

Recepción: 22 de junio de 2023

Aprobación: 21 de noviembre de 2023

CARBONO ORGÁNICO Y SU DINÁMICA EN SUELOS TROPICALES: UNA REVISIÓN

ORGANIC CARBON AND ITS DYNAMICS IN TROPICAL SOILS:
A REVIEW

CARBONO ORGÂNICO E SUA DINÂMICA EM SOLOS
TROPICAIS: UMA REVISÃO

Carmenza Pérez Fagua

Candidata a Doctora en Ciencias Agrarias
Universidad de los Llanos
cperezf@unillanos.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-7355-857X>

Ángela Yaneth Landínez-Torres

Ph. D. en Ciencias del Medio Ambiente
Universidad de Pavia - Italia
angelayaneth.landineztorres@unpv.it
<https://orcid.org/0000-0002-5360-5252>

Amanda Silva Parra

Ph. D. en Ciencias Agrarias
Universidad de los Llanos
asilvap@unillanos.edu.co
<https://orcid.org/0000-0001-9872-790X>

¿Cómo citar este artículo?

Pérez, C., Landínez-Torres, A., y Silva, A. (2023). Carbono orgánico y su dinámica en suelos tropicales: una revisión, *Cultura Científica*. (21). <https://doi.org/10.38017/1657463X.820>

RESUMEN

El 95 % del secuestro del carbono (C) tiene lugar en los trópicos. La transformación de los ecosistemas de bosque para una ganadería y agricultura intensiva, puede afectar la degradación de la materia orgánica del suelo (MOS). La revisión bibliográfica incluye una visión de diversas investigaciones con relación a la importancia del carbono orgánico del suelo (COS), como recurso natural no renovable que cumple diversas funciones en el suelo y la atmósfera, y garantiza la producción de alimentos a nivel global. Para la revisión, se realizó una búsqueda de la información bibliográfica en bibliotecas digitales como Google Académico, Science Direct y SciELO, usando palabras clave como "suelo" y "carbono" en inglés y español. Se analizó el estado del arte de publicaciones de los últimos diez años en temas relacionados con el ciclo del carbono, carbono y materia

orgánica, captura del COS y biomasa, y su dinámica, mediante la acción de microorganismos. Se revisaron diferentes alternativas de mitigación y adaptación frente al cambio climático focalizadas en zonas tropicales. El análisis bibliográfico indica que el C del suelo en zonas tropicales se ve afectado por factores relacionados como el clima, relieve, vegetación y material parental; sin embargo, la degradación de la MOS es causada por acciones antrópicas como cambios en los usos del suelo, debido a la deforestación del bosque y transformación de las sabanas. El COS y su dinámica cobra importancia en alternativas de producción para la captura de C de los suelos y la biomasa en sistemas de producción agropecuaria tropical.

Palabras clave: materia orgánica, servicios ecosistémicos, efecto invernadero, cambio climático.

ABSTRACT

Ninety-five percent of carbon (C) sequestration occurs in the tropics. The transformation of forest ecosystems for intensive livestock and agriculture can affect soil organic matter (SOM) degradation. This literature review includes an overview of various research studies regarding the importance of soil organic carbon (SOC) as a non-renewable natural resource that fulfills several functions in the soil and atmosphere, ensuring food production globally. For this review, a search of bibliographic information was carried out in digital libraries such as Google Scholar, Science Direct and SciELO, using keywords such as "soil" and "carbon" in English and Spanish. The state of the art of publications of the last ten years on topics related to the carbon cycle, carbon and organic matter, COS capture and biomass, and its dynamics, through the action of microorganisms, was analyzed. Different alternatives for mitigation and adaptation to climate change focused on tropical zones were reviewed. The literature review indicates that soil C in tropical zones is affected by related factors such as climate, topography, vegetation and parent material; however, degradation of SOM is caused by anthropogenic actions such as changes in land use, due to forest deforestation and transformation of forest cover. SOC and its dynamics are important in production alternatives for capturing C from soils and biomass in tropical agricultural production systems.

Keywords: organic matter, ecosystem services, greenhouse effect, climate change.

RESUMO

95% do sequestro de carbono (C) ocorre nos trópicos. A transformação dos ecossistemas florestais para a pecuária e agricultura intensivas pode afetar a degradação da matéria orgânica do solo (MOS). A revisão bibliográfica inclui uma visão de diversas pesquisas em relação à importância do carbono orgânico do solo (COS), como recurso natural não renovável que cumpre diversas funções no solo e na atmosfera, e garante a produção de alimentos em nível global. Para a revisão foi realizada uma busca de informações bibliográficas em bibliotecas digitais como Google Scholar, Science Direct e SciELO, utilizando palavras-chave como "soil" e "carbon" em inglês e espanhol. Foi analisado o estado da arte das publicações dos últimos dez anos sobre temas relacionados ao ciclo do carbono, carbono e matéria orgânica, captura de SOC e biomassa, e sua dinâmica, através da ação de microrganismos. Foram revisadas diferentes alternativas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas focadas em áreas tropicais. A análise bibliográfica indica que o C do solo em áreas tropicais é afetado por fatores relacionados como clima, relevo, vegetação e material de origem; Porém, a degradação da MOS é causada por ações antrópicas como mudanças no uso do solo, devido ao desmatamento florestal e transformação dos lençóis. O SOC e sua dinâmica tornam-se importantes em alternativas de produção para captura de C dos solos e biomassa em sistemas de produção agrícola tropical.

Palavras chaves: matéria orgânica, serviços ecossistêmicos, efeito estufa, mudanças climáticas.

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas tropicales se encuentran entre las latitudes 22 grados Norte y 22 grados Sur. Los ecosistemas predominantes en la mayoría de las áreas tropicales, son las selvas tropicales y las sabanas. Colombia está entre los países en los que se puede encontrar mayor extensión de selvas tropicales húmedas. Los bosques tropicales cada año, capturan y almacenan alrededor de 200 mil millones de toneladas de carbono (C), ayudando significativamente a reducir la cantidad de CO₂ en la atmósfera (IPCC, 2006).

Lal (2010) describe un aumento progresivo de la población mundial proyectada en 9.2 billones para el año 2050, donde la demanda de alimentos viene ocasionando una gran presión sobre el recurso suelo. La agricultura y la ganadería permiten la subsistencia de 900 millones de personas en el mundo, que viven con menos de \$1.9 dólares norteamericanos/día. Al mismo tiempo, estas actividades son un importante agente de emisiones de GEI (Soto-Pinto y Jiménez, 2018).

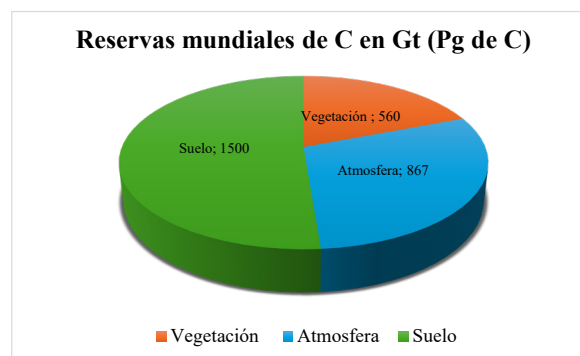
Con el paso de los años, los suelos tropicales se han visto afectadas por la deforestación, la minería, la explotación petrolera y la expansión

de la frontera agrícola y ganadera, y los usos intensivos del suelo, ocasionando pérdida de hábitats, la disminución de la materia orgánica del suelo (MOS) y la biodiversidad en estas áreas (Lal, 2008). Los terrenos agrícolas contienen aproximadamente entre 25 y 75 % menos COS que los ecosistemas naturales.

El C es un elemento importante del ciclo global, ya que ocupa el 69.8 % del C orgánico de la biósfera (Burbano, 2018), integra los procesos físicos, químicos y biológicos que lo controlan en sitios de almacenamiento como la atmósfera, hidrosfera, biosfera, rizosfera y litosfera. Esta capacidad de almacenamiento es muy variable (Martin, 2010).

Las reservas mundiales del COS varían entre 1,500 y 2,400 Pg, a una profundidad de 0 a 1 m (Lal, 2018, Smith et al., 2020, Lal et al., 2021). El suelo representa el reservorio terrestre más grande de C y equivale a aproximadamente tres veces las reservas de C en la vegetación y dos veces las reservas de C en la atmósfera (Smith et al. 2020, Lal et al. 2021), como se observa en la figura 1. Por consiguiente, los cambios pequeños en las reservas de C del suelo pueden, entonces, tener impactos considerables en la atmósfera y el cambio climático.

Figura 1. Reservas mundiales de C en Gt (Pg de C). (1 Pg o Petagramo = 10¹⁵ g C)



Nota. Tomada de Lal (2018).

Otras principales reservas de C, se encuentran en los fondos marinos y en los depósitos geológicos minerales (rocas carbonatadas y combustibles fósiles) (IPCC, 2006). Con la aparición de la vida sobre el planeta, se sobrepuso al ciclo geoquímico del C, el biogeoquímico o de ciclo rápido, en el cual dominan dos grandes transferencias anuales de C: i) el flujo de dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera a las plantas como resultado de la fotosíntesis y ii) la descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS) que ocasiona el regreso de CO₂ a la atmósfera (Jaramillo, 2004). Este último es de gran importancia, si se considera que los contenidos de COS dependen principalmente de factores a largo plazo relacionados con la formación del suelo, pero pueden ser fuertemente modificados, degradados o mejorados por los cambios en el uso y manejo del suelo (Cunlata et al., 2013).

A nivel del suelo, la asimilación del C en los cultivos se presenta por medio de la fotosíntesis, y entra en el sistema como un residuo de la biomasa aérea y la raíz. El material orgánico muerto es colonizado por diversos organismos del suelo, extrayendo energía para el crecimiento y descomposición oxidativa de moléculas orgánicas complejas. Durante este proceso, aproximadamente la mitad del C es mineralizado y liberado como CO₂.

La captura de COS en el suelo mejora la calidad, fertilidad, retiene humedad, nutrientes y reduce la erosión; caso contrario, se reduce la productividad agrícola y forestal, incrementando problemas relacionados con la seguridad alimentaria (Paz et al., 2016). El uso y manejo inadecuado del recurso suelo, como son la sobreexplotación y

la deforestación, producen impactos negativos en el COS debido a la erosión de los suelos (Landínez-Torres, 2017).

En el trópico, el proceso de descomposición acelerada de la MOS se ve afectado por el modelo de la destrucción del bosque y sabanas nativas a sistemas convencionales de agricultura, y el sobrelaboreo que provoca la degradación de la MOS, principalmente en la capa arable, debido al bajo o nulo aporte de residuos, incremento de la temperatura y destrucción de macro y micro-agregados en el suelo (Céspedes et al., 2012).

El Panel Intergubernamental de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, IPCC (por sus siglas en inglés), en el informe del 2013, sugirió que el calentamiento global ha sido un fenómeno incuestionable durante los últimos 50 años (Broda et al., 2018). La actividad antrópica causa pérdida de la biodiversidad, contaminación de aguas y alta vulnerabilidad a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Petit et al., 2011); el incremento de los eventos climáticos, como sequías y precipitaciones intensas, influyen en este cambio (Jumbo et al., 2018). Estas situaciones inciden en un incremento de los GEI producidos por el aumento en la atmósfera de gases como CO₂, CH₄, NO y vapor de agua, entre otros (Orellana et al., 2012), causadas, en gran medida, por el manejo intensivo del suelo para la producción de alimentos.

El manejo de los suelos está relacionado con las emisiones de GEI (Silva-Parra, 2018). Los suelos tropicales son generalmente pobres y ácidos, compuestos por arena, limo y arcilla de óxidos de Fe y Al y caolinitas, que

representan entre 9-40, 10-55 y 14-72 %, respectivamente. Existe una alta variabilidad en la composición mineralógica, principalmente Oxisoles, Ultisoles e Inceptisoles (Malagón, 2003). La arcilla afecta de forma positiva al almacenamiento de COS (Ruiz Potma Goncalves et al., 2017).

Por otra parte, en suelos del trópico, las altas temperaturas y altitud influye en la composición y la diversidad de las especies microbianas, la biomasa microbiana (BM) y la MOS que se almacena en el suelo (Colmenares et al., 2017). Los suelos de zonas tropicales con altas precipitaciones y pendientes predisponen a los suelos a la degradación física, química y biológica de la MOS, debido a la erosión del suelo (Zhang et al., 2018).

Los esfuerzos generados en la adopción de SAF en el trópico han sido referenciados por varios autores para mejorar las cualidades de la MOS (Nair et al., 2010; Silva-Parra, 2018; Mora, 2019); el potencial que tienen estos sistemas en el almacenamiento de C del suelo y la biomasa, ayudan en parte a reducir las emisiones de GEI al ambiente (IPCC, 2006; Anguiano et al., 2013; Cotler et al., 2016).

Otras alternativas para suelos tropicales como las coberturas de leguminosas, incorporación de residuos, rotación de cultivos y uso de compost, influyen no solo en la actividad de los microorganismos del suelo y la agregación, sino que también regulan otros procesos importantes. Estos procesos, como la mineralización e inmovilización microbiana, la relación C/N y la humificación, dependen del tipo de microorganismo dominante.

A través de estos procesos, se libera N, P y otras formas de nutrientes que afectan la producción de la MOS (Orozco et al., 2016).

El objetivo del presente trabajo fue realizar una revisión bibliográfica relacionada con el ciclo del C, el COS y su dinámica en suelos tropicales, con la finalidad de mejorar la calidad de la MOS, ofrecer múltiples servicios ecológicos y sociales, a través de la captura de C por sistemas agropecuarios más amigables con el medio ambiente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la búsqueda de información bibliográfica, se utilizó la base de datos de Google Académico, Science Direct y SciELO, utilizando palabras clave como "suelo" y "carbono" en inglés y español. Se analizó el estado del arte de publicaciones de los últimos diez años, en temas relacionados con la dinámica del COS en suelos tropicales.

El tipo de estudio de la presente revisión se considera de tipo descriptivo crítico, en la medida en que permite interpretar los reportes científicos consultados, para la generación de una revisión más actualizada que genere nuevo conocimiento en el tema.

Se consultaron en la literatura varias alternativas de producción para potenciar las reservas de COS en suelos tropicales como la labranza de conservación, la fertilización de cultivos y pasturas, cultivos de cobertura, rotación de cultivos, sistemas agropecuarios integrados como los sistemas silvopastoriles (SSP), y sistemas agroforestales (SAF),

el uso de enmiendas orgánicas, entre otros (Paustian *et al.*, 2016; Cusack *et al.*, 2011; Jun *et al.*, 2013; Silva-Parra, 2018; Lal *et al.*, 2021; Koutika, 2022).

3. RESULTADOS

3.1 Importancia del ciclo biogeoquímico del carbono

El ciclo biogeoquímico es fundamental para la regulación del clima de la Tierra, controla la transferencia de C entre el suelo y la atmósfera (IPCC, 2006), por lo que analizar este proceso es prioridad para comprender las consecuencias del incremento acelerado de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, y lograr diseñar estrategias con el fin de reducir sus emisiones (Vásquez y Macías, 2017). La deforestación ha causado la emisión de grandes cantidades de GEI, que corresponden entre un 6 a 17 % de las emisiones antropogénicas de CO₂ a la atmósfera. La acumulación de GEI en la atmósfera, principalmente de CO₂, ha mostrado un aumento de 280 a 375 ppm en los últimos 200 años, a una tasa promedio de 1,5 ppm por año (Aranda y Ley-de Coss, 2018). Entre los años 2000 y 2010, se emitieron aproximadamente 1,0 Pg3C/año por destrucción del bosque tropical y cambios en el uso de la tierra (Andrade *et al.*, 2016).

Han surgido diversos estudios relacionados con la función que cumplen los sistemas edáficos como fuentes y sumideros de carbono, para así contribuir en la mitigación de los efectos negativos del calentamiento global y minimizar las emisiones de GEI como resultados de prácticas agrícolas y pecuarias inadecuadas (IPCC, 2006).

Según Lok *et al.* (2013), en el suelo, el

C se eleva a 2.500 Gt. De esta cantidad, 1.550 Pg se encuentra en forma de carbono orgánico y 950 Pg inorgánico. Este contenido puede variar; en zonas áridas, el primer metro de suelo solo alcanza hasta 30 t·ha⁻¹, mientras que en las turberas ubicadas en latitudes altas se registran hasta 800 t·ha⁻¹; en el caso de las zonas tropicales, el contenido fluctúa entre 50 y 150 t·ha⁻¹. Estos contenidos en los suelos pueden ser resultado principalmente del incremento en las tasas de entrada y el decremento en las tasas de descomposición de la MOS, la translocación de la MOS hasta profundidades mayores a los 10 cm y la mejora de la protección física o química del suelo (Paz *et al.*, 2016).

Según Jaramillo (2004), el balance neto del C incluye los ciclos lento y rápido, el ciclo rápido del C involucra a las plantas superiores, ellas adquieren el CO₂ atmosférico por difusión a través de los estomas de las hojas, y es transportado a los sitios de intercambio donde se lleva a cabo la fotosíntesis, donde cierta cantidad de este CO₂ regresa a la atmósfera. La cantidad que se fija y se convierte en carbohidratos durante la fotosíntesis, es conocida como producción primaria bruta (PPB), la cual se ha estimado globalmente en 120 PgC/año. La mitad de la PPB (60 PgC/año) se incorpora en la estructura de los tejidos vegetales, como hojas, raíces y tejido leñoso, y la otra mitad regresa a la atmósfera como CO₂, debido a la respiración autotrófica (Ra) de los tejidos vegetales.

En este sentido, el crecimiento de las plantas está dado por la diferencia entre el C fijado y el respirado (PPB Ra), o producción primaria neta (PPN),

y a nivel global se ha estimado en 60 PgC/año. Eventualmente, en el transcurso de pocos a muchos años, casi todo el C fijado o de la PPB, por vía de la PPN, regresa a la atmósfera por medio de dos procesos: i) La respiración heterótrofa (Rh), que incluye a los descomponedores de la materia orgánica (bacterias y hongos que se alimentan de tejidos muertos y de exudados) y a los herbívoros; gran parte de la biomasa muerta se incorpora al detritus y a la materia orgánica del suelo, donde es "respirada" a diferentes velocidades dependiendo de sus características químicas. Se producen así almacenes de C en el suelo que regresan el C a la atmósfera en diferentes periodos, y ii) Por la combustión de las quemaduras o antropogénicas. La diferencia entre la fijación de C por la PPN y las pérdidas por el Rh, en ausencia de otras perturbaciones que producen pérdidas de carbono (p. ej. el fuego o la cosecha), se conoce como la producción neta del ecosistema (PNE).

Cuando se contabilizan todas las pérdidas de C, tales como las quemaduras, la cosecha o la remoción, el transporte por los ríos a los océanos (ciclo lento) y la erosión, lo que queda es el C que se acumula efectivamente en la biosfera a nivel global, la cual se conoce como la producción neta del bioma (PNB). Esta se ha calculado en 0.2 a 0.4 Pg C/año en las décadas de los 80 y 90, respectivamente. Sin embargo, los suelos liberan aproximadamente el 4 % de su almacén (60 Pg) a la atmósfera, que es diez veces la combustión de combustibles fósiles, debido a la intervención antrópica en los ecosistemas.

3.2 Carbono y materia orgánica en el suelo

El reservorio de C en el suelo está formado por la fracción orgánica (C orgánico) y la fracción mineral (C inorgánico), variando en función del tipo de suelo y de la zona climática (Fuentes et al., 2010), e influyen en las propiedades edáficas controladas parcialmente por la cobertura vegetal y el uso del suelo (Yescas et al., 2018). La capacidad de almacenamiento de C puede variar entre 1500 y 2000 Pg; este elemento predomina en la MOS, 45-55 %, y determina la calidad del suelo como fuente y almacén de nutrientes (Galicia et al., 2016).

De acuerdo con Bolaños et al. (2016), a nivel mundial, los suelos del orden taxonómico Histosoles almacenan mayor cantidad de C (357 Pg), seguido por los Inceptisoles (352 Pg) y Entisoles (148 Pg), presentando una mayor densidad de C los Histosoles con 2045.85 Mg·ha⁻¹, los Inceptisoles con 305.64 Mg·ha⁻¹ y los Andosoles con 163.11 Mg·ha⁻¹. Todos ellos son suelos tropicales, donde los Oxisoles son pobres en la MOS (Malagón, 2003).

El C orgánico almacenado en el suelo es parte fundamental de la MOS, influye en las propiedades como la estructura, capacidad de intercambio catiónico, retención de agua, densidad aparente, porosidad e infiltración (Bojórquez *et al.*, 2015); propiedades que pueden tener cambios al ser alteradas en los diferentes sistemas de producción por las labores de la producción de cultivos (Lal, 2008).

La materia orgánica activa (MOA) representa alrededor del 10-30 % de

la materia orgánica total (MOT) del suelo, constituida por los organismos del suelo, 20 %, donde la microbiota es responsable de procesos de descomposición de los substratos orgánicos (fracción lábil) y resíntesis de sustancias que dan origen a otros productos metabólicos como mucílagos, gomas, ácidos, enzimas, polisacáridos extracelulares (sustancias orgánicas no húmicas) y, por supuesto, CO₂ (Mora et al., 2009), que participan temporariamente en la formación de macro-agregados del suelo. Igualmente, esta BM se compone por restos vegetales y animales en descomposición y mezclas amorfas coloidales de sustancias orgánicas complejas de alto peso molecular conformada por ácidos fúlvicos, húmicos y huminas (70-90 % de la MOT) (Eyherabide et al., 2014), y que junto con las arcillas forman complejos recalcitrantes, para dar formación a los micro-agregados del suelo.

En los Oxisoles, predominan los ácidos fúlvicos/ácidos húmicos como resultado de las condiciones climáticas y del suelo, especialmente en suelos poco fértiles (Malagón, 2003), lo que predispone a una materia orgánica del suelo (MOS) más frágil que en otros tipos de suelo. En consecuencia, en zonas tropicales donde se lleva a cabo la transformación de bosques naturales a sabanas y/o cultivos, los suelos son productivos en los primeros años, pero con el tiempo pierden su capacidad productiva debido a ácidos fúlvicos menos polimerizados que favorecen la degradación acelerada de la MOS.

En suelos tropicales, el efecto de la labranza convencional en sistemas de monocultivo, ocasiona la destrucción

de los macro-agregados dejando expuestos el COS encapsulado dentro del micro-agregado, a procesos de erosión y pérdidas considerables (Burbano, 2018). Se ha reportado que la siembra directa no siempre detiene la degradación del suelo en relación con la agregación y el almacenamiento de C en el suelo (González-Rosado et al., 2022).

Estos temas de interés sobre la degradación de los suelos deben ser investigados a mayor profundidad en suelos de zonas tropicales. Silva-Parra (2018), en sistemas productivos de la Altillanura Plana de la Orinoquia de Colombia, encontró un CD de arcillas de 35.12 %, indicando sellamiento del suelo y susceptibilidad a procesos erosivos, donde los contenidos de COS presentaron niveles de bajos a medios entre 0.92-2.90 %, valores que influyeron en el almacenamiento del COS que variaron entre un 44.58-81.61 t C ha⁻¹.

La MOS es un indicador del estado o salud del suelo debido a su contribución en procesos vitales dentro del ecosistema (Lupi *et al.*, 2012), abarca tanto azúcares muy simples, como productos recalcitrantes que son el resultado de transformaciones microbianas, presentando un grado de evolución continuo que va desde material vegetal original hasta material orgánico transformado con características propias (humus) (Santos y Velasco, 2016). Según Irizar *et al.*, (2010), los procesos de mineralización y humificación están condicionados por la actividad microbiana presente en el suelo, limitándose en repetidas ocasiones a la velocidad y al equilibrio entre procesos del contenido total de la

materia orgánica obtenida (Gamarra *et al.*, 2018). Prácticas agronómicas como la aplicación óptima de fertilizantes afecta directamente la capacidad metabólica de las comunidades bacterianas del suelo, lo que puede desacelerar la descomposición del C recalcitrante y, potencialmente, resultar en tasas avanzadas de secuestro de C en el suelo (Yuan *et al.*, 2021). Alternativas de manejo de los suelos tropicales deben ser investigadas a mayor profundidad, con el fin de reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Según Mora *et al.* (2019), varios estudios reportan los beneficios de la aplicación de compost semimaduros en procesos de recuperación de suelos degradados por procesos erosivos o pérdida de la MOS. Tales efectos del compost pueden medirse mediante parámetros como la estabilidad de agregados, la resistencia a la penetración, la densidad aparente, la cantidad de agua retenida y la porosidad total.

La revisión destaca la necesidad de avanzar en investigaciones más sólidas sobre la edad de compostaje. Esto posibilitaría la obtención de compost biológicamente activo, que actúe como mejorador de la calidad del suelo, abordando aspectos físicos, químicos y biológicos. En los suelos tropicales, donde la materia orgánica del suelo (MOS) se degrada rápidamente, las enmiendas orgánicas con baja relación C/N pueden tener un efecto negativo en dichos suelos.

3.3 Microorganismos y su función en la dinámica de la captura de carbono.

El concepto de la calidad del suelo está asociado a las principales

contribuciones de la microbiota, que incluye arqueobacterias, bacterias, hongos, virus, algas o actinomicetos, entre otros; además, su composición en el suelo, funcionamiento, estabilización y ciclo de nutrientes en los agroecosistemas (Landínez *et al.*, 2019). De acuerdo con Beltrán y Lizarazo (2013), las comunidades microbianas son responsables de impulsar los procesos esenciales del ecosistema y son particularmente sensibles a los cambios inducidos en la calidad del suelo, principalmente por incendios forestales o perturbaciones (Barreiro y Díaz-Raviña, 2021). Por otra parte, contribuyen significativamente al cambio climático a través de la retroalimentación del ciclo rápido del C del suelo (Li *et al.*, 2021).

La fauna del suelo desempeña la función de llevar a cabo la descomposición o mineralización de los residuos vegetales y las sustancias húmicas mediante procesos oxidativos (Serrato *et al.*, 2014). Además, participa en procesos de inmovilización de la materia orgánica del suelo (MOS), reciclaje de nutrientes, flujo de energía y agregación del suelo, donde alteraciones en la constitución de la microbiota, pueden afectar las modificaciones biogeoquímicas de los elementos químicos de interés agropecuario (Reis, 2017). Estas actividades están directamente relacionadas con la respiración basal del suelo que expresa la suma total de todas las funciones y procesos metabólicos en los que el CO₂ es producido.

Los agroecosistemas dominados por hongos están asociados a ecosistemas más estables y eficientes en el reciclaje de nutrientes y son más ricos en

carbono orgánico (Lavelle, 2013). Sin embargo, estos sistemas son más susceptibles a las perturbaciones externas. Por su parte, las bacterias pueden tolerar de una mejor manera las perturbaciones externas del medio ambiente, ya que están presentes como células individuales, y colonizan de manera más eficiente, aprovechando la materia orgánica recién disponible y los componentes orgánicos más lábiles (Mora *et al.* 2019).

3.4 Captura de carbono en suelo y biomasa y su dinámica en el suelo

Las plantas, a través de la fotosíntesis, capturan el CO₂ de la atmósfera y devuelven el oxígeno, una parte de los carbohidratos sintetizados son oxidados durante la respiración para generar la energía requerida por los procesos metabólicos (Hernández *et al.* 2012). De igual manera, las especies vegetales mantienen este proceso natural en un flujo constante de absorción de C y fijación del mismo, para nutrir el suelo y promover el crecimiento de estas (Yerena *et al.* 2014). Este proceso es afectado principalmente por la eliminación de la cubierta vegetal, y el cambio del uso del suelo que provoca liberación de CO₂ (Cordova *et al.*, 2008).

La medición en las existencias del COS es determinada por el almacenamiento del carbono orgánico total (COT) o "stock de C", a partir de la MOS por el método de Walkley and Black, tomado a diferentes profundidades a través de un perfil de suelo, considerando la densidad aparente del suelo y la pedregosidad (IPCC, 2006). Se estima que el C en la biomasa de las plantas corresponde al 45 % de la materia seca por métodos destructivos, también

se puede estimar a partir de diversas ecuaciones alométricas dependiendo de las zonas de estudio (Honorio y Baker, 2010). En bosques tropicales se ha documentado que los biotipos arbóreos son los más importantes ecológicamente, debido al mayor control de energía y la entrada y salida de nutrientes en suelos pobres en MOS, como en la captura de C en la biomasa (Nair *et al.*, 2010).

Cárdenas *et al.* (2012) señalan a los SSP de los trópicos, como alternativas frente a los sistemas de pasturas convencionales para mejorar la MOS y disminuir el efecto invernadero capturando el C en el suelo y la biomasa, con capacidad de capturar el C en el largo plazo, donde el estiércol dejado por los animales también contribuye a enriquecer la MOS (Mora *et al.* 2019).

Contreras *et al.* (2020) analizaron sistemas silvopastoriles del Caribe colombiano, y encontraron que la acumulación de C varía entre 60,6 y 65,1 t ha⁻¹ de C en comparación con el sistema tradicional ganadero de pasturas sin árboles, donde se detectó una acumulación de 38,3 t ha⁻¹ de C, lo que podría incrementar la productividad ganadera de manera sostenible.

Se suman a los anteriores esfuerzos ambientales y productivos, los SAF o cultivos asociados con árboles, que permiten beneficios a los campesinos al obtener no solo productos como frutos, madera, leña, sino la posibilidad de pago directo por el servicio ambiental o bonos ambientales (Nair *et al.*, 2010; Hidalgo, 2011; Torres *et al.*, 2011), y que han demostrado tener capacidad de captura de CO₂ acorde

con la productividad de los sistemas y de las condiciones ambientales bajo los que se cultiva (Sánchez *et al.*, 2011; Marcos *et al.*, 2016). Africano *et al.* (2016) analizaron la captura de C a través de los páramos de

Boyacá (Colombia), como sistemas importantes en la regulación del clima. La tabla 1 presenta algunas alternativas para el secuestro de C en el suelo y la biomasa de árboles y pasturas de zonas tropicales.

Tabla 1. Prácticas de manejo o de usos del suelo en la captura de C (tC/ha/año) en biomasa y suelo en zonas tropicales

Sistema	Localidad	Suelo	Biomasa	Autor
SSP de Acacia mangium + pastura mejorada	Orinoquia (Colombia)	+2.64 ¹	---	Silva-Parra (2018)
SAF de caucho + leguminosas de cobertura	Orinoquia (Colombia)	+0.37 ¹	----	Silva-Parra (2018)
SAF de cacao	Waslala (Nicaragua)	+2.84 ²	+2.0	Poveda <i>et al.</i> (2013)
Cacaotales de 37 años	Tolima (Colombia)	---	+1.3	Andrade <i>et al.</i> (2013)
Sistema agroforestal de café con plátano + leguminosas	Orinoquia (Colombia)	+2.37 ¹	---	Silva-Parra (2018)
Cultivos con cobertura viva o muerta	América Latina y el Caribe	+0.1 - +0.3	---	Lal (1999)
Labranza de conservación	América Latina y el Caribe	+0.2 - +0.5	---	Lal (1999)
Labranza mínima	Brasil	+1.6	---	Amado <i>et al.</i> (2006)
Labranza convencional		+0.12		
SAF de cacao	Ecuador	----	+3.0	Jadan <i>et al.</i> (2015)

¹ Obtenidos a partir de la aplicación de la metodología del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2006).

² Calculado de datos de Poveda *et al.* (2013).

Las evidentes variaciones en la captura de C del suelo y biomasa, dependen de muchas variables como lo confirman numerosos autores a través de la revisión realizada (Fuentes et al., 2010; Galicia et al., 2016; Yescas et al., 2018; Canal et al., 2019). El IPCC (2006) proporciona valores por defecto para determinar la dinámica en los cambios en las existencias del COS, por efecto de factores como cambios en los usos del suelo, tipo de labranza y niveles de incorporación de residuos.

Silva-Parra (2018), aplicando la metodología del IPCC (2006) en la Orinoquia, encontró que la conversión de monocultivo de arroz para rotación con maíz y soya, se estaría aumentando el stock de C en cerca de $12.31 \text{ t C ha}^{-1}$ en 20 años, equivalente a $0.61 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo cual reduciría las emisiones en $2.27 \text{ t CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En las regiones tropicales, las pérdidas del COS en un 25 % a 36 cm de profundidad y de 30 % a 48 cm de profundidad (método de masa de suelo equivalente), pueden ocurrir por la conversión del bosque primario a cultivos de tierra y/o a cultivos perennes, respectivamente (Don et al., 2011).

Giraldo et al. (2018), comparando una pastura de *Pennisetum clandestinum* sin árboles con un SSP de la misma pastura con *Acacia decurrens* de 6 años de edad, encontraron que el almacenamiento del COS varió de 139.99 a 156.21 t C ha^{-1} . Hoy en día, se propende por recuperar los bosques de las zonas tropicales o de tratar de imitar el bosque natural con los SAF (Nair et al. 2010).

3.5 Dinámica del COS

Los microorganismos son los principales mediadores de la tasa de

recambio del carbono en el suelo. La biomasa microbiana (BM) es el indicador más importante de la composición microbiana en el suelo, especialmente en combinación con un parámetro de actividad tal como la producción de CO_2 (Yichao et al., 2017). La actividad microbiana medida en términos de la relación entre el CO_2 producido por la respiración microbiana y el carbono de la BM, denominado cociente metabólico ($q\text{CO}_2$), es una medida indicadora de modificaciones en procesos edáficos (Ferrerías, 2009). Una actividad respiratoria más elevada en relación al tamaño de la BM, indica una menor eficiencia metabólica de los microorganismos, reflejada por una mayor energía de mantenimiento como respuesta a la baja disponibilidad de nutrientes o sustratos como el carbono orgánico.

Los métodos más usados para medir la dinámica del COS son el recuento de poblaciones y los de extracción-fumigación, estos se relacionan con la función que tienen en la transformación de nutrimentos, su papel en la formación y estabilización de la estructura del suelo y como indicadores biológicos (Mora et al., 2019). Las mediciones del C microbial, el desprendimiento de CO_2 del suelo, la presencia de ácidos nucleicos y enzimas, o los productos metabólicos, dan una idea de la dinámica de la microbiota y, por lo tanto, de los procesos bioquímicos que en él se desarrollan (Vallejo, 2013).

En suelos tropicales con bajos contenidos de MOS, la aplicación de residuos con una alta relación C/N aportan a los procesos de estabilización de la MOS (Burbano, 2018). Residuos de maíz con altos contenidos de lignina y relación C/N alta, favorecen

los procesos de humificación en los suelos (Bordin et al., 2008). La Relación C/N de bacterias y hongos del suelo es menor a 15, lo que implica que, con valores bajos de C/N en los residuos producto de la rotación de cultivos u otras prácticas agropecuarias, los microorganismos serán más eficientes en la descomposición de la MOS. El cultivo de soya es una leguminosa que tiene un excelente potencial para dinamizar suelos del trópico, para incrementar las entradas de N; resultando en incrementos en producción de biomasa y acumulación de C y N del suelo (Amado et al., 2006).

Los sistemas de producción animal de los trópicos basados en pastoreo como los SSP, donde el ingreso de materiales orgánicos al suelo como estiércol, orina, hojarasca, exudados de raíces, etc., podría mejorar la BM como un indicador para la evaluación de los cambios asociados en el sistema (Mora et al., 2019). Para suelos tropicales deberán ser mayormente estudiadas alternativas de la dinámica del COS relacionados con la actividad de macro y microorganismos, que se puedan usar en términos predictivos para comprender los procesos que se asocian a los cambios de uso del suelo y la vegetación (Landínez et al., 2020).

De acuerdo con la revisión, existen vacíos de investigación en suelos del trópico, como es conocer a mayor profundidad la complejidad de la diversidad microbial y sus relaciones con la MOS; los factores biofísicos y climáticos, intrínsecos y extrínsecos al sistema suelo, y los cambios en los usos del suelo y de sus prácticas de manejo, que determinan las alteraciones que se suceden en el suelo y la MOS, bajo

escenarios de cambio climático extremo, soportados con proyecciones de GEI .

4. CONCLUSIONES

En la presente revisión, se constató el papel que desempeñan los suelos tropicales en revertir los procesos de emisión de CO₂ a la atmósfera, mediante los sistemas integrados de cultivos como los SSP y los SAF, entre otras prácticas agropecuarias, como la rotación de cultivos, la fertilización de cultivos, y las enmiendas orgánicas en el secuestro de COS y mayor producción de biomasa. La diversidad de métodos de la dinámica del COS, está relacionada con la complejidad de las comunidades microbianas del suelo y su actividad, usados como indicadores biológicos claves para definir problemas de degradación y/o sustentabilidad de los suelos tropicales. En zonas del trópico, suelos provistos de MOS pueden asegurar una producción sostenida y de calidad para una mejor seguridad alimentaria, frente a una población mundial creciente, con derechos incluyentes que les permita definir sus propias políticas y estrategias sustentables de producción frente al cambio climático.

Los SAF y otros ecosistemas naturales del trópico, como sumideros importantes de COS por el papel que asumen para el secuestro de C en la biomasa, pueden representar un mercado alternativo en el esquema de pagos por servicios ambientales, para contribuir a mitigar los efectos negativos de GEI al ambiente, actuando en la regulación del cambio climático global y el crecimiento económico del sector agropecuario.

REFERENCIAS

- Africano, K., Cely, G. y Serrano, P. (2016). Potencial de captura de CO₂ asociado al componente edáfico en páramos Guantiva-La Rusia, departamento de Boyacá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 21(1), 91-110. <https://doi.org/10.19053/01233769.4572>
- Amado, T.J.C., Bayer, C., Conceicao, P.C., Spagnollo, E., Campos, B.C. y Veiga, M. (2006). Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. *Journal of Environmental Quality*, 35, 1599-1607. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0233>
- Andrade, H.J., Figueroa, J.M.P. y Silva, D.P. (2013). Carbon storage in cacao (*Theobroma cacao*) plantations in Armero - Guayabal (Tolima, Colombia). *Scientia Agroalimentaria*, 1, 6-10. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5624645>
- Andrade, H., Segura, M. y Rojas, A. (2016). Carbono orgánico de suelo en bosques riparios, arrozales y pasturas en Piedras, Tolima, Colombia. *Agronomía mesoamericana*, 27(2), 233-241. <https://doi.org/10.15517/am.v27i2.24359>
- Anguiano, J. M., Aguirre, J. y Palma, J. M. (2013). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de cocos nucifera *Leucaena leucocephala* var. Cunningham y *Pennisetum purpureum* Cuba CT-115. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(1), 149-160. <https://www.redalyc.org/pdf/837/83725698009.pdf>
- Aranda, R. y Ley-de Coss, A. (2018). Captura de carbono en la biomasa aérea de la palma de aceite en Chiapas, México. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 629-637. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.32076>
- Barreiro, A. y Díaz-Raviña, M. (2021). Fire impacts on soil microorganisms: Mass, activity, and diversity. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 22, 100-264. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100264>
- Beltrán, M. y Lizarazo, L. (2013). Grupos funcionales de organismos en suelos de páramo perturbados por incendios forestales. *Revista de Ciencias*, 17(2), 121-136. <https://doi.org/10.25100/rc.v17i2.490>
- Bojórquez, J., Castillo, L., Hernández, A., García, J. y Madueño, A. (2015). Cambios en las reservas de carbono orgánico del suelo bajo diferentes coberturas. *Cultivos tropicales*, 36(4), 63-69. <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v36n4/ctr08415.pdf>
- Bolaños, M., Paz, F., Cruz, C., Argumedo, J., Romero, V. y De la Cruz, J. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra latinoamericana*, 34, 271-278. <http://www.>

scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00271.pdf

- Bordin, I., Neves, C.S.V.J., Medina, C.C., Santos, J.C.F. y Torres E, U.S. (2008). Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 12, 1785-1792. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001200020>
- Broda, M., Mazela, B. y Frankowski, M. (2018). Durability of wood treated with aatmos and caffeine - towards the long-term carbon storage. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 20(3), 455-468. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005031501>.
- Burbano, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. (U. d. Nariño, Ed.) *Revista Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82-96. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Canal, D. y Andrade, H. (2019). Sinergias mitigación - adaptación al cambio climático en sistemas de producción de café (*Coffea arabica*), de Tolima, Colombia. *Revista de Biología Tropical* (67), 36-46. <https://doi.org/10.15517/rbt.v67i1.32537>
- Cárdenas, E., Bustamante, Á., Espitia, J. y Páez, A. (2012). Productividad en materia seca y captura de carbono en un sistema silvopastoril y un sistema tradicional en cinco fincas ganaderas de piedemonte en el departamento de Casanare. *Revista de Medicina Veterinaria* (24), 51-57. <https://doi.org/10.19052/mv.1339>
- Céspedes, F., Fernández, J., Gobbi, J. y Bernardis, A. (2012). Reservorio de carbono en el suelo y raíces de un pastizal y una pradera bajo pastoreo. *Fitotencia Mexicana*, 35(1), 79-86. <https://doi.org/10.35196/rfm.2012.1.79>
- Colmenares, C., Silva, A. y Mogollón, Á. (2016). Impacts of different coffee systems on soil microbial populations at different altitudes in Villavicencio (Colombia). *Agronomía Colombiana*, 34(2), 285-291. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n2.55420>
- Contreras, J., Martínez, J., Cadena, J. y Falla, C. (2020). Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe colombiano. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 29-41. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=436/43663511002>
- Cotler, H., Martínez, M. y Etchevers, J. (2016). Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación y Políticas Públicas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 125-138. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n1/2395-8030-tl-34-01-00125.pdf>
- Cunalata, C., Inga, C., Recalde, C. y Echeverría, M. (2013). Determinación de carbono orgánico total presente en el suelo y la biomasa de los páramos de las comunidades del chimborazo y shobol llinllin en Ecuador. *Boletín del Grupo Español de Carbón*, (27), 10-13. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=18807>.
- C Cusack, D. F., Silver, W. L., Torn, M. S., Burton, S. D. y Firestone, M. K.

- (2011). Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests. *Ecology Ecological Society of America*, 92(3), 621-632. <https://doi.org/10.1890/10-0459.1>
- Don, A., Schumacher, J. y Freibauer, A. (2011). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a metaanalysis. *Global Change Biology*, 17, 1658-1670. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>
- Eyherabide, M., Saínz, H., Barbieri, P. y Echeverría, H. (2014). Comparación de métodos para medir carbono orgánico en suelo. *Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*, 32(1), 13-19. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/25777/CONICET_Digital_Nro.6092f0df-9d4b-4597-a8ad-7433176558ac_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Ferreras, L., Toresani, S., Bonel, B., Fernández, E., Bacigaluppo, S., Faggioli, V. y Beltrán, C. (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del suelo*, 27(1), 103-114.
- Fuentes, J. A., Cantero, C., López, M. y Arrúe, J. (2010). *Fijación de C y reducción de emisiones de CO₂*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (España). <http://hdl.handle.net/10261/40465>
- Galicia, L., Gamboa, A. M., Cram, S., Chávez, B., Peña, V., Saynes, V. y Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra latinoamericana*, 34(1), 1-39. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n1/2395-8030-tl-34-01-00001.pdf>
- Gamarra, C., Díaz, M., Vera, M., Galeano, M. y Cabrera, A. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana Ciencias Forestales*, 9(46), 4-25. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>
- Giraldo, A., Zapata, M. y Montoya, E. (2008). Carbon capture and flow in a silvopastoral system of the Colombian Andean zone. *Asociación Latinoamericana de Producción Animal*, 16(4), 241-245.
- González-Rosado, M., Parras-Alcántara, L., Aguilera-Huertas, J. y Lozano-García, B. (2022). No-Tillage Does Not Always Stop the Soil Degradation in Relation to Aggregation and Soil Carbon Storage in Mediterranean Olive Orchards. *Agriculture*, 12, 407. <https://doi.org/10.3390/agriculture12030407>
- Hernández, E., Campos, V., Enríquez, J., Rodríguez, G. y Velasco, V. (2012). Captura de carbono por *Inga jinicuil Schltdl.* en un sistema agroforestal de café bajo sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(9), 11-21. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i9.536>
- H Hidalgo, P. (2011). Determinación de las reservas totales de Carbono

- en un sistema agroforestal de la selva alta de Tingo María. *Aporte Santiaguino*, 4(1), 87-92. <https://doi.org/10.32911/as.2011.v4.n1.532>
- Honorio, E. y Baker, T. (2010). *Manual para el monitoreo del ciclo de carbono en bosques amazónicos*. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. http://repositorio.iiap.gob.pe/bitstream/IIAP/290/1/Honorio_libro_2010.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories* (Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. y Tanabe, K., eds.). Institute for Global Environmental Strategies.
- Irizar, A., Andriulo, A., Consentido, D. y Améndola, C. (2010). Comparación de dos métodos de fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo. *Ciencia del suelo*, 28(1), 115- 121. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/16213>
- Jadan, O., Cifuentes, M., Torres, B., Selesi, D., Veintimilla, D. y Guenter, S. (2015). Influence of tree cover on diversity, carbon sequestration and productivity of cocoa systems in the Ecuadorian Amazon. *Bois Et Forêts Des Tropiques*, (325), 35-47. <https://doi.org/10.19182/bft2015.325.a31271>
- Jaramillo, V. (2004). Ciclo global del carbono. En J. Martínez y A. Fernández, *Cambio climático: una visión desde México* (pp. 77-85). Instituto Nacional de Ecología.
- Jumbo, C., Arévalo, C. y Ramírez, L. (2018). Medición de carbono del estrato arbóreo del bosque natural Tinajillas-Limón Indanza, Ecuador. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1), 51-63. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.04>
- Jun, W., Asuming-Brempong, S., Wang, Q., Tourlousse, D. M., Penton, C. R., Deng, Y., ... y Tiedje, J. M. (2013). Tropical agricultural land management influences on soil microbial communities through its effect on soil organic carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 65, 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.05.007>
- Koutika, L. (2022). Boosting C Sequestration and Land Restoration through Forest Management in Tropical Ecosystems: A Mini-Review. *Ecologies*, 3(1), 13-29. <https://doi.org/10.3390/ecologies3010003>
- Lal, R. (1999). Global carbon pools and fluxes and the impact of agricultural intensification and judicious land use. En *Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean* (pp. 45-52). World Soil Resources Report, 86. FAO, Rome.
- Lal, R. (2008). Carbon sequestration. *Phil. Trans. R Soc B.*, 363, 815-830. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>
- Lal, R. (2010). Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security.

- BioScience*, 60(9), 708-721. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8>
- Lal, R. (2018). Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*, 24, 3285-3301. <https://doi.org/10.1111/gcb.1405>.
- Lal, R., Monger, C., Nave, L. y Smith, P. (2021). The role of soil in regulation of climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376, 20210084. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0084>
- Landínez, Á., Becerra, J., Tosi, S. y Nicola, L. (2020). Soil Microfungi of the Colombian Natural Regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(8311), 3-28. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228311>
- Landínez Torres, Á. Y. (2017). Uso y manejo del suelo en la amazonia colombiana. *CES- Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 12(2), 151-163. <http://dx.doi.org/10.21615/cesmvz.12.2.6>
- Landínez, Á., Panelli, S., Picco, A., Comandatore, F., Tosi, S. y Capelli, E. (2019). A meta-barcoding analysis of soil mycobiota of the upper Andean Colombian agro-environment. *Scientific Reports*, 9(10085). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46485-1>
- Lavelle, P. (2013). Soil as a habitat. *Soil Ecology and Ecosystem Services*, 7-27. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199575923.003.0003>
- Li, J., Zhu, T., Singh, B., Pendall, E., Li, B., Fang, C. y Nie, M. (2021). Key microorganisms mediate soil carbon-climate feedbacks in forest ecosystems. *Science Bulletin*, 66(19), 2036-2044. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.03.008>
- Lok, S., Fraga, S., Noda, A. y García, M. (2013). Almacenamiento de carbono en el suelo de tres sistemas ganaderos tropicales en explotación con ganado vacuno. *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas*, 47(1), 75-82.
- Lupi, A. M., Fernández, R. y Conti, M. (2012). Calidad de carbono orgánico del suelo en diferentes técnicas de manejo en residuos forestales. *Ciencia Forestal*, 22(2), 295-303. <https://doi.org/10.5902/198050985736>
- Malagón, D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos - énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas*, 27(104), 319-341. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.27\(104\).2003.2082](https://doi.org/10.18257/raccefyn.27(104).2003.2082)
- Marcos, B., Martínez, Á., López, G., López, C. y Arteaga, T. (2016). La biomasa de los sistemas productivos de maíz nativo (*Zea mays*). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(3), 361-367. <http://dx.doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.10>

- Martin, J. (2010). Ciclo del carbono y clima: la perspectiva geológica. *Enseñanzas de las ciencias de la tierra*, 18(1), 33-46.
- Mora Delgado, J. R., Silva Parra, A. y Escobar Escobar, N. (2019). *Bioindicadores en suelos y abonos orgánicos*. Sello Editorial Universidad del Tolima.
- Nair, P.K.R., Nair, V.D., Kumar, B.M. y Showalter, J.M. (2010). Carbon sequestration in agroforestry systems. *Advances in Agronomy*, 108, 237-307. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
- Orellana, G., Sandoval, M., Linares, G., García, N. y Tamaríz, J. (2012). Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorios. *Avance en Ciencias e Ingeniería*, 3(1), 123-135. <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323627685012.pdf>
- Orozco, C.A.L., Valverde, F.M.I., Martínez, T.R., Chávez B.C. y Benavides H.R. (2016). Propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo con manzano biofertilizado. *Terra Latinoamericana*, 34, 441-456.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, GP. y Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49-57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>.
- Paz, F., Covalada, S., Hidalgo, C., Etchevers, J. y Matus, F. (2016). Modelación simple y operativa de la distribución del carbono orgánico por fracciones físicas en los suelos. *Terra latinoamericana*, 34(1), 321-337. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00321.pdf>
- Petit, J., Casanova, F., Solorio, J. y Ramírez, L. (2011). Producción y calidad de hojarasca en bancos de forraje puros y mixtos en Yucatán, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), 165-178. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.066>
- Poveda, V., Orozco-Aguilar, L., Medina, C., Cerda, R. y López-Sampson, A. (2013). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua. *Desarrollo rural en las Américas*, 49, 42-50.
- Reis, R. (2017). *Atributos microbiológicos em solos cultivados com cana-de-açúcar cana-de-açúcar (Sacharum spp.) em São Paulo, Brasil*. Universidad Da Curuã. https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/19780/ReisGualter_RegiaMaria_TD_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Ruiz Potma Goncalves, D., Sá, J. C. de M., Mishra, U., Cerri, C. E. P., Ferreira, L. A. y Furlan, F. J. F. (2017). Soil type and texture impacts on soil organic carbon storage in a sub-tropical agro-ecosystem. *Geoderma*, 286, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.021>
- Sánchez, R., Ramos, R., Geissen, V., Mendoza, J., De la Cruz, L., Salcedo,

- E. y Palma, D. (2011). Contenido de carbono en suelos con diferentes usos agropecuarios en el trópico mexicano. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 211-219. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=573/57321257011>
- Santos, T. y Velasco, J. (2016). Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agroproductividad*, 9(8), 52-58
- Serrato Cuevas, R., Adame Martínez, S., López García, J. y Flores Román, D. (2014). Carbono orgánico de la hojarasca en los bosques de la reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, caso santuario sierra Chincua, México. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(1), 29-45. <https://doi.org/10.22490/21456453.905>
- Silva-Parra, A. (2018). Modelación de los stocks de C y emisiones de dióxido de carbono (GEI) en sistemas productivos de la Altillanura Plana. *Orinoquia*, 22(2), 158-171. <https://doi.org/10.22579/20112629.525>
- Smith, P., Soussana, JF., Anger, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, DP., Batjes, NH., VAN Egmond, F., McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, JE., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A. y Klumpp, K. (2020). How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology*, 26, 219-241. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
- Soto-Pinto, L. y Jiménez, G. (2018). Contradicciones socio ambientales en los procesos de mitigación asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales. *Madera y bosques*, 24(e2401887). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401887>
- Torres, J. A., Espinoza, W., Laskmi, R. y Vázquez, A. (2011). Secuestro de Carbono en potreros arbolados, potreros sin árboles y bosque caducifolio de Huatusco, Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(3), 543-549. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93920942033.pdf>
- Vallejo-Quintero, V.E. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos a través del componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia forestal*, 16(1), 83-89. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a06>
- Vásquez, J. R. y Macías, F. (2017). Fraccionamiento químico del carbono en suelos con diferentes usos en el departamento de Magdalena, Colombia. *Terra latinoamericana*, 35(1), 7-17. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i1.237>
- Yerena, J., Jiménez, J., Alanís, E., Aguirre, O., González, M. y Treviño, E. (2014). Dinámica de la captura de carbono en pastizales abandonados del noreste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17(1), 113-121. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93930735009>

- Yescas, P., Álvarez, V., Segura, M., García, M., Hernández, V. y González, G. (2018). Variabilidad Espacial del Carbono Orgánico e Inorgánico del Suelo en la Comarca Lagunera, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 591-610. <https://doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a2>
- Yichao, S., Noura, Z., Chantal, H., Shabtai, B., Derek, H., Roger, L. y Jiali, S. (2017). Soil microbial biomass, activity, and community composition as affected by dairy manure slurry applications in grassland production. *Applied Soil Ecology*, 125, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.12.022>
- Yuan, J., Wang, L., Chen, H., Chen, G., Wang, S., Zhao, X. y Wang, Y. (2021). Responses of soil phosphorus pools accompanied with carbon composition and microorganism changes to phosphorus-input reduction in paddy soils. *Pedosphere - A peer-reviewed international journal*, 31(1), 83-93. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60049-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60049-2)
- Zhang, X., Liu, M., Zhao, X., Li, Y., Zhao, W., Li, A., Chen, S., Chen, S., Han, X. y Huang, J. (2018). Topography and grazing effects on storage of soil organic carbon and nitrogen in the northern China grasslands. *Ecological Indicators*, 93(June), 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.068>