

Water erosion, soil organic carbon redistribution and soil and water conservation: a review

Erosión hídrica, redistribución del carbono orgánico del suelo y conservación del suelo y agua: una revisión

Olimpya T. Aguirre-Salado^{1*}; Joel Pérez-Nieto¹; Carlos A. Aguirre-Salado²; Alejandro I. Monterroso-Rivas³; Juan F. Gallardo-Lancho⁴

¹Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia. km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

²Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. Av. Dr. Manuel Nava 8, Zona Universitaria Poniente. C. P. 78290. San Luis Potosí, México.

³Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

⁴Colegio Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de Salamanca, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (IRNASa). C/ Crespo Rascón 12, 5° N, Salamanca 37002. España.

*Corresponding author: olimpya.aguirre@yahoo.com; tel.: +52 311 244 4114.

Abstract

Introduction: Soil loss caused by water erosion impacts both positive and negative fluxes of carbon to the atmosphere.

Objective: To identify the main research trends related to the influence of water erosion on soil organic carbon (SOC) redistribution and its relationship with soil and water conservation practices.

Materials and methods. Literature published in national and international journals was consulted in Web of Science, Scopus, SciELO, Redalyc, ResearchGate and Google Scholar. Research trends were analyzed using predefined keywords and grouped according to their affinity.

Results: In the period 2012-2022, 80 % of global research focused on SOC redistribution caused by the effect of water erosion and the effect of soil management and conservation practices; however, no studies were found in this regard in Mexico. Due to water erosion, programs for the construction of soil and water conservation works have been implemented in Mexico with significant success, such as sediment control dams, but the impacts in terms of C storage have not been evaluated.

Conclusions: In Mexico there are areas of opportunity to focus research at different scales: (I) analyze the redistribution of SOC caused by water erosion, (II) estimate the storage of SOC in sediments, (III) analyze the potential of mechanical soil and water conservation practices as carbon sinks, and (IV) propose a risk index of SOC loss using remote sensing.

Keywords: watershed; mineralization; check dams; sediment; carbon sink.

Resumen

Introducción: La pérdida de suelo por erosión hídrica influye en los flujos positivos y negativos de carbono hacia la atmósfera.

Objetivo: Identificar las principales tendencias de investigación con respecto a la influencia de la erosión hídrica en la redistribución del carbono orgánico del suelo (COS) y su relación con las prácticas de conservación del suelo y agua.

Materiales y métodos. La literatura publicada en revistas nacionales e internacionales se consultó en Web of Science, Scopus, SciELO, Redalyc, ResearchGate y Google Académico. Mediante palabras clave predefinidas se analizaron las tendencias de investigación y se agruparon según su afinidad.

Resultados: En el periodo 2012-2022, 80 % de la investigación global se enfocó en la redistribución del COS por efecto de la erosión hídrica y en el efecto del manejo del suelo y de las prácticas de conservación; sin embargo, no se encontraron trabajos al respecto en México. Debido a la erosión hídrica, en México se han implementado programas para la construcción de obras de conservación de suelos y aguas con éxito significativo, como las presas de control de sedimentos, pero no se han evaluado los impactos en términos del almacenamiento de C.

Conclusiones: En México existen áreas de oportunidad para enfocar la investigación a diferentes escalas: (I) analizar la redistribución del COS por efecto de la erosión hídrica, (II) estimar el almacenamiento del COS en sedimentos, (III) analizar el potencial de prácticas mecánicas de conservación de suelo y agua como sumideros de carbono y (IV) proponer un índice de riesgo de pérdida del COS utilizando sensores remotos.

Palabras clave: cuenca hidrográfica; mineralización; presas de control; sedimentos; sumidero de carbono.

Introduction

The global process of soil water erosion has been identified as a net source of C to the atmosphere of about 1.3 Pg-yr⁻¹ (Lal, 2020). Bolaños et al. (2016) exposed that 76 % of the surface in Mexico has some degree of water erosion damage and pointed out that losses of soil organic carbon (SOC), related to this phenomenon, have been little studied and quantified. Water erosion influences the redistribution of SOC and positive or negative CO₂ fluxes to the atmosphere (Deumlich et al., 2018; Yue et al., 2016), since, during the transport phase, water favors the loss and, in the deposition phase, the resulting sedimentation can facilitate storage (Wang et al., 2014b)

A high proportion of SOC is the C left in the soil after partial decomposition of any organic residues produced by living organisms (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2017). According to Lal et al. (2021), soil has the largest terrestrial organic C reserves; the global estimate of SOC is between 1500 and 2400 Pg C. Etchevers et al. (2006) expressed that SOC accumulation is an important process for mitigating the effects of climate change, because soil, being a sink, forms a stable C reservoir. In this regard, Cotler et al. (2016) mentioned that better agricultural and soil conservation practices increase SOC considerably, decrease erosion, and mitigate greenhouse gas (GHG) emissions. Mechanical soil and water conservation practices include terraces, ditches, ponds, accommodated stone dams, gabion dams, stone cordons, and living barriers.

The main objective of this study was to identify the main research trends regarding the influence of water erosion on SOC redistribution and its relationship with soil and water conservation practices at the micro-watershed level. A literature review was carried out to recognize the processes and relationships involved, which will allow the promotion of sustainable agronomic practices oriented to C sequestration based on evidence and experiences.

Materials and Methods

A search for scientific articles was made by matching the title, abstract and keywords of the terms: 1) water erosion, 2) soil organic carbon (SOC) and 3) micro-watersheds and dams. Databases consulted included Web of Science, Scopus, Scientific Electronic Library Online (SciELO), ResearchGate, Google Scholar and Redalyc. In the last four, a filter was applied to show results for Mexico.

The search covered the period 2012-2022 (preferred, but not restricted). Publications were reviewed to establish research trends, referring to the way in

Introducción

El proceso global de erosión hídrica del suelo se ha identificado como una fuente neta de C a la atmósfera de aproximadamente 1.3 Pg-año⁻¹ (Lal, 2020). Bolaños et al. (2016) expusieron que 76 % de la superficie en México tiene algún grado de afectación por erosión hídrica y señalaron que las pérdidas de carbono orgánico del suelo (COS), asociadas a este fenómeno, se han estudiado y cuantificado poco. La erosión hídrica influye en la redistribución del COS y sobre los flujos positivos o negativos de CO₂ hacia la atmósfera (Deumlich et al., 2018; Yue et al., 2016), ya que, durante la fase de transporte, el agua favorece la pérdida y, en la fase de deposición, la sedimentación resultante puede facilitar el almacenamiento (Wang et al., 2014b)

Una proporción alta del COS es el C que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier residuo orgánico producido por organismos vivos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [FAO], 2017). Según Lal et al. (2021), el suelo tiene las mayores reservas de C orgánico terrestre; la estimación mundial de COS se ubica entre 1500 y 2400 Pg C. Etchevers et al. (2006) expresaron que la acumulación de COS es un proceso importante para la mitigación de los efectos del cambio climático, debido a que el suelo, al ser un sumidero, conforma un reservorio estable de C. En este sentido, Cotler et al. (2016) mencionaron que las mejores prácticas agrícolas y de conservación de suelo incrementan el COS de manera considerable, disminuyen la erosión y mitigan la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Entre las prácticas mecánicas de conservación de suelo y agua se incluyen terrazas, zanjas, bordos, presas de piedra acomodada, presas filtrantes de gaviones, cordones de piedra y barreras vivas.

El objetivo principal de este trabajo fue identificar las principales tendencias de investigación con respecto a la influencia de la erosión hídrica en la redistribución del COS y su relación con las prácticas de conservación del suelo y agua a nivel de microcuenca. Se hizo una revisión bibliográfica para reconocer los procesos y relaciones involucradas, lo cual permitirá promover prácticas agronómicas sustentables orientadas a la captura de C con base en evidencias y experiencias.

Materiales y métodos

Se hizo una búsqueda de artículos científicos mediante coincidencias en el título, resumen y palabras clave de los términos: 1) erosión hídrica, 2) carbono orgánico del suelo (COS o SOC en inglés) y 3) microcuencas y presas. La consulta se hizo en bases de datos de Web of Science, Scopus, Scientific Electronic Library Online (SciELO), ResearchGate, Google Académico y Redalyc. En los últimos cuatro se aplicó un filtro que mostrara resultados para México.

which researchers have addressed the relationship between erosion, SOC and mechanical soil and water conservation practices in high impact journals globally and those recognized by the National Council of Science and Technology (CONACYT) in Mexico. These publications were classified into the following groups: (I) SOC redistribution caused by the effect of water erosion, (II) effect of soil management and soil and water conservation practices on SOC, (III) estimation of SOC storage in sediments trapped in erosion control projects, and (IV) modeling of SOC storage using spatial analysis and erosion scenarios.

We exported the publications to the NVivo program (QSR International, 2018) as suggested by Ayala et al. (2020), in order to perform a word frequency analysis where at least five characters were considered to identify the most representative keywords of each document. The results were subjected to a cluster analysis to establish the relationship between research trends, classification parameters called nodes were created and the Jaccard coefficient similarity test was run between data sets to statistically validate the research trends in discussion groups. In this test, values greater than 0 and closer to 1 have similarity and values of 0 have no similarity.

Results and Discussion

Clustering of bibliographic references in discussion groups

The search for bibliographic references yielded a total of 48 scientific articles of interest, which were grouped based on research trends to generate discussion groups as shown in Figure 1.

Based on research trends, discussion groups 1, 2, 3 and 4 concentrated 40 %, 40 %, 12 % and 8 % of the scientific articles, respectively. This means that 80 % of the research (38 articles) studied the redistribution of SOC caused by water erosion and the effect of soil management and conservation practices on SOC (Tables 1 and 2). The remaining research has estimated SOC storage in sediments trapped in erosion control structures and the modeling of SOC storage using spatial analysis and erosion scenarios (Tables 3 and 4). It is important to highlight that, in discussion groups 1 and 3 (Figure 1), no research done in Mexico was found, suggesting the need to explore these topics. The greatest contributions from Mexico were observed in discussion group 2.

The NVivo program generated nine most frequent terms: carbon, erosion, organic, sediment, soils, water, *suelo*, global and China, which is the country with the most research published on the subject in the period studied (Figure 2).

La búsqueda comprendió el periodo 2012-2022 (preferibles, más no limitativas). Se revisaron las publicaciones para establecer tendencias de investigación, referidas a la manera en que los investigadores han abordado la relación entre erosión, COS y prácticas mecánicas de conservación del suelo y agua en revistas de alto impacto a nivel global y las reconocidas por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en México. Las publicaciones se clasificaron en los siguientes grupos: (I) redistribución del COS por efecto de la erosión hídrica, (II) efecto del manejo del suelo y de las prácticas de conservación del suelo y agua sobre el COS, (III) estimación de los almacenamientos de COS en sedimentos atrapados en obras de control de la erosión y (IV) modelación del almacenamiento del COS mediante análisis espacial y escenarios de erosión.

Las publicaciones se exportaron al programa NVivo (QSR International, 2018) como sugiere Ayala et al. (2020), a fin de hacer un análisis de frecuencia de palabras donde se consideraron cinco caracteres como mínimo para identificar las palabras clave más representativas de cada documento. Los resultados se sometieron a un análisis de conglomerados para establecer la relación entre las tendencias de investigación, se crearon parámetros de clasificación llamados nodos y se ejecutó la prueba de similitud del coeficiente de Jaccard entre conjuntos de datos, para validar estadísticamente las tendencias de investigación en grupos de discusión. En dicha prueba, los valores mayores de 0 y más cercanos a 1 tienen similitud y valores de 0 no tienen similitud.

Resultados y discusión

Agrupación de las referencias bibliográficas en grupos de discusión

La búsqueda de referencias bibliográficas arrojó un total de 48 artículos científicos de interés, los cuales se agruparon con base en tendencias de investigación para generar grupos de discusión como se muestra en la Figura 1.

Con base en las tendencias de investigación, los grupos de discusión 1, 2, 3 y 4 concentraron 40 %, 40 %, 12 % y 8 % de los artículos científicos, respectivamente. Esto significa que 80 % de las investigaciones (38 artículos) han estudiado la redistribución del COS por efecto de la erosión hídrica y el efecto del manejo del suelo y de las prácticas de conservación sobre el COS (Cuadros 1 y 2). El resto de las investigaciones han estimado los almacenamientos de COS en sedimentos atrapados en obras de control de la erosión y la modelación del almacenamiento del COS mediante análisis espacial y escenarios de erosión (Cuadros 3 y 4). Es importante resaltar que, en los grupos de discusión 1 y 3 (Figura 1), no se encontraron investigaciones hechas en México, lo cual sugiere la necesidad de explorar esos temas. Las

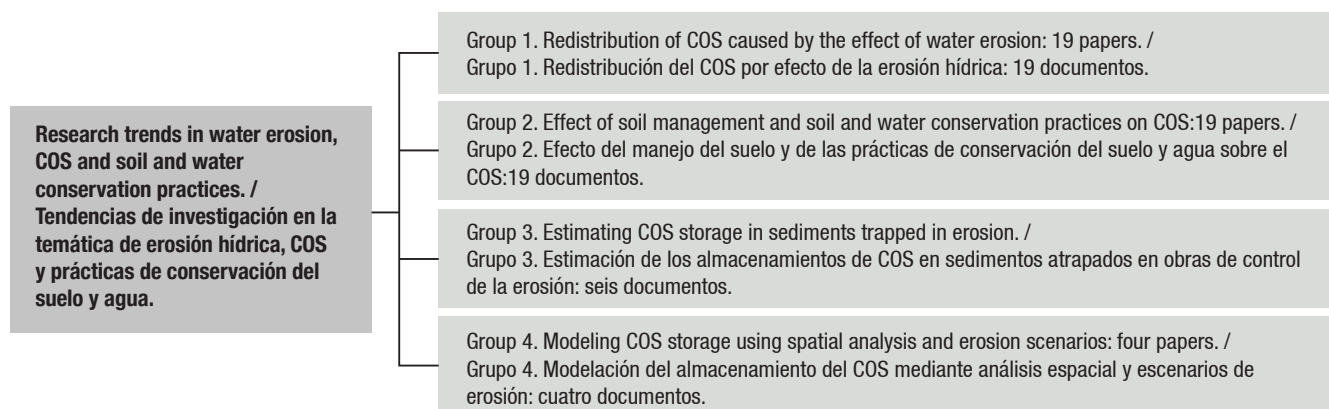


Figure 1. Clustering of research trends related to water erosion and soil organic carbon (SOC).

Figura 1. Agrupación de las tendencias de investigación relacionadas con erosión hídrica y carbono orgánico del suelo (COS).

Table 1. Global-scale literature references associated with discussion group 1: Redistribution of soil organic carbon because of water erosion.

Cuadro 1. Referencias bibliográficas a escala global asociadas al grupo 1 de discusión: Redistribución del carbono orgánico del suelo por efecto de la erosión hídrica.

No./Núm.	Reference/Referencia	Title/Título
1	Holz and Agustín (2021)	Erosion effects in soil carbon and nitrogen dynamics on cultivated slopes: A meta-analysis
2	Gaspar et al. (2020)	Lateral mobilization of soil carbon induced by runoff along karstic slopes
3	Tong et al. (2020)	Sediment deposition changes the relationship between soil organic and inorganic carbon: Evidence from the Chinese Loess Plateau
4	Lal (2019)	Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO ₂
5	Wang et al. (2019).	Selective transport of soil organic and inorganic carbon in eroded sediment in response to raindrop sizes and inflow rates in rainstorms
6	Zhang et al. (2019)	The role of dissolved organic matter in soil organic carbon stability under water erosion
7	Liu et al. (2018)	Soil carbon and nitrogen sources and redistribution as affected by erosion and deposition processes: A case study in a loess hilly-gully catchment, China
8	Xiao et al. (2018)	The mineralization and sequestration of organic carbon in relation to agricultural soil erosion
9	Deumlich et al. (2018)	Estimating carbon stocks in young moraine soils affected by erosion
10	Doetterl et al. (2016)	Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes
11	Novara et al. (2016)	Understanding the role of soil erosion on CO ₂ -C loss using ¹³ C isotopic signatures in abandoned Mediterranean agricultural land.
12	Olson et al. (2016)	Impact of soil erosion on soil organic carbon stocks
13	Yue et al. (2016)	Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO ₂ flux induced by water erosion in China
14	Müller and Chaplot (2015)	Soil carbon losses by sheet erosion: a potentially critical contribution to the global carbon cycle
15	Kirkels et al. (2014)	The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes - A review of different concepts
16	Wang et al. (2014b)	Soil organic carbon redistribution by water erosion –The role of CO ₂ emissions for the carbon budget
17	Berhe and Kleber (2013)	Erosion, deposition, and the persistence of soil organic matter: mechanistic considerations and problems with terminology
18	Mchunu and Chaplot (2012)	Land degradation impact on soil carbon losses through water erosion and CO ₂ emissions
19	Lal (2003)	Soil erosion and the global carbon budget

Table 2. Bibliographic references according to scale associated with discussion group 2: Effect of soil management and soil and water conservation practices on soil organic carbon.**Cuadro 2. Referencias bibliográficas por escala asociadas al grupo 2 de discusión: Efecto del manejo del suelo y de las prácticas de conservación del suelo y agua en el carbono orgánico del suelo.**

No./Núm.	Reference/Referencia	Title/Título	Scale/Escala
1	Lal et al. (2021)	The role of soil in regulation of climate	Global
2	Seifu et al. (2021)	Impact of land use type and altitudinal gradient on topsoil organic carbon and nitrogen stocks in the semi-arid watershed of northern Ethiopia	Global
3	Barrales et al. (2020)	Dinámica de carbono en agregados del suelo con diferentes tipos de usos de suelo en el monte Tláloc, Estado de México	Mexico
4	Chen et al. (2020)	Does terracing enhance soil organic carbon sequestration? A national-scale data analysis in China	Global
5	Shi et al. (2019).	Distribution of soil organic carbon impacted by land-use changes in a hilly watershed of the Loess Plateau, China	Global
6	Zamora et al. (2019)	La investigación científica en México: secuestro de carbono orgánico en suelos agrícolas y de agostadero	Mexico
7	Cantú and Yáñez (2018)	Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido del carbono orgánico y nitrógeno del suelo	Mexico
8	González et al. (2014)	Cambios de carbono orgánico del suelo bajo escenarios de cambio de uso de suelo en México	Mexico
9	Lal (2018)	Sustainable intensification of China's agroecosystems by conservation agriculture	Global
10	Zamora et al. (2018)	El manejo del suelo en la conservación de carbono orgánico	Mexico
11	Cotler et al. (2016)	Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: investigación y políticas públicas	Mexico
12	Mengistu et al. (2016)	Conservation effects on soil quality and climate change adaptability of Ethiopian watersheds	Global
13	Velásquez et al. (2016)	Organic carbon transport under simulated rainfall conditions for different land uses	Mexico
14	Cotler et al. (2015)	Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera	Mexico
15	Nadeu et al. (2015)	Modelling the impact of agricultural management on soil carbon stocks at the regional scale: the role of lateral fluxes	Global
16	Srinivasarao et al. (2015)	Conservation agriculture and soil carbon sequestration	Global
17	Lal (2013)	Intensive agriculture and the soil carbon pool	Global
18	Olson et al. (2012)	Impacts of land-use change, slope, and erosion on soil organic carbon retention and storage	Global
19	Etchevers et al. (2006)	Influence of land use on carbon sequestration and erosion in Mexico, a review	Mexico

Based on the 48 selected articles, the results of similarity between keyword codes, shown by Jaccard's similarity coefficients (Table 4), ratify the thematic classification and the proportion of research in each discussion group. Thus, there is more research in the thematic group 1 and its relationship with SOC compared to less research in group 4.

Group 1. Soil organic carbon redistribution caused by water erosion

Soil erosion and its influence on carbon release to the atmosphere is uncertain in the processes of estimating global C fluxes (inventories) and is a component that is

mayores aportaciones de México se observaron en el grupo 2 de discusión.

El programa NVivo generó nueve vocablos de mayor frecuencia: *carbon*, *erosion*, *organic*, *sediment*, *soils*, *water*, *suelo*, *global* y *China* que es el país con más investigaciones publicadas en el tema durante el periodo estudiado (Figura 2).

Con base en los 48 artículos seleccionados, los resultados de similitud entre códigos de palabras clave, mostrados por los coeficientes de similitud de Jaccard (Cuadro 4), ratifican la clasificación temática y la proporción de investigaciones en cada grupo de

Table 3. Literature references according to scale associated with discussion groups 3 (Estimation of soil organic carbon [SOC] storage in sediments trapped in erosion control studies) and 4 (Modeling SOC storage using spatial analysis and erosion scenarios).

Cuadro 3. Referencias bibliográficas por escala asociadas a los grupos de discusión 3 (Estimación de los almacenamientos de carbono orgánico del suelo [COS] en sedimentos atrapados en obras de control de la erosión) y 4 (Modelación del almacenamiento del COS mediante análisis espacial y escenarios de erosión).

No.	Cite/Cita	Title/Título	Scale/Escala	Trend/Tendencia
1	Mekonnen and Getahun (2020)	Soil conservation practices contribution in trapping sediment and soil organic carbon, Minizr watershed, northwest highlands of Ethiopia	Global	Group 3/Grupo 3
2	Addisu and Mekonnen (2019)	Check dams and storages beyond trapping sediment, carbon sequestration for climate change mitigation, Northwest Ethiopia	Global	Group 3/Grupo 3
3	Liu et al. (2017)	Do land use change and check-dam construction affect a real estimate of soil carbon and nitrogen stocks on the Loess Plateau of China?	Global	Group 3/Grupo 3
4	Zhang et al. (2016)	Loess Plateau check dams can potentially sequester eroded soil organic carbon	Global	Group 3/Grupo 3
5	Wang et al. (2014a)	Carbon sequestration function of check-dams: A case study of the Loess Plateau in China	Global	Group 3/Grupo 3
6	Lü et al. (2012)	Carbon retention by check dams: Regional scale estimation	Global	Group 3/Grupo 3
1	Márquez et al. (2020)	The use of remote sensing to detect the consequences of erosion in gypsiferous soils	Global	Group 4/Grupo 4
2	Bolaños et al. (2016)	Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo	Mexico	Group 4/Grupo 4
3	Ji et al. (2014)	Assessment of the redistribution of soil carbon using a new index—a case study in the Haihe River Basin, North China	Global	Group 4/Grupo 4
4	Segura et al. (2005)	Carbono orgánico de los suelos de México	Mexico	Group 4/Grupo 4

Table 4. Jaccard's similarity coefficients between keyword codes related to the topic water erosion and soil organic carbon (SOC).

Cuadro 4. Coeficientes de similitud de Jaccard entre códigos de palabras clave relacionadas con el tema de erosión hídrica y carbono orgánico del suelo (COS).

Code A/Código A	Code B/Código B	Coefficient/Coeficiente
SOC redistribution/ Redistribución del COS	<i>Carbon-erosion</i>	0.66
Conservation practices/ Prácticas de conservación	<i>Carbon-erosion</i>	0.61
Check dams/ Presas de control	<i>Carbon-erosion</i>	0.24
SOC modeling/ Modelación de COS	<i>Carbon-erosion</i>	0.22

not considered in determining the potential of soils for C sequestration (Mchunu & Chaplot, 2012; Novara et al., 2016; Wang et al., 2014a).

Water erosion comprises three processes: (i) initiation or detachment of soil particles, (ii) transport and redistribution of sediments over the landscape, and (iii) deposition on depression or concavity sites and in aquatic ecosystems (Doetterl et al., 2016). Derived from these processes, water erosion has significant impacts on the distribution and transformation of SOC at the micro-watershed scale (Liu et al., 2018; Wang et al., 2014b).

discusión. De esta manera existe mayor investigación en la temática del grupo 1 y su relación con el COS comparado con la menor investigación en el grupo 4.

Grupo 1. Redistribución del carbono orgánico del suelo por efecto de la erosión hídrica

La erosión del suelo y su influencia sobre la liberación del carbono a la atmósfera es una incertidumbre en los procesos de estimación de los flujos globales de C (inventarios) y es un componente que no se considera en la determinación del potencial de los suelos para la

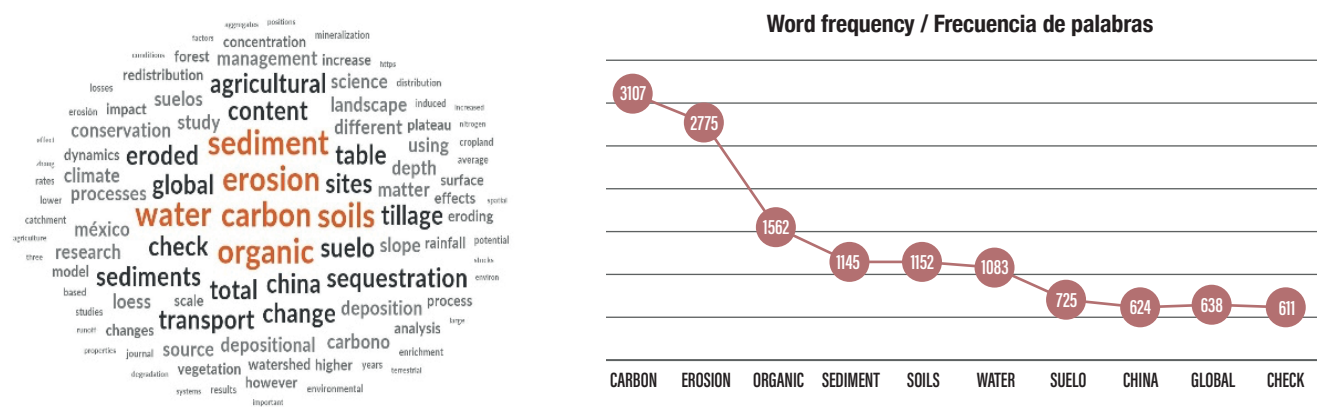


Figure 2. Cloud and frequency of keywords generated by the NVivo program.

Figura 2. Nube y frecuencia de vocablos clave generados por el programa NVivo.

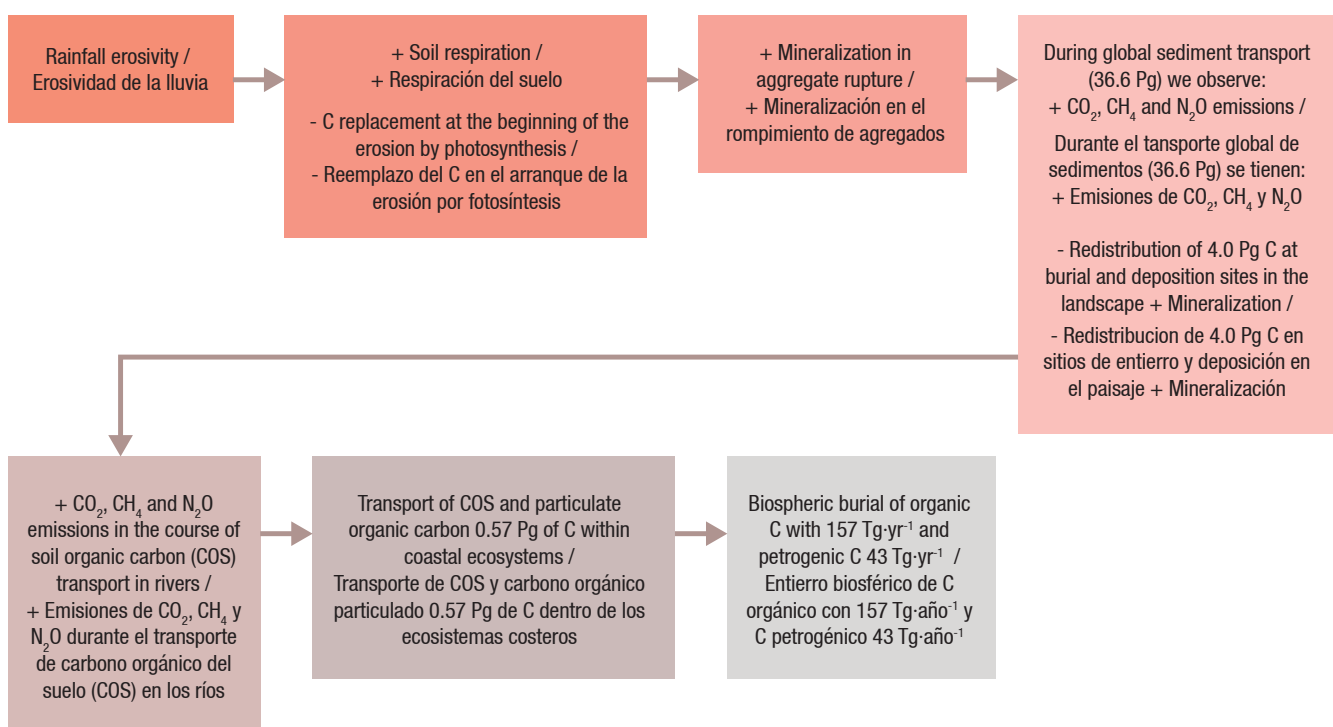


Figure 3. Process of CO₂ dynamics influenced by water erosion (+ emitter, - sink) (Lal, 2019).

Figura 3. Proceso de la dinámica de CO₂ influenciados por la erosión hídrica (+ emisor, - sumidero) (Lal, 2019).

Soil water erosion, when analyzed using the micro-watershed approach, can be considered as a CO₂ emitting source, in terms of particle initiation and transport due to the effect these processes have on soil organic matter (SOM) mineralization, but also as a source of storage at deposition sites (Doetterl et al., 2016).

Erosion initiation or start site

Forces causing splashing and collisions induced by raindrops and runoff initially decrease the stability

captura de C (Mchunu & Chaplot, 2012; Novara et al., 2016; Wang et al., 2014a).

La erosión hídrica comprende tres procesos: (i) inicio o desprendimiento de partículas de suelo, (ii) transporte y redistribución de sedimentos sobre el paisaje y (iii) deposición en los sitios en depresión o concávos y en ecosistemas acuáticos (Doetterl et al., 2016). Derivado de estos procesos, la erosión hídrica tiene impactos significativos sobre la distribución y transformación del COS a escala de microcuencas (Liu et al., 2018; Wang et al., 2014b).

of soil aggregates and accelerate the mineralization of SOM (Wei et al., 2017). These forces can induce the death of microorganisms on the soil surface, driven by aggregate dispersion and nutrient loss, which will result in a positive effect on soil mineralization (Xiao et al., 2018). On the other hand, the destruction of structural aggregates exposes SOM as it is no longer encapsulated and protected against microbial processes (Lal, 2003, 2019; Olson et al., 2016). In eroded areas of the landscape, SOC stores are reduced by erosion with speed and extent related to the gradient of slope and convexity (Singh & Benbi, 2018).

Transport and redistribution on the landscape

Transport is a link between erosion and sedimentation, which results in deposition at an eroded or intact site, even in an aquatic environment, but always elsewhere on the landscape (Kirkels et al., 2014). Two seemingly contradictory processes have been highlighted in transport: (i) increased C mineralization due to aggregate breakdown and (ii) enrichment of C in sediments relative to source soils, due to deposition and selective transport of other components with high organic load. The possible release of CO₂ to the atmosphere during the transport of soil removed by erosion is related to the particle size of the sediment source soil; those with higher clay and silt content are transported more easily (where SOC is most concentrated), since coarse particles are the first to be deposited (Doetterl et al., 2016; Wang et al., 2019).

Reservoir sites

Redistribution of sediment from erosion results in C concentration at reservoir sites (Holz & Agustín, 2021; Kirkels et al., 2014; Zhang et al., 2019). According to Olson et al. (2016), deep burial by deposition is responsible for a removal of 0.4 to 0.6 Pg C · yr⁻¹ at a global level. SOC in deep-buried sediments can be considered as a sink for CO₂, as C is stabilized by being in an area with little or no oxygen present, with organisms responsible for its decomposition (Müller & Chaplot, 2015) and, many times, out of reach of moisture. Gaspar et al. (2020) established that the highest SOC gains were recorded in sediments buried on concave slopes of the landscape. In this respect, Tong et al. (2020) determined a 24 % increase in SOC at reservoir sites compared to boot sites.

Water erosion and its relationship with CO₂ emissions to the atmosphere

Figure 3 shows the scheme proposed by Lal (2019), which exposes the fate of the transported SOC in the stages of the erosive process, from the *in situ* impact of rain erosivity to the burial of a small fraction, emissions to the atmosphere and transport to the ocean.

La erosión hídrica del suelo, cuando se analiza mediante el enfoque de microcuencas, puede considerarse como una fuente emisora de CO₂, en lo referente al inicio y transporte de partículas por el efecto que estos procesos tienen en la mineralización de la materia orgánica del suelo (MOS), pero también como fuente de almacenamiento en los sitios de depósito (Doetterl et al., 2016).

Sitio de inicio o arranque de la erosión

Al principio, las fuerzas que causan salpicadura y colisiones inducidas por las gotas de lluvia y la escorrentía disminuyen la estabilidad de los agregados del suelo y aceleran la mineralización de la MOS (Wei et al., 2017). Estas fuerzas pueden inducir la muerte de microorganismos en la superficie del suelo, motivada por la dispersión de los agregados y la pérdida de nutrientes, lo que resultará en un efecto positivo en la mineralización del suelo (Xiao et al., 2018). Por otra parte, la destrucción de los agregados estructurales expone a la MOS al dejar de estar encapsulada y protegida contra procesos microbianos (Lal, 2003, 2019; Olson et al., 2016). En las áreas erosionadas del paisaje, los almacenes de COS se reducen por la erosión con velocidad y extensión relacionadas con el gradiente de la pendiente y convexidad (Singh & Benbi, 2018).

Transporte y redistribución sobre el paisaje

El transporte es un vínculo entre erosión y sedimentación, el cual resulta en la deposición en un sitio erosionado o intacto, incluso en un medio acuático, pero siempre en otro lugar del paisaje (Kirkels et al., 2014). En el transporte se han destacado dos procesos aparentemente contradictorios: (i) aumento de la mineralización de C debido al rompimiento de los agregados y (ii) enriquecimiento de C en sedimentos con relación a los suelos de origen, debido a la deposición y el transporte selectivo de otros componentes con alta carga orgánica. La posible liberación de CO₂ a la atmósfera durante el transporte del suelo removido por la erosión está relacionada con el tamaño de las partículas del suelo fuente de los sedimentos, aquellos que tienen mayor contenido de arcillas y limos son transportados con mayor facilidad (que es donde más se concentra el COS), dado que las partículas gruesas son las primeras en depositarse (Doetterl et al., 2016; Wang et al., 2019).

Sitios de depósito

La redistribución del sedimento producto de la erosión da como resultado la concentración de C en sitios de depósito (Holz & Agustín, 2021; Kirkels et al., 2014; Zhang et al., 2019). De acuerdo con Olson et al. (2016), el entierro profundo por deposición es responsable de una remoción de 0.4 a 0.6 Pg C · año⁻¹ a nivel global. El

Lal (2019) mentions that soil erosion would be a net source if the on-site replacement of eroded C were less than the new organic matter added by photosynthesis and if all GHGs (CO₂, CH₄ and N₂O) were accounted for. However, data based on measurements of SOC transported in a watershed are scarce and measurements of GHGs in different landscape units are even scarcer.

Group 2. Effect of land use and soil and water conservation practices on soil organic carbon

Lal et al. (2021) indicated that the adoption of soil management practices can lead to recarbonization of depleted soils and convert them into a sink of atmospheric C. The most suggested practices include conservation tillage and maize intercropped with fruit trees (Cotler et al., 2016; González et al., 2014; Lal, 2018; Srinivasarao et al., 2015); additionally, Lal (2013) and Gallardo (2021) recommend the use of cover crops, green manures, biochar, agroforestry, fertilization, irrigation, compost addition, reduced tillage, crop rotation, soil covered by organic residues and mulching.

Regarding land uses and redistributed SOC at a landscape scale by land use changes, several studies show that grassland has higher SOC reserve compared to agricultural use (Barrales et al., 2020; Cantú & Yáñez, 2018; Seifu et al., 2021; Shi et al., 2019; Velásquez et al., 2016).

Soil management strategies aimed at C sequestration are most effective when accompanied by conservation projects that reduce erosion and increase the capacity of farmers to offset emissions and adapt to climate change (Mengistu et al., 2016; Nadeu et al., 2015). Chen et al. (2020) reported that terraces caused 32.4 % increase in SOC after five years of construction. An important contribution to the generation of information on soil and water conservation, and its relationship with SOC storage at the micro-watershed level in Mexico, has been the Project *Manejo Sustentable de Laderas*, which highlights the practice of terraces with fruit trees as living retaining walls (Etchevers et al., 2006).

Group 3. Soil organic carbon storage in sediments trapped in erosion control structures

Sediment control structures have been used in watersheds to trap soil resulting from erosion. Studies by Lü et al. (2012) showed that check dams in Shaanxi Province, Loess Plateau region, retained about 42.3 million tons of SOC; this was about 4.0 % of the estimated C emission from fossil fuels in China in 2000. Wang et al. (2014c) estimated that 11 000 silt control structures trapped 219 109 m³ of sediment and stored 0.945 Tg SOC. Addisu and Mekomen (2019)

COS en sedimentos enterrados en la profundidad puede ser considerado como sumidero de CO₂, ya que el C se estabiliza al quedar en una zona con escasa o nula presencia de oxígeno, con organismos responsables de su descomposición (Müller & Chaplot, 2015) y, muchas veces, fuera del alcance de la humedad. Gaspar et al. (2020) establecieron que las ganancias mayores de COS se registraron en los sedimentos enterrados en pendientes cóncavas del paisaje. En este sentido, Tong et al. (2020) determinaron un aumento del 24 % del COS en sitios de depósito comparados con los sitios de arranque.

Erosión hídrica y su relación con las emisiones de CO₂ a la atmósfera

La Figura 3 muestra el esquema propuesto por Lal (2019), el cual expone el destino del COS transportado en las etapas del proceso erosivo, desde el impacto *in situ* de la erosividad de la lluvia hasta el entierro de una pequeña fracción, las emisiones a la atmósfera y el transporte hacia el océano.

Lal (2019) menciona que la erosión del suelo sería una fuente neta si el reemplazo en el sitio del C erosionado fuera menor que la nueva materia orgánica agregada a través de la fotosíntesis y si se contabilizaran todos los GEI (CO₂, CH₄ y N₂O). No obstante, los datos basados en mediciones de COS transportados en una cuenca son pocos y más escasa es la medición de los GEI en diferentes unidades del paisaje.

Grupo 2. Efecto del uso del suelo y de las prácticas de conservación del suelo y agua sobre el carbono orgánico del suelo

Lal et al. (2021) indicaron que la adopción de prácticas de manejo del suelo puede conducir a la recarbonización de suelos agotados y convertirlos en un sumidero de C atmosférico. Entre las prácticas más sugeridas se encuentra la labranza de conservación y el sistema de maíz intercalado con árboles frutales (Cotler et al., 2016; González et al., 2014; Lal, 2018; Srinivasarao et al., 2015); adicionalmente, Lal (2013) y Gallardo (2021) recomiendan el uso de cultivos de cobertura, abonos verdes, biocarbón, agroforestería, fertilización, riego, adición de composta, labranza reducida, rotación de cultivos, suelo cubierto por residuos orgánicos y acolchado (*mulch*).

Con relación a los usos del suelo y el COS redistribuido en una escala de paisaje por cambios en el uso de la tierra, varios estudios muestran que los pastizales tienen reserva mayor de COS con respecto al uso agrícola (Barrales et al., 2020; Cantú & Yáñez, 2018; Seifu et al., 2021; Shi et al., 2019; Velásquez et al., 2016).

found that storage and silt control dams constructed in a watershed in Ethiopia sequestered 4468 Mg of SOC and 68.8 Tg of sediment. This research reveals that, in addition to conserving soil and water, these structures also store C.

In Mexico, there are still no studies that prove or disprove that mechanical soil and water conservation works (accommodated stone dams and gabion or stone fence dams), built in river tributaries, are CO₂ sinks. Sediments trapped and accumulated behind the stone or earth walls, transported by water erosion, may be enriched with C as in other parts of the world. In Mexico, the construction of soil and water conservation structures has been subsidized by several government programs; therefore, it is suggested to evaluate the C storage capacity, whose value may be important in terms of retention of the stable C already mineralized that, because of the lack of oxygen inside the sediment, decreases the emission of CO₂ to the atmosphere. Considering the large number of structures constructed nationwide, a significant amount of retained C that is not emitted to the atmosphere is expected, as long as it is not removed from the site.

Group 4. Modeling soil organic carbon storage by spatial analysis with erosion scenarios

SOC and water erosion can be analyzed and modeled using GIS. Ji et al. (2014) proposed a redistribution index of SOC on a watershed scale. In Mexico, remote sensing and GIS were used to generate information on SOC storage and soil loss caused by erosion at a national level (Bolaños et al., 2016; Segura et al., 2005).

In short, water erosion, in the processes that characterize it, is an emitter of CO₂ as a GHG. Despite this, there are no research reports in Mexico on the redistribution of SOC as a result of erosion and no evaluations of sediment control projects as CO₂ sinks (taking into account the bibliographic references reviewed on a global scale). Therefore, it is inferred that SOC redistribution may be associated with the redistribution of silt- and very fine sand-sized sediments resulting from rainfall transport and surface runoff from erosion initiation sites to deposition sites behind mechanical conservation practices. This results in significant accumulations of SOC at the depths of the storage sites that need to be quantified by further research.

Regarding the serious problem of water erosion in Mexico and the fact that several programs have been implemented to support the construction of soil and water conservation structures with significant success, but without having evaluated the impacts in terms of C storage, it is suggested to recognize this area of opportunity to focus research at different scales. The

Las estrategias de manejo del suelo dirigidas al secuestro de C son más efectivas cuando están acompañadas de obras de conservación que reducen la erosión y aumentan la capacidad de los agricultores para compensar emisiones y adaptarse al cambio climático (Mengistu et al., 2016; Nadeu et al., 2015). En este sentido, Chen et al. (2020) observaron que las terrazas provocaron 32.4 % de aumento de COS después de cinco años de construidas. Una contribución importante en la generación de información de conservación del suelo y agua, y su relación con el almacenamiento de COS a nivel microcuenca en México, ha sido el Proyecto Manejo Sustentable de Laderas que destaca la práctica de terrazas con árboles frutales como muros vivos de contención (Etchevers et al., 2006).

Grupo 3. Almacenamiento de carbono orgánico del suelo en sedimentos atrapados en obras de control de la erosión

Las obras de control de sedimentos se han utilizado en las cuencas hidrográficas para atrapar el suelo producto de la erosión. Los estudios de Lü et al. (2012) mostraron que las presas de control en la provincia Shaanxi, en la región Loess Plateau, retuvieron alrededor de 42.3 millones de toneladas de COS; esta cantidad representó aproximadamente 4.0 % de la emisión de C estimada de los combustibles fósiles en China en el año 2000. Por su parte, Wang et al. (2014c) estimaron que 11000 obras de control de azolve atraparon 219109 m³ de sedimentos y almacenaron 0.945 Tg de COS. Por su parte, Addisu y Mekomen (2019) encontraron que las presas de almacenamiento y control de azolve, construidas en una cuenca en Etiopía, secuestraron 4468 Mg de COS y 68.8 Tg de sedimentos. Dichas investigaciones revelan que, estas obras, además de conservar suelo y agua, también almacenan C.

En México aún no se tienen estudios que demuestren o refuten que las obras mecánicas de conservación de suelo y agua (presas de piedra acomodada y presas filtrantes de gaviones o de mampostería), construidas en los afluentes fluviales, sean sumideros de CO₂. Los sedimentos atrapados y acumulados detrás de los muros de piedra o tierra, transportados por erosión hídrica, pueden estar enriquecidos de C como en otras partes del mundo. En México se ha subsidiado la construcción de obras de conservación de suelo y agua por diversos programas de gobierno; por tanto, se sugiere evaluar la capacidad de almacenamiento de C, cuyo valor puede ser importante en términos de retención del C estable ya mineralizado que, debido a la falta de oxígeno al interior del sedimento, disminuya la emisión en forma de CO₂ a la atmósfera. Debido al gran número de obras construidas a nivel nacional se espera una magnitud importante de C retenido que no se emite a la atmósfera, mientras no sea removido del sitio.

analysis of water erosion and its relationship with SOC can be studied with the use of remote sensing and GIS under a watershed approach. This can be used to suggest the best sustainable practices for soil and water conservation and C retention to contribute to the commitments acquired by Mexico in the nationally determined contributions. These practices would allow decision makers and public policies to further promote the implementation of mechanical structures and agronomic and vegetative practices for soil and water conservation to mitigate and adapt to climate change.

Conclusions

In the period 2012-2022, 80 % of global research focused on soil organic carbon (SOC) redistribution caused by water erosion, and the effect of soil management and conservation practices; however, no studies on this subject were found in Mexico, nor were there any evaluations of sediment control dams as CO₂ sinks. These research trends suggest studying: I) SOC redistribution caused by water erosion at the watershed scale, II) the storage of buried SOC in sediments deposited by water erosion, III) the potential of mechanical soil and water conservation practices as carbon sinks, and IV) the generation of SOC loss risk indices using remote sensing. This research could generate the necessary knowledge to promote sustainable agronomic practices in Mexico, oriented to evidence-based carbon sequestration.

Acknowledgments

The authors thank the Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) for the scholarship provided (CVU no.: 345659) to the first author as a student of Doctorate in Multifunctional Agriculture for Sustainable Development-Universidad Autónoma Chapingo.

End of English version

References / Referencias

- Addisu, S., & Mekonnen, M. (2019). Check dams and storages beyond trapping sediment, carbon sequestration for climate change mitigation, Northwest Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 6(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0120-1>
- Ayala, M. D., Monterroso, R. A., Baca, D. J., Escamilla, P. E., Sánchez, H. R., Pérez, N. J., & Valdés, V. E. (2020). Identificación de necesidades de investigación sobre la dinámica de carbono y nitrógeno en sistemas agroforestales de café en México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23, 99. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3403/1499>

Grupo 4. Modelación del almacenamiento del carbono orgánico del suelo mediante análisis espacial considerando escenarios de erosión

El COS y la erosión hídrica se pueden analizar y modelar con la ayuda de los SIG. En este sentido, Ji et al. (2014) propusieron un índice de redistribución del COS en una escala de cuenca. En México se utilizaron sensores remotos y los SIG para generar información de los almacenamientos de COS y pérdida de suelo por erosión a nivel nacional (Bolaños et al., 2016; Segura et al., 2005).

En síntesis, la erosión hídrica, durante los procesos que la caracterizan, es un emisor de CO₂ como GEL. A pesar de ello, no hay reportes de investigación en México sobre la redistribución del COS por efecto de la erosión y de evaluaciones sobre las obras de control de sedimentos como sumideros de CO₂ (considerando las referencias bibliográficas revisadas a escala global). Por tanto, se infiere que la redistribución del COS puede estar asociada a la redistribución de sedimentos del tamaño de los limos y arenas muy finas producto de su transporte por la lluvia y al escurrimiento superficial desde los sitios de inicio de la erosión hasta los sitios de depósito detrás de las prácticas mecánicas de conservación. Esto da como resultado acumulaciones significativas de COS en las profundidades de los sitios de depósito que deben ser cuantificadas mediante investigación.

Considerando el grave problema de la erosión hídrica en México y que se han implementado diversos programas en apoyo a la construcción de obras de conservación de suelos y aguas con éxito significativo, pero sin haber evaluado los impactos en términos del almacenamiento de C, se sugiere reconocer esta área de oportunidad para enfocar la investigación a diferentes escalas. El análisis de la erosión hídrica y su relación con el COS puede ser estudiado con el uso de sensores remotos y SIG bajo el enfoque de cuencas. Derivado de ello se pueden sugerir las mejores prácticas sustentables de conservación de suelo y agua y de retención de C, para contribuir con los compromisos adquiridos por México en las contribuciones determinadas a nivel nacional. Tales prácticas permitirían a los tomadores de decisiones y políticas públicas promover aún más la implementación de obras mecánicas y prácticas agronómicas y vegetativas de conservación de suelo y agua, a fin de mitigar y adaptarse al cambio climático.

Conclusiones

En el periodo 2012-2022, 80 % de la investigación global se enfocó en la redistribución del carbono orgánico del suelo (COS) por efecto de la erosión hídrica, y el efecto del manejo del suelo y de las prácticas de conservación;

- Barrales, B. E., Paz, P. F., Etchevers, B. J., Hidalgo, M. C., & Velázquez, R. A. (2020). Dinámica de carbono en agregados del suelo con diferentes tipos de usos de suelo en el monte Tláloc, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 275–288. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.680>
- Berhe, A. A., & Kleber, M. (2013). Erosion, deposition, and the persistence of soil organic matter: mechanistic considerations and problems with terminology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(8), 908–912. <https://doi.org/10.1002/esp.3408>
- Bolaños, G. M., Paz, P. F., Cruz, G. C., Argumedo, E. J., Romero, B. V., & De la Cruz, C. J. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271–288. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000300271&lng=es&tln=es
- Cantú, S. I., & Yáñez, D. M. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido del carbono orgánico y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45), 122–151. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.138>
- Chen, D., Wei, W., Daryanto, S., & Tarolli, P. (2020). Does terracing enhance soil organic carbon sequestration? A national-scale data analysis in China. *Science of the Total Environment*, 721, 137751. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137751>
- Cotler, H., Cram, S., Martínez T. S., & Bunge, V. (2015). Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trincheras. *Investigaciones Geográficas*, (88), 6–18. <https://doi.org/10.14350/rig.47378>
- Cotler, H., Martínez, M., & Etchevers, J. D. (2016). Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación y políticas públicas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 125–138. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100125&lng=es&tln=es
- Deumlich, D., Ellerbrock, R. H., & Frielinghaus, M. (2018). Estimating carbon stocks in young moraine soils affected by erosion. *CATENA*, 162, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.016>
- Doetterl, S., Berhe, A. A., Nadeu, E., Wang, Z., Sommer, M., & Fiener, P. (2016). Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. *Earth-Science Reviews*, 154, 102–122. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.12.005>
- Etchevers, J. D., Prat, C., Balbontín, C., Bravo, M., & Martínez, M. (2006). Influence of land use on carbon sequestration and erosion in Mexico, a review. *Agronomie*, 26(1), 21–28. <https://doi.org/10.1051/agro:2005053>
- Gallardo, L. J. (2021). Manejos edáficos óptimos y captura de carbono: con referencia a suelos de Iberoamérica. *Industria Química*, (92), 74–82. https://www.academia.edu/49973332/Manejos_ed%C3%A1ficos_%C3%B3ptimos_y_captura_de_carbono_con_referencia_a_suelos_de_Iberoam%C3%A9rica
- Gaspar, L., Mabit, L., Lizaga, I., & Navas, A. (2020). Lateral mobilization of soil carbon induced by runoff along karstic slopes. *Journal of Environmental Management*, 260, 110091. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110091>
- González, M. L., Acosta, M. M., Carrillo, A. F., Báez, P. A., & González, C. J. M. (2014). Cambios de carbono orgánico del suelo bajo escenarios de cambio de uso de suelo en México. *Revista sin embargo, no se encontraron trabajos al respecto en México ni evaluaciones sobre las presas de control de sedimentos como sumideros de CO₂. Derivado de estas tendencias de investigación se sugiere estudiar: I) la redistribución del COS por efecto de la erosión hídrica a escala de cuenca, II) el almacenamiento del COS enterrado en los sedimentos depositados por la erosión hídrica, III) el potencial de prácticas mecánicas de conservación del suelo y agua como sumideros de carbono y IV) la generación de índices de riesgo de pérdida del COS utilizando sensores remotos. Estas investigaciones podrían generar los conocimientos necesarios para promover prácticas agronómicas sustentables en México, orientadas a la captura de carbono con base en evidencias.*

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca proporcionada (núm. CVU: 345659) al primer autor como estudiante del Doctorado en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible-Universidad Autónoma Chapingo.

Fin de la versión en español

- Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(7), 1275–1285. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v5n7/v5n7a11.pdf>
- Holz, M., & Augustin, J. (2021). Erosion effects on soil carbon and nitrogen dynamics on cultivated slopes: A meta-analysis. *Geoderma*, 397, 115045. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115045>
- Ji, Y., Chen, L., Zhou, G., Sun, R., Shang, L., & Wang, S. (2014). Assessment of the redistribution of soil carbon using a new index—a case study in the Haihe River Basin, North China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(11), 8023–8036. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3985-1>
- Kirkels, F. M., Cammeraat, L. H., & Kuhn, N. J. (2014). The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes—A review of different concepts. *Geomorphology*, 226, 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.023>
- Lal, R. (2003). Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 29(4), 437–450. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7)
- Lal, R. (2013). Intensive agriculture and the soil carbon pool. *Journal of Crop Improvement*, 27(6), 735–751. <https://doi.org/10.1080/15427528.2013.845053>
- Lal, R. (2018). Sustainable intensification of China's agroecosystems by conservation agriculture. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.11.001>
- Lal, R. (2019). Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO₂. *Soil and Tillage Research*, 188, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.001>

- Lal, R. (2020). Soil erosion and gaseous emissions. *Applied Sciences*, 10(8), 2784. <https://doi.org/10.3390/app12010048>
- Lal, R., Monger, C., Nave, L., & Smith, P. (2021). The role of soil in regulation of climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1834). <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0084>
- Liu, C., Li, Z., Chang, X., He, J., Nie, X., Liu, L., & Zeng, G. (2018). Soil carbon and nitrogen sources and redistribution as affected by erosion and deposition processes: A case study in a loess hilly-gully catchment, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 253, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.028>
- Liu, C., Li, Z., Dong, Y., Nie, X., Liu, L., Xiao, H., & Zeng, G. (2017). Do land use change and check-dam construction affect a real estimate of soil carbon and nitrogen stocks on the Loess Plateau of China? *Ecological Engineering*, 101, 220–226. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.036>
- Lü, Y., Sun, R., Fu, B., & Wang, Y. (2012). Carbon retention by check dams: regional scale estimation. *Ecological Engineering*, 44, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.03.020>
- Marqués, M. J., Alvarez, A., Carral, P., Sastre, B., & Bienes, R. (2020). The use of remote sensing to detect the consequences of erosion in gypsiferous soils. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(4), 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.10.001>
- Mchunu, C., & Chaplot, V. (2012). Land degradation impact on soil carbon losses through water erosion and CO₂ emissions. *Geoderma*, 177, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.038>
- Mengistu, D., Bewket, W., & Lal, R. (2016). Conservation effects on soil quality and climate change adaptability of Ethiopian watersheds. *Land Degradation & Development*, 27(6), 1603–1621. <https://doi.org/10.1002/ldr.2376>
- Müller, N. D., & Chaplot, V. (2015). Soil carbon losses by sheet erosion: a potentially critical contribution to the global carbon cycle. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(13), 1803–1813. <https://doi.org/10.1002/esp.3758>
- Nadeu, E., Gobin, A., Fiener, P., Van Wesemael, B., & Van Oost, K. (2015). Modelling the impact of agricultural management on soil carbon stocks at the regional scale: the role of lateral fluxes. *Global Change Biology*, 21(8), 3181–3192. <https://doi.org/10.1111/gcb.12889>
- Novara, A., Keesstra, S., Cerdà, A., Pereira, P., & Gristina, L. (2016). Understanding the role of soil erosion on CO₂-C loss using ¹³C isotopic signatures in abandoned Mediterranean agricultural land. *Science of the Total Environment*, 550, 330–336. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.095>
- Olson, K. R., Al-Kaisi, M., Lal, R., & Cihacek, L. (2016). Impact of soil erosion on soil organic carbon stocks. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(3), 61A–67A. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.3.61A>
- Olson, K. R., Gennadiyev, A. N., Zhidkin, A. P., & Markelov, M. V. (2012). Impacts of land-use change, slope, and erosion on soil organic carbon retention and storage. *Soil Science*, 177(4), 269–278. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e318244d8d2>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). (2017). *Carbono orgánico del suelo: el potencial oculto*. FAO. <https://www.fao.org/documents/card/es/c/b3fc8b3c-3afa-46ca-9883-96f6c3113549/>
- QSR International. (2018). *NVivo qualitative data analysis*. Version 12 [software]. <https://support.qsrinternational.com/nvivo/s/>
- Seifu, W., Elias, E., Gebresamuel, G., & Khanal, S. (2021). Impact of land use type and altitudinal gradient on topsoil organic carbon and nitrogen stocks in the semi-arid watershed of northern Ethiopia. *Heliyon*, 7(4), e06770. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06770>
- Segura, C. M., Sánchez, G. P., Ortiz, S. C., & del Carmen, G. C. (2005). Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 21–28. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57323103>
- Shi, P., Zhang, Y., Li, P., Li, Z., Yu, K., Ren, Z., & Ma, Y. (2019). Distribution of soil organic carbon impacted by land-use changes in a hilly watershed of the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 652, 505–512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.172>
- Singh, P., & Benbi, D. K. (2018). Soil organic carbon pool changes in relation to slope position and land-use in Indian lower Himalayas. *CATENA*, 166, 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.006>
- Srinivasarao, C., Lal, R., Kundu, S., & Thakur, P. B. (2015). Conservation agriculture and soil carbon sequestration. In M. Farooq, & K. Siddique (Eds.), *Conservation agriculture* (pp. 479–524). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11620-4_19
- Tong, L. S., Fang, N. F., Xiao, H. B., & Shi, Z. H. (2020). Sediment deposition changes the relationship between soil organic and inorganic carbon: Evidence from the Chinese Loess Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 302, 107076. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107076>
- Velásquez, V. M. A., Martínez, B. O. U., Esquivel, A. G., Bueno, H. P., & Sánchez, C. I. (2016). Organic carbon transport under simulated rainfall conditions for different land uses. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 15(1), 29–45. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2015.08.009>
- Wang, X., Cammeraat, E. L., Cerli, C., & Kalbitz, K. (2014a). Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 72, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.01.018>
- Wang, X., Cammeraat, E. L., Romeijn, P., & Kalbitz, K. (2014b). Soil organic carbon redistribution by water erosion—the role of CO₂ emissions for the carbon budget. *PLoS ONE*, 9(5), e96299. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096299>
- Wang, Y., Chen, L., Gao, Y., Wang, S., Lü, Y., & Fu, B. (2014c). Carbon sequestration function of check-dams: a case study of the Loess Plateau in China. *Ambio*, 43(7), 926–931. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0518-7>
- Wang, L., Huang, X., Fang, N. F., Niu, Y. H., Wang, T. W., & Shi, Z. H. (2019). Selective transport of soil organic and inorganic carbon in eroded sediment in response to raindrop sizes and inflow rates in rainstorms. *Journal of Hydrology*, 575, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.033>
- Wei, S., Zhang, X., McLaughlin, N. B., Chen, X., Jia, S., & Liang, A. (2017). Impact of soil water erosion processes on catchment export of soil aggregates and associated SOC. *Geoderma*, 294, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.021>
- Xiao, H., Li, Z., Chang, X., Huang, B., Nie, X., Liu, C., & Jiang, J. (2018). The mineralization and sequestration of organic carbon in

- relation to agricultural soil erosion. *Geoderma*, 329, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.018>
- Yue, Y., Ni, J., Ciais, P., Piao, S., Wang, T., Huang, M., & Van Oost, K. (2016). Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO₂ flux induced by water erosion in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(24), 6617–6622. <https://doi.org/10.1073/pnas.1523358113>
- Zamora, M. B., Mendoza, C. M., Sangerman, J. D., Quevedo, N. A., & Navarro, B. A. (2018). El manejo del suelo en la conservación de carbono orgánico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(8), 1787–1799. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.1723>
- Zamora, M. B., Mendoza, C. M., Sangerman, J. D. M., Quevedo, N. A., & Navarro, B. A. (2019). La investigación científica en México: secuestro de carbono orgánico en suelos agrícolas y de agostadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(1), 155–164. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1733>
- Zhang, H., Liu, S., Yuan, W., Dong, W., Xia, J., Cao, Y., & Jia, Y. (2016). Loess Plateau check dams can potentially sequester eroded soil organic carbon. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(6), 1449–1455. <https://doi.org/10.1002/2016JG003348>
- Zhang, X., Li, Z., Nie, X., Huang, M., Wang, D., Xiao, H., & Zeng, G. (2019). The role of dissolved organic matter in soil organic carbon stability under water erosion. *Ecological Indicators*, 102, 724–733. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.038>