

SECUESTRO DE CARBONO INORGÁNICO EN EL SUELO: UNA PRIMERA ESTIMACIÓN EN EL ÁMBITO SEMIÁRIDO ESPAÑOL

INORGANIC CARBON SEQUESTRATION IN SOIL: A FIRST APPRO- ACH IN SPANISH SEMIARID FIELD

J. SÁNCHEZ; L. RECATALÁ; M. GOBERNA

Departamento de Planificación territorial, CIDE-Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CSIC, Universitat de València, Generalitat Valenciana), Apartado Oficial, C/ Camí de la Marjal S/N, 46470-Albal (Valencia, España)

Abstract. In the last years, the importance of the soil has been projected like carbon sink. The reason is because the organic carbon in soil means the major stock of this element in the terrestrial ecosystems, so its stock and sequestration can be basic to deaden the greenhouse effect. However, a few estimations have been made about the inorganic carbon stock in soil, in spite of being capture in stable forms like calcium carbonate. In this work, it is showed an estimate about the total content of inorganic carbon in the soils of semiarid Spain, in general, and in the autonomous communities of Valencia and Castilla-La Mancha, in particular. The numbers obtained are situated close to 4.8, 0.3 and 0.3 Pg C-CO₃²⁻ in 1 meter of depth, respectively. Assumed all the uncertainties in the calculation, this first valuation tries to show the relevant paper that the semiarid fields can play, through the carbon sequestration in inorganic forms, to mitigate the greenhouse effect. This roll can mean a new challenge to try mitigating the effects of some processes of desertification in these places, which can reduce significantly their potential of carbon sequestration in soil.

Keywords: Carbon sequestration, inorganic carbon, semiarid field, Spain, Community Valenciana, Castilla-La Mancha

Resumen. En los últimos años, se ha resaltado con más énfasis la importancia del suelo como sumidero de carbono. Esto se debe principalmente a que el carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva de este elemento en los ecosistemas terrestres, de manera que su almacenamiento y secuestro puede resultar fundamental para amortiguar el efecto invernadero. Sin embargo, se han realizado pocas estimaciones de la acumulación de carbono inorgánico en el suelo, a pesar de ser capturado en formas más estables como el carbonato cálcico. En este trabajo, se presenta una estimación sobre el contenido total de carbono inorgánico en los suelos de la España semiárida, en general, y de las comunidades autónomas de Valencia y Castilla La Mancha, en particular. Las cifras obtenidas se sitúan en torno a 4.8, 0.3 y 0.3 Pg C-CO₃²⁻ a 1 metro de profundidad, respectivamente. Con todas las incertidumbres asumidas en el cálculo, esta primera valoración intenta poner de manifiesto el papel relevante que pueden desempeñar las zonas semiáridas, mediante el secuestro de carbono en formas inorgánicas, para atenuar el efecto invernadero. Ese papel puede constituir un nuevo reto para tratar de minimizar los efectos de determinados procesos de desertificación en esas áreas, que pueden mermar significativamente su potencial de captura de carbono en el suelo. Palabras clave: Secuestro de carbono, carbono inorgánico, ámbito semiárido, España, Comunidad Valenciana, Castilla La Mancha.

INTRODUCCION

En las últimas décadas, y sobre todo con mayor énfasis después del Protocolo de Kyoto, se ha puesto de manifiesto la relevancia del papel del suelo en la regulación del ciclo del carbono (Lal *et al.*, 1998; Smith, 1999).

Según algunas estimaciones, el carbono orgánico del suelo representa con un 75% del total almacenado en los ecosistemas terrestres, la mayor reserva de este elemento en interacción con la atmósfera, calculándose en cerca de 1500 Pg C la cantidad existente a 1 metro de profundidad (Batjes, 1996; FAO, 2002). De hecho, la mayoría de estudios sobre almacenamiento de carbono en el suelo se han centrado en las formas orgánicas (Smith, 1997). En este contexto, el procedimiento más comúnmente aplicado ha consistido en la determinación del carbono orgánico total a diferentes profundidades o globalmente para uno o más horizontes, con la posterior transformación de los datos tomando en consideración la densidad y pedregosidad del suelo (e.g. Post *et al.*, 1982; Eswaran *et al.*, 1993; Sombroek *et al.*, 1993; Batjes, 1996).

En cuanto a la acumulación de carbono inorgánico, han sido menos las estimaciones realizadas (e.g. Lal, 2002), a pesar de ser capturado en formas más estables tales como el carbonato cálcico. De hecho, la formación de carbonatos secundarios o carbonatos pedogénicos y el lavado de carbonatos hacia las aguas subterráneas constituyen también dos mecanismos importantes de secuestro de carbono (FAO, 2002). Según Lal (2001), incluso asumiendo un promedio bajo de formación de carbonatos, es decir, entre 30 y 50 kg ha⁻¹ año⁻¹, el potencial de secuestro de carbono en forma inorgánica en las zonas áridas de Estados Unidos se situaría entre 11 y 18 Tg C año⁻¹. Así pues, este proceso puede resultar particularmente interesante para la atenuación del efecto invernadero, en unas áreas, áridas y semiáridas (Lal, 2001; Mermut, 2002), en las que el contenido

de carbono orgánico del suelo y la capacidad de fijación de CO₂ en formas orgánicas por unidad de superficie son bajas.

En este trabajo, se presenta una primera estimación sobre el contenido total de carbono inorgánico en los suelos de la España semiárida. Asimismo, se realiza dicho ejercicio para las comunidades autónomas de Valencia y Castilla La Mancha. Se trata de dos zonas representativas del ámbito semiárido español, con alto riesgo de desertificación (FAO *et al.*, 1977; UNEP, 1992), para las cuales se cuenta con información de suelos detallada, por lo que se han empleado como áreas piloto para la realización de esta primera aproximación a mesoescala. Con todas las reservas e incertidumbres asumidas en el cálculo, esta primera valoración pretende ser punto de partida hacia la resolución de las principales cuestiones que, según el último informe de FAO sobre captura de carbono en los suelos (FAO 2002), aparecen todavía asociadas a este importante proceso. Así, el conocimiento de los tipos de compuestos de carbono capturados, del tiempo de residencia y de su función en el suelo es especialmente interesante en estas zonas, donde la intensidad de determinados procesos de desertificación, principalmente el relativo a la erosión hídrica, pueden mermar significativamente el potencial de captura de carbono del suelo, y consiguientemente su capacidad de amortiguación del efecto invernadero.

MATERIAL Y MÉTODOS

El área de estudio está constituida por el ámbito semiárido español, considerando como tal el territorio ubicado por debajo de la isoyeta de los 500 mm de precipitación media anual. Por otro lado, la Comunidad Valenciana y la Comunidad Autónoma de Castilla La Mancha se han empleado como áreas piloto, dada la existencia de información de suelos detallada. El mapa de localización de las áreas de estudio se presenta en la Figura 1.

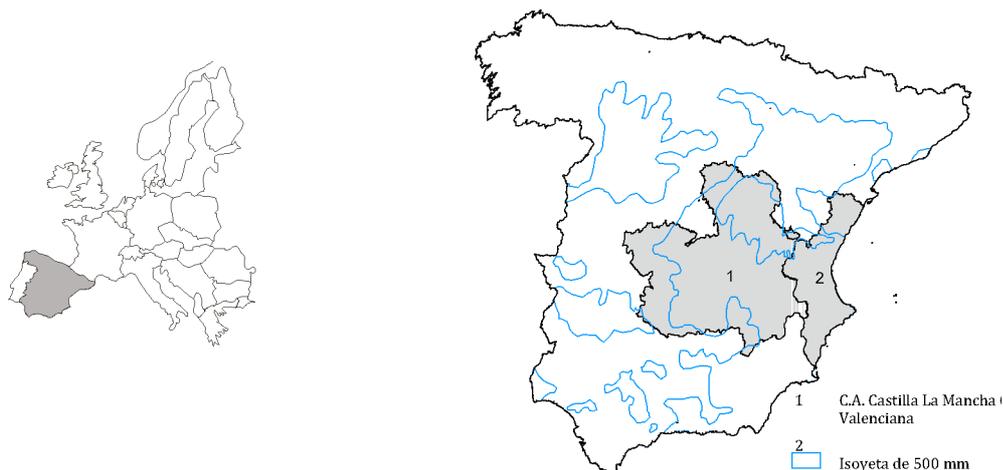


FIGURA 1. Localización del área de estudio.

Concretamente, para el cálculo del carbono inorgánico almacenado en los suelos de estas áreas, se han considerado únicamente aquellos grupos de suelos que presentan carbonatos de origen edafogénico, es decir, Calcisoles, Luvisoles cálcicos, Kastanozems cálcicos y Chernozems cálcicos (FAO, 1988). En la Figura 2 se muestra la distribución espacial de estos suelos en la España semiárida, según la información contenida en el Mapa de Suelos

del Instituto Geográfico Nacional a escala 1:2.000.000 (MOPT, 1991). La misma información, correspondiente a la Comunidad Valenciana y la Comunidad Autónoma de Castilla La Mancha se presentan respectivamente en las Figuras 3 y 4. En este caso, los datos se extrajeron de los Mapas Geocientíficos de las Provincia de Castellón (Agencia de Medio Ambiente, 1991a), Valencia (Diputación Provincial de Valencia, 1986a) y Alicante (Agencia

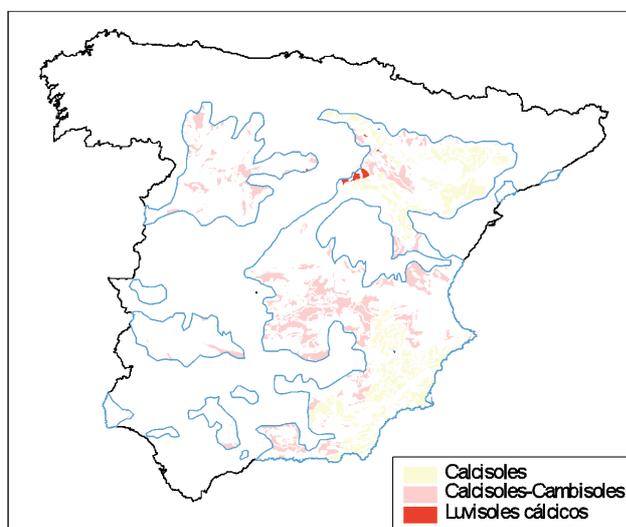


FIGURA 2. Distribución espacial de los suelos con carbonato edafogénico en el ámbito semiárido español.

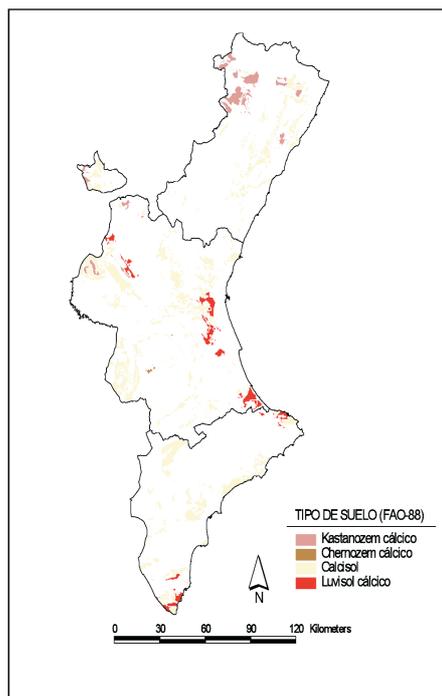


FIGURA 3. Distribución espacial de los suelos con carbonato edafogénico en la Comunidad Valenciana.

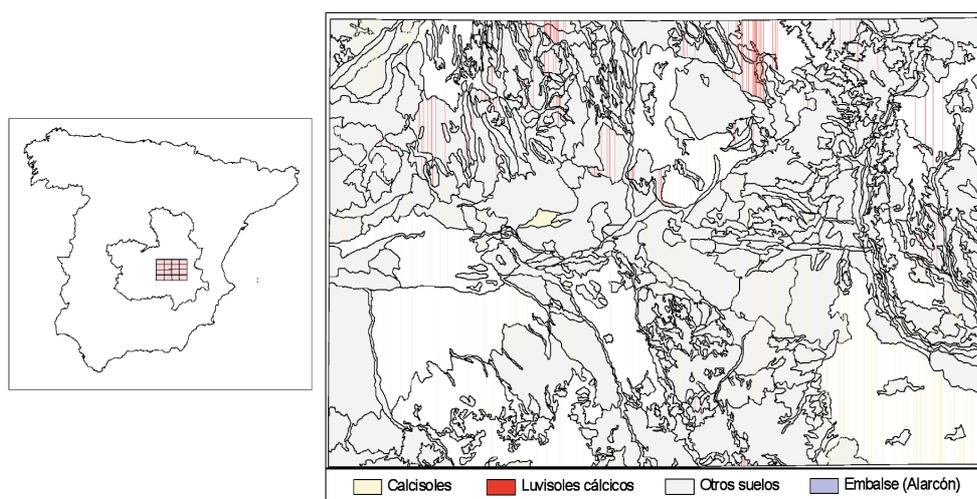


FIGURA 4. Distribución espacial de grupos de suelos con carbonato edafogénico en el área del proyecto EFEDA (Castilla La Mancha)

de Medio Ambiente, 1991b) a escala 1:200.000 y el Mapa de Suelos del área de trabajo del proyecto EFEDA (Sánchez et al., 1994).

La estimación de los gramos de carbonatos en los suelos considerados, se ha realizado siguiendo procedimiento similar al aplicado para calcular el carbono orgánico en el suelo. Específicamente, se ha aplicado el siguiente algoritmo matemático:

$$CC = [C * DA * P * (100 - EG)] * S \quad (I)$$

donde, CC es el contenido en carbonatos calculado (g) en la tierra fina hasta una profundidad de 1 m; C es el contenido medio en carbonatos (%); DA es la densidad aparente media (g cm⁻³); P es la profundidad del suelo (cm); EG es el contenido medio en elementos gruesos (%) y S es la superficie ocupada por el tipo de suelo que está siendo evaluado en el área de estudio (cm²)

A través de la relación molar, se calculan finalmente los gramos de carbono contenidos en los gramos de carbonatos obtenidos con la expresión anterior para cada grupo de suelos.

La aplicación del procedimiento de cálculo se ha realizado con datos medios de 50 perfiles pertenecientes a varios proyectos de investigación (Diputación Provincial de Valencia, 1986b; Sánchez *et al.*, 1994; CIDE, 2000; CIDE, 2001), y que se encuentran incorporados en el Sistema de Información de Suelos, que está desarrollando el Departamento de Planificación Territorial del Centro de Investiga-

ciones sobre Desertificación (CIDE). Los datos considerados corresponden a diferentes horizontes hasta una profundidad del suelo de 1 m. La superficie ocupada por cada tipo de suelo se ha obtenido en un entorno SIG (ArcView 3.0), partiendo de la información digital perteneciente al Mapa de Suelos de España de MOPT (1991) (E 1:2.000.000), a los Mapas Geocientíficos de las Provincias de Castellón (Agencia de Medio Ambiente, 1991a), Valencia (Diputación Provincial de Valencia, 1986a) y Alicante (Agencia de Medio Ambiente, 1991b) (E 1:200.000) y actualizados con los datos obtenidos del proyecto Suelos Forestales de la Comunidad Valenciana (CIDE, 2000; CIDE, 2001) y al Mapa de Suelos de Castilla La Mancha obtenido del proyecto EFEDA (Sánchez et al., 1994).

RESULTADOS Y DISCUSION

La estimación del contenido en carbono inorgánico en los suelos con carbonatos edafogénicos se realizó aplicando la ecuación (I). Para el cálculo se emplearon los valores medios del contenido en carbonatos (C), densidad aparente (DA) y porcentaje de elementos gruesos (EG) de los 50 perfiles seleccionados para el estudio. Estos datos, así como las superficies (S) ocupadas por cada tipo de suelo, tanto en el conjunto de la España semiárida como en las comunidades autónomas de Valencia y Castilla La Mancha, se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1. Valores medios de carbonatos (C), densidad aparente (DA) y elementos gruesos (EG) empleados para el cálculo, y superficie (S) ocupada por cada tipo de suelo en cada área de estudio

TIPO DE SUELO	C (%)	DA (g cm ⁻³)	EG (%)	S (ha) España semiárida	S (ha) C. Valenciana	S (ha) C. A. Castilla La Mancha
CALCISOLES	60	1.35	34	7,450,513.3	445,969.1	390.946,5
LUVISOLES CÁLCICOS	15	1.35	15	82,189.2	47,275.1	113,289.2
KASTANOZE MS CÁLCICOS	30	0.70	40	-	51,404	-
CHERNOZEM S CÁLCICOS	30	0.70	40	-	1,856	-

Los resultados obtenidos para cada uno de los casos de estudio y cada uno de los tipos de suelos se muestran en la Tabla 2. En ésta puede observarse también las cantidades totales de carbonatos contenidos en la tierra fina en los

suelos con acumulaciones de origen edáfico hasta la profundidad de 1 m, tanto en el conjunto de las áreas semiáridas de España como en las dos comunidades autónomas seleccionadas.

TABLA 2. Contenido en carbonatos (CC) calculado en la tierra fina, hasta una profundidad de 1 m, en la España semiárida, la Comunidad Valenciana y Castilla La Mancha

TIPO DE SUELO	CC (g) España semiárida	CC (g) C. Valenciana	CC (g) C. A. Castilla La Mancha
CALCISOLES	3,98 E 16	2,38 E 15	2,09 E 15
LUVISOLES CÁLCICOS	1,41 E 14	8,14 E 13	1,95 E 13
KASTANOZE MS CÁLCICOS	-	6,48 E 13	-
CHERNOZEM S CÁLCICOS	-	2,34 E 12	-
TOTAL	40.0 E 15	2.53 E 15	2.29 E 15

A través de la relación molar, se ha obtenido que el total de carbono inorgánico almacenado en estos suelos hasta 1 m de profundidad es de 4.8, 0.30 y 0.27 Pg C-CO₃²⁻ para la España semiárida, la Comunidad Valenciana y la Comunidad Autónoma de Castilla La Mancha, respectivamente. Nuestras cifras representan entre un 0.44 y un 0.67 % del mundial en la España semiárida y entre 0.03 y 0.04 % en cada una de las comunidades autónomas en estudio, si se tienen en cuenta las estimaciones de carbono inorgánico a nivel mundial realizadas por varios autores e Instituciones. Así, Batjes (1996) estima que el total de carbono inorgánico almacenado en el suelo a nivel mundial se sitúa entre 695-748 Pg C-CO₃²⁻ a 1 m de profundidad. Por su parte, la estimación realizada por la National Science Foundation (2000), se sitúa en 1100 Pg C-CO₃²⁻ a 1 m de profundidad. En principio los datos obtenidos resultan coherentes con el porcentaje de superficie que ocupan estos territorios con respecto a la superficie mundial.

Sin embargo, esta estimación está sometida a incertidumbres, en cuanto que, por ejem-

plo, no se han tenido en cuenta en el cálculo los carbonatos de las costras calcáreas que, no sólo presentan un elevado contenido en carbonatos, si no que además, pueden tener una extensión considerable en algunas áreas del territorio. Así, según Bouwman y Sombroek (1990), a nivel mundial, la formación de caliche puede suponer un sumidero de carbono relativamente pequeño, pero de cierta importancia. Por tanto, la no consideración de estas estructuras puede suponer una infravaloración en la estimación del contenido en carbonatos.

Por otra parte, y quizás de mayor envergadura para el grado de adecuación de la estimación, está el hecho de que una mayor o menor parte de los carbonatos calculados no sean de origen edafogénico, si no heredados de la roca madre. Aunque algunos autores (p. ej. Birkeland, 1984) comentan que es bastante improbable que el carbonato acumulado en horizontes cálcicos proceda de la alteración de la roca madre, no se tiene absoluta certeza de que sea realmente así. Además, aun determinando que el carbono no procede del material originario, habría que eliminar del cálculo la canti-

dad de carbonatos procedentes del aumento de presión parcial de CO_2 por la actividad microbiana y la respiración radicular. Esto es especialmente relevante en el ámbito semiárido, donde la elevada tasa de respiración radicular y microbiana incrementa notablemente la presión parcial de CO_2 en el suelo. Así pues, si no se determina el carbonato de origen biológico se podría sobrevalorar el contenido en carbonatos edafogénicos, y por tanto la potencialidad real de estos suelos para amortiguar el efecto invernadero. En este sentido, resulta fundamental la realización de experimentos con isótopos radiactivos, que pongan de manifiesto la procedencia del carbono, es decir, si es atmosférico (difusión como gas, acumulación de carbonatos como sólido o entrada en forma disuelta en la precipitación), biológico (respiración radicular o microbiana) o del material originario. No obstante, la interpretación de los resultados de estos experimentos puede acarrear dificultades, tal como discuten McFadden et al. (1991), por: a) la contribución relativa de la biomasa C_3 y C_4 , b) la tasa de producción de CO_2 atmosférica y biológica, c) la variación de los valores isotópicos de O de la precipitación y el agua del suelo en los valores del mismo en el carbonato edafogénico, y d) la magnitud de la herencia de los valores isotópicos de C y O en el carbonato del material originario.

Con todo, resulta de especial interés la estimación de la acumulación de carbono inorgánico y de las tasas de fijación del mismo a partir del CO_2 atmosférico, en los suelos de las zonas áridas y semiáridas, por varias razones. La principal reside en que las formas inorgánicas del carbono son más estables en el suelo que las formas orgánicas. Además, en los ámbitos árido y semiárido, está favorecida la calcificación frente a la descalcificación, dada la escasez de agua en el suelo. Por ello, los suelos de estas zonas pueden constituirse en reservorios naturales de carbono inorgánico más que orgánico, y contribuir de esta manera a atenuar el efecto invernadero. De hecho, la materia orgánica en

los suelos de los ámbitos árido y semiárido es relativamente escasa. Aproximadamente un 75% de las superficies estudiadas en el sur de Europa presentan un contenido en materia orgánica que se considera bajo (<3.4 %) o muy bajo (<1.7%), de acuerdo con COM (2002). En general, en estos ámbitos, el proceso de mineralización de las sustancias orgánicas se encuentra favorecido respecto al de humificación, dadas las elevadas temperaturas medias. No obstante, la dinámica de las sustancias orgánicas se ve enormemente afectada por el contenido de carbonatos del suelo. La interacción química que se produce entre sustancias inorgánicas y orgánicas estabiliza a estas últimas, convirtiéndolas en sustratos más inaccesibles para la oxidación microbiana y más resistentes a la mineralización química (Sollins *et al.*, 1996). Por ello, potenciando la acumulación de carbonatos en estos suelos se incrementaría también el secuestro de carbono en formas orgánicas, favoreciendo de esta manera la capacidad de amortiguación del efecto invernadero por parte de estas áreas.

En realidad, la capacidad de las zonas áridas y semiáridas para secuestrar carbono puede ser relevante, tomando en consideración que según algunas estimaciones (p. ej. Mermut, 2002) suponen una superficie nada despreciable del planeta, con 450 millones de hectáreas. Además, existen muchas hectáreas degradadas que podrían restaurarse para ser convertidas en sumideros de carbono. De hecho, en general, las áreas áridas y semiáridas se encuentran bajo la constante amenaza del proceso de desertificación, que podría conllevar que las zonas que aún se conservan en estado natural se transformaran en nuevas fuentes de emisión de CO_2 a la atmósfera (Mermut, 2002). Esto puede suponer un nuevo reto para la propuesta de estrategias adecuadas que minimicen los efectos de determinados procesos de desertificación (p. ej. prácticas de control de la erosión hídrica) en esas áreas, de manera que no quede mermado su potencial de atenuación del efecto inverna-

dero. En cualquier caso, para garantizar que ese potencial puede ser significativo es necesario profundizar en el conocimiento de los tipos de compuestos de carbono capturados y su procedencia, del tiempo de residencia y de su función en el suelo. El desarrollo de programas de investigación en esta temática es, por tanto, altamente necesario y recomendable en estas áreas.

REFERENCIAS

- Agencia de Medio Ambiente. (1991a). Mapa Geocientífico de la Provincia de Castellón. Memoria y Cartografía. Agència del Medi Ambient, *Conselleria d'Administració Pública, Generalitat Valenciana*, Valencia, España.
- Agencia de Medio Ambiente. (1991b). Mapa Geocientífico de la Provincia de Alicante. Memoria y Cartografía. Agència del Medi Ambient, *Conselleria d'Administració Pública, Generalitat Valenciana*, Valencia, España.
- Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47, 151-163.
- Birkeland, P.W. (1984). Soils and Geomorphology. *Oxford University Press*, 372 pp.
- Bowman, A.F. y Sombroek, W.G. (1990). Inputs to climate change by soil and agriculture related activities. In: Soils on a warmer Earth (Scharpenseel, H.W.; Schomaker, M.; Ayoub, A., eds.). *Elsevier Science Publisher*, Amsterdam, pp 15-30.
- CIDE. (2000). Inventario de suelos forestales de la Comunidad Valenciana. Programa de Lucha contra la Desertificación. Información y Caracterización de Suelos Forestales. Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Dpto. de Planificación Territorial, 64 pp.
- CIDE. (2001). Caracterización de los suelos forestales de la Comunidad Valenciana. Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Dpto. de Planificación Territorial, 40 pp.
- COM. (2002). Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. Comunicación de la Comisión al Consejo, el Parlamento Europeo, el Comité Económico y Social y el Comité de las Regiones. Comisión de las Comunidades Europeas, Bruselas, 39 pp.
- Diputación Provincial de Valencia. (1986a). Mapa Geocientífico de la Provincia de Valencia. Diputación Provincial de Valencia, Valencia, España.
- Diputación Provincial de Valencia. (1986b). Los suelos como recurso natural. Diputación Provincial de Valencia (inédito).
- Eswaran, H., Van Den Berg, E., Reich, P. (1993). Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 192-194.
- FAO/UNEP/UNESCO/WMO. (1977). World Map of Desertification. United Nations Conference on Desertification, Nairobi, 29 August-9 September, Document A/CONF.74.2.
- FAO. (1988). FAO-UNESCO Soil Map of the World, Revised Legend (with corrections and updates). Technical Paper 20. *ISRIC*, Wageningen, 140 pp.
- FAO. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mayor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos 96. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 59 pp.
- Lal, R., Klimbe, J.M., Follet, R.F., Cole, C.V. (1998). The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Ann Arbor*, MI: Sleeping Bear Press, 128 pp.
- Lal, R. (2001). Desertification to sequester carbon and reduce net emissions in the

- United States. Documento electrónico, URL: <http://ag.arizona.edu/OALS/ALN/aln49/lal.html>. Fecha de acceso: 11-11-2002.
- Lal, R. (2002). Soil conservation and restoration to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. In: Proceedings of the third International Congress Man and Soil at the Third Millennium (J.L. Rubio, R.P.C. Morgan, S. Asins & V. Andreu, eds), *Geoforma, Ediciones*, Logroño, España, pp. 37-51.
- Mermut, A.R. (2002). Carbon sequestration and its importance for arid and desert environments En: Sustainable Use and Management of Soils in Arid and Semiarid Regions (Volume I) (Faz, A.; Ortiz, R.; Mermut, A.R., eds.). *Quadrana Editorial*, Cartagena, pp. 210-219.
- McFadden, L.D., Amundson, R.G., Chadwick, O.K. (1991). Numerical Modeling, Chemical and Isotopic Studies of Carbonate Accumulation in Soils of Arid Regions. In: Occurrence, Characteristics and Genesis of Carbonates, Gypsum, and Silica Accumulations in Soils (Neheleton, W.D., ed.). *SSSA Special Publications* Nº 26. SSSA Inc, Madison, USA, pp. 17-36.
- MOPT. (1991). Atlas Nacional de España. Edafología. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- National Science Foundation. (2000). The Changing Carbon Cycle: A Terrestrial Focus. Documento electrónico. URL: <http://www.geo.nsf.gov/ear/programs/TerrestrialCarbonCycleReport.doc>, 15 pp. Fecha de acceso: 20-11-2002
- Post, W.M., Emmanuel, W.R., Zinke, P.J., Stangenberger, A.F. (1982). Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 258, 165-169.
- Sánchez, J., Boluda, R., Artigao, A., Morell, C., Colomer, J.C., Guardado, R. (1994). Suelos. En: Desertificación en Castilla La Mancha. Ediciones de la Universidad de Castilla La Mancha, Cuenca, pp. 97-141.
- Smith, K. (1997). Soils and the Greenhouse Effect. *Soil Use and Management*, 13, 229.
- Smith, K. (1999). After the Kyoto Protocol: can soil scientists make a useful contribution? *Soil Use and Management* 15, 71-75.
- Sollins, Ph., Homann, P., Caldwell, B.A. (1996). Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and control. *Geoderma* 74, 65-105.
- Sombroek, W.G., Nachtergaele, F.O., Hebel, A. (1993). Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio*, 22, 417-426.
- UNEP. (1992). World Atlas of Desertification. United Nations Environment Programme. London, *Edward Arnold*.