

Avanzando hacia una agricultura climáticamente inteligente: el papel del carbono orgánico en las funciones del suelo, los servicios ecosistémicos y la sostenibilidad de agroecosistemas

Advancing towards climate-smart agriculture: the role of soil organic carbon in soil functions, ecosystem services, and agroecosystem sustainability

Carlos Alcides Villalba Algarín¹ 

¹ Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria, Centro de Investigación Capitán Miranda, Departamento de Suelos. Capitán Miranda, Itapúa, Paraguay.

RESUMEN

Los desafíos actuales, como el cambio climático y la creciente presión sobre la producción de alimentos primarios, exigen la transición hacia modelos agrícolas más resilientes y ambientalmente responsables. En este contexto, preservar el carbono orgánico del suelo (COS) se consolida como una estrategia clave para potenciar las funciones edáficas, sustentar servicios ecosistémicos esenciales y fortalecer la resiliencia de los agroecosistemas. Este artículo de revisión tiene como objetivo analizar y sintetizar el papel del COS en las funciones del suelo, su contribución a la provisión de servicios ecosistémicos, su importancia para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, e identificar las estrategias de manejo más promisoras para su aumento y estabilización en el suelo. La investigación se fundamentó en una revisión bibliográfica exhaustiva con enfoque descriptivo, basada en 43 artículos de revisión publicados entre 2019 y 2024 en la base de datos Scopus. Los resultados evidencian que el mantenimiento y la valorización del COS son determinantes para preservar la integridad funcional del suelo, respaldar servicios ecosistémicos clave, proteger la seguridad alimentaria y mitigar los efectos del cambio climático. En conjunto, los hallazgos destacan la necesidad de promover estrategias de manejo orientadas a la regeneración del COS como eje central en la construcción de agroecosistemas más resilientes y en el avance hacia una agricultura climáticamente inteligente.

Palabras clave: Bienestar humano, carbonización del suelo, producción sustentable, salud del planeta, salud del suelo.

ABSTRACT

Current challenges, such as climate change and increasing pressure on primary food production, demand a transition toward more resilient and environmentally responsible agricultural models. In this context, the preservation of soil organic carbon (SOC) emerges as a key strategy to enhance soil functions, support essential ecosystem services, and strengthen the resilience of agroecosystems. This review article aims to analyze and synthesize the role of SOC in soil functioning, its contribution to ecosystem service provision, its importance for achieving the Sustainable Development Goals, and to identify the most promising management strategies for its increase and stabilization in soils. The research was based on a comprehensive and descriptive bibliographic review of 43 review articles published between 2019 and 2024 in the Scopus database. The results demonstrate that maintaining and enhancing SOC is crucial for preserving the functional integrity of soils, supporting key ecosystem services, safeguarding food security, and mitigating the effects of climate change. Collectively, the findings underscore the need to promote management strategies focused on SOC regeneration as a central axis for building more resilient agroecosystems and advancing towards climate-smart agriculture.

Keywords: Human well-being, soil carbonization, sustainable production, planet health, soil health.

***Autor para correspondencia:**
carlos.villalba@ipta.gov.py

Conflictos de interés:
El autor declara no tener conflicto de interés.

Financiamiento:
Ninguno

Disponibilidad de datos
Todo el conjunto de datos que respalda los resultados de este estudio está disponible previa solicitud al autor de correspondencia. El conjunto de datos no se encuentra disponible públicamente, ya que el autor prevé su utilización en futuras investigaciones.

Historial:
Recibido: 17-11-2024;
Aceptado: 24-04-2025;
Publicado: 27-06-2025;

Editor responsable:
Arnaldo Esquivel-Fariña 
Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

Licencia:
Artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons CC-BY 4.0

INTRODUCCIÓN

Enfrentar la crisis climática global y satisfacer la creciente demanda de alimentos representa uno de los desafíos más urgentes para la humanidad (Fróna et al., 2019). En este contexto, el suelo se consolida como un recurso clave tanto para la sostenibilidad ecológica como para la seguridad alimentaria mundial (Taylor et al., 2021). Además de su papel en la producción agropecuaria, constituye el mayor reservorio de carbono terrestre (Gonçalves et al., 2025; Song et al., 2024). El carbono en el suelo es una piedra angular para el equilibrio suelo, planta, atmósfera (Adhikari & Hartemink, 2016; Wiesmeier et al., 2019). Su contenido y manejo adecuado optimizan las propiedades funcionales del suelo y fortalecen su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos importantes (Andrea et al., 2018; Q. Yang et al., 2024).

El carbono orgánico del suelo contribuye a la restauración y mantenimiento de las propiedades físicas que sustentan la estabilidad edáfica, favoreciendo la formación y la persistencia de agregados, (Dai et al., 2024; Nascimento et al., 2024) lo que mejora la capacidad del suelo para retener agua y facilitar la aireación (Pang et al., 2025). Además, representa una fuente de energía y nutrientes para la microbiota, estimulando interacciones biológicas que fortalecen la dinámica del ecosistema edáfico (Ahmad et al., 2024; Zong et al., 2024). La acumulación de carbono también contribuye a mitigar contaminantes que amenazan la calidad del agua y a optimizar la disponibilidad de nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal (Wiesmeier et al., 2019). Estas múltiples contribuciones son determinantes para sostener los agroecosistemas más estables (dos Santos et al., 2024).

A partir de los beneficios promovidos por el COS, se refuerza la provisión de servicios ecosistémicos que impactan positivamente no solo en la producción de alimentos, sino también en la salud humana, animal y ambiental (Drobnik et al., 2018; Wiesmeier et al., 2019). The soil quality index SQUID (Soil QUality InDicator. El COS también desempeña un papel crucial en la regulación climática mediante la captura de carbono atmosférico, contribuyendo a la reducción de la erosión, al uso más eficiente del agua y a la preservación de la biodiversidad edáfica (Cherubin et al., 2021; LAL, 2023). Estos servicios resultan fundamentales para sustentar una agricultura capaz de atender la creciente demanda global sin comprometer la estabilidad ecológica (Zhao et al., 2020). Particularmente frente a eventos climáticos extremos, el COS fortalece la resiliencia de los agroecosistemas, mejorando su capacidad de adaptación y sostenibilidad a largo plazo (Fagodiya et al., 2024; Sarkar & McLawrence, 2023).

Frente a estos escenarios, y considerando la importancia del COS en la salud del ecosistema edáfico, resulta fundamental identificar e implementar prácticas de manejo que favorezcan su secuestro estable en el suelo (Villalba Algarín et al., 2024). En este sentido, la agricultura climáticamente inteligente representa una estrategia integradora que combina sostenibilidad productiva, resiliencia frente al cambio climático y mitigación de gases de efecto invernadero mediante prácticas validadas. Este

enfoque se sustenta en tres pilares fundamentales: la productividad sostenible, que implica la optimización de recursos, la mejora genética y el manejo agronómico; la adaptación, a través de sistemas agroecológicos, gestión eficiente del agua y diversificación de cultivos; y la mitigación, mediante el secuestro de carbono en suelos, la reducción de emisiones derivadas del uso de fertilizantes y la adecuada gestión de residuos (Du et al., 2023; Siddique et al., 2024; J. Zhao et al., 2023).

A la luz de lo expuesto, el presente artículo de revisión tuvo como objetivo analizar y sintetizar el papel del COS en las funciones del suelo, su contribución a la provisión de servicios ecosistémicos, su importancia para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, e identificar las estrategias de manejo más prometedoras para su conservación y fortalecimiento. Al reunir la información científica más reciente en un lenguaje accesible, se busca ofrecer a la comunidad paraguaya una base técnica clara para orientar decisiones agronómicas que promuevan la acumulación de carbono en el suelo. Con ello, se espera contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes, sostenibles y alineados con los desafíos actuales del cambio climático y la seguridad alimentaria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se basó en una revisión bibliográfica de carácter descriptivo orientada a analizar la influencia del COS en las funciones edáficas, la provisión de servicios ecosistémicos, su relevancia en el cumplimiento de compromisos internacionales y la identificación de prácticas agrícolas que favorecen su acumulación y estabilización. Para ello, se realizó una búsqueda exhaustiva en la base de datos Scopus durante el mes de septiembre de 2024, utilizando los descriptores ("soil organic carbon" OR "soil organic matter") AND ("soil function" OR "ecosystem services"), aplicados a títulos, resúmenes y palabras clave mediante los operadores booleanos "AND" y "OR".

Con el fin de garantizar la calidad y actualidad de las publicaciones seleccionadas, se aplicaron los siguientes criterios de inclusión: (i) tipo de documento: artículos de revisión revisados por pares; (ii) período de publicación: entre 2019 y 2024; y (iii) idioma: inglés. La aplicación de estos filtros arrojó un total de 43 artículos, que fueron depurados para eliminar duplicados y evaluados críticamente en cuanto a su pertinencia. Los documentos seleccionados fueron exportados en formato PDF y sometidos a una lectura detallada y análisis interpretativo. A partir de esta síntesis rigurosa se construyó la base conceptual que sustenta el desarrollo del presente estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La dinámica del carbono en el ecosistema

La dinámica del carbono en el ecosistema es altamente compleja y depende de procesos interconectados (Figura 1). Las plantas desempeñan un papel fundamental en la carbonización del suelo (Bhattacharyya et al., 2022; Hoffland et al., 2020), capturando CO₂ atmosférico

mediante la fotosíntesis y transformándolo en biomasa que almacena carbono en hojas, tallos y raíces (Zhang et al., 2021). Este carbono es posteriormente transferido al suelo a través de exudados radiculares y restos orgánicos, los cuales son descompuestos por la biota del suelo (Bhattacharyya et al., 2022; Wiesmeier et al., 2019; Zhang et al., 2021). Una fracción de este carbono se estabiliza como materia orgánica, convirtiendo al suelo en un sumidero de carbono que mejora su estructura, fertilidad y contribuye a la resiliencia del ecosistema (Kopittke et al., 2022; Ndour et al., 2023).

Los procesos de descarbonización representan la fase opuesta a la carbonización, en la que la respiración de plantas y organismos del suelo libera CO_2 a la atmósfera, manteniendo un flujo constante de carbono bajo condiciones equilibradas (Zhang et al., 2021). Sin embargo, actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la perturbación intensiva del suelo alteran este equilibrio, liberando grandes cantidades de carbono previamente almacenado en el suelo (Kopittke et al., 2022; Wiesmeier et al., 2019). Esta liberación masiva excede la capacidad de los ecosistemas para absorber el CO_2 , lo que altera el ciclo del carbono y contribuye significativamente al calentamiento global (Hassan et al., 2022; J. Yang et al., 2020).

El rol del carbono orgánico en la funcionalidad del suelo

El carbono orgánico es fundamental para que el suelo conserve su plena capacidad para funcionar como un ecosistema vivo, capaz de sustentar una producción agrícola sostenible (Figura 2). Este carbono favorece la formación de agregados estables, estructuras que incrementan la porosidad del suelo y lo hacen menos susceptible a condiciones extremas (Ghimire et al., 2023; Hoffland et al., 2020; Sullivan et al., 2022). La estabilidad estructural resultante refuerza la capacidad del suelo

para soportar el tránsito de maquinaria y animales, al mismo tiempo que favorece el crecimiento de las raíces de las plantas, optimizando así el aprovechamiento de los recursos disponibles a mayores profundidades (Han et al., 2020; Karasawa, 2024; Maticic et al., 2024).

La mejora en la aireación del suelo es otro beneficio directo del COS, que, al favorecer una estructura óptima, facilita una adecuada circulación del aire en los poros (Ghorbani & Amirahmadi, 2024; Hoffland et al., 2020). Esta oxigenación es esencial para el metabolismo de la biota edáfica y el desarrollo radicular, creando un entorno favorable para los microorganismos aeróbicos responsables de descomponer la materia orgánica y liberar nutrientes (Ghimire et al., 2023; Karasawa, 2024).

El COS también incrementa la capacidad del suelo para retener agua, al aumentar la cantidad de humedad almacenada en los microporos (Davis et al., 2023; Hoffland et al., 2020; Karasawa, 2024). Este efecto garantiza un suministro constante de agua para las plantas, incluso durante períodos de sequía (Karasawa, 2024; Widyati et al., 2022). Así, los suelos ricos en COS no solo mejoran la resistencia de los cultivos al estrés hídrico, sino que también estabilizan la producción agrícola y refuerzan la resiliencia frente a eventos climáticos extremos (Taylor et al., 2021).

Otro beneficio significativo del COS es el aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), una propiedad que permite al suelo retener y suministrar nutrientes esenciales como calcio, magnesio y potasio (Hoffland et al., 2020; Maticic et al., 2024; Widyati et al., 2022). Este aumento en la CIC minimiza las pérdidas por lixiviación, garantizando un suministro eficiente de nutrientes para las plantas y reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos, lo que promueve una agricultura más limpia y de menor costo (Garrett et al., 2021; Tang et al., 2022).

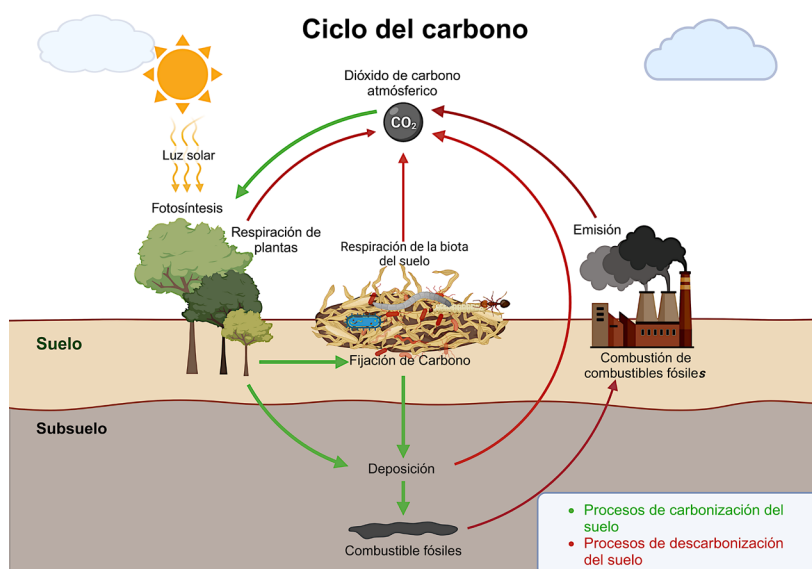


Figura 1. Representación esquemática de la dinámica del carbono en el ecosistema, incluyendo los procesos de carbonización y descarbonización del suelo. Diseñado a partir de artículos de revisión publicados en los últimos cinco años (2019-2024). Fuente de datos: Scopus (2024). Creada con Biorender.com.

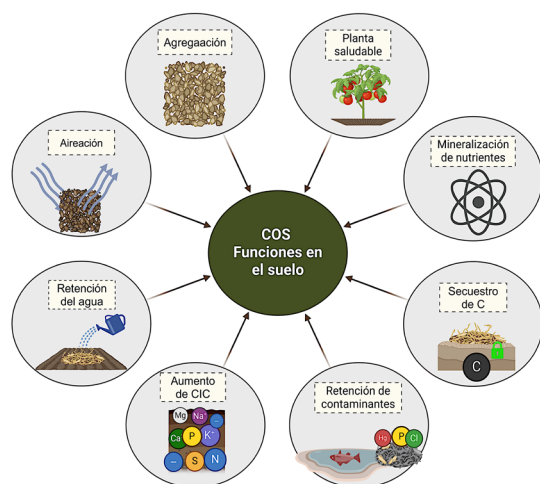


Figura 2. Funciones del carbono orgánico del suelo (COS). Diseñado a partir de artículos de revisión publicados en los últimos cinco años (2019-2024). Fuente de datos: Scopus (2024). Creada con Biorender.com.

El COS cumple un rol importante en la mineralización de nutrientes, estimulando la actividad de la biota edáfica que transforma compuestos orgánicos en formas inorgánicas disponibles (Hassan et al., 2022; Karasawa, 2024). Este proceso asegura un flujo continuo de nutrientes, favoreciendo el crecimiento vegetal (Hoffland et al., 2020; Imran, 2022; Karasawa, 2024). Otra función esencial del COS es secuestrar C en el suelo, contribuyendo a la mitigación del cambio climático mediante la reducción de las concentraciones de CO₂ atmosférico (Alavi-Murillo et al., 2022; Hoffland et al., 2020). Este almacenamiento convierte al suelo en un preciado cofre para alcanzar los objetivos globales de sostenibilidad (Kopittke et al., 2022).

El COS también actúa como un agente protector al inmovilizar metales pesados y sustancias tóxicas, evitando su lixiviación hacia aguas subterráneas y superficiales (Hassan et al., 2022; Koutika, 2022; O'Brien et al., 2024). Este mecanismo preserva la calidad hídrica y reduce los riesgos de contaminación, protegiendo tanto la salud de los ecosistemas como de las comunidades que dependen de estos recursos (Hassan et al., 2022; O'Brien et al., 2024). Además, favorece la producción de plantas saludables al proporcionar un entorno equilibrado; un suelo con niveles óptimos de COS suministra recursos ambientales de forma continua, aumentando la productividad y mejorando la resistencia de los cultivos frente a condiciones de estrés (Imran, 2022).

Estos beneficios resaltan la importancia del COS como un componente fundamental para el equilibrio ecológico, con efectos directos sobre los procesos clave de la agricultura y en la promoción de la sostenibilidad de los agroecosistemas (Gmach et al., 2020; Kopittke et al., 2022).

De las funciones a los servicios ecosistémicos del COS: conexiones clave

Los servicios ecosistémicos son beneficios derivados de

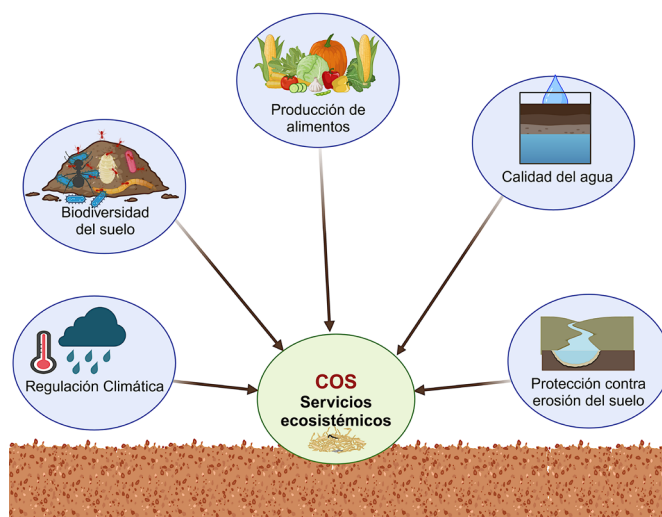


Figura 3. Principales servicios ecosistémicos del carbono orgánico del suelo (COS). Diseñado a partir de artículos de revisión publicados en los últimos cinco años (2019-2024). Fuente de datos: Scopus (2024). Creada con Biorender.com.

los procesos y funciones naturales que los ecosistemas proporcionan al bienestar humano (Davis et al., 2023; Hassan et al., 2022). En el caso del suelo, los servicios ecosistémicos están intrínsecamente ligados al COS, ya que este compuesto orgánico sustenta las funciones del suelo que resultan en servicios esenciales para la vida (Alavi-Murillo et al., 2022; Hoffland et al., 2020), como los ilustrados en la Figura 3.

El COS reduce significativamente la erosión, uno de los desafíos más críticos en la agricultura moderna (Hassan et al., 2022; Hoffland et al., 2020). Los agregados estables que genera el COS evitan la compactación y favorecen la infiltración de agua, reduciendo la escorrentía y el riesgo de erosión superficial (Hoffland et al., 2020; Widyati et al., 2022). Esto no solo previene la pérdida de la calidad del suelo y nutrientes esenciales, sino que también protege la capacidad del suelo para sostener cultivos a largo plazo (Tang et al., 2022; Widyati et al., 2022). Además, mitiga la sedimentación en cuerpos de agua, contribuyendo a la preservación de los ecosistemas acuáticos (Mishra et al., 2022; O'Brien et al., 2024).

Un suelo rico en COS favorece una biodiversidad robusta, desde microorganismos hasta organismos clave del ecosistema, como lombrices, que mejoran tanto la fertilidad como la estabilidad del suelo (Song et al., 2024; Vogel et al., 2024). Esta diversidad biológica mejora la salud del suelo al estabilizar los ciclos de nutrientes y fortalecer la estructura física (Bhattacharjya et al., 2024; Pot et al., 2022). Además, contribuye a reducir la incidencia de enfermedades al promover organismos benéficos que compiten con patógenos (Hoffland et al., 2020; Mishra et al., 2022; Song et al., 2024).

El COS influye directamente en la producción de alimentos al regular la disponibilidad de recursos ambientales (Das et al., 2022; Hassan et al., 2022). Los suelos con alto

contenido de COS soportan cultivos más vigorosos y ofrecen producciones de alimentos estables, incluso bajo condiciones adversas (Kopittke et al., 2022).

Además, el COS contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático al capturar y almacenar carbono en el suelo, evitando su liberación como CO₂ a la atmósfera (Hassan et al., 2022; Kopittke et al., 2022). Este proceso transforma al suelo en un recurso clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Alavi-Murillo et al., 2022; Hassan et al., 2022).

El COS y su importancia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El carbono orgánico del suelo representa una pieza clave en la agenda de sostenibilidad global, particularmente en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Bhattacharjya et al., 2024; Kopittke et al., 2022). La Figura 4 ilustra esta conexión, destacando cómo las funciones del COS trascienden el ámbito agrícola e impactan directamente en diversos Objetivos del Acuerdo Paris 2030. En el contexto del ODS 13, el COS se posiciona como un aliado estratégico en la mitigación del cambio climático con la descarbonización atmosférica (Eze et al., 2023; Kopittke et al., 2022), un esfuerzo que no solo combate el calentamiento global, sino que también fortalece la adaptación al clima desequilibrado (Hassan et al., 2022; Koutika, 2022).

Además, el COS es sumamente importante para el avance hacia el ODS 2, al proporcionar una base sólida para una producción alimentaria sostenible (Alavi-Murillo et al., 2022; Kopittke et al., 2022). Al mejorar la capacidad del suelo para sostener cultivos diversificados y resilientes, el COS se convierte en un elemento central para reducir el hambre en el mundo, especialmente en contextos de alta vulnerabilidad (Das et al., 2022; Hassan et al., 2022).



Figura 4. Conexión del carbono orgánico del suelo (COS) con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Diseñado a partir de artículos de revisión publicados en los últimos cinco años (2019-2024). Fuente de datos: Scopus (2024). Creada con Biorender.com.

Su impacto también abarca el ODS 6, ya que el COS contribuye significativamente a la conservación de los recursos hídricos mediante procesos de filtración natural, protegiendo fuentes de agua de contaminantes potenciales y garantizando su calidad (Hassan et al., 2022; Kopittke et al., 2022; Mishra et al., 2022).

En cuanto al ODS 15, el COS favorece la regeneración y sostenibilidad de los ecosistemas terrestres, estabilizando el suelo y creando un ambiente propicio para la biodiversidad (Kopittke et al., 2022). Este equilibrio terrestre tiene implicaciones directas sobre el ODS 14, ya que la protección del suelo previene la contaminación de cuerpos de agua, beneficiando indirectamente la vida submarina (Hassan et al., 2022). Asimismo, el COS respalda el ODS 3 al fomentar un entorno agrícola más saludable, mejorando la calidad de vida de las comunidades rurales (Das et al., 2022; Sharma et al., 2024; Taylor et al., 2021). En conjunto, el COS no solo impulsa prácticas agrícolas sostenibles, sino que refuerza los pilares fundamentales para mantener la multifuncionalidad del suelo y el equilibrio de los ecosistemas (Kopittke et al., 2022).

Desafíos y alternativas para la conservación y mejora del COS

La conservación del COS es sumamente compleja, dinámico y dependiente de múltiples factores intrínsecos de cada región, como el clima, el tipo de suelo y la topografía (Cherubin et al., 2021). Entre los mayores desafíos se encuentra la erosión promovida por las prácticas agrícolas convencionales (Matisic et al., 2024; Thiengo et al., 2024; Wiesmeier et al., 2019). La erosión, al remover capas ricas en carbono, no solo disminuye la salud física, química y biológica del suelo, sino que también provoca pérdidas sustanciales del carbono secuestrado durante años (Rehshuh et al., 2021).

Las prácticas convencionales, basadas en la perturbación constante del suelo y el monocultivo, priorizan el aumento inmediato de la producción de granos, pero generan impactos negativos profundos en la carbonización del suelo (Assunção et al., 2023). El laboreo agresivo del suelo provoca compactación y degrada los macroagregados, estructuras esenciales para la protección física del carbono (Sekaran et al., 2021). Al destruir estos macroagregados, el carbono almacenado queda expuesto, aumentando su vulnerabilidad a la mineralización y su liberación a la atmósfera (Chellappa et al., 2021; Sekaran et al., 2021). Por otro lado, el monocultivo reduce la cantidad y diversidad de raíces, limitando la entrada de residuos orgánicos al suelo (Rosset et al., 2022; Teixeira et al., 2023). Esto impacta negativamente en la biodiversidad edáfica, restringiendo las actividades enzimáticas responsables de la estabilización de carbono, comprometiendo la plena funcionalidad y el apoyo a los servicios ecosistémicos a largo plazo (Eze et al., 2023; Sekaran et al., 2021).

Ante estas problemáticas, en los últimos años la comunidad científica ha documentado y propuesto alternativas basadas en sistemas agrícolas conservacionistas (Bonetti et al., 2023; Mathers et al., 2023), también conocidos como sistemas agrícolas climáticamente inteligentes (Figura 5)

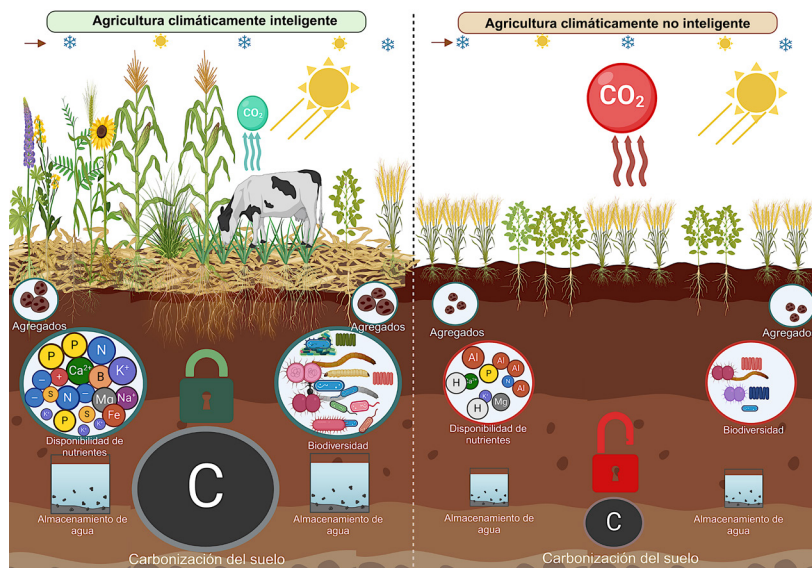


Figura 5. Esquematzación de tipos de agricultura y sus efectos en la salud del suelo-planta-atmósfera. Diseñado a partir de artículos de revisión publicados en los últimos cinco años (2019-2024). Fuente de datos: Scopus (2024). Creada con Biorender.com.

(Tyagi & Haritash, 2024), como una solución viable para mejorar la salud del suelo, incrementar la productividad y, sobre todo, proteger y optimizar el COS (Eze et al., 2023; Moraes et al., 2024; Sharma et al., 2024). Estas prácticas se sustentan en los tres pilares del sistema de siembra directa: la nula remoción del suelo, la rotación de cultivos con inclusión de abonos verdes, y la cobertura permanente del suelo (Babu et al., 2023).

Junto a los tres pilares fundamentales mencionados, las investigaciones más recientes destacan la intensificación de los sistemas mediante la combinación de agricultura y ganadería en las mismas áreas como una estrategia prometedora para fomentar la sostenibilidad agropecuaria (Rodríguez-Hernández et al., 2023; Venkatesh et al., 2024). Este enfoque permite aprovechar sinergias clave entre ambas actividades, optimizando el uso de recursos y promoviendo un manejo más eficiente del suelo (Venkatesh et al., 2024). La integración de agricultura y ganadería contribuye a enriquecer el suelo con materia orgánica a partir de los residuos animales, al tiempo que la cobertura vegetal protege contra la erosión y fortalece la estructura del suelo (Ambus et al., 2024). Así también, fomenta un ciclo eficiente de nutrientes y potencia la biodiversidad, creando un ecosistema dinámico que mejora la actividad biológica del suelo y su resiliencia frente a condiciones climáticas adversas (Palsaniya et al., 2024; Paramesh et al., 2022).

La implementación de estas alternativas enfrenta retos significativos, pero ofrece una vía prometedora para reconciliar la productividad agrícola y pecuaria con la conservación del suelo, la producción de alimentos de calidad y la reducción de la contaminación del ecosistema mediante un secuestro eficiente de carbono (Davis et al., 2023; Hassan et al., 2022). En última instancia, estas prácticas representan un cambio necesario hacia una agricultura que no solo garantice la seguridad alimentaria,

sino que también promueva la salud y resiliencia a largo plazo de los ecosistemas globales (Alavi-Murillo et al., 2022; Sharma et al., 2024)

CONCLUSIÓN

Con base en la revisión cuidadosa de la literatura más reciente, el carbono orgánico del suelo ha surgido como un componente clave a nivel mundial, reconocido como el pilar más importante para abordar los desafíos que amenazan la sostenibilidad de los agroecosistemas actuales y, aún más, de las futuras generaciones. Un suelo rico en carbono no solo garantiza el cumplimiento de sus funciones esenciales y servicios ecosistémicos, sino que también impulsa un equilibrio saludable entre suelo, planta y atmósfera. Este enfoque convierte al COS en una herramienta estratégica para alcanzar los compromisos internacionales orientados a la protección de la salud del planeta.

Sin embargo, para materializar este potencial, se requiere un esfuerzo coordinado por parte de los gestores de la tierra, orientado hacia la implementación de sistemas de producción climáticamente inteligentes. Estas estrategias deben promover un equilibrio sostenible entre los componentes del suelo, la productividad agrícola y la preservación del medio ambiente, consolidando así la agricultura como un motor de resiliencia frente a los desafíos climáticos y un pilar esencial para la seguridad alimentaria global.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, 262, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Ahmad, A., Arif, M. S., Shahzad, S. M., Yasmeen, T., Shakoar, A., Iqbal, S., Riaz, A., Zahid, A., & Chapman, S. J. (2024). Long-term raw crop residue

- but not burned residue incorporation improved soil multifunctionality in semi-arid agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 240(February), 106073. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106073>
- Alavi-Murillo, G., Diels, J., Gilles, J., & Willems, P. (2022). Soil organic carbon in Andean high-mountain ecosystems: importance, challenges, and opportunities for carbon sequestration. *Regional Environmental Change*, 22(4). <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01980-6>
- Ambus, J. V., Alves, A. R., Scheid, D. L., Antonino, A. C. D., & Reichert, J. M. (2024). Lowland Integrated Crop-Livestock Systems with Grass Crops Increases Pore Connectivity and Permeability, Without Requiring Soil Tillage. *Soil Systems*, 8(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8040111>
- Andrea, F., Bini, C., & Amaducci, S. (2018). Soil and ecosystem services: Current knowledge and evidences from Italian case studies. *Applied Soil Ecology*, 123(June 2017), 693–698. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.031>
- Assunção, S. J. R., Pedrotti, A., Gonzaga, M. I. S., Nobrega, J. C. A., & Holanda, F. S. R. (2023). Soil quality index of an ultisol under long-term plots in the coastal tablelands in northeastern Brazil. *Revista Caatinga*, 36(2), 432–444. <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n220rc>
- Babu, S., Singh, R., Avasthe, R., Rathore, S. S., Kumar, S., Das, A., Layek, J., Sharma, V., Wani, O. A., & Singh, V. K. (2023). Conservation tillage and diversified cropping enhance system productivity and eco-efficiency and reduce greenhouse gas intensity in organic farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1114617>
- Bhattacharjya, S., Ghosh, A., Sahu, A., Agnihotri, R., Pal, N., Sharma, P., Manna, M. C., Sharma, M. P., & Singh, A. B. (2024). Utilizing soil metabolomics to investigate the untapped metabolic potential of soil microbial communities and their role in driving soil ecosystem processes: A review. *Applied Soil Ecology*, 195(August 2023), 105238. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105238>
- Bhattacharyya, S. S., Ros, G. H., Furtak, K., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldivar, R. (2022). Soil carbon sequestration – An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics. *Science of the Total Environment*, 815. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152928>
- Bonetti, J. de A., Nunes, M. R., Fink, J. R., Tretto, T., & Tormena, C. A. (2023). Agricultural practices to improve near-surface soil health and crop yield in subtropical soils. *Soil and Tillage Research*, 234(July), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105835>
- Chellappa, J., Laxmisagara, K., Sekaran, U., & Kumar, S. (2021). Soil organic carbon, aggregate stability and biochemical activity under tilled and no-tilled agroecosystems. *Journal of Agriculture and Food Research*, 4(March), 100139. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100139>
- Cherubin, M. R., Bordonal, R. O., Castioni, G. A., Guimarães, E. M., Lisboa, I. P., Moraes, L. A. A., Menandro, L. M. S., Tenelli, S., Cerri, C. E. P., Karlen, D. L., & Carvalho, J. L. N. (2021). Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. *Industrial Crops and Products*, 163(February). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113315>
- Dai, W., Feng, G., Huang, Y., Adeli, A., & Jenkins, J. N. (2024). Influence of cover crops on soil aggregate stability, size distribution and related factors in a no-till field. *Soil and Tillage Research*, 244(June), 0–2. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106197>
- Das, B. S., Wani, S. P., Benbi, D. K., Muddu, S., Bhattacharyya, T., Mandal, B., Santra, P., Chakraborty, D., Bhattacharyya, R., Basak, N., & Reddy, N. N. (2022). Soil health and its relationship with food security and human health to meet the sustainable development goals in India. *Soil Security*, 8(July), 100071. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100071>
- Davis, A. G., Huggins, D. R., & Reganold, J. P. (2023). Linking soil health and ecological resilience to achieve agricultural sustainability. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 21(3), 131–139. <https://doi.org/10.1002/fee.2594>
- dos Santos, J. V., Goranov, A. I., Bento, L. R., Oliveira, P. P. A., Pezzopane, J. R. M., Bernardi, A. C. C., de Sá, I. P., Nogueira, A. R. A., Martin-Neto, L., & Hatcher, P. G. (2024). Biogeochemistry of dissolved organic matter and inorganic solutes in soil profiles of tropical pasturelands. *Soil and Tillage Research*, 240(December 2023). <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106100>
- Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., & Grêt-Regamey, A. (2018). Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 94(July), 151–169. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>
- Du, C., Li, L., Xie, J., Effah, Z., Luo, Z., & Wang, L. (2023). Long-Term Conservation Tillage Increases Yield and Water Use Efficiency of Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.) by Regulating Substances Related to Stress on the Semi-Arid Loess Plateau of China. *Agronomy*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/agronomy13051301>
- Eze, S., Magilton, M., Magnone, D., Varga, S., Gould, I., Mercer, T. G., & Goddard, M. R. (2023). Meta-analysis of global soil data identifies robust indicators for short-term changes in soil organic carbon stock following land use change. *Science of the Total Environment*, 860(November 2022), 160484. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160484>
- Fagodiya, R. K., Singh, A., Prajapat, K., Chandra, P., Malyan, S. K., Verma, K., Verma, V. K., Rai, A. K., Yadav, R. K., & Biswas, A. K. (2024). Conservation agriculture practices for carbon sequestration and greenhouse gas mitigation. In *Waste Management for Sustainable and Restored Agricultural Soil* (Vol. 2000). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18486-4.00020-8>
- Fróna, D., Szenderák, J., & Harangi-Rákos, M. (2019). The challenge of feeding the world. *Sustainability* (Switzerland), 11(20). <https://doi.org/10.3390/su11205816>
- Garrett, L. G., Smaill, S. J., Addison, S. L., & Clinton, P. W. (2021). Globally relevant lessons from a long-term trial series testing universal hypothesis of the impacts of increasing biomass removal on site productivity and nutrient pools. *Forest Ecology and Management*, 494(December 2020), 119325. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119325>
- Ghimire, R., Thapa, V. R., Acosta-Martinez, V., Schipanski, M., Slaughter, L. C., Fonte, S. J., Shukla, M. K., Bista, P., Angadi, S. V., Mikha, M. M., Adebayo, O., & Noble Strohm, T. (2023). Soil Health Assessment and Management Framework for Water-Limited Environments: Examples from the Great Plains of the

- USA. *Soil Systems*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010022>
- Ghorbani, M., & Amirahmadi, E. (2024). Insights into soil and biochar variations and their contribution to soil aggregate status – A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 244(August). <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106282>
- Gmach, M. R., Cherubin, M. R., Kaiser, K., & Cerri, C. E. P. (2020). Processes that influence dissolved organic matter in the soil: a review. *Scientia Agricola*, 77(3). <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0164>
- Gonçalves, D. R. P., Canisares, L. P., Wood, H. A. J., Barth, G., Peper, A., Galvan, J., & Anselmi, A. (2025). Agriculture intensification in subtropical crop systems and its potential to sequester carbon in soils. *Soil and Tillage Research*, 246(December 2023). <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106330>
- Han, L., Sun, K., Yang, Y., Xia, X., Li, F., Yang, Z., & Xing, B. (2020). Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon. *Geoderma*, 364(January), 114184. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114184>
- Hassan, W., Li, Y., Saba, T., Jabbi, F., Wang, B., Cai, A., & Wu, J. (2022). Improved and sustainable agroecosystem, food security and environmental resilience through zero tillage with emphasis on soils of temperate and subtropical climate regions: A review. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(3), 530–545. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.01.005>
- Hoffland, E., Kuyper, T. W., Comans, R. N. J., & Creamer, R. E. (2020). Eco-functionality of organic matter in soils. *Plant and Soil*, 455(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>
- Imran. (2022). Phosphorus Availability Enhanced with Combine Application of Organic Amendments and Beneficial Microbes under Soybean-Wheat Cropping System. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(8), 929–943. <https://doi.org/10.1080/0103624.2022.2034848>
- Karasawa, T. (2024). Beneficial effects of cover crops on various soil functions and nutrient supply. *Soil Science and Plant Nutrition*, 70(4), 237–245. <https://doi.org/10.1080/00380768.2024.2360022>
- Kopittke, P. M., Berhe, A. A., Carrillo, Y., Cavagnaro, T. R., Chen, D., Chen, Q. L., Román Dobarco, M., Dijkstra, F. A., Field, D. J., Grundy, M. J., He, J. Z., Hoyle, F. C., Kögel-Knabner, I., Lam, S. K., Marschner, P., Martinez, C., McBratney, A. B., McDonald-Madden, E., Menzies, N. W., ... Minasny, B. (2022). Ensuring planetary survival: the centrality of organic carbon in balancing the multifunctional nature of soils. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(23), 4308–4324. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.2024484>
- Koutika, L. S. (2022). How hydrogen sulfide deposition from oil exploitation may affect bacterial communities and the health of forest soils in Congolese coastal plains? *Frontiers in Soil Science*, 2(August), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.920142>
- LAL, R. (2023). Carbon farming by recarbonization of agroecosystems. *Pedosphere*, 33(5), 676–679. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.07.024>
- Mathers, C., Heitman, J., Huseeth, A., Locke, A., Osmond, D., & Woodley, A. (2023). No-till imparts yield stability and greater cumulative yield under variable weather conditions in the southeastern USA piedmont. *Field Crops Research*, 292(February 2022), 108811. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108811>
- Maticic, M., Dugan, I., & Bogunovic, I. (2024). Challenges in Sustainable Agriculture—The Role of Organic Amendments. *Agriculture (Switzerland)*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/agriculture14040643>
- Mishra, C. S. K., Samal, S., & Samal, R. R. (2022). Evaluating earthworms as candidates for remediating pesticide contaminated agricultural soil: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 10(October), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.924480>
- Moraes, M. T. de, Olbermann, F. J. R., Bonetti, J. de A., Pilegi, L. R., Costa, M. V. R., Pacheco, V., Rogers, C. D., & Guimarães, R. M. L. (2024). The impacts of cover crop mixes on the penetration resistance model of an Oxisol under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 242(May), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106138>
- Nascimento, M. dos S., Barreto-Garcia, P. A. B., Monroe, P. H. M., Pereira, M. G., Barros, W. T., & Nunes, M. R. (2024). Carbon in soil macroaggregates under coffee agroforestry systems: Modeling the effect of edaphic fauna and residue input. *Applied Soil Ecology*, 202(August), 105604. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105604>
- Ndour, P. M. S., Bargaz, A., Rchiad, Z., Pawlett, M., Clark, I. M., Mauchline, T. H., Harris, J., & Lyamlouli, K. (2023). Microbial Catabolic Activity: Methods, Pertinence, and Potential Interest for Improving Microbial Inoculant Efficiency. *Microbial Ecology*, 86(4), 2211–2230. <https://doi.org/10.1007/s00248-023-02250-6>
- O'Brien, P. L., DeSutter, T. M., Casey, F. X. M., Wick, A., Bartsch, Z. J., Croat, S. J., & Struffert, S. (2024). Oil spill soil remediation using thermal desorption: Project synthesis and outcomes. *Agrosystems, Geosciences and Environment*, 7(1), 2–7. <https://doi.org/10.1002/agg2.20463>
- Palsaniya, D. R., Kumar, S., Das, M. M., Kumar, T. K., Chaudhary, M., Chand, K., & Sahay, C. S. (2024). Ecosystem services from rain water harvesting, agroforestry and livestock based smallholder rain-fed integrated farming system. *Agroforestry Systems*, 1–16.
- Pang, L., Tian, C., Yuan, Q., & Deng, W. (2025). Effects of different restoration years on soil carbon sequestration and water retention capacity in bamboo forest: A case study in Southwest China Karst. *Ecological Engineering*, 210(November 2024), 107434. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107434>
- Paramesh, V., Ravisankar, N., Behera, U. K., Arunachalam, V., Kumar, P., Solomon Rajkumar, R., Dhar Misra, S., Mohan Kumar, R., Prusty, A. K., Jacob, D., Panwar, A. S., Mayenkar, T., Reddy, V. K., & Rajkumar, S. (2022). Integrated farming system approaches to achieve food and nutritional security for enhancing profitability, employment, and climate resilience in India. *Food and Energy Security*, 11(2), 1–16. <https://doi.org/10.1002/fes3.321>
- Pot, V., Portell, X., Otten, W., Garnier, P., Monga, O., & Baveye, P. C. (2022). Understanding the joint impacts of soil architecture and microbial dynamics on soil functions: Insights derived from microscale models. *European Journal of Soil Science*, 73(3), 1–22. <https://doi.org/10.1111/ejss.13256>
- Rehsehuh, S., Jonard, M., Wiesmeier, M., Rennenberg, H., & Dannenmann, M. (2021). Impact of European Beech Forest Diversification on Soil Organic Carbon

- and Total Nitrogen Stocks—A Meta-Analysis. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4(February). <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.606669>
- Rodríguez-Hernández, P., Sanz-Fernández, S., Reyes-Palomo, C., Díaz-Gaona, C., Simões, J., & Rodríguez-Estévez, V. (2023). Climate Change Adaptation for Sustainable Extensive Livestock Farming in Southern Europe. *Sustainable Food Science - A Comprehensive Approach: Volumes 1-4*, 1-4, V4-311-V4-327. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823960-5.00067-6>
- Rosset, J. S., do Carmo Lana, M., Schiavo, J. A., de Cássia Piccolo, M., da Silva Rodrigues Pinto, L. A., Ziviani, M. M., & Pereira, M. G. (2022). Organic matter and isotopic composition of soils under different management systems in western Paraná State, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 81(4), 136. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10261-8>
- Sarkar, R., & McLawrence, J. (2023). Simulating soil-carbon-water interactions in two profiles to select precision cover for soil-health and drought-resilience. *Smart Agricultural Technology*, 4(March), 100218. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100218>
- Scopus (2024). <https://www.scopus.com/home.uri>
- Sekaran, U., Sagar, K. L., & Kumar, S. (2021). Soil aggregates, aggregate-associated carbon and nitrogen, and water retention as influenced by short and long-term no-till systems. *Soil and Tillage Research*, 208(May 2020), 104885. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104885>
- Sharma, P., Sharma, P., & Thakur, N. (2024). Sustainable farming practices and soil health: a pathway to achieving SDGs and future prospects. *Discover Sustainability*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00447-4>
- Siddique, K. H. M., Bolan, N., Rehman, A., & Farooq, M. (2024). Enhancing crop productivity for recarbonizing soil. In *Soil and Tillage Research* (Vol. 235). <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105863>
- Song, Y., Yao, S., Li, X., Wang, T., Jiang, X., Bolan, N., Warren, C. R., Northen, T. R., & Chang, S. X. (2024). Soil metabolomics: Deciphering underground metabolic webs in terrestrial ecosystems. *Eco-Environment and Health*, 3(2), 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2024.03.001>
- Sullivan, P. L., Billings, S. A., Hirmas, D., Li, L., Zhang, X., Ziegler, S., Murenbeeld, K., Ajami, H., Guthrie, A., Singha, K., Giménez, D., Duro, A., Moreno, V., Flores, A., Cueva, A., Koop, Aronson, E. L., Barnard, H. R., Banwart, S. A., ... Wen, H. (2022). Embracing the dynamic nature of soil structure: A paradigm illuminating the role of life in critical zones of the Anthropocene. *Earth-Science Reviews*, 225(November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103873>
- Tang, W., Yang, H., Wang, W., Wang, C., Pang, Y., Chen, D., & Hu, X. (2022). Effects of Living Grass Mulch on Soil Properties and Assessment of Soil Quality in Chinese Apple Orchards: A Meta-Analysis. *Agronomy*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy12081974>
- Taylor, A., Wynants, M., Munishi, L., Kelly, C., Mtei, K., Mkilema, F., Ndakidemi, P., Nasser, M., Kalnins, A., Patrick, A., Gilvear, D., & Blake, W. (2021). Building climate change adaptation and resilience through soil organic carbon restoration in sub-saharan rural communities: Challenges and opportunities. *Sustainability* (Switzerland), 13(19), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su131910966>
- Teixeira, C. dos S., Malysz, M., Savanciski, S., Gayger, A. L., Artusi, A. C., Delevatti, H. A. de A., Decian, V. S., Petry, C., Bayer, C., & Sausen, T. L. (2023). Monocultures negatively influence ecosystem services provided by roots, plant litter and soil C stocks in subtropical riparian zones. *Environment, Development and Sustainability*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03214-z>
- Thiengo, C., De Souza, G., Villalba Algarin, C. A., da Silva, D., & De Sá, E. (2024). Effects of soil tillage practices on soil conservation in pasture - based integrated management systems : a case study on steep slopes in southeastern Brazil. *Discover Soil*. <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00026-z>
- Tyagi, A., & Haritash, A. K. (2024). Climate-smart agriculture, enhanced agroproduction, and carbon sequestration potential of agroecosystems in India: a meta-analysis. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 2019(ESI 2020). <https://doi.org/10.1007/s13412-024-00917-1>
- Venkatesh, G., Gopinath, K. A., Ramana, D. B. V., Kumari, V. V., Srinivas, I., Shanker, A. K., Rao, K. V., Prasad, J. V. N. S., Reddy, K. S., Sridhar, K. B., Sarkar, B., Raju, B. M. K., Rajkumar, B., Chary, G. R., Singh, V. K., & Timsina, J. (2024). Agrosilvopastoral systems for improved crop and fodder productivity and soil health in the rainfed environments of South India. *Agricultural Systems*, 214(August 2023), 103812. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103812>
- Villalba Algarin, C. A., González, A. C., Szostak, J. E., Fabian, M., & Franco, S. (2024). Explorando el estado del arte de la labranza y su impacto en la calidad del suelo y la productividad agrícola : una revisión crítica de los últimos 20 años. *Investigación Agraria*, 26(2), 111–124.
- Vogel, H. J., Amelung, W., Baum, C., Bonkowski, M., Blagodatsky, S., Grosch, R., Herbst, M., Kiese, R., Koch, S., Kuhwald, M., König, S., Leinweber, P., Lennartz, B., Müller, C. W., Pagel, H., Rillig, M. C., Rüschoff, J., Russell, D., Schnepf, A., ... Wollschläger, U. (2024). How to adequately represent biological processes in modeling multifunctionality of arable soils. In *Biology and Fertility of Soils* (Vol. 60, Issue 3). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01802-3>
- Widyati, E., Nuroniah, H. S., Tata, H. L., Mindawati, N., Lisnawati, Y., Darwo, Abdulah, L., Lelana, N. E., Mawazin, Octavia, D., Prameswari, D., Rachmat, H. H., Sutiyono, Darwati, W., Wardani, M., Kalima, T., Yulianti, & van Noordwijk, M. (2022). Soil Degradation Due to Conversion from Natural to Plantation Forests in Indonesia. *Forests*, 13(11), 1–21. <https://doi.org/10.3390/f13111913>
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H. J., & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333(July 2018), 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- Yang, J., Li, A., Yang, Y., Li, G., & Zhang, F. (2020). Soil organic carbon stability under natural and anthropogenic-induced perturbations. *Earth-Science Reviews*, 205(April), 103199. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103199>
- Yang, Q., Peng, J., Ni, S., Zhang, C., Wang, J., & Cai, C. (2024). Soil erosion-induced decline in aggregate stability and soil organic carbon reduces aggregate-

- associated microbial diversity and multifunctionality of agricultural slope in the Mollisol region. *Land Degradation and Development*, 35(11), 3714–3726. <https://doi.org/10.1002/ldr.5163>
- Zhang, K., Maltais-Landry, G., & Liao, H. L. (2021). How soil biota regulate C cycling and soil C pools in diversified crop rotations. *Soil Biology and Biochemistry*, 156, 108219. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108219>
- Zhao, J., Liu, D., & Huang, R. (2023). A Review of Climate-Smart Agriculture: Recent Advancements, Challenges, and Future Directions. *Sustainability* (Switzerland), 15(4), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su15043404>
- Zhao, X., Liu, B. Y., Liu, S. L., Qi, J. Y., Wang, X., Pu, C., Li, S. S., Zhang, X. Z., Yang, X. G., Lal, R., Chen, F., & Zhang, H. L. (2020). Sustaining crop production in China's cropland by crop residue retention: A meta-analysis. *Land Degradation and Development*, 31(6), 694–709. <https://doi.org/10.1002/ldr.3492>
- Zong, D., Zhou, Y., Zhou, J., Zhao, Y., Hu, X., & Wang, T. (2024). Soil microbial community composition by crop type under rotation diversification. *BMC Microbiology*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03580->