad aparente debido a compactación o fricción en la toma de muestras.
- Métodos analíticos validados: Una puntuación baja compromete la precisión de la cuantificación del COS.

Criterios secundarios con ponderación baja ( $\leq 8$ )

- Representatividad de muestras: Una puntuación baja limita la extrapolación de resultados a nivel nacional.
- Calidad de datos y replicabilidad: Un desempeño deficiente cuestiona la confiabilidad de los resultados.
- Variabilidad temporal: Una puntuación baja reduce la capacidad del estudio para proyectar dinámicas futuras de COS.

## Discusión

### Perspectiva global e implicaciones

En regiones tropicales, como América Latina y Asia, las características específicas de los suelos, en algunos casos con alta proporción de fragmentos rocosos, requieren metodologías adaptadas que aseguren mediciones precisas. Según [14], la omisión de estos fragmentos puede llevar a errores significativos en las estimaciones de carbono. La inclusión de enfoques localizados no solo mejora la precisión, sino que también fomenta la equidad en la implementación de políticas globales como REDD+ y los mercados de carbono.

El aumento reciente en la cantidad de publicaciones científicas sobre COS refleja una mayor conciencia sobre su importancia para los balances globales de

carbono. Sin embargo, este crecimiento también ha expuesto desafíos metodológicos persistentes, como la estandarización de protocolos de muestreo y análisis, especialmente en suelos compactados y con alta pedregosidad [18]. Este panorama subraya la necesidad de fortalecer capacidades locales en regiones subrepresentadas y avanzar hacia la integración de tecnologías avanzadas y enfoques participativos.

### Matriz para la evaluación de estudios de COS

El diseño de la matriz para evaluar estudios de cuantificación de COS responde a la necesidad de contar con un marco estructurado y transparente que permita medir la calidad y aplicabilidad de las metodologías utilizadas en el país. Este enfoque es particularmente relevante en Costa Rica, donde los compromisos climáticos y estrategias como REDD+ dependen de estimaciones precisas de las reservas de carbono en los suelos.

Inspirada en herramientas similares utilizadas en disciplinas como la gestión de riesgos, la matriz estandariza criterios clave para la evaluación, identificando fortalezas y áreas de mejora en los estudios analizados. Por ejemplo, la inclusión de la fracción gruesa ( $>2$  mm) y la implementación de metodologías como "minicalcitas" son esenciales para garantizar la representatividad en suelos rocosos, comunes en regiones forestales [19]. Además, criterios como la relación D/h en cilindros de muestreo y la exclusión de los primeros centímetros de suelo compactado permiten minimizar errores en la densidad aparente, un aspecto crítico en pasturas y áreas agrícolas [18].

La matriz no solo evalúa la calidad metodológica, sino que también promueve la comparabilidad entre estudios, algo esencial en un país con gran diversidad de suelos y usos de la tierra. Este enfoque alineado con principios de transparencia es similar al propuesto por [13] en sistemas complejos, donde la falta de estándares claros puede llevar a decisiones erróneas y al desperdicio de recursos.

**Cuadro 3.** Identificación de criterios deficientes en los estudios sobre COS que permiten priorizar acciones de mejora para futuros estudios.

**Table 3.** Identification of deficient criteria in SOC studies to support the prioritization of improvement actions for future research.

Criterion deficient	Action improvement proposal
Inclusión de agregados gruesos	Implementar protocolos para el ajuste de volumen de suelo fino, según [19].
Uso de "minicalicatas"	Incorporar esta metodología en áreas rocosas para aumentar la precisión de la fracción gruesa.
Relación D/h en cilindros	Estandarizar cilindros con relación $D/h \geq 8$ , especialmente en suelos forestales y compactados.
Métodos analíticos validados	Utilizar combustión seca DUMAS como estándar, ajustando Walkley-Black en suelos con alta materia orgánica.
Representatividad de muestras	Diseñar un muestreo estratificado que abarque diversidad de usos de suelo (forestal, agrícola, pasturas).
Calidad de datos y replicabilidad	Asegurar replicación y validación estadística de resultados, siguiendo protocolos de calidad [16].
Fraccionamiento del COS (lábil vs. recalcitrante)	Evaluar la distribución del carbono en fracciones de estabilidad diferenciada mediante métodos físicos o químicos [28].

### Aplicación para la mejora de estudios

Los resultados de la matriz ofrecen una hoja de ruta para mejorar futuros estudios en Costa Rica y regiones similares (cuadro 3). Algunas acciones clave incluyen:

- Inclusión de agregados gruesos: Protocolos como los de [19] que permiten ajustar las mediciones para reflejar con mayor precisión el contenido de carbono en suelos forestales rocosos.
- Uso de "minicalicatas": La implementación de esta técnica es crucial para suelos pedregosos, asegurando la inclusión de fracciones importantes para el cálculo del COS.
- Relación D/h en cilindros: La estandarización de esta relación minimiza errores por fricción y compactación, especialmente en suelos forestales y agrícolas.
- Representatividad y replicabilidad: Diseñar muestreos estratificados que incluyan suelos forestales, agrícolas y pasturas garantiza resultados representativos a nivel nacional [16].
- El COS se compone de fracciones con diferentes niveles de estabilidad y tiempo de residencia en el suelo. Las fracciones lábil y recalcitrante representan dos extremos del continuo de estabilidad del carbono [28]:
  - a) Carbono lábil: de rápida descomposición, representa una reserva fácilmente movilizable por la microbiota. Es muy sensible a cambios en el manejo y el clima, y tiene relevancia en ciclos de corto plazo.
  - b) Carbono recalcitrante: asociado a partículas minerales o compuesto por estructuras químicamente

complejas (lignina, ácidos húmicos), permanece en el suelo por décadas o siglos y es clave para la permanencia de las remociones en el marco de REDD+.

### Conclusiones

La matriz propuesta constituye un esfuerzo significativo para sistematizar y estandarizar la evaluación de los estudios sobre la cuantificación del carbono orgánico del suelo (COS) en Costa Rica y otras regiones, alineándolos con las recomendaciones científicas más recientes. Este marco metodológico garantiza que los estudios sean robustos y confiables, elementos esenciales para comunicar políticas de manejo sostenible del suelo y estrategias de mitigación de emisiones, en concordancia con compromisos climáticos como REDD+ y los mercados de carbono.

Una cuantificación precisa del COS en suelos forestales y agrícolas depende de una metodología que contemple aspectos técnicos específicos. Por ejemplo, incluir la fracción gruesa ( $>2$  mm) en suelos forestales es esencial para evitar sobreestimaciones [14]. En suelos compactados, es crucial controlar adecuadamente la densidad aparente, excluyendo las capas más afectadas por la compactación, además de seguir las proporciones óptimas entre el diámetro y la altura de los cilindros de muestreo ( $D/h \geq 8$ ; [18]). Estas recomendaciones, sumadas a las derivadas de iniciativas como REDD+, fomentan la estandarización de protocolos, mejorando la calidad y comparabilidad de los datos a nivel regional y nacional.

## Referencias

- [1]. FAO. Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Roma, Italia. 2017.
- [2]. R. Lal. "Managing soils for resolving the conflict between agriculture and nature: The hard talk". European Journal of Soil Science, vol. 71, no. 1, Jan., pp. 1–9. 2020. doi: [10.1111/ejss.12857](https://doi.org/10.1111/ejss.12857)
- [3]. FAO. Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems. Roma: FAO, 2018.
- [4]. K. Paustian, et al. "Climate-smart soils". Nature, vol. 532, Apr., pp. 49–57. 2016. doi: [10.1038/nature17174](https://doi.org/10.1038/nature17174)
- [5]. H. E. Birge, et al. "Adaptive management for soil ecosystem services". Journal of Environmental Management, vol. 183, no. 2, Dec., pp. 371–378. 2016. doi: [10.1016/j.jenvman.2016.06.024](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.024)
- [6]. X. Dupla, et al. "Are soil carbon credits empty promises? Shortcomings of current soil carbon quantification methodologies and improvement avenues". Soil Use and Management, vol. 40, no. 3, Jul., pp. 1–17. 2024. doi: [10.1111/sum.13092](https://doi.org/10.1111/sum.13092)
- [7]. K. Pudasaini, J. et al. "Comparison of major carbon offset standards for soil carbon projects in Australian grazinglands". Carbon Management, vol. 15, no. 1, Jan., pp. 1–9. 2024. doi: [10.1080/17583004.2023.2298725](https://doi.org/10.1080/17583004.2023.2298725)
- [8]. U. Franko & J. Ruehlmann. "Novel methodology for the assessment of organic carbon stocks in German arable soils". Agronomy, vol. 12, no. 5, May., pp. 1–12. 2022. doi: [10.3390/agronomy12051231](https://doi.org/10.3390/agronomy12051231)
- [9]. C. L. Dietz, et al. "Soil carbon maintained by perennial grasslands over 30 years but lost in field crop systems in a temperate Mollisol". Communications Earth & Environment, vol. 5, no. 1, p. 15. 2024. doi: [10.1038/s43247-024-01500-w](https://doi.org/10.1038/s43247-024-01500-w)
- [10]. S. Wang, et al. "Calibration, validation, and evaluation of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for hillslopes with natural runoff plot data". International Soil and Water Conservation Research, vol. 11, no. 4, Dec., pp. 669–687. 2023. doi: [10.1016/j.iswcr.2022.10.004](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.10.004)
- [11]. F. Isbell, et al. "Linking the influence and dependence of people on biodiversity across scales". Nature, vol. 546, Jun., pp. 65–72. 2017. doi: [10.1038/nature22899](https://doi.org/10.1038/nature22899)
- [12]. P. Baybutt. "Guidelines for designing risk matrices". Process Safety Progress, vol. 37, no. 1, Jul., pp. 49–55. 2017. doi: [10.1002/prs.11905](https://doi.org/10.1002/prs.11905)
- [13]. J. Zhou, et al. "Evaluating the quality of machine learning explanations: A survey on methods and metrics". Electronics, vol. 10, no. 5, Mar., pp. 1–19. 2021. doi: [10.3390/electronics10050593](https://doi.org/10.3390/electronics10050593)
- [14]. L. S. Harbo, et al. "Estimating organic carbon stocks of mineral soils in Denmark: Impact of bulk density and content of rock fragments". Geoderma Regional, vol. 30, e00560, Jun. 2022. doi: [10.1016/j.geodrs.2022.e00560](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00560)
- [15]. H. L. Throop, et al. "When bulk density methods matter: Implications for estimating soil organic carbon pools in rocky soils". Journal of Arid Environments, vol. 77, Feb., pp. 66–71. 2012. doi: [10.1016/j.jaridenv.2011.08.020](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.08.020)
- [16]. G. R. Blake. "Bulk Density". En Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Properties, C. A. Black, D. D. Evans, J. L. White, L. E. Ensminger & F. E. Clark, Eds. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1965, pp. 374–390.
- [17]. C. Poeplau, et al. "Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content". Soil, vol. 3, no. 1, Mar., pp. 61–66. 2017. doi: [10.5194/soil-3-61-2017](https://doi.org/10.5194/soil-3-61-2017)
- [18]. R. P. de Lima & T. Keller. "Impact of sample dimensions, soil-cylinder wall friction and elastic properties of soil on stress field and bulk density in uniaxial compression tests". Soil and Tillage Research, vol. 189, Jun., pp. 15–24. 2019. doi: [10.1016/j.still.2018.12.021](https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.021)
- [19]. J. W. Wendt & S. Hauser. "An equivalent soil mass procedure for monitoring soil organic carbon in multiple soil layers". European Journal of Soil Science, vol. 64, no. 1, pp. 58–65. 2013. doi: [10.1111/ejss.12002](https://doi.org/10.1111/ejss.12002)
- [20]. G. Corti, et al. "The soil skeleton, a forgotten pool of carbon and nitrogen in soil". European Journal of Soil Science, vol. 53, no. 2, Jun., pp. 283–298. 2002. doi: [10.1046/j.1365-2389.2002.00442.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00442.x)
- [21]. K. Paustian, et al. "Introduction". En 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara & K. Tanabe, Eds. Hayama, Japón: IGES, 2006.
- [22]. A. M. Rubio Gutiérrez. La densidad aparente en suelos forestales del Parque Natural Los Alcornocales. Sevilla: CSIC, 2010, pp. 1–88.
- [23]. F. Casanoves, et al. Estimación del carbono a partir de inventarios forestales nacionales. En: Buenas

prácticas para la recolección, manejo y análisis de datos. Turrialba, Costa Rica: CATIE, 2019, 110 p.

- [24]. G. Corti, et al. "Classing the soil skeleton (greater than two millimeters): Proposed approach and procedure". Soil Science Society of America Journal, vol. 62, no. 6, Dec., pp. 1620–1629. 1998. doi: [10.2136/sssaj1998.03615995006200060020x](https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200060020x)
- [25]. D. S. Page, et al. "Comparison of methods for determining bulk densities of rocky soils". Soil Science Society of America Journal, vol. 63, no. 2, Mar., pp. 379–383. 1999. doi: [10.2136/sssaj1999.03615995006300020016x](https://doi.org/10.2136/sssaj1999.03615995006300020016x)
- [26]. Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO] & Intergovernmental Technical Panel on Soils [ITPS]. Recarbonizing global soils – A technical manual of recommended management practices. Volume 1: Introduction and methodology. Roma: FAO, 2021. doi: [10.4060/cb6386en](https://doi.org/10.4060/cb6386en)
- [27]. J. Jastrow & J. Six. "Organic matter turnover". En Encyclopedia of Soil Science, 2nd ed., R. Lal, Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006, pp. 1219–1223. doi: [10.1201/noe0849338304.ch252](https://doi.org/10.1201/noe0849338304.ch252)