

CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO Y FACTORES DE CONTROL EN LA ESPAÑA PENINSULAR

C. HONTORIA¹, J.C. RODRÍGUEZ-MURILLO², A. SAA¹

¹Departamento de Edafología. Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Complutense s/n. 28040 Madrid. e-mail: kirah@eda.etsia.upm.es

²Centro de Ciencias Medioambientales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. C/ Serrano 115, Dpdo. Madrid.

Abstract. The carbon sequestration in soils is one of the current strategies to mitigate the impacts of greenhouse gas emissions responsible of climate change. Besides, it is a way to diminish the degradation processes of soils and increase the soil quality. In this context, research about original carbon content in soils and C changes is needed. We studied the organic carbon content of surface horizon in peninsular Spain and its relation with some soil and site properties. A soil database was elaborated with information from published soil studies. Different climatic zones were analysed in the study. Soil organic content of surface horizon showed high variability and was highly influenced by land use. Climate and land use were the main factors controlling the organic carbon content ($R^2_{adj} = 43\%$), while the influence of the rest of the variables was much lower ($R^2_{adj} = 6\%$). However, the last variables seem to play a major role in the driest zones of peninsular Spain ($R^2_{adj} = 14\%$) than in the humid zones ($R^2_{adj} = 1\%$).

Keywords: soil organic carbon content, carbon sequestration, control factors, soil database, climate, land use, Spain.

Resumen. El secuestro de carbono en los suelos se ha convertido en una estrategia para mitigar los efectos del calentamiento de la atmósfera, pero además supone un medio adicional para frenar los procesos de degradación de los suelos y aumentar la calidad del suelo. En este contexto, interesa conocer el contenido original del carbono orgánico en el suelo y sus posibles cambios. Para ello, se ha estudiado el contenido de carbono orgánico del primer horizonte del suelo en la España peninsular y su relación con propiedades intrínsecas y extrínsecas del mismo. Se ha analizado una base de datos elaborada a partir de información de suelos de la bibliografía española. En el estudio, se han considerado distintas zonas climáticas de la península. Se ha obtenido que el contenido de carbono orgánico presenta alta variabilidad y está muy influido por el uso del terreno. De las variables estudiadas, el clima y el uso son los dos factores de control más importantes del contenido de carbono orgánico del suelo ($R^2_{adj}=43\%$), siendo mucho menor la influencia de otras variables ($R^2_{adj}=6\%$). Sin embargo, estas últimas variables parecen desempeñar un papel más importante en las zonas climáticas más secas de la España peninsular ($R^2_{adj} = 14\%$) que en las zonas húmedas ($R^2_{adj} = 1\%$).

Palabras clave: carbono orgánico, secuestro de carbono, factores de control, bases de datos, clima, uso, del suelo España.

El secuestro del CO₂ atmosférico asociado a determinados cambios de uso de la tierra se está convirtiendo en una estrategia para mitigar los efectos de las emisiones de los gases de invernadero (Batjes, 1998; Lal,

2001). La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (2001) resalta el enorme potencial de los suelos en el secuestro de carbono con la ventaja añadida del incremento de la productividad del suelo, de especial

importancia en áreas con suelos degradados. El programa FAO-IFAD incide en la misma idea enlazando la Convención sobre Cambio Climático-Protocolo de Kioto, la Convención de Lucha contra la Desertificación y la Convención sobre Biodiversidad (FAO, 2001).

Una parte de la investigación actual sobre secuestro de carbono se está dirigiendo a investigar la dinámica del carbono orgánico en los suelos y, en especial, a identificar los componentes de la materia orgánica en el suelo con diferente tasa de retorno mediante métodos de separación física (Cambardella, 1992). También interesa conocer la influencia que diferentes factores ejercen sobre el carbono orgánico, tales como el clima, el tipo de residuo, la estructura, la textura y mineralogía del suelo y otros factores relativos al suelo. Especial relevancia tiene el uso del terreno sobre el contenido de materia orgánica del suelo y son numerosos los estudios realizados al respecto (Lal et al., 1998; Houghton et al. 1999), así como los modelos que predicen los efectos de los cambios de uso en el carbono orgánico (Volumen especial de Geoderma, nº 81 (1-2), 1997). Dentro de éstos, cabe resaltar los modelos Century y DNDC en los Estados Unidos y el modelo RothC en el ámbito europeo y de la FAO. Tan importante como los efectos del cambio de uso en el contenido de carbono orgánico en el suelo son las prácticas de manejo que, en su conjunto, suponen un potencial de fijación de carbono mayor que el propio cambio de uso (IPCC, 2000). El no laboreo o laboreo mínimo, el uso de cubiertas sobre el terreno, el control de la erosión, la fertilización, los sistemas agroforestales, el control del sobrepastoreo son prácticas que aumentan el contenido de carbono en el suelo.

Hay que destacar que la mayor parte de los estudios sobre fijación de carbono se están realizando en ambientes templado-húmedos (Smith, 2000; Heath et al., 2002) o tropicales (Bogdonoff et al, 2000;

Fearnside, 2000). Por el contrario, son pocos los trabajos que estudian el papel del suelo como sumidero de carbono en la zona mediterránea, zona que se caracteriza por el bajo contenido de carbono orgánico en sus suelos y la existencia de extensas zonas degradadas o en peligro de degradación. Estas zonas degradadas, con bajo contenido en carbono, presentan un elevado potencial para fijar carbono atmosférico a través de prácticas de manejo adecuadas o de cambios de uso, lo que es especialmente interesante en el contexto actual de la retirada de tierras promovida por la Unión Europea. Este incremento de carbono podría contribuir decisivamente a detener e invertir el proceso de degradación, aumentando la calidad del suelo. Considerando este doble interés, resulta prioritario incrementar los estudios sobre el potencial de los suelos para secuestrar carbono y su influencia en la calidad del suelo en condiciones de clima mediterráneo y, en especial, en España que presenta graves problemas de degradación de suelos.

Con objeto de estimar el potencial de los suelos para el secuestro de carbono atmosférico interesa conocer los valores de partida del carbono orgánico en el suelo y los cambios en dicho contenido que se pueden esperar (FAO, 2001). Con esta finalidad se ha procedido a estudiar el contenido de carbono orgánico en el primer horizonte del suelo, su relación con ciertas propiedades intrínsecas y extrínsecas del mismo y cómo este contenido de carbono puede verse afectado por variaciones en el clima y el cambio de uso de la tierra.

La contabilización de los depósitos de carbono orgánico, que puede realizarse a varias escalas (Batjes, 1996, 1998), involucra normalmente el uso de bases de perfiles de suelo georreferenciados con datos de densidad aparente y pedregosidad y requiere la existencia de mapas de suelos y mapas de usos del suelo. Precisamente, la relativa carencia y escasa calidad de este tipo de

información dificulta la cuantificación, especialmente, en el caso de España. En nuestro caso concreto, el estudio se basó en información procedente de bibliografía correspondiente al ámbito de la España peninsular. A partir de las fuentes originales, se elaboró una base de datos con información relativa al lugar del perfil del suelo y variables del primer horizonte del suelo o la capa superficial del mismo. Mediante un sistema de información geográfica, a cada perfil del suelo se le hizo corresponder el valor de distintas variables climáticas (valores de precipitación y temperatura). La capa de información de temperatura se obtuvo a partir de 467 estaciones termopluviométricas y la capa de precipitación a partir de 4094 estaciones pluviométricas (Hontoria, 1995; Saa, 1991).

En una primera base de datos de 766 perfiles de suelo distribuidos en la España peninsular (Hontoria et al., 1999), en la que se excluyeron los suelos de turba, se consideraron distintas variables: i) relativas al lugar (coordenadas UTM, altitud, uso del terreno, vegetación, tipo de suelo, pendiente, orientación y material parental); ii) relativas al primer horizonte del suelo (porcentaje en peso del carbono orgánico del suelo determinado por el método de Walkley-Black, profundidad, densidad aparente, contenido de arcilla y limo USDA, clase textural y contenido en peso de elementos gruesos); y iii) relativas al clima (precipitación media anual, temperatura media anual y cinco variables relacionadas con la determinación del régimen de humedad del suelo según la Soil Taxonomy) (Soil Survey Staff, 1994). La falta de suficientes datos de densidad aparente del suelo y contenido en elementos gruesos no permitió la obtención de valores de contenido de carbono por unidad de superficie. Como resultado del estudio, se encontró que el contenido de carbono orgánico (%) del primer horizonte del suelo dependía del tipo de uso (Tabla 1).

TABLA 1. Contenido de carbono orgánico (%) del primer horizonte del suelo por tipo de uso (766 perfiles).

	n	Media	SD
Bosque	188	3.9	3.0
Matorral	124	5.8	4.0
Pastizal	111	3.3	2.6
Cultivos leñosos	110	1.0	0.8
Cultivos herbáceos	233	1.2	1.0

Como medias generales, en los suelos no cultivados, el contenido de carbono fue de 4,4 %, siendo el matorral el uso con un contenido mayor; en los suelos cultivados, este valor descendió a 1,1%, con una alta variabilidad en todos los casos. Al estudiar la relación del carbono orgánico (%) con un conjunto de variables climáticas, del lugar y del suelo, se encontró que las variables mejor relacionadas con el contenido de carbono fueron la precipitación media anual, que mostró una correlación positiva ($r=0.55$), y el número consecutivo de días que la sección de control del suelo está completamente seca durante el verano, que presentó una correlación negativa ($r=-0.53$). El uso de la tierra resultó ser una de las variables con mayor influencia en el contenido de carbono orgánico, llegando a explicar por sí solo un 33% de la variabilidad del carbono, mientras que las variables de clima (temperatura media anual y precipitación media anual) explicaron un 37%. Combinando ambos tipos de variables, uso y clima, se logró explicar un 45% de la varianza. La contribución del resto de variables como la altitud, la pendiente y el contenido en limo fue únicamente de un 2% adicional. Cabe resaltar que estas últimas variables mostraron una relación más estrecha con el contenido de carbono en los suelos cultivados que en los no cultivados. Así, las variables de uso y clima explicaron por sí solas el 35% de la

variabilidad del carbono en los suelos cultivados, pero este porcentaje se elevó al 51% cuando se incluyeron en la regresión el resto de variables.

Estos resultados se han visto confirmados en otro estudio realizado sobre 396 perfiles de suelos forestales pertenecientes a una base de datos de la Red Europea de Seguimiento de Daños en los Bosques (Montoya et al, 1998). Las variables analizadas en el estudio fueron el porcentaje en peso del carbono orgánico determinado por combustión, la densidad aparente, el contenido de elementos gruesos en peso, la clase textural, el pH, la altitud, la orientación, la pendiente, la edad, el tipo de vegetación (frondosas, coníferas) y las variables climáticas (precipitación y temperatura media, anuales y estacionales). En este caso, la existencia de datos de densidad aparente y contenido en elementos gruesos permitió el cálculo del contenido en carbono orgánico por unidad de superficie. Para el conjunto de los perfiles, el contenido medio de carbono orgánico (kg/m^2) de la capa superficial (20 cm), incluido el carbono de la capa orgánica, fue de $6,4 \text{ kg/m}^2$ para las frondosas ($n=194$) y de $7,3 \text{ kg/m}^2$ para las coníferas ($n=202$), siendo las diferencias estadísticamente significativas a un 95% de nivel de confianza. Nuevamente, las variables que mostraron mayor correlación fueron las climáticas, destacando la temperatura media del verano ($r=-0.45$), la precipitación media anual ($r=0.44$) y la precipitación media de

otoño ($r=0.43$). Las variables climáticas por sí solas explicaron el 32% de la variabilidad del contenido en carbono y el resto de las variables (tipo de vegetación, textura, pendiente, altitud y exposición) explicaron un 9% adicional. Cabe destacar la diferente influencia sobre el carbono de las variables en función de las zonas analizadas de la España peninsular (Fig.1), resultando que la varianza explicada por el clima es notablemente mayor en el tercio occidental de la península que en la vertiente mediterránea.

Este comportamiento diferente de los factores que influyen en el contenido de carbono orgánico del suelo, llevó a ampliar la base de datos hasta 1315 perfiles de suelos (Fig. 2) y analizar esta influencia en función de distintas zonas climáticas. Los datos de suelo fueron tomados de la base de datos de 766 perfiles de suelo mencionada anteriormente, de la base de datos de 396 suelos forestales, de 132 perfiles de suelos de la base de datos del Sistema Español de Información de Suelos (SEIS) y 21 perfiles pertenecientes al proyecto LUCDEME y a otros autores. Dada la variedad de fuentes empleada, las variables se normalizaron para asegurar la compatibilidad de las bases de datos y en algunos casos se eliminaron al no existir datos para todos los perfiles. En el análisis estadístico, el contenido de carbono orgánico se consideró como porcentaje en peso sobre tierra fina (%). Mediante un índice

TABLA 2. Regresión múltiple del contenido de carbono orgánico (kg/m^2) del primer horizonte de suelos forestales (396 perfiles) con las variables analizadas.

	n	R^2_{adj}	
		VARIABLES CLIMÁTICAS	TODAS LAS VARIABLES
Todos los perfiles	396	32%	41%
Zona 1	86	48%	55%
Zona 2	111	38%	51%
Zona 3	199	23%	37%

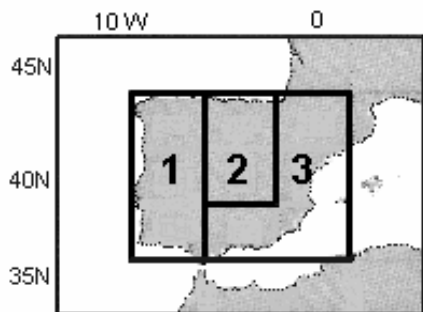


FIGURA 1. Zonificación del estudio de carbono orgánico de suelos forestales (396 perfiles).

climático muy sencillo, el Índice de Lang, se separaron tres tipos de zonas: una zona húmeda con el cociente $P_{\text{anual}}/T_{\text{anual}}$ mayor de 100, una zona intermedia con $P_{\text{anual}}/T_{\text{anual}}$ entre 40 y 100 y, por último, una zona seca con $P_{\text{anual}}/T_{\text{anual}}$ menor de 40. Para el conjunto de los perfiles, las variables climáticas explicaron el 37% de la variabilidad del carbono orgánico. Este porcentaje se incrementó hasta un 43% al considerar conjuntamente el clima y el uso, siendo la contribución del resto de variables no climáticas (textura, pendiente y altitud) muy escasa (Tabla 3). Cabe destacar que el clima y el uso mostraron mayor influencia sobre el carbono orgánico en las zonas húmedas ($R^2_{\text{adj}} = 17$ y 22% respectivamente) que en las secas ($R^2_{\text{adj}} = 12\%$ y 14%), mientras que, por el contrario, otras variables no climáticas como la textura, la pendiente y la altitud mostraron una influencia sobre el contenido de carbono en las zonas secas notablemente mayor ($R^2_{\text{adj}} = 16$) que en las zonas húmedas ($R^2_{\text{adj}} = 1$) e intermedias ($R^2_{\text{adj}} = 6$), lo que confirma los resultados de los estudios anteriores.

De los resultados encontrados, se puede concluir que el clima y el uso se configuran como dos factores de gran influencia en el contenido de carbono de los suelos españoles, desempeñando el resto de las variables analizadas un papel mucho menos importante. Sin embargo, estas últimas

variables parecen jugar un papel más relevante en las zonas climáticas más secas de la España peninsular y en los suelos cultivados.



FIGURA 2. Localización de los perfiles de suelos (1315)

Como líneas futuras de investigación, hay que considerar que la información de suelos procedente de la bibliografía española presenta algunas limitaciones como la heterogeneidad, la carencia de datos básicos para cuantificar o la representación desequilibrada de los distintos ambientes. Por tanto, es conveniente generar información de suelos orientada desde sus inicios al estudio del contenido de carbono en los suelos y prestando especial atención a la toma de datos de pedregosidad y densidad aparente. La generación de información específica sobre carbono del suelo puede relacionarse con el establecimiento de la red de seguimiento necesaria para verificar los cambios en los contenidos de carbono del suelo, tal y como requiere el artículo 3.4. del protocolo de Kioto. De forma complementaria, hay que considerar el establecimiento de sistemas que faciliten la planificación de los usos de la tierra que

contrarresten las emisiones contaminantes. La conexión de modelos de estimación del carbono en el suelo con sistemas de información geográfica puede abrir una vía

que facilite la planificación territorial orientada al secuestro de carbono por parte de las administraciones competentes.

TABLA 3. Regresión múltiple del contenido de carbono orgánico (%) del suelo (1315 perfiles) con las variables analizadas.

	R^2_{adj}	Zonas húmedas	Zonas intermedias	Zonas secas
	Todos los perfiles N = 1315	N = 241	N = 574	N = 501
Todas las variables	44	32	30	26
Uso + clima	43	27	25	21
Clima	37	17	16	12
Uso	24	22	16	14
Otras variables no climáticas	6	1	6	16

REFERENCIAS

- Batjes, N.H. (1996): Total Carbon and Nitrogen in the Soils of the World. *Eur. J. of Soil Sci.* 47:151-163.
- Batjes, N.H. (1998): Mitigation of Atmospheric CO₂ Concentrations by Increased Carbon Sequestration in the Soil. *Biol Fert Soils*, 27 (3): 230-235.
- Bogdonoff P., Detwiler R. P., Hall C.A.S. (2000): Land Use Change and Carbon Exchange in the Tropics: III. Structure, Basic Equations and Sensitivity Analysis of the Model. *Environ. Manage.*, 345-354.
- Cambardella, C.A. and Elliot E.T. (1992): Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Sci. Soc. Am J.*, 56:777-783.
- F.A.O. (2001): Soil Carbon Sequestration for Improved Land Management. World Soils Resources Reports 96. Rome. 57 p.
- Fearnside, P.M. (2000): Global Warming and Tropical Land-Use Change: Greenhouse Gas Emissions from Biomass Burning, Decomposition and Soils in Forest Conversion, Shifting Cultivation and Secondary Vegetation. *Climatic Change*, 46:115-158.
- Heath L.S., Birdsey R.A., Williams D.W. (2002): Methodology for estimating soil carbon for the forest carbon budget model of the United States, 2001. *Environ. Pollut.*, 116: 373-380.
- Hontoria, C. (1995): El régimen de humedad de los suelos de la España peninsular. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. 201 p + anexos.
- Hontoria, C., Rodríguez-Murillo, J.C., Saa, A. (1999): Relationships between soil organic carbon content and other site characteristics in peninsular Spain. *Soil Sci. Soc. Am J.*, 63, 614-621.
- Houghton, R. A., Hackler, J.L., Lawrence, K.T. (1999): The U.S. carbon Budget: Contributions from Land-use Change. *Science* 285:574-577.
- IPCC (2000). Informe especial del IPCC sobre uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura.
- Lal, R. Ed. (2001): Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect. Soil Science Society of America. SSSA Special Publication Nb. 57. 236 p.

- Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F., Cole, C.V. (1998): The Potencial of U.S. cropland to sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse effect. Ann Arbor Press, Chelsea, MI, 128p.
- Montoya, R., López, M., Sánchez, G., González, M.R., Jiménez, R. (1998): La red europea de daños en los bosques (nivel I) España, 1987-1996, Ed. O.A. Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España.
- Saa, A. (1991): Modelo de distribución espacial y de frecuencia de la precipitación en la Península Ibérica. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. 189 p + anejos.
- Smith, W.N., Desjardins, R.L., Pattey, E. (2000): The net flux of carbon from agricultural soils in Canada 1970–2010. *Global Change Biol*, 6, no. 5, pp. 557-568(12).
- Soil Survey Staff (1994): Keys to Soil Taxonomy. 6th Ed. U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C.
- Soils Science Society of America (2001): Carbon Sequestration: Position of the Soils Science Society of America. <http://www.soils.org/carbseq.html>