

PÉRDIDAS DE CARBONO ORGÁNICO POR EROSIÓN EN ANDOSOLES FORESTALES DE LAS ISLAS CANARIAS

C.D. ARBELO, A. RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, J.L. MORA, J.A. GUERRA, C.M. ARMAS

Departamento de Edafología y Geología, Facultad de Biología, Universidad de La Laguna, Avda. Astrofísico Francisco Sánchez s/n 38204 La Laguna, Tenerife, I. Canarias. e-mail: antororo@ull.es

Abstract. The overall objective of this paper is to carry out a first assessment of soil organic carbon (SOC) loss mechanisms due to water erosion in Canary Islands andosols. The study is performed in experimental erosion plots. The soils are classified as Fulvic Andosols or Ultic Fulvudands. The measured values of organic carbon (OC) eroded in sediments oscillate around $116 \pm 30 \text{ gC kg}^{-1}$, implying losses of OC bonded to the solid phase of $114 \text{ gC m}^{-2}\text{año}^{-1}$. It has been observed that regardless of the aggregate size fraction eroded, the greatest enrichment ratios (ER) are produced for the non-oxidizable SOC (OSOC) ($\text{ER} = 1.12\text{-}1.60$). The physical protection of OSOC in the larger aggregates and the chemical stabilization of adsorbed SOC (ASOC) in the smaller-sized ones seem to be the main mechanisms of OC sequestration in these andosols. Moreover, the predominant in the sediments of the apparently more labile forms (OSOC), leads to the assumption that the eroded SOC act in a significant manner as a source of atmospheric CO_2 .

Key words: Andosols, soil organic carbon (SOC), adsorbed organic carbon (ASOC), eroded organic carbon, Canary Islands

Resumen. El principal objetivo de este trabajo es realizar una primera evaluación de las pérdidas de carbono orgánico en Andosoles de las Islas Canarias, debidas a la erosión hídrica. El estudio se ha llevado a cabo en parcelas de erosión. Los suelos se han clasificado como Andosoles fúlvicos o Fulvudands últicos. Las cantidades de carbono orgánico (CO) erosionado en los sedimentos oscilan alrededor de $116 \pm 30 \text{ gC kg}^{-1}$, lo que suponen unas pérdidas de CO ligadas a la fase sólida de $114 \text{ gC m}^{-2}\text{año}^{-1}$. Se ha observado que cualquiera que sea el tamaño de los agregados que se erosionan preferencialmente, las mayores relaciones de enriquecimiento (RE) se producen para el carbono difícilmente oxidable (COO) ($\text{RE} = 1.12\text{-}1.60$). La protección física del COO en los agregados de mayor tamaño y la estabilización química del carbono orgánico adsorbido (COA), en los agregados de menor tamaño, parecen ser los principales mecanismos de secuestro de CO en estos andosoles. Además el predominio en los sedimentos de las formas aparentemente más lábiles (COO) hacen suponer que el CO erosionado actúa de manera significativa como una fuente de CO_2 atmosférico.

Palabras clave: Andosoles, carbono orgánico, carbono orgánico adsorbido, carbono orgánico erosionado, Islas Canarias

INTRODUCCIÓN

Aunque se han realizado numerosos estudios para evaluar el impacto de la erosión del suelo en la dinámica del carbono orgánico (CO) y en el balance global del carbono (C) en la naturaleza, existen aún importantes lagunas en el conocimiento de su importancia, del comportamiento del CO erosionado como sumidero o fuente de CO₂ y en general del efecto neto de la erosión en la evolución del CO₂ atmosférico (IPCC, 1996, Chilar *et al.*, 2002).

Dado que la erosión hídrica es un proceso selectivo que moviliza preferencialmente los componentes edáficos de menor tamaño y densidad, los sedimentos se enriquecen en partículas de tamaño limo y arcilla. Que constituyen las reservas más estables de CO, debido a su protección física en el interior de los agregados (Golchin *et al.*, 1998, Kay, 1998).

Un factor importante en la dinámica posterior del CO movilizado por erosión, es la naturaleza del mismo en cuanto a su estabilidad (carbono orgánico disuelto, lábil, lentamente oxidable, pasivo o recalcitrante) (Eswaran *et al.*, 1995), lo que está en estrecha relación con el grado de complejidad de las moléculas húmicas (estabilidad bioquímica), con su posición en los agregados (protección física) y con el modo de su asociación con metales y minerales secundarios (estabilización química) (Jastrow and Miller, 1998).

Los andosoles se caracterizan por un elevado contenido en CO atribuido a que la materia orgánica en estos suelos está estabilizada por minerales con ordenación de corto alcance, que tienen una elevada superficie específica (alofana, imogolita, ferrihidrita) o por formación de complejos Al-humus (Dahlgren *et al.*, 1993). Son por tanto suelos con un alto potencial para secuestrar CO₂, aunque se conoce poco aún acerca de la dinámica del carbono en estos suelos y de los mecanismos que gobiernan la estabilización de los compuestos orgánicos, aunque si se

sabe que los andosoles muestran una alta resistencia a la erosión hídrica y que esta baja erodibilidad está estrechamente relacionada con las propiedades físicas específicas de los mismos (Khamsook *et al.*, 2003, Rodríguez Rodríguez *et al.*, 2002a).

El objetivo de este trabajo es pues, conocer las pérdidas reales de CO que se producen por erosión hídrica en los andosoles tras la deforestación y las formas de CO más afectadas por estas pérdidas y su posible incidencia en la emisión o secuestro de CO₂ atmosférico, en las condiciones ambientales de las Islas Canarias.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se realizó durante 9 años en parcelas experimentales de 200 m² (25 x 8 m) instalados sobre andosoles alofánicos clasificados como Fulvudands últicos (Soil Survey Staff, 1999) o como Andosoles sili-fúlvicos en el sistema WRB, 1998.

Las muestras de suelo se tomaron en los primeros 5 cm en 10 puntos de muestreo distribuidas al azar en el interior de la parcela. Estas muestras se fraccionaron en tres tamaños de agregados (>2mm, 0.5-2.0 mm, <0.5 mm) por tamizado en seco. Tanto en el suelo total tamizado por 2 mm como en las tres fracciones de agregados se determinó:

- a) Carbono orgánico total (COT), por el método de Walkley-Black usando 1.3 como factor de compensación.
- b) CO extraíble con una solución 0.1 M de pirofosfato sódico (Cp). La diferencia entre COT y Cp consideramos que corresponde a formas de CO lentamente oxidables y no complejadas (COO).
- b) CO extraíble con una solución 0.5 M de sulfato potásico. La diferencia entre Cp y el CO extraíble con SO₄K₂ corresponde al carbono complejado con las formas activas de Fe y Al (COA).

- d) Carbono orgánico disuelto (COD) en el extracto de saturación (sólo en el suelo total).
- e) Fe_o, Al_o, Si_o: extraíbles con una solución de oxalato amónico 0.2 M a pH 3.
- f) Fe_p, Al_p: extraíbles con una solución de pirofosfato sódico 0.1 M.

Después de cada evento lluvioso significativo se recogieron y midieron los sedimentos y la escorrentía producidos. Las determinaciones analíticas en los mismos se realizaron siguiendo iguales procedimientos que en el suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido en carbono orgánico total (COT) en los primeros 5 cm superficiales es

de 120 gC kg⁻¹ (2.4 kgC m⁻²), del cual un 70.8% (85 gC kg⁻¹) aparece en forma complejada (adsorbida) con la fracción mineral (COA), un 26.6% (32 gC kg⁻¹) se encuentra en forma de carbono orgánico lentamente oxidable y no complejado (COO), un 2.5% (3 gC kg⁻¹) en formas lábiles (COL) y sólo un 0.1% (188 mgC L⁻¹) aparece disuelto en la solución edáfica (COD) (Tabla 1). Esto significa que la mayor parte del CO en estos suelos se encuentra en forma de complejos relativamente estables con la fracción mineral, como ya han señalado varios autores (Dahlgren *et al.*, 1993, Parfitt *et al.*, 1997, Powers and Schlesinger, 2002).

De acuerdo con los resultados y según la “composición binaria” acuñada por Mizota and van Reeuwijk, 1989, la relación

TABLA 1. Formas de carbono orgánico erosionado y en la superficie del suelo

	Superficie del suelo (0-5 cm) (g kg ⁻¹)	Sedimentos (n=14) Media (g kg ⁻¹)	Escorrentía (n=14) (mg L ⁻¹)	Tasa de enriquecimiento
Total (COT)	120	116±30	—	0.97
Oxidable (COO)	32	63±11	—	1.97
Adsorbido (COA)	85	52±12	—	0.61
Lábil (COL)	3	1.0±0.7	—	0.33
Disuelto (COD)	188	—	12±10	0.06

Al_p/Al_o=0.45 indica que un 45% del aluminio activo total se encuentra en forma de “aluminio activo” en los complejos Al-humus, mientras que el resto se encontraría en forma de alofana, lo cual está de acuerdo con el contenido de alofana de estos horizontes superficiales (14%) estimado a partir de las relaciones atómicas (Al_o-Al_p)/Si_o (Parfitt and Wilson, 1985, Mizota and van Reeuwijk, 1989).

Por lo tanto podemos asumir que la fracción coloidal activa de estos suelos está dominada por compuestos con ordenación de

corto alcance tipo alofana y en menor proporción por complejos Al-humus, altamente resistentes al ataque microbiano, formados por la interacción del metal con los grupos funcionales carboxílicos de la materia orgánica (Schnitzer, 1978).

Del seguimiento de la dinámica erosiva realizada en las parcelas de erosión se desprende que la generación de escorrentía en estos suelos es relativamente baja, con valores medios del 13% (86 L m⁻²año⁻¹), no superando nunca el 45%, lo cual pone de manifiesto la elevada capacidad de infiltración de

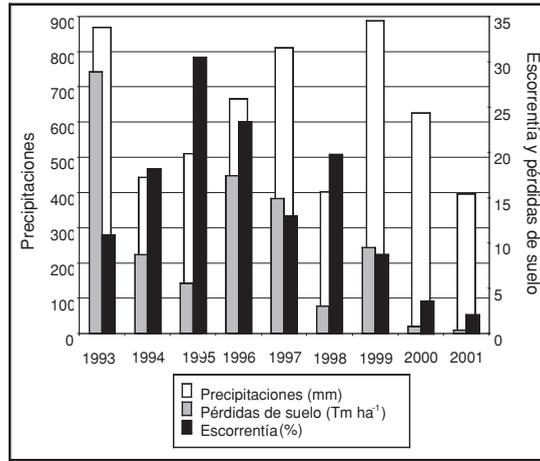


FIGURA 1. Pérdida de suelo, escorrentía(%) y pluviometría. Años 1993–2001.

los andosoles, al menos en los horizontes superficiales. Esto trae consigo una baja pérdida de suelo por erosión laminar, con un valor medio interanual de 9.6 Tm ha⁻¹año⁻¹, aunque pérdidas de hasta 317 Tm ha⁻¹ pueden tener lugar durante determinados eventos pluviométricos. La Figura 1 muestra la distribución interanual durante los 9 años del estudio de la pluviometría, la erosión y la escorrentía

En la Tabla 2 puede observarse que la fracción arcilla es la fracción granulométrica más fácilmente erosionada en estos suelos,

aunque no en estado disperso sino constituyendo pequeños agregados granulares y grumosos de alta estabilidad, de tal modo que más del 36% de los sedimentos están constituidos por agregados de tamaño inferior a 0.5 mm. Así valores de la relación de enriquecimiento superiores a 1 sólo se observan para la fracción arcilla (RE = 2.02) y para las fracciones de agregados de tamaño inferior a 2 mm y en particular para aquellos < 0.5 mm (RE = 2.34). Se observa pues una clara tendencia a erosionarse más fácilmente los agregados de menor tamaño.

TABLA 2. Propiedades físicas de la superficie del suelo y sedimentos

	Superficie del suelo (0-5 cm) (g kg ⁻¹)	Sedimentos (n=14) Media (g kg ⁻¹)	Tasa de enriquecimiento
Granulometría			
Arcilla	190	383±39	2.02
Limo	714	572±47	0.80
Arena	63	47±12	0.75
Fraciones de agregados según tamaño (mm)			
>2.0	502	268±14	0.53
0.5-2.0	350	357±21	1.02
<0.5	156	365±37	2.34
Arcilla, limo y arena dispersos	—	30±8	—

El contenido en COT de los sedimentos oscila entre 86 y 145 g kg⁻¹ (116 ± 30 g kg⁻¹) (Tabla 1), lo que supone unas pérdidas de CO por erosión, ligadas a la fase sólida, que varían entre 0.1 y 3.1 g m⁻², dependiendo de la cantidad de sedimentos generados en cada evento, ya que no parece existir relación entre la cantidad de CO perdido en los sedimentos y la concentración de COT en los mismos, ya que ésta depende más de las fracciones que en mayor cantidad se erosionan en cada evento. Si tenemos en cuenta que las tasas de erosión medidas señalan una producción media de sedimentos de 0.91 kg m⁻² año⁻¹, las pérdidas anuales de CO originadas por la erosión y ligadas a la fase sólida son de 114.4 gC m⁻² año⁻¹.

El valor de la relación de enriquecimiento en CO en los sedimentos está próximo a 1, lo que indica la baja selectividad del proceso

de erosión en cuanto al carbono orgánico. La concentración de COD en la escorrentía es también variable en los diferentes eventos (2-45 mg L⁻¹), lo que suponen unas pérdidas de COD oscilando entre 0.8 y 18.0 mg m⁻², dependiendo de la escorrentía generada en cada evento y de la concentración de la misma. La generación de escorrentía tiene un valor medio de 85.8 L m⁻² año⁻¹, lo que significan pérdidas de carbono orgánico en disolución de 1.03 gC m⁻² año⁻¹. Cuando comparamos las formas de carbono orgánico presentes en la superficie del suelo y en los sedimentos erosionados, se observa que los sedimentos se enriquecen principalmente en las formas de CO más difícilmente oxidables (COO) (RE = 1.97), mientras que la proporción de COA, COL y COD es mucho menor (Figura 2).

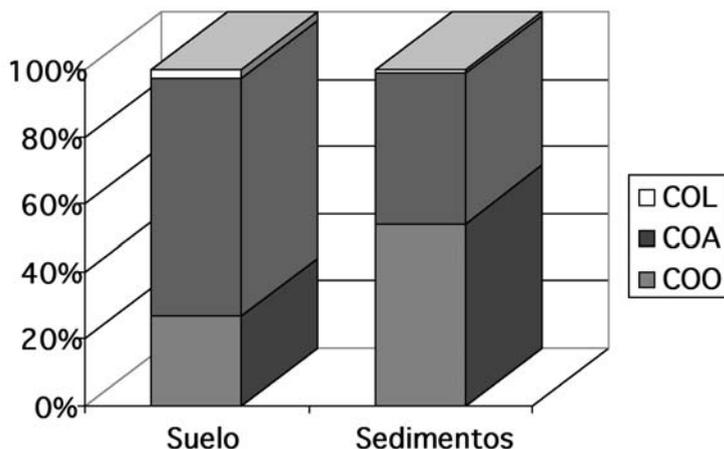


FIGURA 2. Formas de carbono orgánico en la superficie del suelo y en los sedimentos

Parece existir una cierta contradicción en estos resultados, ya que si la fracción más fácilmente erosionable es la de agregados de tamaño inferior a 0.5 mm y en esta fracción predominan las formas de COA, parecería lógico pensar que los sedimentos se enrique-

cerían en COA, lo cual no es el caso, sino que lo hacen en COO, lo que parece indicar que los agregados de tamaño <0.5 mm predominantes en los sedimentos con una relación de enriquecimiento de 2.34 no corresponden exactamente a los agregados del mismo

tamaño presentes en el suelo, sino a fragmentos de los agregados mayores y por tanto con un alto contenido de COO ($69 \pm 10 \text{ g kg}^{-1}$), lo cual confirma que la erosión en estos suelos parece comenzar mediante un desprendimiento de la superficie de los agregados mayores, debido al impacto de las gotas de lluvia, de pequeños fragmentos (0.1-0.2 mm) que son arrastrados por el flujo laminar (Rodríguez Rodríguez, 2002 a, b).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que en estos suelos se producen unas pérdidas importantes de CO por erosión ($114.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) fundamentalmente ligadas a la fase sólida, ya que las pérdidas de COD en las aguas de escorrentía son despreciables ($1.03 \text{ gC m}^{-2} \text{ año}^{-1}$). Si bien en la superficie del suelo predominan las formas de CO complejadas en forma de complejos alofana-Al-humus y Al-humus (COA) (71% del COT), en los sedimentos el predominio corresponde al CO lentamente oxidable y no complejado (COO) (54%). Estos resultados indican que una parte sustancial de los sedimentos la constituyen agregados pequeños (<0.5 mm) en forma de fragmentos desprendidos de los agregados mayores a causa del impacto de las gotas de lluvia. Estos agregados de tamaño superior a 2 mm son los predominantes en la superficie del suelo con un alto contenido de COO ocluido en el interior de los mismos. La encapsulación física del COA en los agregados mayores y la estabilización química del COA por complejos alofana-Al-humus y Al-humus en los agregados más pequeños, parecen ser los principales mecanismos de acumulación de CO en este tipo de andosoles. El hecho de que las formas más lábiles y teóricamente más fácilmente mineralizables (COO) constituyan una fracción despreciable del CO erosionado, hacen pensar que en estos suelos la mineralización del CO removido

por erosión laminar sea una fuente importante de CO_2 atmosférico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del Convenio "Contribución española al desarrollo de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación: I-Red de cuencas y parcelas experimentales de seguimiento y evaluación de la erosión y desertificación de la Universidad de La Laguna" entre el Ministerio de Medio Ambiente y la Universidad de La Laguna.

REFERENCIAS

- Cihlar, J., Heimann, M. and Olson, R. 2002. Terrestrial carbon observations. The Frascati Report on in situ carbon data and information. Environment and Natural Resources Series n° 5, FAO, Roma.
- Dahlgren, R., Shoji, S. and Nanzyo, M., 1993. Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. In: S. Shoji, M. Nanzyo and R.A. Dahlgren (Editors), *Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization*. Developments in Soil Science 21, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, pp. 101-143.
- Eswaran, H. Van der Berg, E., Reich, P. and Kimble, J., 1995. Global soil carbon resources. In: R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart (Editors), *Soils and Global Change*, Advances in Soil Science, CRC Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA, pp. 27-43.
- Golchin, A., Baldock, J.A. and Oades, J.M., 1998. A model linking organic matter decomposition, chemistry, and aggregate dynamics. En: R. Lal, J.M. Kimble, E. and R.F. Follet (Editors), *Soils Processes and the carbon cycle*, Advances in Soil Science, CRC Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA, pp. 245-266.

- IPCC, 1996. Revised IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual. Volume 3, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jastrow, J.D. and Miller, R.M., 1998. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organomineral associations. En: R. Lal, J.M. Kimble, E. and R.F. Follet (Editors), *Soils Processes and the carbon cycle*, Advances in Soil Science, CRC Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA, pp. 207-223.
- Kay, B.D., 1998. Soil structure and organic carbon: A review. In: R. Lal, J.M. Kimble, E. and R.F. Follet (Editors), *Soils Processes and the carbon cycle*, Advances in Soil Science, CRC Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA, pp. 169-197.
- Khamsouk, B., De Noni, G. and Roose, E., 2002. New data concerning erosion processes and soil management on Andosols from Ecuador and Martinique. En Proceedings of the 12th ISCO Conference, Tsinghua University Press, Beijing, China, II: 73-79.
- Mizota, C. and van Reeuwijk, L.P., 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. Soil Monograph 2, ISRIC, Wageningen.
- Parfitt, R.L. and Wilson, A.D., 1985. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. En: E. Fernández-Caldas and D.H. Yaalon (Editors), *Volcanic Soils. Weathering and Landscape relationships of soils on tephra and basalt*. pp. 1-8, Catena Supplement 7, Catena Verlag, Giessen, West Germany.
- Parfitt, R.L., Theng, B.K.G., Whitton, J.S. and Shepherd, T.G., 1997. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools, *Geoderma*, 75: 1-12.
- Powers, J.S. and Schlesinger, W.H. 2002. Relationships among soil carbon distribution and biophysical factors at nested spatial scales in rain forest of northeastern Costa Rica. *Geoderma* 109, 165-190.
- Rodríguez Rodríguez, A. Gorrín, S.P., Guerra, J.A., Arbelo, C.D. and Mora, J.L., 2002a. Mechanisms of soil erosion in andic soils of the Canary Islands. In: J. Juren (Editor), *Sustainable utilization of Global Soils and Water Resources*, Tsinghua University Press, Beijing, Vol. I, 342-348.
- Rodríguez Rodríguez, A., Guerra, J.A., Gorrín, S.P., Arbelo, C.D. and Mora, J.L., 2002b. Aggregates stability and water erosion in Andosols of the Canary Islands. *Land Degradation and Development*, 13:515-523
- Schnitzer, M., 1978. Humic substances: Chemistry and reactions. In: M. Schnitzer and S.U. Khan (Editors), *Soil Organic Matter*, Elsevier Publishing Co., Amsterdam, pp. 1-64.
- Soil Survey Staff, 1999. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, 2nd Edition, USDA-NRCS-US Gov. Printing Office, Washington, DC.
- WRB. 1998. World Reference Base for Soil Resources. FAO, ISRIC, ISSS, Rome.

