

Estimación de la capacidad potencial de secuestro y emisión de CO₂ de los suelos agrícolas de la Comunidad Valenciana

F. Visconti^{1,*}, J.M. de Paz¹

(1) Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias-IVIA (GV), Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible-CDAS, Crta. CV-315, 46113 Moncada, València, España.

* Autor de correspondencia: F. Visconti [visconti_fer@gva.es]

> Recibido el 04 de octubre de 2016 - Aceptado el 23 de febrero de 2017

Visconti, F., de Paz, J.M. 2017. Estimación de la capacidad potencial de secuestro y emisión de CO₂ de los suelos agrícolas de la Comunidad Valenciana. *Ecosistemas* 26(1): 91-100. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-1.15

Los suelos agrícolas presentan capacidad para el secuestro de CO₂ en forma de materia orgánica. No obstante, dicha capacidad apenas se ha cuantificado ni cartografiado para territorios amplios y de gran diversidad de cultivos, como es la Comunidad Valenciana. Esta tarea se hace necesaria si se quiere dimensionar correctamente el papel de la agricultura dentro de cualquier estrategia de mitigación del cambio climático. En el presente trabajo se ha realizado una primera estimación de la capacidad potencial de secuestro y emisión de CO₂ de los suelos agrícolas de la Comunidad Valenciana hasta 20 cm de profundidad. Esta estimación se ha realizado en base al promedio y variabilidad espacial del contenido de materia orgánica del suelo agrícola dentro de zonas agroecológicas homogéneas en clima, tipo de suelo y uso del suelo y usando técnicas de SIG, geostatística y álgebra de mapas. Las capacidades de secuestro y emisión resultan ser así de 24.0 y 22.0 Mt de carbono, respectivamente. Se trata de valores que equivalen aproximadamente a ± 8 años de emisiones de carbono por uso de combustibles fósiles en la misma Comunidad. Esta capacidad de secuestro, que se podría alcanzar en un plazo de 15 a 100 años con la adopción global de prácticas de manejo que favorezcan la acumulación de materia orgánica del suelo, presenta un efecto importante, aunque insuficiente, comparado con el ritmo de emisión actual. En cualquier caso, aumentar el secuestro de carbono en los suelos, ya sea mejorando el manejo o mediante programas de incorporación de materia orgánica, es muy importante tanto para mejorar la capacidad de secuestro como aún más para la adaptación de los agroecosistemas al cambio climático.

Palabras clave: cambio climático; mitigación; adaptación; geostatística; álgebra de mapas; SIG

Visconti, F., de Paz, J.M. 2017. Estimation of the potential CO₂ sequestration and emission capacity of the agricultural soils of the Valencian Community. *Ecosistemas* 26(1): 91-100. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-1.15

Agricultural soils have capacity to sequester CO₂ in the form of organic matter. However, this capacity has hardly been quantified and mapped for large territories and with a wide variety of crops, such as the Valencian Community. This task is required to properly size the role of agriculture in any strategy to mitigate climate change. In this paper a first estimate of the potential CO₂ sequestration and emission capacity of the agricultural soils of the Valencian Community down to 20 cm depth has been made. This estimate has been carried out based on the average and spatial variability of the agricultural soil organic matter content in homogeneous agro-ecological zones in climate, soil class and land use, and using GIS, geostatistics and map algebra techniques. The sequestration and emission capacities were found to be 24.0 and 22.0 Mt of carbon, respectively. These values are equivalent to roughly ± 8 years of carbon emissions by use of fossil fuels in the Community itself. This sequestering capacity, which could be reached in 15 to 100 years with the global adoption of management practices that foster soil organic matter accumulation, has an important but insufficient effect compared to the current emission rate. In any case, increasing carbon sequestration in soils, either through management improvement or through organic matter incorporation programs, is very important both to improve sequestration capacity and even more to adapt agroecosystems to climate change.

Key words: climate change; mitigation; adaptation; geostatistics; map algebra; GIS

Introducción

Durante la última época geológica (Pleistoceno) la concentración de CO₂ en la atmósfera ha fluctuado de manera natural dentro del intervalo de 172 a 300 ppm (Siegenthaler et al. 2005; Luethi et al. 2008). Tales niveles de CO₂ atmosférico han contribuido al establecimiento de un sistema climático favorable para el desarrollo humano, biológico en primer lugar (Trauth et al. 2007; Maslin et al. 2014) y cultural después (Frisia et al. 2006; Chen et al. 2005). No obstante, desde el inicio de la revolución industrial la concentración media de CO₂ en la atmósfera se ha incrementado desde 280 ppm en 1750 hasta 400 ppm en 2015 (Keeling 2015; Blunden y Arndt

2016). La temperatura media mundial también ha aumentado durante los últimos 150 años de manera cada vez más rápida (Hartmann et al. 2013), con el consiguiente aumento de la frecuencia de episodios de calor extremo (Hansen et al. 2012), retroceso glaciar, ascenso del nivel del mar, etc., (IPCC 2014). El aumento de la concentración de CO₂, además de otros gases de efecto invernadero (GEI), principalmente CH₄ y N₂O, se ha identificado como la causa principal de este calentamiento global que conduce al cambio climático (Bindoff et al. 2013). La acumulación atmosférica de 120 ppm de CO₂ por encima de su nivel preindustrial tiene su origen, principalmente, en la utilización de combustibles fósiles, la deforestación y otros cambios de uso del suelo (Ciais et al. 2013).

Como productoras primarias, las plantas son el origen de prácticamente toda la biomasa en los ecosistemas terrestres, lo cual incluye los agroecosistemas. Las plantas toman CO₂ de la atmósfera y lo fijan mediante la fotosíntesis como carbono orgánico, el cual, constituye del 37 al 54% de la biomasa seca de los cultivos mediterráneos (Mota et al. 2010). Parte del CO₂ fijado en la fotosíntesis se distribuye al suelo mediante el crecimiento de las raíces, la liberación de exudados radicales, y en general, mediante la incorporación de restos orgánicos ya sea directamente por la planta, a través de la cadena trófica, o mediante el manejo. Mediante la respiración de los seres vivos y la combustión, el carbono orgánico se oxida y devuelve a la atmósfera en forma de CO₂ principalmente. La diferencia a largo plazo entre fotosíntesis y respiración más combustión (FS – (R + C)) es la cantidad de carbono que queda permanentemente confinado en los ecosistemas agrícolas y forestales. Si esta diferencia es positiva tendremos secuestro y mitigación del cambio climático, mientras que si es negativa tendremos emisión e incremento del mismo (Sedjo y Sohngen 2012).

Se ha estimado que desde la revolución neolítica hasta el presente la transformación de usos del suelo hacia la agricultura podría haber emitido a la atmósfera hasta 450 Pg (miles de millones de toneladas) de carbono orgánico como CO₂ (Ruddiman 2003; Lal 2004). Dado que las emisiones industriales desde 1750 se cifran en aproximadamente 390 Pg hasta 2013 (Boden et al. 2016), los cambios de uso del suelo habrían contribuido en más de la mitad de las emisiones antrópicas de CO₂. Estos cambios de uso del suelo han causado la emisión de CO₂ mediante dos procesos (Lal 2004): i) mediante la pérdida de materia orgánica de los suelos causada por la roturación y las técnicas de cultivo convencional se ha emitido el 58% de este CO₂, y ii) mediante la pérdida de biomasa causada por la sustitución de la vegetación natural por los cultivos se ha emitido el 42% restante de este CO₂.

Una parte del carbono orgánico perdido por los ecosistemas agrícolas hacia la atmósfera puede, no obstante, ser recuperada por los mismos manteniendo el uso agrícola pero cambiando las prácticas de manejo. De este modo la agricultura tiene potencial para el secuestro de CO₂ y, en consecuencia, para mitigar el cambio climático (Lal 2004). Esta capacidad potencial de secuestro de CO₂, estimada entre el 50 y el 66% del carbono originalmente presente en los suelos, puede desarrollarse mediante la adopción a largo plazo de determinadas prácticas de cultivo no convencional o de conservación (Batjes 1999; Lal 2004). De manera inversa, prácticas de cultivo inadecuadas pueden ocasionar el efecto contrario y aumentar las emisiones de CO₂.

Para poder hablar de secuestro de CO₂ dentro de un ecosistema debe asegurarse el confinamiento del carbono a largo plazo (Lal 2008; Sedjo y Sohngen 2012; Stockmann et al. 2013). En este sentido por largo plazo se entiende un periodo de tiempo superior al tiempo medio de residencia del CO₂ en la atmósfera, en todo caso nunca inferior a 100 años (Stockmann et al. 2013). En los ecosistemas agrícolas la reserva de carbono de la biomasa vegetal se renueva con una periodicidad que va desde algunos meses para cultivos anuales como los herbáceos y hortícolas, hasta varias décadas para cultivos multianuales como los arbóreos. Por el contrario, la reserva de carbono de los suelos se renueva con una periodicidad que puede alcanzar del orden de miles de años para la fracción de materia orgánica más estable y protegida (Jastrow y Miller 1997; Baldock 2007). De esta forma, en los agroecosistemas el suelo presenta una capacidad de secuestro ostensiblemente mayor que la biomasa vegetal, lo cual lo convierte en el principal objetivo de las iniciativas en este sentido a nivel mundial (United Nations 1998; World Bank 2012; Rhodes 2016).

El uso del suelo como sumidero de CO₂ es una propuesta recurrente en todas las iniciativas orientadas a la mitigación del cambio climático. Sin embargo, aunque existen algunos estudios sobre el contenido actual de carbono en los suelos españoles (Romanyà et al. 2007), todavía faltan estimaciones específicas sobre la capacidad de sumidero de CO₂ del suelo tanto en la agricultura en general (Batjes 1999; Lal y Follet 2009; Stockmann et al. 2013), como

en la de España y la Comunitat Valenciana en particular. El objetivo del presente trabajo fue realizar una primera estimación de la capacidad de secuestro de CO₂ a nuestro alcance mediante el uso de tecnologías actuales, así como de emisión de CO₂, de los suelos agrícolas de la Comunitat Valenciana. La aproximación que se presenta se ha llevado a cabo mediante el desarrollo de una metodología empírica basada en la definición de zonas agroecológicas, y su aplicación mediante técnicas geoestadísticas y álgebra de mapas en base a datos reales de contenido de materia orgánica de los suelos.

Material y métodos

Modelo

La metodología propuesta para este estudio se ha basado en la hipótesis de que son cuatro los factores que determinan principalmente el contenido de materia orgánica del suelo (fracción másica de materia orgánica del suelo: w_{MO}), a saber: i) clima, ii) tipo de suelo, iii) uso del suelo y iv) manejo (Lal et al. 1995; Bruce et al. 1999). Se puede proponer así el siguiente modelo lineal (Ec. 1) donde $w_{MOact,i}$ representa el contenido de materia orgánica del píxel i , w_{MOact} barra representa el contenido de materia orgánica promedio para toda el área, en este caso, la totalidad de los suelos agrícolas de la Comunitat Valenciana, y donde cada término clima, suelo, uso y manejo representa el efecto de cada uno de estos factores sobre el contenido de materia orgánica. Finalmente, ε representa un término de error o variabilidad no explicada por ninguno de los factores indicados: variabilidad aleatoria, la cual puede ser natural o introducida por la propia metodología del análisis.

$$w_{MOact,i} = \overline{w_{MOact}} + \text{clima} + \text{suelo} + \text{uso} + \text{manejo} + \varepsilon \quad [1]$$

Tomando este modelo, mediante los tres primeros factores (clima, suelo y uso) pueden delimitarse zonas agroecológicas homogéneas, dentro de las cuales la variabilidad de la materia orgánica del suelo se debe al manejo agrícola, más un componente de variabilidad aleatoria. Dentro de este análisis se asumen los siguientes supuestos. En primer lugar, que bajo unas mismas condiciones en cuanto a clima, tipo y uso de suelo, los suelos con niveles bajos de materia orgánica deben presentar, en general, un manejo no conservativo como, por ejemplo, el laboreo convencional que destruye los agregados del suelo y favorece la descomposición de la materia orgánica, y la respiración y con ello la emisión de CO₂. En segundo lugar, y al contrario que el anterior, los suelos con niveles altos de materia orgánica deben presentar, en general, un manejo conservativo como, por ejemplo, el laboreo de conservación, el no laboreo, el uso de praderas temporales evitando o minimizando el barbecho y el suelo desnudo entre filas, la mejora de las rotaciones, la optimización de la productividad, el uso de enmiendas orgánicas y abonos verdes, o alguna combinación de los anteriores y que, en cualquier caso, facilitan el secuestro de carbono en el suelo (Follett 2001; West y Post 2002; Liniger et al. 2016).

Recopilación de información

A partir de 29 trabajos publicados y propios se recopiló información de más de 1000 puntos de suelo agrícola homogéneamente distribuidos en la Comunitat Valenciana (Tabla 1 y Fig. 1), la cual incluye geolocalización, delimitación por horizontes o profundidades, y datos de porcentaje de materia orgánica, elementos gruesos y densidad aparente, parámetros básicos para calcular el contenido de carbono orgánico en el suelo. Las determinaciones de materia orgánica del suelo en estos trabajos fueron realizadas mediante el método de Walkley-Black (Porta 1986). Para la realización de este estudio los datos de materia orgánica en cada punto fueron estandarizados a la capa superficial, o capa arable del suelo, entendida en este estudio como el intervalo de profundidad de 0 a 20 cm. Esta estandarización consistió en el cálculo del promedio ponderado de materia orgánica en cada punto. Las ponderaciones (pesos) en

este cálculo fueron la profundidad de los horizontes o capas de suelo delimitadas dentro del intervalo de 0 a 20 cm. Usar sólo la capa arable del suelo en este trabajo se debe a que, en general, es en ella donde se concentra la mayor parte de la materia orgánica del suelo, y además, es dicha materia orgánica la que en mayor medida responde a los cambios de manejo del mismo (Sombroek et al. 1993)

Procesamiento espacial de la información

El procesamiento de la información se muestra gráficamente en la Figura 1. Para realizarlo se ha utilizado un Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS 9.3 (ESRI, Redlands, California (USA)) y se han aplicado técnicas de geoestadística y álgebra de mapas mediante herramientas incluidas en el mismo SIG. En esta metodología se dieron los siguientes pasos:

1. Elaboración de un mapa de zonas agroecológicas homogéneas en clima, tipo de suelo y uso del suelo. Para ello se combinaron los mapas de i) áreas de clima clasificado según el índice global de Thornthwaite (de Paz et al. 2007) (Fig. 2), ii) unidades de suelo clasificadas por FAO-88 (INGEMISA 1987, 1989a, 1989b), y iii) usos del suelo de la Comunitat Valenciana del SIOSE (IGN 2011) (Fig. 3).

2. Generación de los mapas de distribución espacial del contenido actual de materia orgánica (W_{MOact}), fracción másica de elementos gruesos (W_{eg}) y densidad aparente (ρ_a) de los suelos. Esto se hizo mediante técnicas geoestadísticas que se concretaron en el desarrollo de modelos de correlación espacial para cada una de estas tres propiedades utilizando los puntos de suelo en los que se dispone de datos, y posterior interpolación espacial por kriging ordinario para inferir sus valores en los puntos donde no se dispone de datos.

Tabla 1. Documentos utilizados para obtener la información de suelos en este trabajo.

Table 1. Documents used to obtain the soil information in this work.

Tipo de documento	Referencias
Libros	Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios 1995a; 1995b; 1995c; 1995d; 1995e; 1995f; 1995g; 1996a; 1996b; 1996c; 1996d; 1996e; 1996f; 1997a; 1997b; López Arias y Grau Corbí 2005.
Artículos científicos	de Paz et al. 2004; de Paz et al. 2011; de Paz et al. 2015.
Tesis doctorales	de Paz 1999; Micó 2005; Peris 2006; Visconti 2009.
Trabajos inéditos (proyectos de investigación)	Sánchez y de Paz 2010; Sánchez y de Paz 2013; de Paz y Sánchez 2014.
Trabajos inéditos (convenios de colaboración)	Bonet et al. 2014; de Paz y Visconti 2015; de Paz y Visconti 2016.

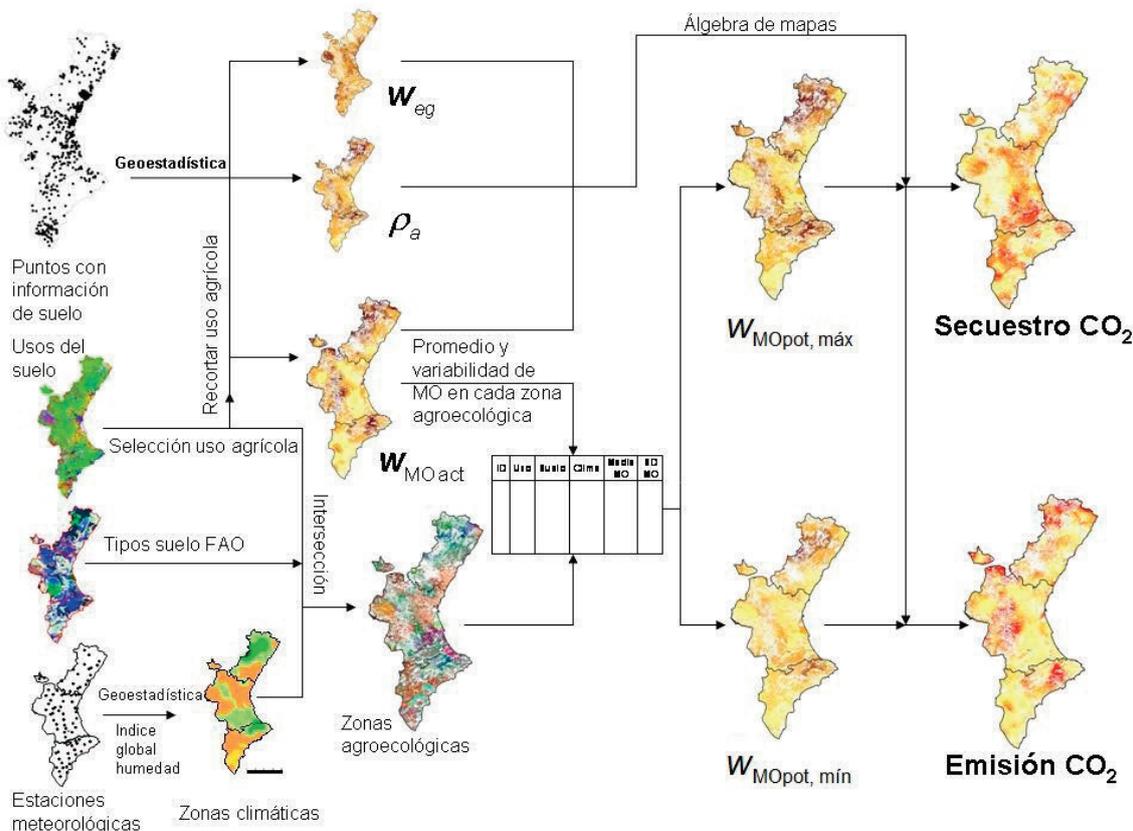


Figura 1. Esquema metodológico para la elaboración de los mapas de capacidad potencial de secuestro y emisión de CO_2 de los suelos agrícolas de la Comunitat Valenciana (W_{eg} : fracción másica de elementos gruesos del suelo, ρ_a : densidad aparente del suelo, W_{MOact} : contenido actual de materia orgánica del suelo, $W_{MOpot,máx}$: contenido potencial máximo de materia orgánica del suelo, $W_{MOpot,mín}$: contenido potencial mínimo de materia orgánica del suelo).

Figure 1. Methodological scheme to develop the maps of potential CO_2 sequestration and emission capacity of the agricultural soils of the Valencian Community (W_{eg} : mass fraction of soil coarse fragments, ρ_a : soil bulk density, W_{MOact} : present soil organic matter content, $W_{MOpot,máx}$: maximum potential soil organic matter content, $W_{MOpot,mín}$: minimum potential soil organic matter content).

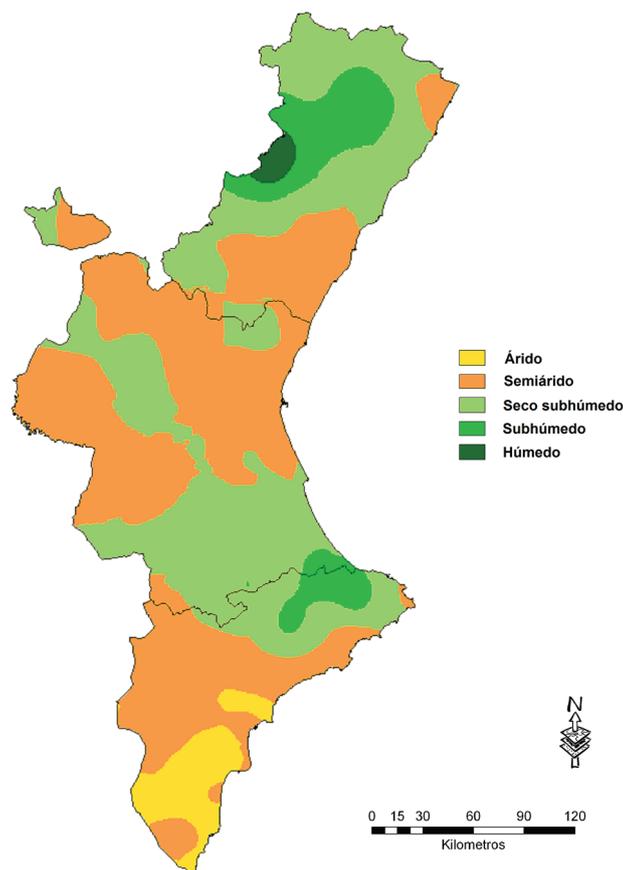


Figura 2. Mapa de zonas climáticas de la Comunitat Valenciana según el índice climático global de Thornthwaite para el periodo de referencia 1961-1990 (de Paz et al. 2007).

Figure 2. Map of climatic zones of the Valencian Community according to the Thornthwaite's global climatic index for the reference span 1961-1990 (de Paz et al. 2007).

3. Una vez calculada la distribución espacial del contenido actual de materia orgánica de los suelos, y las otras dos propiedades (w_{eg} , ρ_a), se estimó el secuestro y emisión potencial de carbono en toda la Comunitat Valenciana. Para ello se dieron los siguientes pasos:

3.1. Cálculo del contenido medio ($\ln(w_{MOact,i})$) y desviación típica ($s(\ln(w_{MOact,i}))$) del contenido de materia orgánica de los suelos en cada zona agroecológica j delimitada en cuanto a clima, tipo de suelo y uso (Fig. 1), mediante las herramientas de análisis espacial del SIG (estadística zonal). Nótese que en estos cálculos se ha utilizado el contenido de materia orgánica expresado en escala logarítmica debido a que la materia orgánica del suelo se distribuye de manera log-normal.

3.2. Partición de la variabilidad del contenido de materia orgánica del suelo en cada zona agroecológica j en una parte debida al manejo agrícola, la cual se estima en este trabajo en más menos una vez la desviación típica ($\pm s(\ln(w_{MOact,i}))$), y otra parte aleatoria. Se toma una desviación típica debido a que dentro de la media más menos una vez la desviación típica se halla el 68% de la población para una distribución normal, y los suelos podrían secuestrar entre un 50 y un 66% del carbono originalmente presente manteniendo el uso agrícola (Lal 2004).

3.3. Estimación del contenido potencial máximo de materia orgánica en cada zona agroecológica j ($w_{MOpot,máx,j}$) como la media del contenido actual de la zona más una vez su desviación típica (Ec. 2). De esta forma, se asume que los suelos con un contenido de materia orgánica de al menos $w_{MOpot,máx,j}$ representarían suelos bien manejados para secuestrar carbono en dicha zona j . Además se asume que si en el resto de suelos de la zona j con contenido de materia orgánica menor que $w_{MOpot,máx,j}$ se mejorase el manejo,

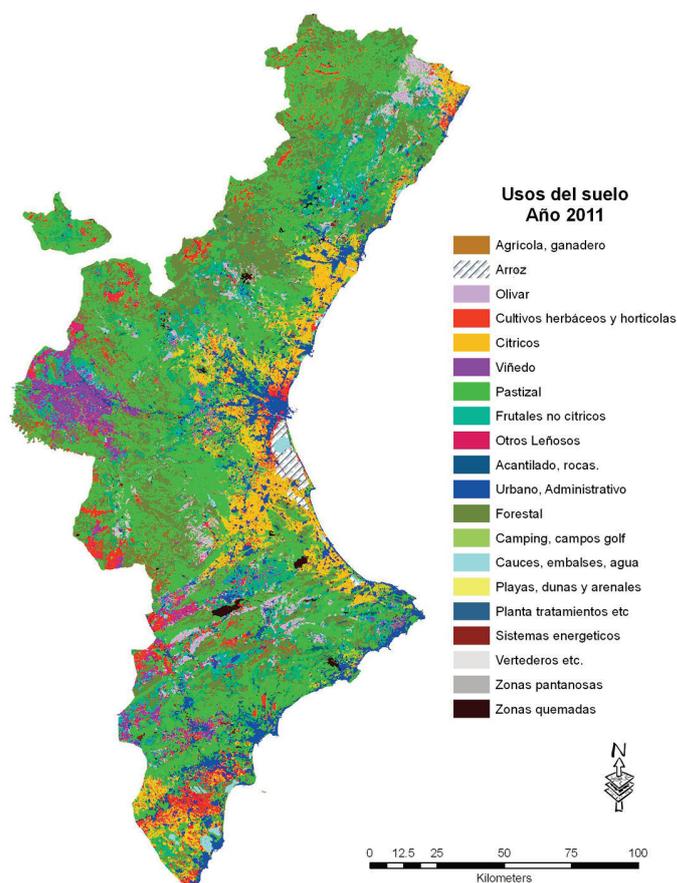


Figura 3. Mapa de usos agrícolas del suelo de la Comunitat Valenciana (IGN 2011).

Figure 3. Map of agricultural land uses of the Valencian Community (IGN 2011).

su contenido de materia orgánica aumentaría hasta $w_{MOpot,máx,j}$, y secuestrarían carbono (Fig. 4).

3.4. Estimación del contenido potencial mínimo de materia orgánica en cada zona agroecológica j ($w_{MOpot,mín,j}$) como la media del contenido actual de la zona menos una vez su desviación típica (Ec. 3). De esta forma, se asume que los suelos con un contenido de materia orgánica menor de $w_{MOpot,mín,j}$ representarían suelos mal manejados para secuestrar carbono en dicha zona j . Además se asume que si en el resto de suelos de la zona j con contenido de materia orgánica mayor que $w_{MOpot,mín,j}$ se empeorase el manejo, su contenido de materia orgánica disminuiría hasta $w_{MOpot,mín,j}$, y emitirían carbono como CO_2 (Fig. 4).

3.5. Una vez conocidos $w_{MOpot,máx,j}$ y $w_{MOpot,mín,j}$ se calculó el incremento potencial, y el descenso potencial del contenido de materia orgánica en cada píxel i del mapa, respectivamente $\Delta w_{MOpot,máx,i}$ y $\Delta w_{MOpot,mín,i}$, restando algebraicamente los mapas correspondientes de contenido potencial máximo, contenido potencial mínimo y contenido actual de materia orgánica (Ec. 4 y Ec. 5).

$$w_{MOpot,máx,j} = e^{(\overline{\ln(w_{MOact,i})} + s(\ln(w_{MOact,i})))} \quad [2]$$

$$w_{MOpot,mín,j} = e^{(\overline{\ln(w_{MOact,i})} - s(\ln(w_{MOact,i})))} \quad [3]$$

$$\Delta w_{MOpot,máx,i} = \begin{cases} 0 & \text{si } w_{MOpot,máx,j} - w_{MOact,i} \leq 0 \\ w_{MOpot,máx,j} - w_{MOact,i} & \text{si } w_{MOpot,máx,j} - w_{MOact,i} > 0 \end{cases} \quad [4]$$

$$\Delta w_{MOpot,mín,i} = \begin{cases} 0 & \text{si } w_{MOact,i} - w_{MOpot,mín,j} \leq 0 \\ w_{MOact,i} - w_{MOpot,mín,j} & \text{si } w_{MOact,i} - w_{MOpot,mín,j} > 0 \end{cases} \quad [5]$$

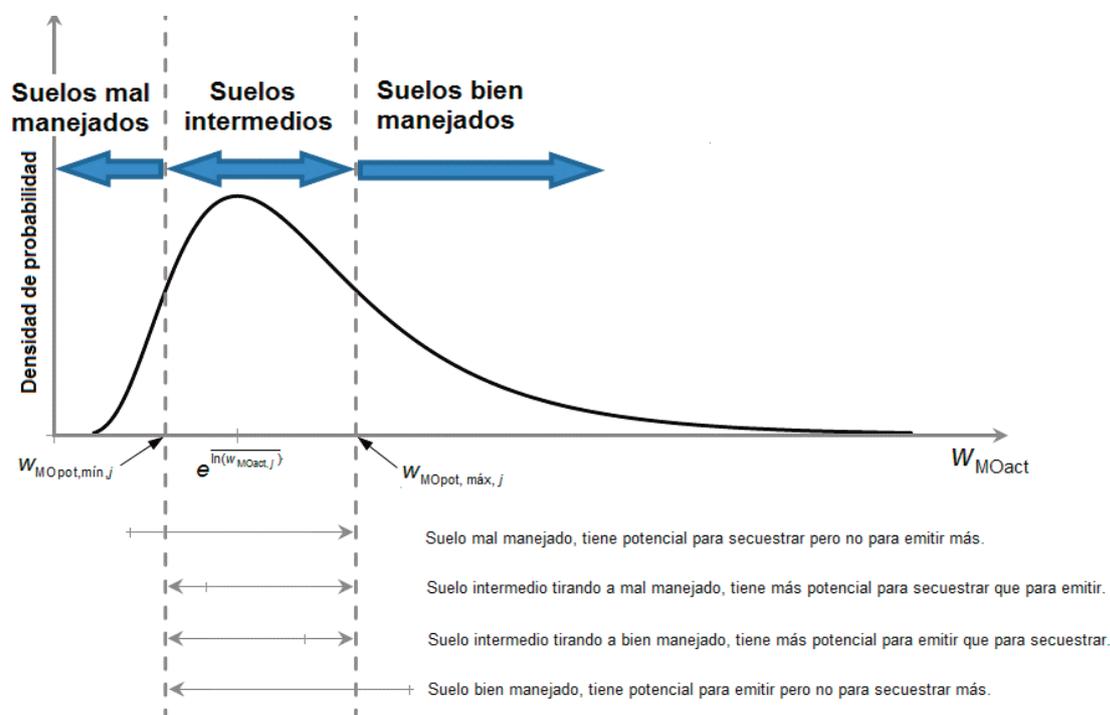


Figura 4. Distribución del contenido de materia orgánica del suelo en cada zona agroecológica j , y oportunidades de secuestro y emisión de carbono para los suelos dentro de dicha zona de acuerdo con la metodología presentada en este trabajo.

Figure 4. Soil organic matter distribution in each agro-ecological zone j , and sequestering and emission opportunities for the soils within such zone following the methodology presented in this work.

Nótese la sustitución por cero (Ec. 4 y Ec. 5), en caso de píxeles con contenido actual de materia orgánica ($w_{MOact,i}$) superior o inferior, respectivamente a $w_{MOpot,máx,i}$ y $w_{MOpot,mín,i}$. En dichos píxeles la capacidad potencial para el secuestro y emisión, respectivamente, se considera nula ya que presentan un contenido actual de materia orgánica o bien superior al máximo, o bien inferior al mínimo de su zona agroecológica (Fig. 4).

4. Finalmente para calcular los mapas de secuestro y emisión de carbono se utilizaron, respectivamente, las ecuaciones 6 y 7 para cada píxel i ,

$$\left(\frac{\Delta m_c}{S}\right)_{máx,i} = 100(1 - w_{eg,j}) \rho_{a,j} f_{VB} \Delta w_{MOpot,máx,i} L \quad [6]$$

$$\left(\frac{\Delta m_c}{S}\right)_{mín,i} = 100(1 - w_{eg,j}) \rho_{a,j} f_{VB} \Delta w_{MOpot,mín,i} L \quad [7]$$

donde m_c es la masa del carbono orgánico, S es la superficie en hectáreas a la que está referida, $w_{eg,j}$ y $\rho_{a,j}$ son, respectivamente, la fracción másica de elementos gruesos (> 2 mm) y la densidad aparente en g/cm^3 en cada zona agroecológica j , f_{VB} es el factor de Van Bemmelen, el cual expresa la fracción másica de carbono en la materia orgánica del suelo, en el caso de suelos agrícolas se toma $f_{VB} = 0.58$ (Porta 1986), L es la profundidad del suelo en cm para la cual se realiza la estimación, en este estudio son 20 cm, y 100 es un factor de conversión de unidades a t/ha.

Resultados y discusión

Contenido actual de carbono orgánico de los suelos agrícolas

En la Figura 5 se muestra el mapa de contenido actual de carbono de los suelos agrícolas de la Comunitat Valenciana. El porcentaje promedio de materia orgánica del suelo agrario en la capa superficial de 0 a 20 cm es de 3.7% si consideramos el pastizal como uso agrario, y de 3.2% si no lo consideramos como tal. De la misma forma, el contenido de carbono orgánico promedio asciende a 55.7 t/ha si consideramos el pastizal como uso agrario y de 50 t/ha en caso contrario. Por provincias el contenido de carbono

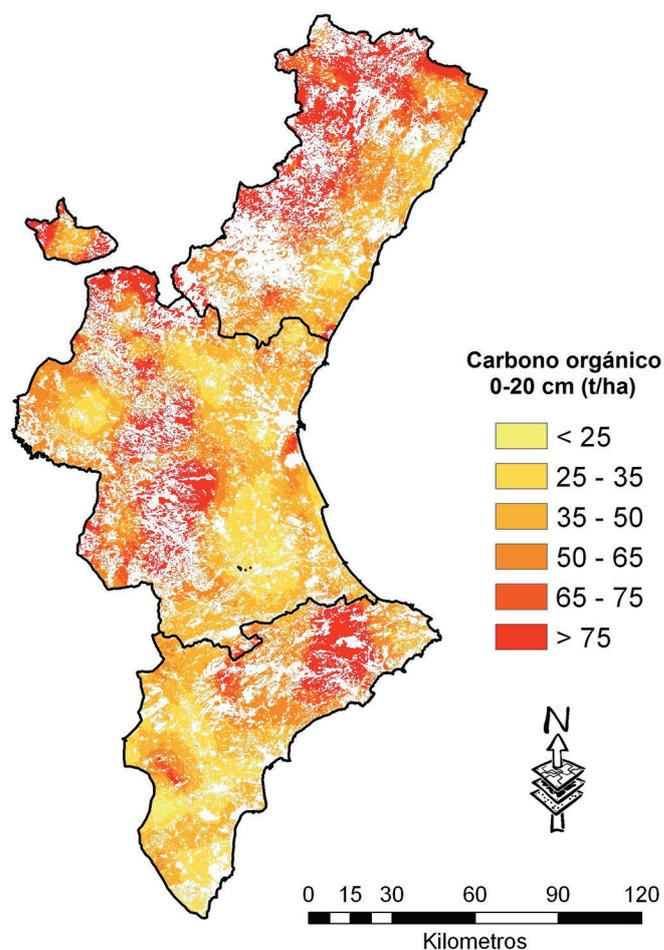


Figura 5. Mapa de contenido actual de carbono orgánico de los suelos agrícolas de la Comunitat Valenciana hasta 20 cm de profundidad.

Figure 5. Map of nowadays organic carbon content in the agricultural soils of the Valencian Community down to 20 cm depth.

orgánico es mayor en la de Castellón con 66.6 t/ha, luego en la de Valencia con 53.1 t/ha, y finalmente en la de Alicante con 50.5 t/ha (Tabla 2). Esto pone de manifiesto que el clima, a través del régimen de humedad y temperatura, es el factor principal que determina la acumulación de materia orgánica en los suelos (Oades 1988). Así la gradación del clima en la Comunitat Valenciana, que es en general más fresco y húmedo en Castellón, luego en Valencia, y finalmente más cálido y árido en Alicante, se refleja en la gradación paralela del contenido actual de materia orgánica en los suelos (Fig. 2).

Si sumamos el carbono total retenido en los primeros 20 cm de los suelos agrícolas de la provincia de Valencia llegamos a una cifra de 35.2 Mt, valor más elevado que el de Castellón con 22.9 Mt, y por último que el de Alicante con 18.9 Mt (Tabla 2). El total de la Comunitat Valenciana sería pues de 77.0 Mt.

Por zonas agroecológicas, los pastizales bajo clima de semiárido a subhúmedo, caracterizados por el desarrollo de suelos con horizonte mólico y saturados en bases como Kastanozems (KS), Phaeozems (PH) y Chernozems (CH) son los que exhiben contenidos superiores de carbono orgánico alcanzando valores promedio de hasta 80 t/ha en las zonas de clima más húmedo (Fig. 6 y Tabla 3). Las zonas agroecológicas de arrozal, p.ej. en el entorno de la Albufera de Valencia caracterizadas por el desarrollo de suelos con horizonte hístico, también presentan lógicamente elevados contenidos de carbono orgánico. Por el contrario, las zonas agroecológicas que soportan una agricultura intensiva desarrollada sobre Fluvisoles (FL), Antrosoles (AT) y Arenosoles (AR) presentan contenidos más bajos de carbono orgánico, los cuales se hallan cercanos a las 40 t/ha (Fig. 6 y Tabla 3).

Tabla 2. Superficie agrícola, contenido actual, y capacidad potencial de secuestro y emisión de CO₂ como carbono orgánico de los suelos agrícolas de la Comunitat Valenciana hasta 20 cm de profundidad.

Table 2. Agricultural area, nowadays content, and potential CO₂ sequestration and emission capacity as organic carbon of the agricultural soils of the Valencian Community down to 20 cm depth.

Provincia	Sup. Agrícola / 10 ³ ha	Carbono actual		Secuestro potencial de carbono		Emisión potencial de carbono	
		Promedio / t ha ⁻¹	Total / 10 ³ t	Promedio / t ha ⁻¹	Total / 10 ³ t	Promedio / t ha ⁻¹	Total / 10 ³ t
Castellón	343.57	66.56	22 868.8	15.69	5390.6	20.42	7015.6
Valencia	662.27	53.09	35 160.2	18.51	12 258.6	15.26	10 106.2
Alicante	373.80	50.48	18 867.5	17.14	6406.9	13.10	4896.7
TOTAL	1379.64		76 896.5		24 056.1		22 018.7

Tabla 3. Contenido actual de carbono y capacidad potencial de secuestro y emisión de CO₂ como carbono orgánico del suelo de las diferentes zonas agroecológicas (uso del suelo ∩ clase climática) representadas en la Comunitat Valenciana.

Table 3. Nowadays carbon content and potential CO₂ sequestration and emission capacity as soil organic carbon of the several agro-ecological zones (land use ∩ climatic class) present of the Valencian Community.

Uso agrícola	Índice climático de Thornthwaite	Sup. / ha	Carbono orgánico actual / t ha ⁻¹	Capacidad potencial de secuestro		Capacidad potencial de emisión	
				Media / t ha ⁻¹	Total / 10 ³ t	Media / t ha ⁻¹	Total / 10 ³ t
Arroz	Árido	8	24.3	0.1	< 0.1	0.1	< 0.1
Arroz	Semiárido	12768	52.7	15.3	194.9	14.2	180.9
Arroz	Seco subhúmedo	3720	40.1	6.9	25.6	6.7	25.1
Arroz	Subhúmedo	464	55.1	3.1	1.5	3.0	1.4
Cultivos herbáceos y huerta	Árido	22172	36.8	5.7	125.6	5.5	121.7
Cultivos herbáceos y huerta	Semiárido	59412	51.6	16.6	983.7	14.7	873.3
Cultivos herbáceos y huerta	Seco subhúmedo	40444	61.2	18.0	729.6	17.3	699.4
Cultivos herbáceos y huerta	Subhúmedo	5560	86.2	15.0	83.4	14.8	82.3
Cultivos herbáceos y huerta	Húmedo	1080	75.4	12.2	13.1	10.7	11.6
Cítricos	Árido	19332	35.6	7.0	136.1	6.9	132.9
Cítricos	Semiárido	106140	41.6	11.3	1198.6	10.3	1098.1
Cítricos	Seco subhúmedo	63596	39.4	11.8	750.4	10.4	660.1
Cítricos	Subhúmedo	10636	58.1	10.8	114.8	9.8	104.3
Frutales	Árido	5320	34.4	5.3	28.2	5.2	27.9
Frutales	Semiárido	86204	50.4	16.5	1423.1	14.8	1278.1
Frutales	Seco subhúmedo	63088	54.2	16.7	1050.6	14.8	932.9
Frutales	Subhúmedo	16332	74.1	16.1	263.1	15.0	244.6
Frutales	Húmedo	68	98.9	12.0	0.8	8.7	0.6
Viñedo	Árido	468	31.5	2.7	1.3	2.8	1.3
Viñedo	Semiárido	66064	45.3	13.8	914.0	12.4	818.6
Viñedo	Seco subhúmedo	15896	54.7	15.0	239.0	14.0	223.2
Viñedo	Subhúmedo	212	59.4	2.5	0.5	2.2	0.5
Olivar	Árido	188	36.5	5.1	1.0	4.9	0.9
Olivar	Semiárido	33332	49.6	14.0	466.2	12.5	418.1
Olivar	Seco subhúmedo	45988	58.5	16.7	769.6	15.4	706.8
Olivar	Subhúmedo	9596	73	13.7	131.6	12.7	121.6
Otros leñosos	Semiárido	32	49.3	9.5	0.3	8.9	0.3
Otros leñosos	Subhúmedo	8	68.9	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Pastizal	Árido	29480	37.1	6.0	176.2	5.8	171.3
Pastizal	Semiárido	313016	55.1	19.4	6087.9	17.5	5475.9
Pastizal	Seco subhúmedo	282432	63.9	24.4	6879.7	22.1	6245.1
Pastizal	Subhúmedo	60412	89.8	22.7	1370.9	22.9	1385.3
Pastizal	Húmedo	6068	98.6	15.9	96.5	14.2	85.9
Olivar-viñedo	Semiárido	68	39.1	5.4	< 0.1	7.4	< 0.1
Olivar-viñedo	Seco subhúmedo	20	48.3	0.2	< 0.1	0.2	< 0.1
Huerto familiar	Árido	16		0.2	< 0.1	0.2	< 0.1
TOTAL					24257.8		22129.9

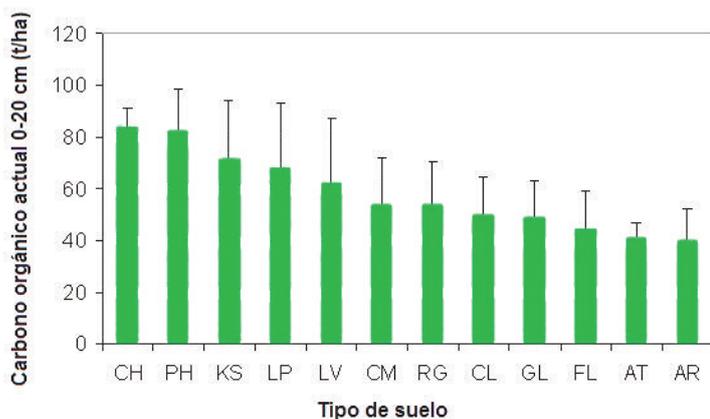


Figura 6. Contenidos de carbono orgánico del suelo por tipo de suelo siguiendo la clasificación FAO-88 (Grupos de suelos de referencia: CH: Chernozems, PH: Phaeozems, KS: Kastanozems, LP: Leptosoles, LV: Luvisoles, CM: Cambisoles, RG: Regosoles, CL: Calcisoles, GL: Gleysoles, FL: Fluvisoles, AT: Antrosoles, AR: Arenosoles).

Figure 6. Soil organic carbon contents by soil class following the FAO-88 classification (Reference soil groups: CH: Chernozems, PH: Phaeozems, KS: Kastanozems, LP: Leptosols, LV: Luvisols, CM: Cambisols, RG: Regosols, CL: Calcisols, GL: Gleysols, FL: Fluvisols, AT: Anthrosols, AR: Arenosols).

Capacidad potencial de secuestro y emisión de carbono de los suelos agrícolas

En la **Figura 7** se muestra la capacidad potencial de secuestro de carbono de los suelos de la Comunitat Valenciana. Según la zona agroecológica (**Tabla 3**) esta capacidad de secuestro de carbono oscila entre más de 22 t/ha para el pastizal bajo clima mediterráneo de seco subhúmedo a subhúmedo en las comarcas de Els Ports, Baix Maestrat, Alt Maestrat y Alcalatén en Castellón, Ribera Alta y Canal de Navarrés en Valencia, y Marina Alta en Alicante, hasta menos de 6 t/ha para zonas con cultivos herbáceos y huerta de las partes más áridas de la Comunitat Valenciana: Vega Baja del Segura, Baix Vinalopó y L'Alacantí (**Tabla 3**). Los suelos cultivados con cítricos disponen de una capacidad de secuestro intermedio con valores de 7 a 12 t/ha dependiendo del clima bajo el que se desarrollen. Capacidades de secuestro de 14 t/ha, algo superiores a las de los cítricos, pero no obstante moderadas, se encuentran en los suelos cultivados con viña independientemente del lugar concreto. Una mayor capacidad potencial de secuestro de carbono, estimada entre 15 y 18 t/ha, la encontramos en las zonas agroecológicas con cultivos hortícolas bajo clima de seco subhúmedo a subhúmedo del norte de la provincia de Castellón: Plana Alta, Baix Maestrat, y también en la montaña del norte de Alicante: Marina Alta. En términos promedio, el potencial de secuestro de los suelos agrícolas resulta ser de casi 18 t/ha con un total de 24.0 Mt de carbono para el conjunto de la agricultura de la Comunitat Valenciana.

En cuanto a la capacidad potencial de emisión de carbono (**Fig. 8**) tenemos, del mismo modo, que dicha capacidad de emisión es máxima para las zonas agroecológicas con suelos de mayor contenido de materia orgánica como son los pastizales bajo climas de subhúmedo a seco subhúmedo con más de 23 t/ha, y mínima para las zonas con cultivos herbáceos en clima árido de 6 t/ha (**Tabla 2**). Así el potencial de emisión presenta un valor promedio de más de 16 t/ha con un total de 22.0 Mt de carbono para el conjunto de los suelos agrícolas de la Comunitat Valenciana. Según esto la capacidad de secuestro/emisión de los suelos agrícolas valencianos resultaría de una variación de $\pm 1/3$ de su materia orgánica.

Se ha estimado que en la agricultura en zonas templadas se pueden alcanzar valores promedio de secuestro de carbono de 8.4 t/ha en los 20 cm superficiales del suelo en 20 años por combinación de no laboreo y optimización de la rotación de cultivos (**West y Post 2002**), valor que se encuentra en el orden de los estimados en este estudio (**Tabla 2**). **Follett (2001)** da una horquilla de entre 0.1-0.6 t/ha/año, que resultarían en un rango entre 2.5 y 15 t/ha para un horizonte de 25 años.

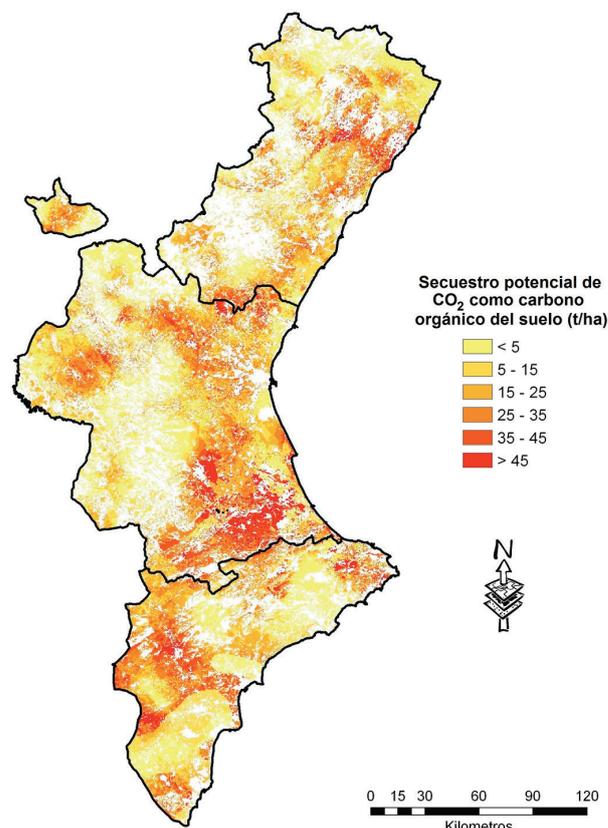


Figura 7. Mapa de capacidad potencial de secuestro de CO₂ como carbono orgánico de los suelos agrícolas de la Comunitat Valenciana hasta 20 cm de profundidad.

Figure 7. Map of the potential CO₂ sequestration capacity as organic carbon of the agricultural soils of the Valencian Community down to 20 cm depth.

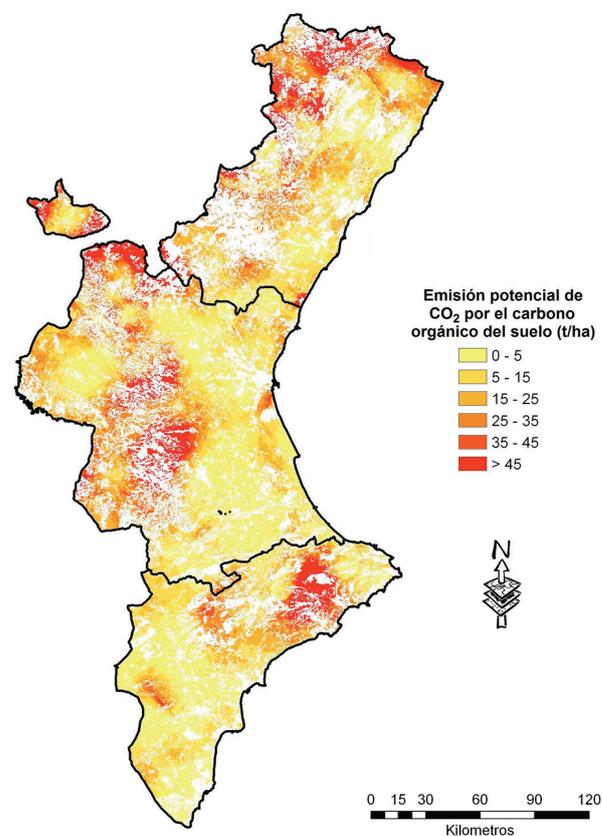


Figura 8. Mapa de capacidad potencial de emisión de CO₂ del carbono orgánico de los suelos agrícolas de la Comunitat Valenciana hasta 20 cm de profundidad.

Figure 8. Map of the potential CO₂ emission capacity of the organic carbon of the agricultural soils of the Valencian Community down to 20 cm depth.

En términos de CO₂ secuestrado o emitido a la atmósfera, 24.0 y 22.0 Mt corresponden, respectivamente, a 11 y 10 ppb. A pesar de la aparente insignificancia de esta cifra, debe tenerse en cuenta que la superficie agrícola de la Comunitat Valenciana es de tan solo 13 796 km². Si los resultados obtenidos para la Comunitat Valenciana se pudiesen extrapolar a los suelos agrícolas de todo el planeta con 52 millones de km² (FAO 2015), tendríamos un potencial de secuestro y emisión de CO₂ de, respectivamente, 41 y 38 ppm. Esto significa que de haberse conservado más materia orgánica en los suelos agrícolas mundiales el nivel de CO₂ podría llegar a ser actualmente tan bajo como 359 ppm, aliviando de forma significativa el efecto del cambio climático. Esta capacidad de secuestro de 41 ppm se encuentra en el orden de la indicada por Batjes (1999), que la estima entre 7 y 22 ppm de CO₂ en 25 años para todos los suelos agrícolas y degradados del mundo, y Lal (2004), a partir de cuyos datos se estima un tope máximo de secuestro de entre 60 y 80 ppm de CO₂ en los suelos agrícolas de todo el planeta.

Si comparamos los datos de secuestro y emisión de carbono de los suelos agrícolas en la Comunitat Valenciana con los datos de emisión como resultado del uso de combustibles fósiles en el mismo territorio podemos evaluar la importancia que tiene el potencial de secuestro de carbono de los suelos agrícolas. Partiendo de los datos de CORES (2016) y aplicando la metodología de referencia de Marland y Rotty (1984), las emisiones de CO₂ en la Comunitat Valenciana procedentes del uso de gasolinas, gasóleos y fuelóleos, han ascendido a más de 57 Mt de carbono en los últimos 20 años, esto es a razón de 2.9 Mt/año en promedio. Por consiguiente, mediante la adopción generalizada y duradera de prácticas de manejo de la materia orgánica de los suelos, los suelos agrícolas de la Comunitat Valenciana podrían compensar el CO₂ emitido por combustibles fósiles en nuestro territorio durante más de 8 años a la tasa de emisión actual. Si se implementaran tecnologías avanzadas de manejo de la materia orgánica del suelo se podrían compensar un mayor número de años. Por el contrario, mediante unas prácticas de manejo opuestas, los suelos agrícolas de la Comunitat Valenciana podrían emitir a la atmósfera una cantidad de CO₂ equivalente a la de los combustibles fósiles de 7 años y medio.

Horizonte temporal para el secuestro de carbono en los suelos agrícolas

Aumentar el contenido de materia orgánica del suelo tiene interés no sólo por actuar como reservorio duradero de carbono y mitigar así el cambio climático, sino por mejorar varias de las principales funciones del suelo, y contribuir así a la adaptación al cambio climático (Lal 2010). Así un mayor contenido de materia orgánica del suelo mejora su fertilidad, tanto física (porosidad, estructura, etc.), como química (contenido de nutrientes, amortiguación de pH, etc.), y biológica (biodiversidad, relaciones simbióticas, reciclaje de nutrientes, etc.), permitiendo a su vez una mejor producción agrícola tanto en términos cualitativos como cuantitativos. Además, debido a la mejora de la estructura edáfica, un mayor contenido de materia orgánica del suelo mejora su capacidad de infiltración y percolación de agua, disminuyendo así la escorrentía, la erosión y la salinización, y aumentando la recarga de los acuíferos subyacentes. Finalmente, un mayor contenido de materia orgánica del suelo mejora su capacidad para, según la naturaleza de los contaminantes, inmovilizarlos o eliminarlos.

La mejora de todas estas funciones como consecuencia del aumento de la materia orgánica del suelo genera un importante mecanismo de retroalimentación positiva para la acumulación de materia orgánica. Así en suelos muy empobrecidos en materia orgánica, como algunos de los que se presentan en la Comunitat Valenciana, la acumulación que resulta de la adopción de nuevas prácticas de cultivo puede ser muy lenta al principio. Dependiendo del clima podemos estar hablando de razones de acumulación tan exiguas como 50 kg C/ha/año bajo clima árido (Lal 2004). No obstante, la acumulación de materia orgánica del suelo va acelerándose a medida que su contenido aumenta y mejoran todas las funciones anteriormente citadas. En suelos como los de la Comunitat Valenciana, la razón de acumulación podría llegar a aumentar

hasta 150 kg C/ha/año tras los primeros años, lo cual se encuentra dentro del objetivo razonable del 0.4% de incremento anual de materia orgánica del suelo propuesto en la pasada Conferencia sobre Cambio Climático de París (COP21) (Rhodes 2016). A este ritmo la capacidad potencial de secuestro de carbono de los suelos agrícolas estimada en este trabajo podría alcanzarse en un plazo de 15 a 100 años según la zona agroecológica. Este horizonte temporal está de acuerdo con las estimaciones presentadas por otros autores para la agricultura bajo clima templado (Lal 2004).

Conclusiones

En el presente trabajo se ha presentado una novedosa metodología para la estimación de la capacidad potencial de secuestro y emisión de CO₂ de los suelos agrícolas de zonas amplias y con gran diversidad de cultivos. Tras aplicar esta metodología a los suelos agrícolas de la Comunitat Valenciana se concluye que en sus 20 primeros cm, éstos pueden secuestrar más de 8 años de CO₂ emitidos por el uso de combustibles fósiles en el mismo territorio. Esta capacidad podría conseguirse en toda su extensión en un plazo de 15 a 100 años mediante la adopción generalizada y duradera de prácticas de cultivo favorables a la acumulación de materia orgánica del suelo. Por el contrario prácticas de cultivo opuestas podrían disminuir aún más la reserva de materia orgánica del suelo y contribuir una cantidad similar de emisiones de CO₂, es decir, el equivalente a la emisión de 7 años y medio de uso de combustibles fósiles en la Comunitat Valenciana. Una capacidad de secuestro/emisión de aproximadamente \pm 8 años de emisiones de CO₂ por uso de combustibles fósiles es importante, pero a todas luces insuficiente en el escenario actual de emisiones mundiales todavía crecientes de CO₂. En base a estos números resulta evidente que el secuestro de CO₂ como materia orgánica de los suelos agrícolas mediante el uso de las tecnologías actuales no es la solución definitiva para la mitigación del cambio climático. Sin embargo, el secuestro de CO₂ como materia orgánica del suelo sigue presentando una importancia que no puede soslayarse y que debería potenciarse en base a planes estratégicos de manejo conservativo de suelos y de materias orgánicas procedentes de reciclaje. Esto es debido a que el incremento de materia orgánica del suelo permite, por un lado, aumentar la calidad del suelo, asunto de gran trascendencia para la adaptación al cambio climático, y por otro lado, ganar tiempo para investigar en otras tecnologías más eficaces para el secuestro de CO₂.

Referencias

- Baldock, J.A. 2007. Composition and cycling of organic carbon in soil. En: Marschner, P., Rengel, Z. (eds.), *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*, pp. 1-35. Springer. Berlin, Heidelberg, Alemania.
- Batjes, N.H. 1999. *Management options for reducing CO₂-concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil* No. 410-200-031). International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, Países Bajos.
- Bindoff, N.L., Stott, P.A., AchutaRao, K.M., Allen, M.R., Gillett, N., Gutzler, D., et al. 2013. Detection and attribution of climate change: From global to regional. En: Stocker, T.F. et al. (eds.), *Climate change 2013: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 867-952. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido and New York, NY, Estados Unidos.
- Blunden, J., Arndt, D.S. 2016. State of the climate in 2015. *Bulletin of the American Meteorological Society* 97 (8): S1-S275.
- Boden, T.A., Marland, G., Andres, R.J. 2016. *Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. Oak Ridge, Tenn, U.S.A.
- Bonet, L., Jordà, M., Visconti, F., Quiñones, A., Besada, C., Salvador, A., de Paz, J.M. Intrioglio, D.S. 2014. *Informe del convenio de colaboración entre la Cooperativa de Carlet y el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias para el estudio y soluciones para el problema de la fitotoxicidad por cloruros en el cultivo del caqui en la Cooperativa de Carlet*. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. Moncada, Valencia, España.

- Bruce J.P., Frome, M., Haites, E., Joanne, H., Lal, R., Faustian, K. 1999. Carbon sequestration in soils. *Journal of Soil and Water Conservation* 54 (1): 382-389.
- Chen, Z., Wang, Z., Schneiderman, J., Tao, J., Cai, Y. 2005. Holocene climate fluctuations in the Yangtze delta of eastern China and the neolithic response. *Holocene* 15(6): 915-924.
- Ciais, P., Sabine, C., Govindasamy, B., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., et al. 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. En: Stocker, T.F. et al. (eds.), *Climate change 2013: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 465-570. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido and New York, NY, Estados Unidos.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1995a. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Chelva (666)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1995b. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Chulilla (694)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1995c. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Llíria (695)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1995d. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Onteniente (820)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1995e. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Sagunto (668)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1995f. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Utiel (693)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris, Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1995g. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Villar del Arzobispo (667)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1996a. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Alpuente (638), Landete (637)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1996b. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Burjassot (696)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1996c. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Cheste (721)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1996d. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Requena (720)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1996e. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Valencia (722)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1996f. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Venta del Moro (719)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1997a. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. Ayora (768)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- Comunidad Valenciana Servicio de Estudios Agrarios y Comunitarios. 1997b. *Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana. El Rincón de Ademuz (612 y 613)*. Servei d'Estudis Agraris i Comunitaris. Valencia, España.
- CORES 2016. *Consumos de gasolinas, gasóleos y fuelóleos por provincias y comunidades autónomas*. [Acceso 07/10, 2016]. Disponible en: <http://www.cores.es/es/estadisticas>
- de Paz, J.M. 1999. *Acople de un sistema de información geográfica con dos modelos de simulación de lixiviación de nitrato y su aplicación a una zona agrícola*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València (UPV). Valencia, España.
- de Paz, J.M., Sánchez, J. 2014. *Evaluación de la capacidad de secuestro/emisión de CO₂ y N₂O de suelos hortícolas mediante un modelo integrado en un Sistema de Información Geográfica (SIG-CARB-NITIRSOIL)*. Informe Final de Proyecto. CGL2012-39725-C02-01 y 02. Moncada, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, Centro de Investigaciones sobre Desertificación. Valencia, España.
- de Paz, J.M., Visconti, F. 2015. *Seguimiento y control del uso como agua de riego de las aguas de rechazo de la planta desalinizadora municipal mezcladas con aguas del río Turia en las parcelas adscritas a la Comunidad de Regantes de Loriguilla*. Informe de Proyecto. Moncada, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. Valencia, España.
- de Paz, J.M., Visconti, F. 2016. *Seguimiento y control del uso como agua de riego de las aguas de rechazo de la planta desalinizadora municipal mezcladas con aguas del río Turia en las parcelas adscritas a la Comunidad de Regantes de Loriguilla*. Informe de Proyecto. Moncada, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. Valencia, España.
- de Paz, J.M., Visconti, F., Zapata, R., Sánchez, J. 2004. Integration of two simple models in a geographical information system to evaluate salinization risk in irrigated land of the Valencian Community, Spain. *Soil Use and Management*, 20, 333-342.
- de Paz, J.M., Visconti, F., Molina, M.J. 2007. Metodología para la elaboración de un mapa de riesgo de salinización del suelo en la Comunidad Valenciana. *Libro De Actas Del III Simposio Nacional De La Sociedad Española De La Ciencia Del Suelo Sobre La "Degradación De Suelos y La Desertificación"*, Lanzarote, España, pp. 287-288.
- de Paz, J.M., Visconti, F., Rubio, J.L. 2011. Spatial evaluation of soil salinity using the WET sensor in the irrigated area of the Segura river lowland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174, 103-112.
- de Paz, J.M., Albert, C., Visconti, F., Jiménez, M.G., Ingelmo, F., Molina, M.J. 2015. A new methodology to assess the maximum irrigation rates at catchment scale using geostatistics and GIS. *Precision Agriculture*, 16, 505-531.
- FAO 2015. *FAOSTAT database*. Retrieved 07/15, 2016, Disponible en: <http://faostat3.fao.org/home/E>
- Follett, R.F. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil and Tillage Research*. 61: 77-92.
- Frisia, S., Borsato, A., Mangini, A., Spoetl, C., Madonia, G., Sauro, U. 2006. Holocene climate variability in Sicily from a discontinuous stalagmite record and the mesolithic to neolithic transition. *Quaternary Research* 66 (3): 388-400.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R. 2012. Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (37): E2415-E2423.
- Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., et al. 2013. Observations: Atmosphere and surface. En: Stocker, T.F. et al. (eds.), *Climate change 2013: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 159-254. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido and New York, NY, Estados Unidos.
- IGN 2011. *Sistema de información sobre ocupación del suelo de España (SIOSE)*. Retrieved 07/01, 2016, Disponible en: <http://www.siose.es/siose/index.html>
- INGEMISA 1987. *Mapa geocientífico de la provincia de Alicante*. Agència del Medi Ambient. Conselleria d'Administració Pública, Valencia, España.
- INGEMISA 1989a. *Mapa geocientífico de la provincia de Castellón*. Agència del Medi Ambient. Conselleria d'Administració Pública, Valencia, España.
- INGEMISA 1989b. *Mapa geocientífico de la provincia de Valencia*. Agència del Medi Ambient. Conselleria d'Administració Pública, Valencia, España.
- IPCC 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Field, C.B. et al. (eds.). Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido and New York, NY, Estados Unidos, 1132 pp.
- Jastrow, J.D., Miller, R.M. 1997. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organomineral associations. En: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A. (eds.), *Soil processes and the carbon cycle*, pp. 207-223. CRC Press. Boca Raton, Estados Unidos.
- Keeling, R. 2015. *Is this the last year below 400?* [Acceso 07/18, 2016], Disponible en: <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/2015/10/21/is-this-the-last-year-below-400/>
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304 (5677): 1623-1627.
- Lal, R. 2008. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 363 (1492): 815-830.
- Lal, R. 2010. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *Bioscience* 60 (9): 708-721.

- Lal, R., Follet, R.F. 2009. Priorities in soil carbon research in response to climate change. En: R. Lal, R., Follet, R.F. (eds.), *Soil carbon sequestration and the greenhouse effect*, pp. 401-410. SSSA. Madison, WI, Estados Unidos.
- Lal, R., Fausey, N.R., Eckett, N.R. 1995. Land use and soil management effects of emissions of radiatively active gases from two soils of Ohio. En: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart B.A. (eds.), *Soil management and greenhouse effect*, pp. 41-60. CRC Press. Boca Raton, Estados Unidos.
- Liniger, H., Mekdaschi Studer, R., Moll, P., Zander, U. 2016. *Making sense of research for sustainable land management*. Centre for Development and Environment (CDE), University of Bern, Switzerland and Helmholtz-Centre for Environmental Research GmbH – UFZ, Leipzig, Alemania.
- López Arias, M., Grau Corbí, J.M. 2005. *Metales pesados, materia orgánica y otros parámetros de la capa superficial de los suelos agrícolas y de pastos de la España Peninsular. II. Resultados por provincias*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Madrid, España.
- Luethi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J., Siegenthaler, U., et al. 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650 000-800 000 years before present. *Nature* 453 (7193): 379-382.
- Marland, G., Rotty, R. 1984. Carbon-dioxide emissions from fossil-fuels - a procedure for estimation and results for 1950-1982. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 36 (4): 232-261.
- Maslin, M.A., Brierley, C.M., Milner, A.M., Shultz, S., Trauth, M.H., Wilson, K.E. 2014. East African climate pulses and early human evolution. *Quaternary Science Reviews* 101: 1-17.
- Micó, C. 2005. *Estudio de metales pesados en suelos con cultivos hortícolas de la provincia de Alicante*. Tesis Doctoral. Universitat de València EG. Valencia, España.
- Mota, C., Alcaraz-López, C., Iglesias, M., Martínez-Ballesta, M.C., Carvajal, M. 2010. *Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la Región de Murcia*. Departamento de Nutrición Vegetal CEBAS-Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Murcia, España.
- Oades, J. 1988. The retention of organic-matter in soils. *Biogeochemistry* 5 (1): 35-70.
- Peris, M. 2006. *Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de Castellón*. Tesis Doctoral. Universitat de València EG. Valencia, España.
- Porta, J. 1986. *Técnicas y experimentos en edafología*. Col·legi Oficial d'Enginyers Agrònoms de Catalunya. Barcelona, España.
- Rhodes, C.J. 2016. The 2015 Paris Climate Change Conference: COP21. *Science Progress* 99 (1): 97-104.
- Romanyà, J., Rovira, P., Vallejo R. 2007. Análisis del carbono en los suelos agrícolas de España. Aspectos relevantes en relación a la reconversión a la agricultura ecológica en el ámbito mediterráneo. *Ecosistemas* 16 (1): 50-57.
- Ruddiman, W. 2003. The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic Change* 61 (3): 261-293.
- Sánchez, J., de Paz, J.M. 2013. *Desarrollo de un sistema de ayuda a la decisión en el manejo del suelo y el agua de riego en zonas agrícolas con problemas de salinidad: DSS-SALTIRSOIL*. Informe Final de Proyecto. CGL2009-14592-C02-01 y 02. Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. Moncada, Valencia, España.
- Sánchez, J., de Paz, J.M. 2010. *Evaluación del riesgo de salinización de los suelos de un área de la Comunidad Valenciana mediante el uso de un SIG en combinación con modelos de simulación de la salinización*. Informe Final de Proyecto. CGL2006-13233-C02-01 y 02. Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. Moncada y Albal, Valencia, España.
- Sedjo, R., Sohngen, B. 2012. Carbon sequestration in forests and soils. *Annual Review of Resource Economics* 4 (4): 126-143.
- Siegenthaler, U., Stocker, T., Monnin, E., Luthi, D., Schwander, J., Stauffer, B., et al. 2005. Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene. *Science* 310 (5752): 1313-1317.
- Sombroek, W.G., Nachtergaele, F.O., Hebel, A. 1993. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* 22 (7): 417-426.
- Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., et al. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture Ecosystems and Environment* 164, 80-99.
- Trauth, M.H., Maslin, M.A., Deino, A.L., Strecker, M.R., Bergner, A.G.N., Duehnforth, M. 2007. High- and low-latitude forcing of Plio-Pleistocene east African climate and human evolution. *Journal of Human Evolution* 53 (5): 475-486.
- United Nations 1998. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. [Acceso 07/30, 2016], Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>.
- Visconti, F. 2009. *Elaboración de un modelo predictivo de la acumulación de sales en suelos agrícolas de regadío bajo clima mediterráneo; aplicación a la Vega Baja del Segura y Bajo Vinalopó (Alicante)*. Tesis Doctoral. Universitat de València EG. Valencia, España.
- World Bank 2012. *Carbon Sequestration in Agricultural Soils* No. 67395-GLB.
- West, T.O. Post, W.M. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1930-1946.