
ELS ESTOCS DE CARBONI ORGÀNIC ALS SÒLS AGRÍCOLES DE CATALUNYA: UNA EINA PER A LA MITIGACIÓ DEL CANVI CLIMÀTIC

**Inma Funes,¹ Robert Savé,¹ Pere Rovira,² Roberto Molowny-Horas,³
Josep M. Alcañiz,³ Emili Ascaso,⁴ J. Ignasi Herms,⁴ Carmen Herrero,⁵
Jaume Boixadera⁵ i Jordi Vayreda³**

1. Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA),
Caldes de Montbui
2. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (CTFC), Solsona
3. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF),
Cerdanyola del Vallès
4. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Barcelona
5. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació (DARP),
Generalitat de Catalunya, Lleida

REBUT: 8 de novembre de 2018 - ACCEPTAT: 10 de gener de 2019

RESUM

Conèixer els estocs de carboni orgànic als sòls (E-COS) agrícoles, avaluar la importància de les variables que els expliquen i entendre'n la distribució pel territori, és crucial per a predir possibles situacions futures i dissenyar estratègies apropiades de mitigació i adaptació al canvi climàtic. En aquest estudi hem caracteritzat i modelitzat els E-COS agrícoles a Catalunya en superfície (0-30 cm) i en profunditat (30-100 cm), basant-nos en dades de 2.186 i 1.612 perfils de sòls, respectivament. A partir d'un conjunt de variables ambientals i mitjançant un enfocament estadístic, *i*) hem avaluat els efectes de les principals variables explicatives sobre la distribució del carboni orgànic del sòl (COS), *ii*) hem estimat els E-COS en funció dels tipus de cultius i *iii*) hem representat espacialment els estocs en superfície de COS agrícola a tot

Correspondència: Inma Funes. IRTA. Torre Marimon, 08140 Caldes de Montbui (Barcelona).
Tel.: 934 674 040. A/e: immaculada.funes@irta.cat.

el país. Mentre que en superfície els E-COS depenen principalment de la textura del sòl i de variables dinàmiques, com ara el clima i les pràctiques agrícoles, en profunditat depenen principalment de les propietats físiques i químiques del sòl. D'acord amb el mapa resultant, el valor mitjà de l'estoc de COS en superfície per a l'agricultura catalana és de $4,88 \pm 0,89 \text{ kg C}\cdot\text{m}^{-2}$ ($1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2} = 10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$), amb un total de 47,9 Tg C [1 teragram = 10^{12} grams = 1 milió de tones (Mt)] per a tot el territori. Aquests resultats seran útils per a definir estratègies d'emmagatzematge de C a escala regional, basades en canvis d'usos del sòl i pràctiques de gestió agrícola sota un context de canvi climàtic.

PARAULES CLAU: canvi climàtic, agricultura mediterrània, carboni orgànic del sòl, emmagatzematge de carboni, gestió agrícola, geoestadística.

LAS RESERVAS DE CARBONO ORGÁNICO EN LOS SUELOS AGRÍCOLAS DE CATALUÑA: UNA HERRAMIENTA PARA LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

RESUMEN

Conocer las existencias de carbono orgánico en suelos (E-COS) agrícolas, evaluar la importancia de las variables explicativas y entender su distribución espacial es crucial para predecir posibles escenarios futuros y diseñar estrategias apropiadas de mitigación y adaptación al cambio climático. En el presente estudio hemos caracterizado y modelizado las E-COS agrícolas de Cataluña en superficie (0-30 cm) y en profundidad (30-100 cm), sobre la base de datos de 2.186 y 1.612 perfiles de suelos, respectivamente. A partir de un conjunto de variables ambientales, y mediante un enfoque estadístico: *i*) hemos evaluado las principales variables explicativas sobre la distribución del carbono orgánico del suelo (COS), *ii*) hemos estimado las E-COS en función del tipo de cultivo y *iii*) hemos representado espacialmente las existencias en superficie de COS agrícola en todo el país. Mientras que en superficie las E-COS dependen principalmente de la textura del suelo y de variables dinámicas como el clima y las prácticas agrícolas, en profundidad dependen principalmente de las propiedades físicas y químicas del suelo. De acuerdo con el mapa resultante, el valor medio de las existencias de COS en superficie para la agricultura catalana es de $4,88 \pm 0,89 \text{ kg C}\cdot\text{m}^{-2}$ ($1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2} = 10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) con un total de 47,9 Tg C [1 teragramo = 10^{12} gramos = 1 millón de toneladas (Mt)] para todo el territorio. Estos resultados serán útiles para definir estrategias de almacenamiento de C a escala regional, relacionadas con cambios en el uso del suelo y prácticas de gestión agrícola bajo un contexto de cambio climático.

PALABRAS CLAVE: cambio climático, agricultura mediterránea, carbono orgánico en el suelo, almacenamiento de carbono, gestión agrícola, geoestadística.

SOIL ORGANIC CARBON STOCKS IN AGRICULTURAL SOILS OF CATALONIA: A TOOL FOR CLIMATE CHANGE MITIGATION

ABSTRACT

Determining the soil organic carbon stocks (SOC-S) in agricultural soils, assessing the importance of their variables and understanding their spatial distribution over the territory is crucial to predict possible future scenarios and to design appropriate strategies of climate-change mitigation and adaptation. In this study we characterized and modelled the agricultural SOC-S of Catalonia (NE Spain) in topsoil (0-30 cm) and subsoil (30-100 cm) based on data from 2,186 and 1,612 soil profiles, respectively. We used a set of environmental factors and a statistical approach in order to: *i*) assess the effect of the main variables on the distribution of SOC-S, *ii*) estimate SOC-S according to the type of agricultural land use and *iii*) map topsoil SOC-S in Catalonia. While topsoil SOC-S mainly depend on climate, soil texture and agricultural practices, subsoil SOC-S are mainly dependent on the physical and chemical properties of the soil. According to the resulting map, the mean stock value for the Catalan cropland in the topsoil is $4.88 \pm 0.89 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ ($1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} = 10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), with a total of 47.9 Tg C (1 teragram = 10^{12} grams = 1 million metric tons) for the whole territory. Our findings would be useful for defining C sequestration strategies on the regional scale based on agricultural land use changes and agricultural management practices in a context of climate change.

KEYWORDS: climate change, Mediterranean agriculture, soil organic carbon, carbon sequestration, crop management, geostatistics.

1. INTRODUCCIÓ

Els sòls són el principal embornal de carboni (C) terrestre, per davant de les plantes i de l'atmosfera (Batjes, 2014), malgrat que també actuen com a font de diòxid de carboni (CO₂) i d'altres gasos amb efecte d'hivernacle (GEH). Els canvis d'usos del sòl són la causa principal de la pèrdua de carboni orgànic al sòl (COS) a escala global, sobretot la desforestació a favor del cultiu (Canadell *et al.*, 2007). S'estima que les terres cultivades perden més del 50% del contingut original de COS a la capa superficial en uns

25-50 anys després de la rompuda dels respectius ecosistemes naturals (Lal *et al.*, 2011). Aquestes pèrdues són degudes a l'acceleració de l'activitat biològica que provoca el treball del sòl, als canvis en la temperatura i en la humitat edàfica, a l'alteració de l'estructura —el trencament dels agregats allibera matèria orgànica abans protegida— o a l'augment de l'erosió. Malgrat això, els sòls agrícoles poden incrementar el contingut de COS amb la implantació de certes pràctiques de gestió agrícola recomanades (PGAR). De fet, l'estratègia de mitigació del canvi climàtic anomenada «4 per 1000 Soils for Food Security and Climate»,¹ llançada a la Conferència de les Parts sobre el Canvi Climàtic celebrada a París el 2015 (COP21), aspira a incrementar a escala global la matèria orgànica als sòls en el 0,4% anual per compensar les emissions de GEH, a fi de *i*) mantenir l'escalfament global per sota dels 2°C, *ii*) millorar la qualitat del sòl, *iii*) fer la terra més productiva i *iv*) garantir la seguretat alimentària.

Exigim molt als sòls, volem que ens forneixin de béns i serveis productius i ecosistèmics, i un d'aquests és l'emmagatzematge de carboni. Ara bé, en primer lloc no coneixem prou bé el contingut real de COS dels sòls agrícoles, ni com es distribueix pel país. En segon lloc, el potencial d'emmagatzematge no és el mateix per a tots els tipus de sòls, perquè és en funció del mateix contingut de C orgànic, i depèn de propietats edàfiques com la textura, el pH, el tipus i la concentració de cations bàsics de canvi, entre d'altres, que determinen la capacitat de protecció física de la matèria orgànica, principal via d'estabilització del carboni al sòl (Rovira i Vallejo, 2003). En tercer lloc, les possibilitats d'aplicar mesures per a recuperar els estocs de COS (E-COS), com ara pràctiques d'agricultura de conservació, reg, gestió dels residus de collita, aplicació d'adobs i esmenes orgàniques, o altres, estan condicionades pels mateixos factors edàfics i, a la pràctica, tenen limitacions.

En aquest context, millorar el coneixement de les reserves de carboni orgànic als sòls agrícoles d'un país és vital per a definir possibles estratègies d'emmagatzematge de carboni a escala nacional, relacionades amb la gestió agrícola i paisatgística en situacions de canvi climàtic. Conèixer la distribució geogràfica dels E-COS i l'efecte de les variables explicatives ens ajudarà a predir els possibles canvis de COS futurs. És per això que la mesura dels E-COS i la predicció dels seus canvis han esdevingut un factor clau en les últimes dècades. Ara bé, elaborar prediccions exactes en sistemes tan complexos com ara els sòls agrícoles és un gran repte, atès que les dades disponibles són sovint obsoletes, insuficients, disperses o inaccessibles, sense oblidar que tampoc no tenim prou coneixement de totes les variables que permeten explicar els E-COS actuals als sòls agrícoles. No obstant això, hi ha un ampli ventall de tècniques geoestadístiques a l'abast per a predir i repre-

1. Per a més informació, consulteu: <https://www.4p1000.org>.

sentar espacialment els E-COS tant a escala de paisatge com regional o continental (Minasny *et al.*, 2013). Els enfocaments estadístics basats en dades experimentals ens permeten quantificar la influència de les variables del medi i la repercussió de les activitats humanes sobre els E-COS. El coneixement de la situació de partida és essencial per a futurs inventaris de COS i, particularment en sistemes agrícoles, permetrà avaluar els efectes dels canvis d'ús del sòl o de l'aplicació de certes PGAR sobre els estocs de COS. A més, la representació espacial dels E-COS basada en factors dinàmics (com el tipus de cultiu, la gestió agrícola o el clima), i també en factors estàtics (les propietats del sòl o del relleu), poden ajudar a entendre millor la potencialitat dels sistemes agraris mediterranis per a emmagatzemar carboni.

Aquest estudi és el primer inventari dels E-COS agrícoles en superfície i en profunditat a escala de tot Catalunya que considera els principals factors que els afecten. Pretén ser un punt de partida per contribuir a generar estratègies, polítiques i accions de mitigació del canvi climàtic en la línia suggerida per la COP21 i la COP22 celebrada el 2016 a Marràqueix, en consonància amb les marcades per l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic en l'Estratègia catalana d'adaptació al canvi climàtic 2013-2020 (OCCC, 2012).

Els objectius principals d'aquest treball han estat: *i*) avaluar la distribució dels estocs de COS agrícoles a dues fondàries; 0-30 cm (en superfície) i 30-100 cm (en profunditat); *ii*) identificar les principals variables explicatives dels estocs de COS i *iii*) representar espacialment els estocs de COS agrícoles segons un conjunt de variables ambientals.

2. MATERIAL I MÈTODES

2.1. La superfície agrícola, el clima i els sòls

L'àrea d'estudi comprèn tota la superfície agrícola de Catalunya, que xifrem en 9.822 km². Segons el Sistema d'informació geogràfica de parcel·les agrícoles² (SIGPAC), de l'any 2016, la superfície cultivada catalana és de 8.882 km² (no inclou els pastius ni els camps abandonats, que també hem considerat en aquest estudi). Gairebé el 67% de la superfície cultivada és de secà. Els conreus herbacis extensius (cereals, lleguminoses gra, farratges i altres, excepte l'arròs) són el tipus més estès, amb el 61%, seguit dels conreus llenyosos: fruiters (17%), olivera (15%) i vinya (6%). En aquest treball hem observat de manera simplificada els següents tipus d'ús del sòl agrícola i afins: conreus herbacis extensius, fruiters, olivera, camps abandonats,

2. Per a més informació, consulteu: <http://agricultura.gencat.cat/ca/serveis/cartografia-sig/aplicatius-tematics-geoinformacio/sigpac/>.

vinya, prats de pastura, arròs i prats de dall, tot distingint si són de secà o de regadiu.

Pel que fa al clima (Martín-Vide, 1992), les àrees agrícoles de Catalunya es caracteritzen per un tipus general marcadament mediterrani, amb hiverns suaus i estius secs i càlids. A més, Catalunya presenta un fort gradient climàtic altitudinal definit per la temperatura mitjana anual (0-17,3 °C) i la precipitació mitjana anual (335-1.464 mm). També presenta una tendència a la continentalitat des de la costa vers l'interior per la barrera que constitueixen les serralades Litoral i Prelitoral (Martín-Vide, 1992).

Quant als sòls, de manera resumida, l'agricultura catalana es desenvolupa majoritàriament sobre inceptisols i entisols (sobretot fluvents i ortents) i molt menys sobre alfisols, aridisols i mol·lisols (Porta *et al.*, 1987). Els inceptisols (sòls amb desenvolupament moderat) de composició calcària i els entisols (sòls recents o molt poc desenvolupats) representen la major part de les terres cultivades (tant secans com regadius). Així, els fluvents (sòls al·luvials) són majoritaris en molts dels regadius històrics. Els aridisols són típics d'àrees on l'evapotranspiració és molt superior a la precipitació; solen ser poc profunds, la qual cosa limita la producció agrícola. Els alfisols (sòls amb un horitzó d'acumulació d'argiles i d'elevada saturació de bases) es localitzen sobretot al nord-est i els mol·lisols (sòls amb un horitzó superficial fosc) es limiten a certes zones sobre materials calcaris. Els sòls agrícoles són, majoritàriament, de textura mitjana (franca) i de reacció bàsica. Predominen els sòls amb carbonat càlcic, sovint amb un horitzó petrocàlcic com a capa limitant per a les arrels (Porta *et al.*, 1987). En materials parentals no calcaris apareixen sòls entre neutres i lleugerament àcids. D'altra banda, hi ha problemes de salinitat en àrees significatives de la Depressió Central i en deltes i maresmes. Tot això configura un mosaic de sòls ben divers, sobre el qual es desenvolupen les activitats agrícoles.

2.2. Les dades de sòls agrícoles de Catalunya

Hem partit de la informació descriptiva i analítica de 7.245 perfils de sòls agrícoles d'arreu de Catalunya que conté la Base de Dades i Sistema d'Informació dels Sòls de Catalunya (BDSISCat) recopilada per l'ICGC (2018). La majoria d'aquestes dades pertanyen als estudis per a l'elaboració del Mapa de Sòls 1:25.000 (MSC25M) de Catalunya (ICGC, 2017) realitzats durant els darrers 35 anys, inicialment pel DARP i des del 2006 conjuntament amb l'ICGC. A partir de la descripció de camp, seguint la metodologia CBDSA (1983), d'aquests més de 7.000 perfils, hem destriat, depurat i harmonitzat les dades. Els criteris aplicats han estat: la correcta georeferenciació dels perfils, és a dir, que les dades associades a cada perfil fossin completes; la precisió de la dada de contingut de matèria orgànica als horitzons; les esti-

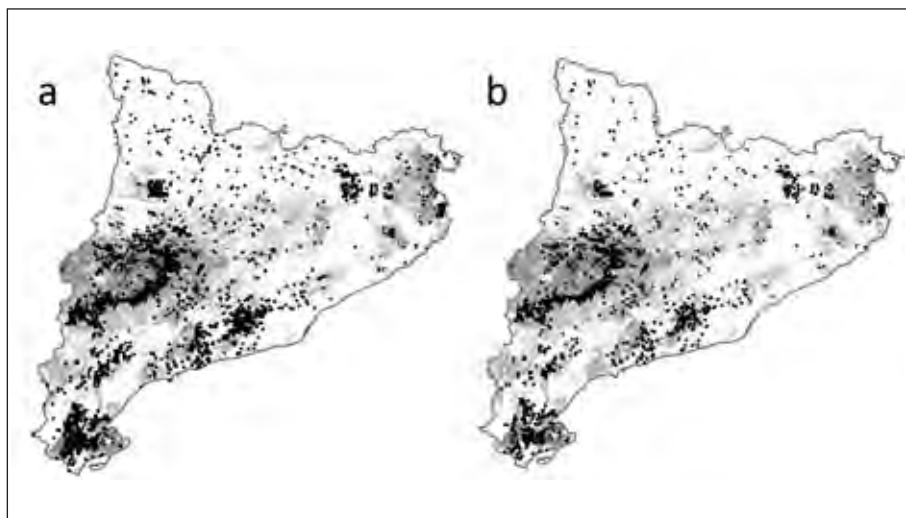
Els estocs de carboni orgànic als sòls agrícoles de Catalunya

macions acceptables de la densitat aparent i de la proporció d'elements grossos, i l'especificació del tipus de cultiu o d'ús del sòl. Segons aquests criteris, hem seleccionat 2.186 perfils de sòls per calcular els E-COS en superfície, dels quals 1.612 han servit per a calcular els estocs en profunditat (vegeu a la figura 1 la distribució espacial del conjunt de perfils escollits). A partir d'aquesta selecció de perfils, aplicant els resultats de contingut de matèria orgànica dels diferents horitzons analitzats segons el mètode de Walkley-Black i els resultats de granulometria obtinguts mitjançant el mètode de sedimentació discontinua (Comisión de Métodos Oficiales de Análisis de Suelos y Aguas, 1975; MAPA, 1994), hem estimat els E-COS (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) dels diferents horitzons del sòl, seguint aquesta equació:

$$\text{E-COS} = Bd \cdot (\text{COc}/100) \cdot 10000 \cdot Th \cdot (1 - S) \cdot (1/1000) \quad [1]$$

Bd és la densitat aparent ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), COc és la concentració de carboni orgànic en la terra fina (en % del pes), Th és el gruix de l'horitzó en cm, i S és la fracció del volum de l'horitzó (entre 0 i 1) ocupada per elements grossos (> 2 mm de diàmetre). S s'ha estimat visualment al camp durant els mostrejos i la densitat aparent ha estat estimada mitjançant una funció d'edafotransferència (Honetsset i Ratkowski, 1989).

FIGURA 1. Distribució de la selecció final de perfils dels sòls agrícoles estudiats (punts negres): a) per l'estoc en superfície (2.816 perfils de 0-30 cm) i b) per l'estoc en profunditat (1.612 perfils de 30-100 cm); en gris, la superfície agrícola segons el SIGPAC (2016); en blanc, les àrees no agrícoles



FONT: Elaboració pròpia a partir de la informació provinent de la BDSISCat (ICGC, 2018) i del SIGPAC (2016).

L'estoc de COS en superfície es calcula sumant els estocs obtinguts dels diferents horitzons que es troben entre 0 i 30 cm. L'estoc en profunditat s'obté de la mateixa manera, sumant els estocs dels horitzons situats entre 30 i 100 cm. Per a cada tipus d'ús del sòl, es calculen els E-COS a l'àrea d'estudi en funció de la superfície ocupada.

2.3. Les variables explicatives dels estocs de COS

Com a variables explicatives hem escollit un conjunt de variables ambientals (taula 1).

1. Climàtiques: Precipitació mitjana anual (PMA), temperatura mitjana anual (TMA), ràtio PMA/TMA, evapotranspiració potencial mitjana anual (ET_0) i índex d'aridesa (IA, ràtio PMA/ ET_0).
2. Topogràfiques: Altitud.
3. Agrícoles: Tipus de cultiu i règim de gestió de l'aigua (secà, regadiu).
4. Edàfiques: Tipus de sòl, classe textural del perfil, drenatge del perfil, contingut d'argila ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) i fondària del sòl (cm).

2.4. L'anàlisi estadística

Per tal d'avaluar la importància relativa de les variables explicatives dels E-COS i de tenir en compte una possible correlació entre punts espacialment propers, hem emprat el mètode de mínims quadrats generalitzats (GLS, per l'anglès *generalized least squares*) mitjançant la funció *gls* del paquet *nlme* de R (R Development Core Team, 2014). GLS és una tècnica de regressió on la component espacial del terme residual es modelitza explícitament en la matriu variància-covariància, fent servir funcions paramètriques (decaïment exponencial, en el nostre cas). GLS, en aquest estudi, inclou les coordenades (X, Y) dels perfils de sòl mostrejats en la part aleatòria del model. Per a la selecció del millor model hem partit del model complet (amb totes les variables explicatives incloses) i hi hem aplicat un procediment d'eliminació de variables cap enrere (*backward stepwise*). El criteri per a la selecció del millor model ha estat l'error quadràtic mitjà (MSE): com més petit és el MSE, millor és el model. Finalment, hem ajustat dos models: en el primer, la variable resposta correspon als E-COS en superfície i en l'altre, als E-COS en profunditat.

Els estocs de carboni orgànic als sòls agrícoles de Catalunya

TAULA I. *Variables explicatives dels estocs de COS en superfície (0-30 cm; n = 2.816) als sòls agrícoles*

| | Variables | Unitats | Rangs / Categories | Nombre de casos |
|----------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|-----------------|
| Climàtiques | PMA | mm | 362-1.180 | — |
| | TMA | °C | 5-18 | — |
| | PMA / TMA | mm / °C | 26-141 | — |
| | ET ₀ | mm | 600-1.226 | — |
| | IA (PMA/ET ₀) | adimensional | 0,30-2,03 | — |
| Topogràfiques | Altitud (snm) | m | 0-2.152 | — |
| Agrícoles | Tipus de cultiu | | Herbació extensius | 1.288 |
| | | | Fruiters | 488 |
| | | | Olivera | 298 |
| | | | Camps abandonats | 281 |
| | | | Vinya | 233 |
| | | | Prats de pastura | 141 |
| | | | Arròs | 49 |
| | | | Prats de dall | 38 |
| | Règim de gestió de l'aigua | | Secà | 2.403 |
| | | | Regadiu | 413 |
| Edàfiques | Tipus de sòl | | Alfisol | 95 |
| | | | Aridisol | 39 |
| | | | Entisol | 1.009 |
| | | | Inceptisol | 1.473 |
| | | | Mol·lisol | 200 |
| | Classe textural | | Fina | 23 |
| | | | Mitjana-fina | 462 |
| | | | Mitjana | 1.891 |
| | | | Mitjana-grossa | 413 |
| | | | Grossa | 27 |
| | Drenatge | | Bo | 2.396 |
| | | | Dolent | 123 |
| | | | Excessiu | 117 |
| | | | Mediocre | 180 |
| | Contingut d'argila | kg · m ⁻² | 27-157 | — |
| Fondària del sòl | cm | 8-200 | — | |

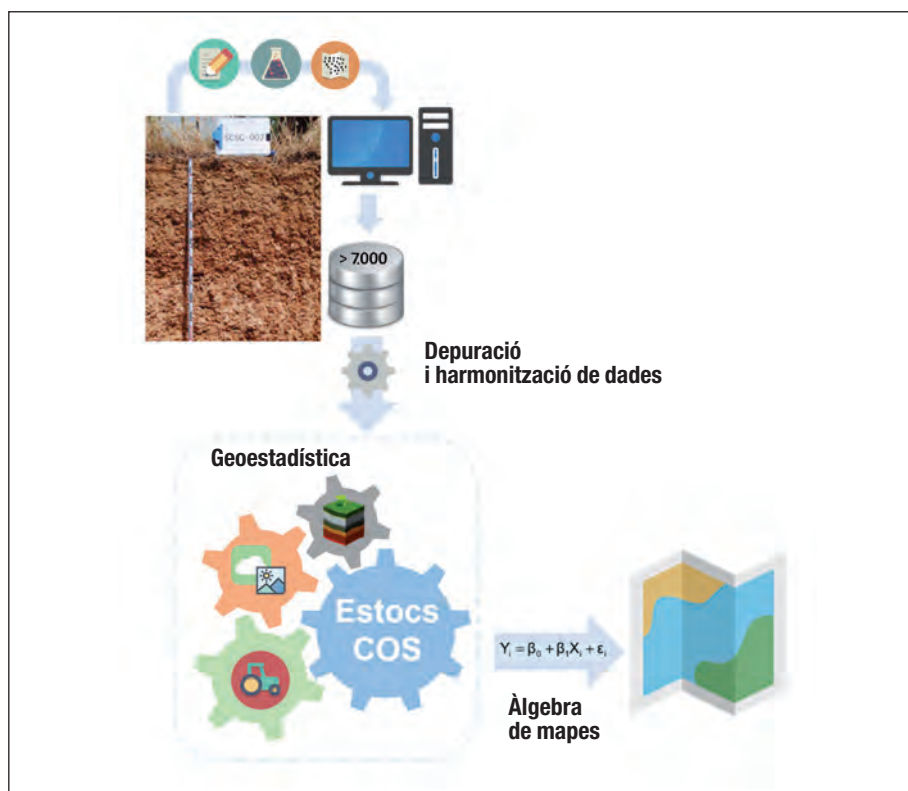
FONT: Elaboració pròpia.

2.5. Elaboració del mapa dels estocs de COS

Per a representar espacialment els E-COS dels sòls agrícoles a Catalunya hem aplicat l'equació de regressió del GLS mitjançant l'àlgebra de mapes del programari ArcGIS 10.3.1 (ESRI, 2011), juntament amb les capes de les variables predictorres, en format ràster. La predicció d'E-COS a cada píxel en la representació de tota l'àrea agrícola catalana ha estat corregida fent-hi una interpolació espacial dels residus del model (diferències entre els estocs de COS predits i mesurats en les diferents localitzacions), per tal de corregir la correlació espacial dels residus (Ninyerola *et al.*, 2000). El mapa resultant té una resolució espacial de 180 m (mida del píxel).

La figura 2 mostra un diagrama resum del mètode aplicat en aquest estudi.

FIGURA 2. *Diagrama resum del mètode aplicat per a l'elaboració del mapa dels estocs de COS: obtenció de les dades dels perfils dels sòls, processos de depuració, tractament geoestadístic, algorismes del mapa resultant*



FONT: Elaboració pròpia.

3. RESULTATS

A fi de garantir la qualitat del treball, més de la meitat dels perfils de sòls agrícoles disponibles a la BDSISCat han estat descartats per dades incompletes o poc precises. La selecció definitiva conté, però, un nombre elevat de perfils, 2.186, per a calcular els E-COS en superfície, dels quals 1.612 han servit també per a calcular els estocs en profunditat.

TAULA II. *Mitjana i desviació estàndard (DE) de l'estoc de C orgànic dels sòls (E-COS) dels perfils que arriben a 1 m de fondària (1.612) per a cada interval de profunditat i cada tipus d'ús del sòl, juntament amb el nombre de perfils seleccionats de cada ús i el valor relatiu de l'E-COS que representa cada interval de fondària sobre el total estudiat*

| Tipus d'ús del sòl | Nombre de perfils | E-COS en superfície (0-30 cm) | | E-COS en profunditat (30-100 cm) | | E-COS total (0-100 cm) |
|--------------------|-------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| | | Mitjana ± DE (kg · m ⁻²) | Relatiu a 100 cm (%) | Mitjana ± DE (kg · m ⁻²) | Relatiu a 100 cm (%) | Mitjana ± DE (kg · m ⁻²) |
| Herbació extensius | 808 | 4,60 ± 1,37 | 43,3 | 6,02 ± 2,76 | 56,7 | 10,62 ± 3,50 |
| Fruiters | 248 | 4,59 ± 1,47 | 44,8 | 5,65 ± 3,01 | 55,2 | 10,24 ± 3,71 |
| Olivera | 152 | 4,39 ± 1,62 | 46,1 | 5,13 ± 3,30 | 53,9 | 9,53 ± 4,32 |
| Camps abandonats | 140 | 5,02 ± 1,71 | 44,3 | 6,32 ± 4,23 | 55,7 | 11,34 ± 5,20 |
| Vinya | 114 | 3,90 ± 1,66 | 42,3 | 5,30 ± 2,61 | 57,7 | 9,20 ± 3,43 |
| Prats de pastura | 79 | 6,36 ± 2,23 | 58,4 | 4,52 ± 2,81 | 41,6 | 10,88 ± 4,06 |
| Arròs | 46 | 6,49 ± 1,56 | 44,3 | 8,17 ± 5,15 | 55,7 | 14,65 ± 6,33 |
| Prats de dall | 25 | 4,90 ± 1,85 | 51,0 | 4,70 ± 2,80 | 49,0 | 9,60 ± 4,03 |
| Total | 1.612 | 4,71 ± 1,62 | 44,7 | 5,82 ± 3,13 | 55,3 | 10,53 ± 4,01 |

FONT: Elaboració pròpia.

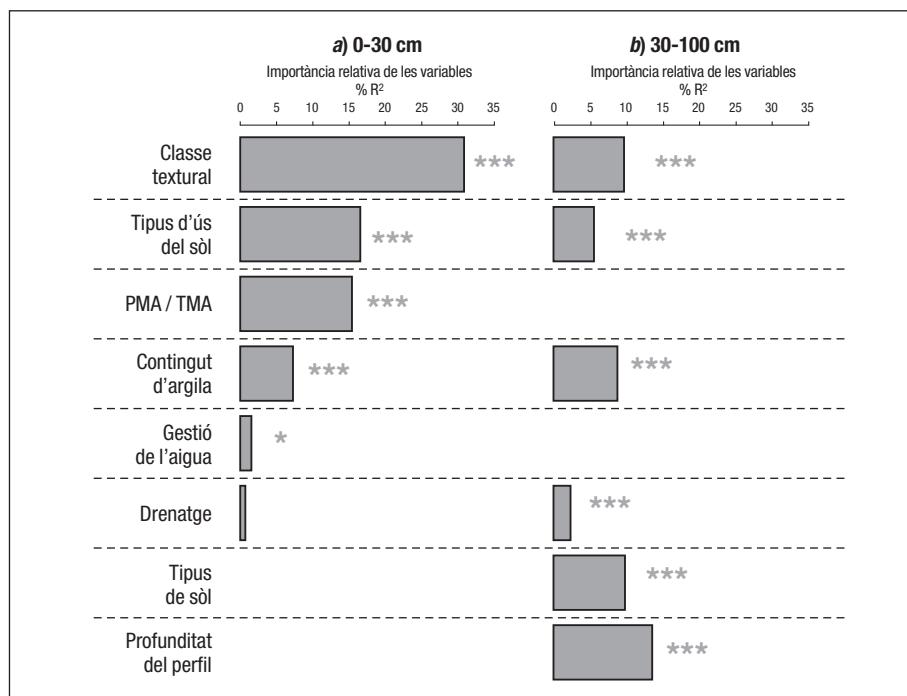
3.1. Caracterització dels estocs de COS agrícoles

Els resultats indiquen que el conreu d'arròs mostra el valor màxim d'estoc de COS agrícola a Catalunya, tant en superfície com en profunditat (taula II), probablement a causa de les pràctiques d'enterrament de la palla i de fangueig. Els sòls de prats de pastura també tenen unes reserves de COS elevades en superfície, però, en canvi, presenten els valors més baixos

en profunditat, perquè solen ser sòls molt soms. Els sòls de vinya mostren el valor més baix en la capa superficial. En conjunt, els valors mitjans d'E-COS dels sòls agrícoles de Catalunya fins a 1 metre de profunditat són aproximadament de 10 kg·m⁻² (1 kg·m⁻² = 10 t·ha⁻¹) i oscil·len entre 9,2 i 14,7 kg·m⁻², corresponents a sòls de vinya i d'arrossar, respectivament. En general, en els sòls agrícoles més de la meitat de l'estoc de carboni que es troba en 1 metre de gruix es localitza en la capa més profunda (30-100 cm), excepte en els sòls de prats (especialment els de pastura).

Cal tenir present que els valors de la taula II corresponen a un conjunt de dades diferent del que s'ha emprat per a elaborar el mapa dels E-COS de sòls agrícoles (0-30 cm), que correspon exclusivament a aquells perfils on s'han pogut estimar els E-COS més enllà dels 30 cm (1.612 perfils), d'acord amb la informació analítica i descriptiva disponible dels perfils registrats a la base de dades original.

FIGURA 3. *Importància relativa, calculada com la proporció de R², de les variables explicatives dels estocs de COS en superfície: a) i en profunditat: b)*



NOTA: Nivell de significació: * : p < 0,05; ***: p < 0,001. La variabilitat total explicada per a tots aquests paràmetres és de 0,20 i 0,27, corresponents als models dels estocs de COS en profunditat i en superfície, respectivament.

FONT: Elaboració pròpia.

3.2. Importància relativa de les variables explicatives

La importància de les principals variables explicatives dels E-COS és diferent segons la part del sòl considerada (superfície versus profunditat) (figura 3). En els 30 cm superficials, aquestes variables són la classe textural, el tipus de cultiu i la ràtio PMA/TMA. Els atributs dels sòls esdevenen més rellevants a mesura que augmenta la profunditat. La variable tipus de cultiu o d'ús del sòl continua essent important en profunditat, però no pas l'indicador climàtic PMA/TMA ni la gestió de l'aigua (secà-regadiu).

El contingut d'argila i, implícitament, la classe textural del sòl són factors importants a considerar si volem avaluar el potencial d'emmagatzematge de COS. L'argila, com a component mineral amb propietats col·loïdals, té capacitat per a formar complexos estables amb components orgànics del sòl que esdevenen menys vulnerables a la biodegradació microbiana o enzimàtica. Les argiles faciliten, també, la formació d'agregats, que inclouen partícules i substàncies orgàniques que queden protegides de l'atac microbià.

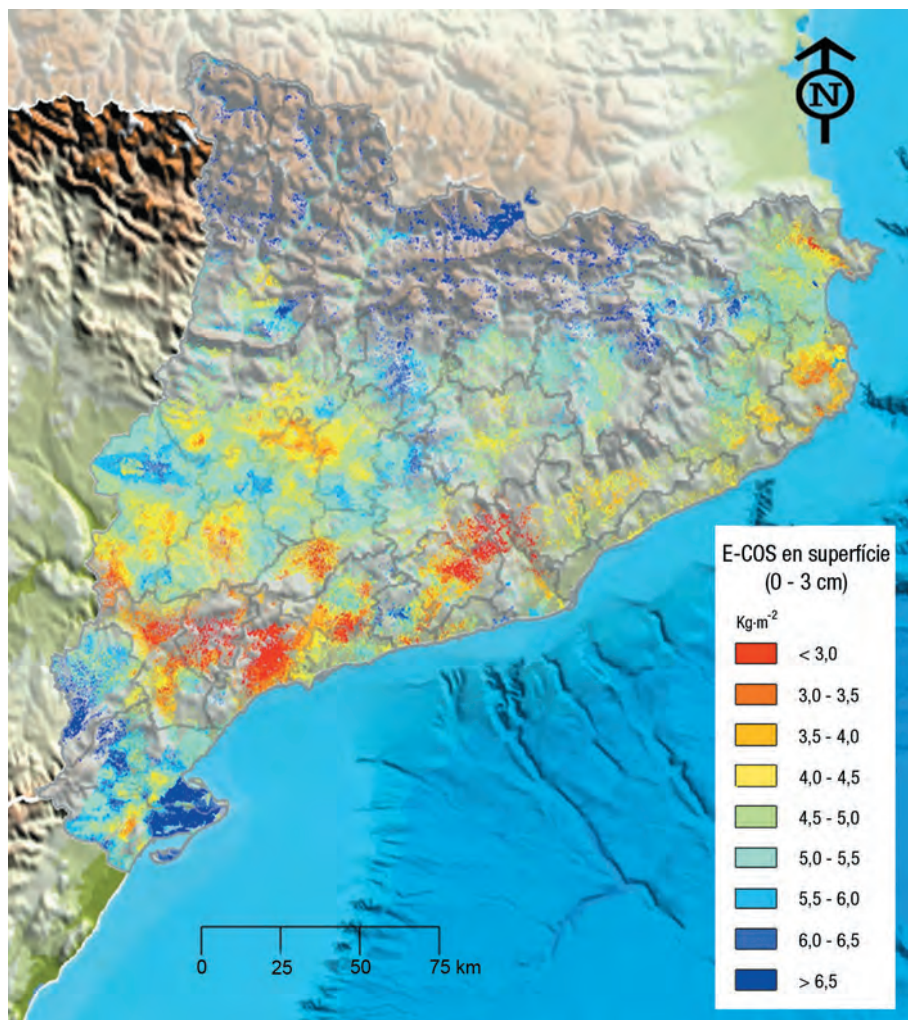
3.3. Mapa dels estocs de COS agrícoles en superfície

Tal com mostra el mapa de la figura 4 de les estimacions dels E-COS segons el tipus d'ús, es pot observar que en els sòls agrícoles del Pirineu i del Prepirineu és on són més elevats ($> 6,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) en superfície. Els camps d'arròs, que es localitzen en dos paratges: el delta de l'Ebre i, en menys extensió, els Aiguamolls de l'Empordà, destaquen també pels elevats E-COS. Els valors d'E-COS moderats ($4,0\text{-}5,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) es troben distribuïts per la Depressió Central, pel sud i pel nord-est de Catalunya, i ocupen gairebé el 84% de tota l'àrea d'estudi. A la meitat sud del prelitoral català es distribueixen els sòls agrícoles amb menor estoc de COS ($< 4,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$), en zones on l'explotació de la vinya o de l'olivera són importants.

3.4. Estimació dels estocs de COS en superfície a partir del model base del mapa

Els valors d'E-COS en superfície dels sòls agrícoles obtinguts del mapa (figura 4) varien entre $0,99$ i $13,98 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, amb un valor mitjà de $4,88 \pm 0,89 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. A partir d'aquestes dades, l'estimació del valor total d'estoc de COS en superfície és de $47,89 \text{ Tg}$ (o Mt) per al conjunt dels sòls agrícoles de Catalunya (taula III).

FIGURA 4. Distribució espacial dels estocs de COS en superfície (0-30 cm) dels sòls agrícoles de Catalunya, segons el model de regressió. Resolució del mapa: 180 m per píxel



FONT: Elaboració pròpia.

3.5. Variabilitat dels estocs de COS dins de cada tipus d'ús del sòl

Tal com s'observa en la figura 5, la majoria d'usos de sòl agrícola (conreus herbacis extensius, fruiters, olivera i camps abandonats) presenten una

Els estocs de carboni orgànic als sòls agrícoles de Catalunya

TAULA III. Estocs de COS en superfície, mitjans i totals, calculats per al conjunt de la superfície que ocupa cada tipus d'ús del sòl considerat

| Usos de sòl | Àrea | | E-COS (0-30 cm) | | |
|-----------------------|----------------|---------------|--|--------------|---------------|
| | ha | % | Mitjana \pm DE ^a (Kg C · m ⁻²) | Total (Tg) | % |
| Herbació extensius | 533.651 | 54,33 | 4,83 \pm 0,74 | 25,80 | 53,87 |
| Fruiters ^b | 147.750 | 15,04 | 4,77 \pm 0,94 | 7,04 | 14,71 |
| Olivera | 123.719 | 12,60 | 4,70 \pm 0,94 | 5,82 | 12,14 |
| Camps abandonats | 61.693 | 6,28 | 5,22 \pm 1,24 | 3,22 | 6,72 |
| Vinya | 56.097 | 5,71 | 3,47 \pm 0,86 | 1,95 | 4,07 |
| Prats de pastura | 33.933 | 3,45 | 6,90 \pm 1,32 | 2,34 | 4,98 |
| Arròs | 20.269 | 2,06 | 7,01 \pm 0,62 | 1,42 | 2,97 |
| Prats de dall | 5.122 | 0,52 | 5,87 \pm 1,56 | 0,30 | 0,63 |
| Total | 982.235 | 100,00 | 4,88 \pm 0,89 | 47,89 | 100,00 |

^a Mitjana i desviació estàndard de l'estoc de COS predit a escala de píxels per al conjunt de la superfície ocupada per cada tipus d'ús del sòl agrícola.

^b Inclouen els fruiters de llavor i de pinyol i els de fruita seca.

FONT: Elaboració pròpia.

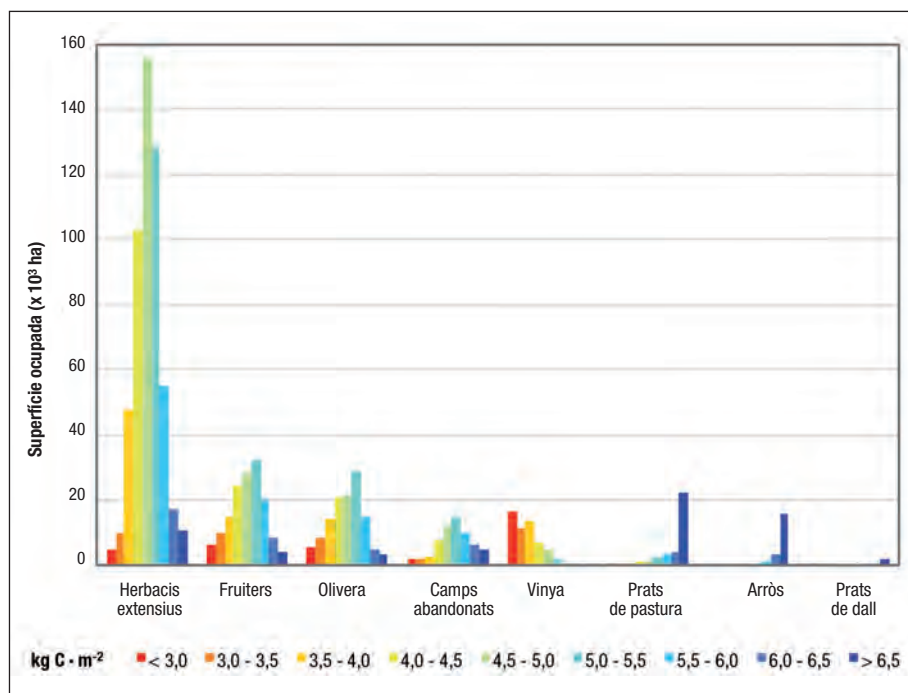
distribució normal de les classes d'E-COS (histogrames simètrics amb la major part de la superfície concentrada en les classes d'E-COS mitjanes, que oscil·len entre 4 i 5,5 kg · m⁻²). Contràriament, els arrossars, els prats de dall i els de pastura presenten una distribució asimètrica amb cua als valors baixos, i la vinya amb cua als valors alts.

La distribució dels estocs de C orgànic totals per tipus de conreu es mostra en la taula III, on es pot observar que respon bàsicament a la distribució de la superfície ocupada per cadascun dels usos del sòl agrícola.

Les variables explicatives que hem aplicat en l'equació de regressió per tal d'elaborar el mapa d'E-COS dels sòls agrícoles en superfície han estat el tipus d'ús del sòl agrícola, la gestió de l'aigua, l'índex d'aridesa i l'altitud. El coeficient de correlació (R²) de l'equació de regressió usada per a elaborar aquest mapa ha estat de 0,18.

Finalment, no hem pogut elaborar un mapa dels estocs de COS en profunditat (30-100 cm), perquè les dades de les variables explicatives més importants, que en aquest cas són les propietats del sòls, no estaven disponibles amb prou resolució espacial a tota l'àrea d'estudi.

FIGURA 5. Histogrames de la distribució dels estocs de COS en superfície ($\text{kg C} \cdot \text{m}^{-2}$) derivada del mapa d'estocs de COS per a cada tipus d'ús de sòl estudiat



FONT: Elaboració pròpia.

4. DISCUSSIÓ

El valor mitjà d'estoc de COS als sòls agrícoles de Catalunya estimat en aquest treball ha estat semblant a d'altres publicats en països de latitud semblant (Minasny *et al.*, 2017). És ben sabut que els E-COS depenen del clima (Minasny *et al.*, 2017): són més elevats en latituds altes i en els tròpics humits, i inferiors en latituds mitjanes.

Els nostres resultats posen de manifest que la qualitat de les dades disponibles, procedents d'una base de dades dissenyada per a elaborar el MSC25M (ICGC, 2017) —és a dir, amb una altra finalitat—, és insuficient per a millorar la modelització i les prediccions i, consegüentment, reduir la incertesa del mapa de COS agrícola resultant. Com es pot observar, malgrat que el nombre de perfils de sòls disponibles a Catalunya és elevat, hem hagut de descartar-ne molts que no ofereixen la informació completa o bé contenen dades ambigües o poc precises. Caldria millorar la informació per

tal d'entendre el paper dels factors abiòtics, biòtics i humans que afecten la distribució espacial dels E-COS i que no hem pogut considerar en aquest treball. Per tant, com a recomanació a partir d'aquest treball, cal fer esforços per obtenir dades més precises d'aquells paràmetres necessaris per a l'estimació dels E-COS (com ara la densitat aparent o el contingut d'elements grossos), i també dels paràmetres relacionats amb les seves variables explicatives (analítiques de sòl més completes, posició geogràfica exacta, detalls de l'ús del sòl, pràctiques de gestió actuals i anteriors, etc.). Aquestes recomanacions van adreçades tant a l'elaboració i la revisió dels mapes de sòls (especialment el MSC25M) com als mostrejos sistemàtics de sòls destinats a seguir l'evolució dels E-COS.

És important esmerçar els esforços a elaborar mapes de sòls a una escala útil per a la gestió i la presa de decisions que representin espacialment els factors principals que determinen la distribució del C orgànic, en particular els factors edàfics, que en aquest treball ens han mancat per a explicar els continguts de COS entre 30 i 100 cm. Per tant, és de vital importància avançar cap a la finalització del MSC25M (ICGC, 2017) per a poder disposar plenament de la base de dades que té associada.

En aquest estudi hem modelat i predit els E-COS, donant per fet que el contingut de matèria orgànica dels sòls es troba en un estadi estacionari durant els anys que comprèn la mostra de perfils seleccionats, amb la finalitat de prendre el mapa resultant com un punt de partida per a predir possibles canvis futurs i assajar diferents situacions espaciotemporals. L'estudi d'aquestes situacions condicionades pel canvi climàtic podrà ajudar a formular polítiques i estratègies per a mitigar-ne els efectes i adaptar l'agricultura mitjançant l'exploració de canvis en l'ús del sòl i pràctiques de gestió agrícola, com proposen altres autors (Lugato *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2016; Yigini i Panagos, 2016).

La figura 5 permet identificar els usos o tipus de cultius més deficitaris quant a embornals de COS en l'agricultura catalana a fi de poder esmerçar els esforços a implementar mesures que ajudin a augmentar l'emmagatzematge de COS als sòls agrícoles.

Aquestes estratègies de mitigació podrien consistir en canvis en l'ús del sòl, a favor d'usos generadors de sòls més rics en carboni. Ara bé, a Catalunya, els canvis d'usos que comporten la pèrdua de sòl agrari solen ser negatius per al balanç d'E-COS. De manera limitada, la reconversió d'una part de l'extensa superfície de conreus herbacis extensius o de camps abandonats en sòls destinats a usos com ara pastures al nord o cultius llenyosos al centre i al sud de Catalunya podria afavorir la recuperació dels E-COS. Caldrà recordar, però, que les estratègies basades en l'aforestació de terres cultivades poden causar pèrdues del potencial productiu agroalimentari, cosa que podria tenir conseqüències també negatives en relació amb el canvi climàtic, per la necessitat d'incrementar la importació d'aliments i de matèries primeres.

Quant a la gestió agrícola per a mitigar el canvi climàtic, caldria afavorir una implementació més intensa d'algunes pràctiques recomanades (PGAR), típiques de l'agricultura de conservació, com ara la llaurada mínima, la sembra directa, la rotació de cultius o l'*intercropping*, així com totes aquelles de conservació de l'aigua que s'han demostrat eficients per a mantenir o incrementar els E-COS (Plaza-Bonilla *et al.*, 2015). També, la incorporació al sòl d'esmenes orgàniques (compost, fems, biocarbó) o de restes del cultiu són pràctiques útils i que, a més, contribueixen a «tancar el cercle» en una concepció d'economia circular. Hi ha altres solucions indirectes també molt interessants, com implantar cobertes vegetals en conreus llenyosos per evitar els sòls nus i, per tant, reduir l'erosió, o mantenir els marges dels camps amb arbres, mates o herbes, que també actuen com a refugi de biodiversitat en els sistemes agraris. Vegeu la revisió bibliogràfica sobre algunes PGAR i les seves taxes d'emmagatzematge feta per Minasny *et al.* (2017). D'altra banda, la gestió agrícola per a millorar l'emmagatzematge de C no es pot deslligar de les pràctiques per a incrementar l'eficiència en l'ús de l'aigua, especialment en l'agricultura mediterrània.

Pel que fa al paisatge, és molt important evitar els monocultius en favor d'un mosaic de paisatges que integri diferents usos agraris i forestals del sòl: això farà un sistema més resilient i aportarà una varietat de serveis ecosistèmics (FAO, 2017).

En general, l'augment de carboni als sòls agrícoles té un paper important en quatre serveis ecosistèmics que forneixen els sòls: la reducció de l'erosió, l'increment de la retenció d'aigua, l'augment de la fertilitat i la conservació de la biodiversitat. Tots quatre tenen conseqüències directes i indirectes en la productivitat agrícola i en la reducció dels GEH. Aquest augment de carboni al sòls agrícoles, per tant, passa de ser desitjable a ser imprescindible si volem afrontar els desafiaments de la seguretat alimentària, l'adaptació dels sistemes agrícoles al canvi climàtic i la mitigació dels GEH, que són els fonaments del concepte *climate-smart agriculture* (FAO, 2013).

5. CONCLUSIONS

Aquest estudi ha demostrat que els factors més importants que afecten els E-COS en la part superficial del sòl (0-30 cm) són la textura, el clima i el tipus d'ús del sòl. En canvi, a més fondària (30-100 cm), les variables més determinants són les propietats intrínseques del sòl. D'aquesta manera, la capa superficial del sòl, més afectada per les operacions de conreu, ofereix més oportunitats de gestió a l'hora d'emmagatzemar carboni, atès que els seus E-COS es veuen més afectats per variables dinàmiques, lligades a l'acció humana i al canvi climàtic.

Basant-nos en una selecció acurada de les dades disponibles (partint de 7.245 perfils de sòls de la BDSISCat, triant-ne 2.186 per a la capa superficial i

1.612 per a la part més profunda), hem elaborat i proporcionat un primer mapa dels E-COS de l'agricultura catalana entre 0 i 30 cm, millorant espacialment les estimacions fetes fins ara, que no consideraven la distribució espacial d'aquest element en l'àrea agrícola de Catalunya. Aquests resultats ofereixen un marc de referència a partir del qual podem dissenyar estratègies de mitigació i adaptació al canvi climàtic basades en la identificació de punts forts i punts febles. Aquest marc també ens permet explorar amb més detall el potencial d'emmagatzematge de C que tenen els sòls agrícoles de Catalunya, dissenyant pràctiques més eficients en la línia proposada pels acords de la COP21 i la COP22.

AGRAÏMENTS

Els autors agraïm a l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) i al Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació de la Generalitat de Catalunya (DARP) la cessió de les dades de perfils de sòls, mostrejades al llarg de 35 anys, que serveixen per a l'elaboració del MSC25M. I especialment, regradim tot el personal tècnic que va realitzar el dur treball de camp i les corresponents anàlisis durant el període 1980-2015.

BIBLIOGRAFIA

- BATJES, N. H. (2014). «Total carbon and nitrogen in the soils of the world». *European Journal of Soil Science*, núm. 65, p. 10-21.
- CANADELL, J. G.; PATAKI, D. E.; GIFFORD, R.; HOUGHTON, R. A.; LUO, Y.; RAUPACH, M. R.; SMITH, P.; STEFFEN, W. (2007). «Saturation of the terrestrial carbon sink». A: CANADELL J. G., PATAKI D. E., PITEKKA L. F. (ed.). *Terrestrial ecosystems in a changing world*. Berlín, Heidelberg: Springer, p. 59-78.
- CBDSA (1983). *SINEDARES. Manual para la descripción codificada de suelos en el campo*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), Madrid, p. 137.
- COMISIÓN DE MÉTODOS OFICIALES DE ANÁLISIS DE SUELOS Y AGUAS (1975). *Métodos oficiales de análisis*, tom III. Madrid: Ministerio de Agricultura.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI) (2011). *ArcGIS Desktop: Release 10*. Redlands, Califòrnia, EUA: Environmental Systems Research Institute.
- FAO (2013). *Climate-smart agriculture. Sourcebook* [en línia]. Roma: FAO. <<http://www.fao.org/docrep/018/i3325e/i3325e.pdf>> [Consulta: 22 octubre 2018].
- (2017). *Landscapes for life. Approaches to landscape management for sustainable food and agriculture* [en línia]. Roma: FAO. <<http://www.fao.org/3/i8324en/i8324en.pdf>> [Consulta: 22 octubre 2018].

- HONEYSETT, J. L.; RATKOWSKY, D. A. (1989). «The use of ignition to estimate bulk density of forest soils». *Journal of Soil Science*, núm. 40, p. 299-308.
- INSTITUT CARTOGRÀFIC I GEOLÒGIC DE CATALUNYA (ICGC) (2017). *Mapa Geològic de Catalunya: Geotrell IV. Mapa de sòls* [en línia]. <<http://www.icgc.cat/Ciutada/Informa-t/Recursos-geologics/Sols>> [Consulta: 14 octubre 2018].
- (2018). *Base de dades i Sistema d'Informació de Sòls de Catalunya (BDSISCat)* Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) [en línia]. <www.icgc.cat> [Consulta: 14 octubre 2016].
- LAL, R.; DELGADO, J. A.; GROFFMAN, P. M.; MILLAR, N.; DELL, C.; ROTZ, A. (2011). «Management to mitigate and adapt to climate change». *Journal of Soil and Water Conservation*, núm. 66, p. 276-285.
- LUGATO, E.; BAMPA, F.; PANAGOS, P.; MONTANARELLA, L.; JONES, A. (2014). «Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices». *Global Change Biology*, núm. 20, p. 3557-3567.
- MAPA (1994). *Métodos Oficiales de Análisis*, tom III. Madrid: Dirección General de Política Alimentaria, p. 662.
- MARTÍN-VIDE, J. (1992). «El clima». A: *Geografía General dels Països Catalans*. Barcelona: Enciclopèdia Catalana, cap. 1, p. 1-110.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B.; MALONE, B. P.; WHEELER, I. (2013). «Digital mapping of soil carbon». A: SPARKS, D. L. (ed.). *Advances in Agronomy*, vol. 118. San Diego: Elsevier Academic Press Inc., p. 1-47.
- MINASNY, B. [et al.]. (2017). «Soil carbon 4 per mille». *Geoderma*, núm. 292, p. 59-86.
- NINYEROLA, M.; PONS, X.; ROURE, J. M. (2000). «A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques». *International Journal of Climatology*, núm. 20, p. 1823-1841.
- OFICINA CATALANA DEL CANVI CLIMÀTIC (OCCC) (2012). *Resum executiu de l'Estratègia Catalana d'Adaptació al Canvi Climàtic (ESCACC) 2013-2020*. Barcelona: Departament de Territori i Sostenibilitat, Generalitat de Catalunya.
- PLAZA-BONILLA, D.; ARRÚE, J. L.; CANTERO-MARTÍNEZ, C.; FANLO, R.; IGLESIAS, A.; ÁLVARO-FUENTES, J. (2015). «Carbon management in dryland agricultural systems». *A review. Agron. Sustain. Dev.* [en línia], núm. 35, p. 1319. <<https://doi.org/10.1007/s13593-015-0326-x>> [Consulta: 22 octubre 2018].
- PORTA, J.; ALCÀÑIZ, J. M.; CASTELLS, E.; CRUAÑAS, R.; DANES, R.; FELIPÓ, M. T.; SÁNCHEZ, J.; TEIXIDOR, N. (1987). *Introducció al coneixement del sòl: Sòls dels Països Catalans*. Barcelona: Col·legi d'Enginyers Agrònoms de Catalunya, Fundació Enciclopèdia Catalana,
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2014). *R: A language and environment for statistical computing* [en línia]. <<https://www.rdocumentation.org/packages/nlme/versions/3.1-137/topics/gls>> [Consulta: 3 gener 2017].

Els estocs de carboni orgànic als sòls agrícoles de Catalunya

- ROVIRA, P.; VALLEJO, V. R. (2003). «Physical protection and biochemical quality of organic matter in Mediterranean calcareous forest soils: a density fractionation approach». *Soil Biology and Biochemistry*, núm. 35, p. 245-261.
- SIGPAC (2016). *Sistema d'informació geogràfica de parcel·les agrícoles* [en línia]. Generalitat de Catalunya. <http://governobert.gencat.cat/ca/dades_obertes/> [Consulta: 5 juliol 2017].
- YIGINI, Y.; PANAGOS, P. (2016). «Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe». *Science of the Total Environment*, núm. 557, p. 838-850.
- ZHANG, L. M.; ZHUANG, Q. L.; HE, Y. J.; LIU, Y. L.; YU, D. S.; ZHAO, Q. Y.; SHI, X. Z.; XING, S. H.; WANG, G. X. (2016). «Toward optimal soil organic carbon sequestration with effects of agricultural management practices and climate change in Tai-Lake paddy soils of China». *Geoderma*, núm. 275, p. 28-39.