

12 Sòls

Autors

Josep M. Alcañiz Baldellou

Jaume Boixadera i Llobet

Maria Teresa Felipó Oriol

Josep Oriol Ortiz i Perpiñà

Rosa M. Poch Claret

Josep M. Alcañiz Baldellou és catedràtic d'edafologia a la Universitat Autònoma de Barcelona i investigador al Centre de Recerca Ecològica i d'Aplicacions Forestals (CREAF). Ha centrat la recerca en el camp de l'aplicació de residus orgànics per a regenerar sòls degradats, com ara l'aprofitament de fangs de depuradora o compost en la rehabilitació de pedreres. Les línies actuals tracten el segrest de carboni, els sòls contaminats i els efectes del biocarbó (*biochar*).

Jaume Boixadera i Llobet és doctor en ciència del sòl, cap del Servei de Sòls i Gestió Mediambiental de la Producció Agrària de la Generalitat de Catalunya i professor associat a la Universitat de Lleida. Ha treballat en els àmbits de la recerca, dels inventaris, de la cartografia i de la gestió dels sòls.

Maria Teresa Felipó Oriol és catedràtica d'edafologia i química agrícola a la Universitat de Barcelona. Va orientar la recerca en la caracterització de residus

orgànics, en la valorització al sòl i en aspectes relacionats amb la contaminació dels sòls.

Josep Oriol Ortiz i Perpiñà és professor d'edafologia de la Universitat de Saragossa. Centra la recerca en la dinàmica de la matèria orgànica del sòl i el segrest de carboni, en els efectes dels incendis i en la rehabilitació de sòls molt degradats mitjançant l'ús de residus orgànics. Ha participat en la implementació d'assajos d'ecotoxicitat basats en l'activitat biològica del sòl.

Rosa M. Poch Claret és catedràtica d'edafologia de la Universitat de Lleida i presidenta de la Comissió de Morfologia i Micromorfologia de Sòls de la Unió Internacional de Ciències del Sòl (IUSS). Centra la recerca en la gènesi de sòls de zones semiàrides, en el maneig i la rehabilitació de sòls i en l'emmagatzematge de carboni en relació amb l'estructura del sòl.

Sumari

Síntesi	293
12.1. Introducció	294
12.1.1. Importància del sòl amb relació al canvi climàtic	294
12.2. Processos edàfics influenciats pel canvi climàtic.....	294
12.2.1. Emmagatzematge de carboni al sòl i límit per saturació	294
12.2.2. Pèrdues per respiració heterotròfica.....	295
12.2.3. Producció de biomassa i modificació de la disponibilitat de nutrients.....	295
12.2.4. Impactes del canvi climàtic en la biodiversitat edàfica	295
12.2.5. Erosió	296
12.2.6. Aridificació	297
12.2.7. Salinització i regadius.....	298
12.3. Processos que incideixen en el canvi climàtic. Emissions de GEH a partir del sòl	299
12.4. Indicadors de canvis del reservori de carboni	300
12.4.1. Tendències actuals dels canvis d'usos del sòl.....	300
12.4.2. Efectes del tipus de maneig dels sòls.....	301
12.4.3. Gestió de residus orgànics al sòl i efectes en el reservori de carboni i en la qualitat del sòl.....	302
12.4.4. El biocarbó com a estratègia de mitigació dels efectes del canvi climàtic.....	303
12.4.5. Rehabilitació de terrenys degradats en el marc del segrest edàfic de carboni	304
12.5. Implementació de les mesures mitigadores del canvi climàtic.....	305
12.5.1. Normatives sobre la protecció del sòl.....	305
12.5.2. Mesures mitigadores del canvi climàtic que impliquen el sòl.....	306
12.5.3. Polítiques, plans i programes	307
12.6. Conclusions	308
12.7. Recomanacions	308
Referències bibliogràfiques	310

Síntesi

S'analitzen els efectes del canvi climàtic en el sòl i la contribució del sol en les emissions, entre altres aspectes. Les previsions de canvi climàtic a Catalunya impliquen un augment de l'energia que incideix en el sòl, que es destina, en part, al manteniment de la vida (i a l'emissió de GEH) i, en part, al manteniment de les reserves de carboni orgànic del sòl. Els canvis d'usos del sòl, també relacionats amb el canvi climàtic, tenen un pes més gran que el canvi climàtic mateix en les emissions de GEH del sòl i, per tant, s'han de tenir molt en compte en les polítiques de mitigació. En cultius de secà, les emissions són més baixes quan s'adopta un conreu de conservació, però en sòls de regadiu són més difícils de preveure.

La combinació dels factors climàtics i de la vegetació i l'evolució causada pel canvi climàtic continuen indicant una tendència cap a l'augment de l'aridesa i, en conseqüència, de l'erosió, que es podria atenuar mitjançant pràctiques adients de conservació de sòls. L'augment de l'evapotranspiració potencial a causa del canvi climàtic farà disminuir la disponibilitat d'aigua als sòls. En les àrees de regadiu, caldrà una dotació més gran d'aigua per al reg i preveure fraccions de rentatge per tal d'evitar l'acumulació de sals. D'altra banda, l'augment de la temperatura podria permetre desplaçar activitats agrícoles cap a zones de més altitud, que a Catalunya també són les que tenen més risc d'erosió del sòl, perquè estan situades en zones de més pendent. Per tant, caldria implementar, amb criteris tècnics, una combinació de mesures de conreu de conservació i d'abancalaments.

Les reserves mitjanes de carboni orgànic dels sòls agrícoles de la Catalunya mediterrània i semiàrida són de 100 Mg ha^{-1} (fins a 1 m de fondària). Per a poder estimar amb més precisió la capacitat de segrest de carboni dels sòls de tot el territori català, caldria processar les dades disponibles i

integrar-les en models globals. Les previsions de canvi climàtic indiquen que els nostres sòls experimentaran una pèrdua lenta de matèria orgànica per mineralització durant els propers decennis. Per a compensar-la, l'ús de la dosi adequada de restes de collita i d'adobs orgànics de qualitat en sòls agrícoles, o d'esmenes orgàniques en la rehabilitació d'espais degradats, pot contribuir a mantenir el reservori de carboni orgànic al sòl. També és previsible, pel canvi climàtic, una certa pèrdua de biodiversitat edàfica a mitjà o a llarg termini, però més petita que la causada per canvis d'usos i altres activitats humanes.

Les millores introduïdes en la gestió de residus orgànics en faciliten la valorització al sòl, important per al manteniment de la qualitat ambiental. Per a minimitzar les emissions de N_2O i NO , i les pèrdues de qualitat del sòl, cal aplicar els fertilitzants en la dosi i de la manera adequades. L'aplicació de biocarbó (*biochar*) és una opció de mitigació dels efectes del canvi climàtic que cal considerar. S'hauria d'incloure el processat per piròlisi de biomassa de residus als plans d'energia i fer una estimació molt prudent de la capacitat de recepció de biocarbó dels sòls de Catalunya.

El marc normatiu existent no és el més adequat per a la protecció del sòl ni per al paper que ha de jugar en la lluita contra el canvi climàtic. Manca informació sobre el sòl i sobre les mesures més adequades per a la protecció i, de retruc, per a l'adaptació i/o la lluita contra el canvi climàtic. Mantenir la qualitat dels sòls és la millor recomanació perquè els agroecosistemes contribueixin a mitigar els efectes del canvi climàtic. Per tant, accions sobre els usos i el maneig dels sòls són les eines més eficaces de mitigació.

Paraules clau

protecció del sòl, conservació del sòl, usos del sòl, segrest de carboni, gestió de residus, emissions de GEH del sòl

12.1. Introducció

12.1.1. Importància del sòl amb relació al canvi climàtic

El sòl juga un doble paper amb relació al canvi climàtic. D'una banda, n'és un subjecte passiu que veu modificades les propietats i característiques d'una manera accelerada o retardada segons la resiliència i els usos a què és sotmès; de l'altra, actua com a embornal i emissor de gasos amb efecte d'hivernacle (GEH), i aquí, de nou, les interaccions entre la resiliència i els usos del sòl tenen un paper determinant. Quan hom estudia el sòl amb relació al canvi climàtic ha de considerar aquestes interaccions, ja que el sòl no es pot estudiar isoladament, mesurant i preveient l'evolució dels paràmetres més característics sense considerar la resta de components de l'entorn.

La quantitat, la qualitat, la composició i la distribució interna de la matèria orgànica són elements clau per a jutjar el comportament del sòl davant del canvi climàtic. Malgrat que sovint ens centrem en el CO_2 , cal no perdre de vista el paper dels dos altres gasos amb efecte d'hivernacle, el N_2O i el CH_4 , també lligats al cicle del carboni.

Arreu del món, s'han dedicat grans esforços a quantificar les dimensions del reservori de carboni al sòl i l'evolució espacial i temporal lligada o no al canvi climàtic. A banda de la contribució modesta del carboni edàfic per a mitigar el canvi climàtic que molts d'aquests estudis apunten, s'ha posat en relleu la gran dificultat d'obtenir bones estimacions d'aquest reservori i també el pes d'altres agents, com ara els canvis d'usos del sòl, que poden ser molt més determinants en l'evolució d'aquest reservori que no pas el canvi climàtic mateix.

Les accions adreçades a la preservació de la qualitat o de la salut del sòl són bons enfocaments per a la protecció d'aquest recurs natural, però sovint no aporten gaire llum sobre quines han de ser les accions quan hom intenta gestionar el sòl davant del canvi climàtic. Alguns autors (Janzen, 2015) han indicat que és més important mantenir els fluxos d'energia i de matèria per mitjà dels sòls que no pas centrar-se exclusivament en la grandària dels reservoris.

Una altra constatació important, ja coneguda d'an-tuvi, és l'evolució lenta en el temps de les propietats i característiques del sòl, fet que, per més que es dediquin esforços valuosos a la recerca, no permet aportar grans novetats en terminis quinquennals. Per aquesta raó, en aquest INFORME només recollim els aspectes més destacats i no tractarem quantificacions o valoracions ja realitzades en informes previs.

Finalment, cal remarcar que, el desembre del 2013, la 68a Assemblea General de l'Organització de les Nacions Unides (ONU) atorgà al sòl el reconeixement que es mereix en declarar, alhora, l'any 2015 com a Any Internacional dels Sòls i el 5 de desembre com a Dia del Sòl. Iniciatives com aquestes han tingut el suport de l'Organització de les Nacions Unides per a l'Agricultura i l'Alimentació (FAO), que va crear l'Aliança Mundial pel Sòl, i també de la Unió Europea (UE). Es tracta d'un intent de donar al sòl el mateix tractament que, des de fa temps, reben altres recursos naturals com ara l'aire, l'aigua i la biodiversitat, i de valorar el paper que té amb relació al canvi climàtic. Cal esperar que els organismes i les administracions públiques emprenguin les actuacions necessàries per a assegurar, on calgui, la protecció i/o la conservació del sòl.

12.2. Processos edàfics influenciats pel canvi climàtic

12.2.1. Emmagatzematge de carboni al sòl i límit per saturació

Les reserves de carboni en sòls agrícoles de la Catalunya semiàrida són de 100 Mg ha^{-1} (fins a 1 m de fondària). Es disposa de més dades de la resta del país, però no s'han elaborat. Quant als sòls forestals, les estimacions publicades indiquen valors mitjans lleugerament més petits; en el capítol 3 d'aquest TERCER INFORME SOBRE EL CANVI CLIMÀTIC A CATALUNYA se'n dóna més informació.

El concepte de saturació de carboni es refereix a la quantitat màxima de carboni orgànic que el sòl pot establitzar atesos els mecanismes interns de protecció de la matèria orgànica. Actualment, s'aporta informació rellevant sobre la dimensió temporal d'aquests mecanismes i s'indica que calen decennis per a detectar canvis significatius en el carboni orgànic del sòl i poder estimar el grau de saturació assolit. Per exemple, no s'ha arribat a detectar la

saturació de carboni en mol·lisòls a Ucraïna que s'havien cultivat anteriorment i abandonat gairebé fa seixanta anys. Una de les maneres més comunes d'accelerar l'emmagatzematge de matèria al sòl consisteix en l'addició d'adobs orgànics, tot i que hi ha autors que han demostrat que amb aportacions de més de $2,5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ es produeix una reducció significativa de l'eficiència dels mecanismes d'estabilització. Determinades esmenes orgàniques es poden conservar al sòl durant períodes de temps relativament llargs gràcies a la riquesa en compostos resistents a l'atac microbià. Cal tenir en compte, però, que sobretot enriqueixen els horitzons superficials del sòl i que perquè tot el sòl arribés a nivells propers a la saturació de carboni caldria que existís un transport vertical de matèria orgànica prou eficient per a incorporar-la, que no sembla produir-se en les nostres condicions edafoclimàtiques. Per tant, saber quant carboni hi ha al sòl no és suficient, sinó que cal conèixer, també, la capacitat de segrest de carboni que tenen. La informació disponible per als sòls agrícoles catalans indica que encara som lluny del grau teòric de saturació, però probablement no en som tan lluny en el cas dels sòls forestals. Cal més recerca sobre aquest tema.

12.2.2. *Pèrdues per respiració heterotròfica*

Les previsions de canvi climàtic a Catalunya per als propers decennis indiquen que afectarà el sòl i la dinàmica de la matèria orgànica que conté, malgrat que aquests efectes encara són poc previsibles. L'efecte de l'increment de la temperatura en la mineralització de la matèria orgànica es pot estudiar per mitjà del paràmetre Q10.¹ Hamdi *et al.* (2013) l'estudien en una extensa varietat de sòls, i indiquen que els valors de Q10 sempre són positius, és a dir, que un increment de la temperatura sempre causa un increment en la mineralització de la matèria orgànica, que s'apropa a valors de 2 per a temperatures de 25 °C i a valors més grans per a temperatures inferiors. Altres autors demostren, a més, que la mineralització de la matèria orgànica augmenta per un efecte combinat de l'increment de la temperatura i de la concentració de CO₂ atmosfèric.

1. El paràmetre Q10 indica la modificació de la cinètica d'un procés químic o biològic en incrementar-se 10 °C la temperatura.

Ara bé, un increment de la temperatura lligat a un descens de l'aigua disponible al sòl, un escenari previsible del canvi climàtic a Catalunya, pot tenir conseqüències que segueixen sent incertes atès l'efecte advers que la manca d'aigua exerceix sobre l'activitat microbiana. En un escenari amb temperatures més altes cal esperar més mineralització en els períodes amb disponibilitat d'aigua. L'anàlisi comparativa del contingut de carboni al sòl a Itàlia, en els períodes 1961-1990 i 1991-2006, mostra que efectivament l'augment clar de la temperatura i la disminució aparent de la precipitació es relacionen amb una disminució del carboni del sòl, malgrat que es relacionen més amb els canvis d'usos del sòl i que els més afectats són els agrícoles i les pastures (Fantappiè *et al.*, 2011).

12.2.3. *Producció de biomassa i modificació de la disponibilitat de nutrients*

La productivitat de biomassa dels ecosistemes naturals o cultivats en un escenari de canvi climàtic presenta incerteses, ja que no es coneix prou, per exemple, com l'increment del CO₂ a l'atmosfera l'afectarà via plantes C3 o C4, o a causa del tancament dels estomes, que podria permetre incrementar l'eficiència en l'ús de l'aigua. Aquests possibles canvis en la producció de biomassa afegixen incertesa a la predicció dels efectes en el carboni orgànic que pot quedar retingut al sòl.

L'augment de l'aridesa pel canvi climàtic previsible a bona part de Catalunya provocarà un desajust als cicles biogeoquímics d'alguns elements, especialment el C, el N i el P. Segons Wardle (2013) i altres treballs, s'observa una disminució del contingut de C i de N als sòls en augmentar l'aridesa i, per tant, un augment relatiu de P (a partir de mesures de C, N i P en 224 sòls d'arreu del món que representen un gradient d'aridesa). En sòls sobrefertilitzats, el desajust entre els cicles del C i del N o del P pot ser més gran i comportar més emissions de C i de N, si bé caldria més recerca en aquests aspectes a Catalunya.

12.2.4. *Impactes del canvi climàtic en la biodiversitat edàfica*

La pèrdua de biodiversitat del sòl és una amenaça reconeguda a Europa a l'*Estrategia Temàtica para la Protección del Suelo* [COM(2006) 231 final].

S'estima que, com a mínim, una quarta part de la biodiversitat global es troba als sòls. El canvi global, especialment pels canvis d'usos del sòl, l'extensió dels monocultius, la sobrefertilització, l'ús de plaguicides i la contaminació, modifica les comunitats d'organismes del sòl i, en general, comporta una pèrdua de biodiversitat amb conseqüències no sempre ben establertes. La pèrdua de biodiversitat edàfica acostuma a seguir una tendència paral·lela cap a la pèrdua de matèria orgànica, ja que la major part d'organismes del sòl en són consumidors (heteròtrofs). Ara bé, a Catalunya no es disposa d'una xarxa de seguiment de la biodiversitat del sòl que permeti avaluar la importància de l'afectació.

Un augment de l'escalfament i de la durada dels episodis de sequera que afecti els horitzons superficials del sòl agreujarà el risc d'extinció d'algunes espècies sensibles, cosa que a la llarga pot comportar pèrdues i canvis en la biodiversitat edàfica (Jeffery *et al.*, 2010). Molts estudis fan referència als efectes del canvi climàtic en l'activitat de la microbiota, més que als efectes en la riquesa o la diversitat d'espècies. Certament, l'increment de temperatura causat pel canvi climàtic té un efecte directe en molts processos biològics, especialment microbiològics, però cal tenir present que les fluctuacions tèrmiques que es produeixen a la superfície s'esmoreeixen molt a l'interior del sòl i, per tant, els organismes amb mobilitat poden compensar l'increment de temperatura traslladant-se a més fondària. En general, l'increment de temperatura comporta un augment de l'activitat microbio-

lògica quan l'aigua no és limitant. La combinació de més temperatura amb sequera pot comportar l'augment de períodes inactius, cosa que podria afectar el manteniment de les poblacions de determinades espècies. Ara bé, l'activitat microbiana es produeix en forma de pulsacions quan les condicions d'humitat i temperatura són favorables, la qual cosa fa difícil preveure els efectes directes del canvi climàtic. Els organismes que es veurien més afectats són els que viuen en els films d'aigua dels porus del sòl, com els nematodes que passen a fases de cistos o a estats de dormància quan les condicions de temperatura o humitat són desfavorables i que, per tant, estarien més temps en fases inactives. La taula 12.1 mostra una síntesi dels efectes del canvi climàtic sobre comunitats microbianes del sòl.

Els efectes combinats que l'increment de la temperatura, la concentració atmosfèrica de CO₂ i la reducció de la disponibilitat d'aigua puguin exercir en la diversitat edàfica són difícils de preveure, i avui encara poc estudiats.

12.2.5. Erosió

Les dades i els mapes més recents de la UE mostren que l'erosivitat de la pluja a Catalunya té una gran variabilitat espacial: els valors arriben a 600 MJ ha mm⁻¹ h⁻¹ a la vall de l'Ebre, al voltant de 1.000 MJ ha mm⁻¹ h⁻¹ a la Catalunya central, als ports de Beseit i a la Mediterrània sud, i més de 1.300 MJ ha mm⁻¹ h⁻¹ als Pirineus i a la Mediterrània nord. Quan es refereixen a mil·límetres de pluja (densitat d'erosivitat), els valors varien entre 1,2 (O)

TAULA 12.1. Resum dels impactes del canvi climàtic en les comunitats microbianes del sòl

	CO ₂ elevat	Escalfament	Sequera
Diversitat microbiana	↔	↔	↑
Diversitat bacteriana	↔	↓	↓
Diversitat fúngica	↔	↔	↔
Abundància microbiana	↑	↑	↔
Abundància bacteriana	↔	↑	↓
Abundància fúngica	↑	↑	↑

La major part d'estudis indiquen un efecte positiu (↑), negatiu (↓) o indiferent (↔). El color vermell indica més seguretat en la conclusió.

Font: Adaptat de Vries *et al.*, 2015.

i 2,3 (NE), i són més erosives les unitats de pluja de la Mediterrània nord. Per tant, les zones de més risc d'erosió serien els Pirineus (alta precipitació, alta densitat), i la zona de la vall de l'Ebre (baixa precipitació, alta densitat). Amb un canvi climàtic que derivés en un augment de la irregularitat de les pluges, aquestes zones de risc es mantindrien o augmentarien en incrementar la densitat d'erosivitat.

L'evolució de la coberta del sòl del 1993 al 2009 a Catalunya (CREAF, 2013) mostra, d'una banda, un augment de boscos i prats i una disminució de matollars i conreus, la qual cosa comporta, en principi, una més bona protecció del sòl respecte a l'erosió a escala del país. D'altra banda, però, el gran augment relatiu de la coberta urbana, l'efecte segellador i l'augment de l'escolament són factors desfavorables. A més, l'evolució de la densitat de la coberta vegetal davant d'un canvi climàtic derivaria de la disminució de la producció de biomassa i, per tant, de la disminució de la protecció del sòl a l'erosió. Aquestes dades, però, no permeten preveure l'efecte global del canvi climàtic i l'erosió en el futur.

Algunes de les pràctiques de conservació de sòls que la UE considera a escala continental són el conreu a nivell, els bancals de pedra i els marges. A Catalunya s'estima que els bancals de pedra són els més abundants i que redueixen el risc d'erosió un 38 %. La pèrdua de funcionalitat, com es

pot observar en molts indrets de Catalunya, les construccions dràstiques de terrasses o l'eliminació condueixen, però, a increments importants de l'erosió.

12.2.6. Aridificació

L'aridificació, entesa com el procés que condueix a una disminució de la disponibilitat d'aigua al sòl, és un dels efectes més clars del canvi climàtic. L'alta variabilitat geogràfica de climes a Catalunya, que inclou des de climes humits fins a climes mediterranis semiàrids i àrids, comporta que precisament les zones de transició siguin les més afectades per la desviació cap a règims amb més manca d'aigua, no tant per una disminució de la precipitació, sinó per un augment de l'evapotranspiració potencial (ET_0) relacionada amb l'augment de la temperatura. La tendència previsible serà una despesa més gran d'aigua del sòl a la Catalunya humida —actualment sense manca d'aigua— i probablement una despesa igual o més petita als climes mediterranis i àrids, per la manca d'aigua disponible. La figura 12.1 mostra la projecció de les previsions per a dues estacions amb climes contrastats com ara Mollerussa (Pla d'Urgell) i Castellfollit de la Roca (Garrotxa). Si bé la llargada de l'estació seca ($P < ET_0$) només varia en la segona en la previsió 2031-2050 (de tres a quatre mesos), es produeix una reducció de la despesa d'aigua en el primer cas que s'estabilitza per la manca de disponibilitat d'aigua, i un augment progressiu en el segon, que arriba a 77 mm en la previsió a mitjà

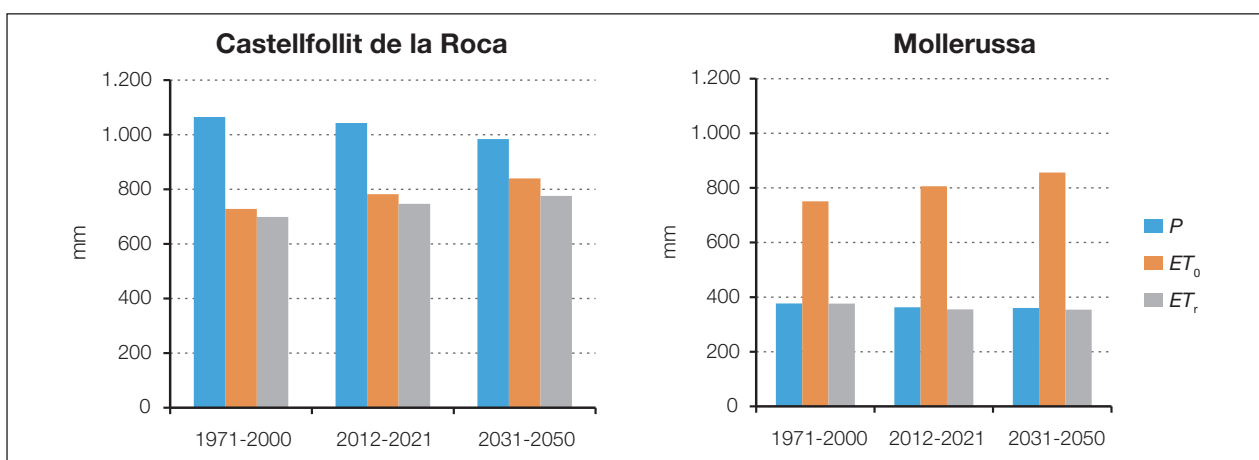


FIGURA 12.1. Canvis en la precipitació (P), l'evapotranspiració potencial segons Thornthwaite (ET_0) i l'evapotranspiració real (ET_r) en mm, a les estacions de Castellfollit de la Roca i Mollerussa, per a la sèrie normal actual (1971-2000) i les projeccions decennals 2012-2021 i 2031-2050 (vegeu el capítol 5). Es considera una reserva d'aigua al sòl de 100 mm.

Font: Les dades de precipitació i temperatura per al càlcul de l' ET_0 provenen de l'INM.

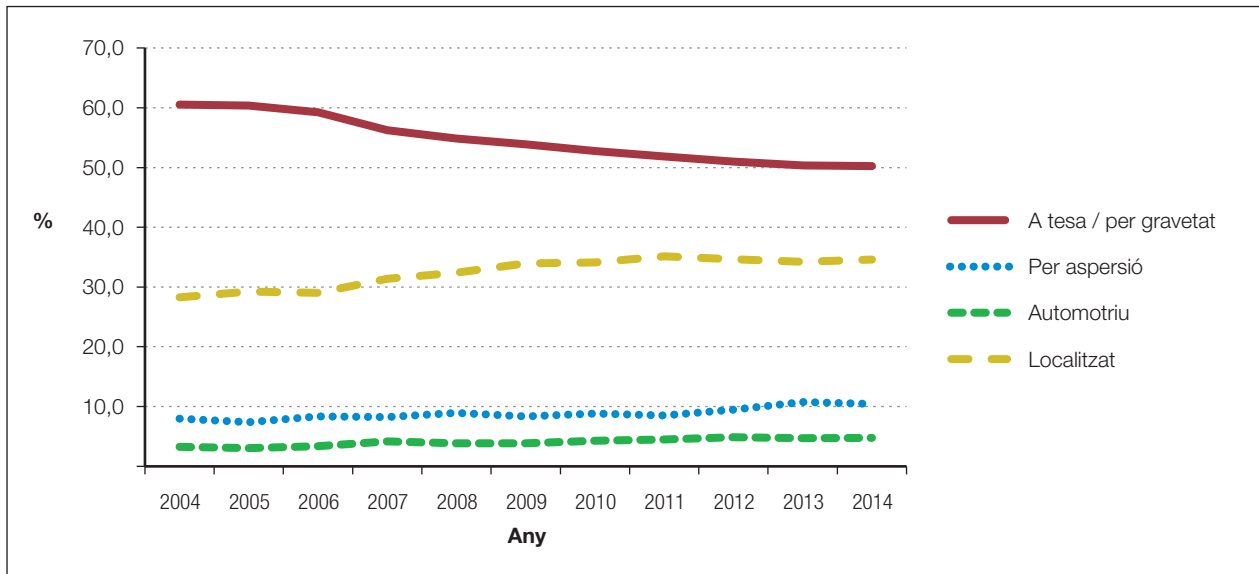


FIGURA 12.2. Evolució de les superfícies dedicades als diferents tipus de reg (%), referides al total de la superfície regada a Catalunya.

Font: MAGRAMA, 2015.

termini. Aquests canvis s'accentuarien en sòls amb menys capacitat de retenció d'aigua (els soms i/o pedregosos).

12.2.7. Salinització i regadius

L'augment de salinitat és un dels efectes més clars i ràpids del canvi climàtic pels canvis que comporta en la dinàmica de les sals més solubles que el guix, d'una gran mobilitat al paisatge i als sòls. La salinització es produeix, d'una banda, per un augment de l'evapotranspiració (ET) i una disminució del rentatge, que comporten un increment de la concentració de sals a menys fondària, i, de l'altra, per la gestió inadequada del reg.

L'augment d' ET_0 previst per a l'escenari A1B² vers l'any 2050 no és tan elevat a Catalunya, on són esperables increments de 30 a 90 mm anuals, com a la Mediterrània sud, amb increments de fins a 150 mm anuals. Combinats amb la modificació del règim de precipitacions, aquests canvis poden comportar, fins i tot, una reducció de l'evapotranspiració real (ET_r) en diferents cultius, ja que

se n'escurça el cicle, cosa que fa difícil elaborar-ne una predicció.

Els sòls més afectats per la salinitat es troben a les zones regades de l'interior (Noguera, Urgell, Pla d'Urgell i Segrià), on les aigües de reg provenen, majorment, del Pirineu i no són salines, i a les zones costaneres (els aiguamolls de l'Empordà i els deltes del Llobregat i de l'Ebre). No existeixen estudis prou llargs i comprensius que permetin constatar un augment de la salinitat en aquests sòls en els darrers decennis. Herrero i Castañeda (2013), en un estudi comparatiu de sòls salins a la vall de l'Ebre en un període de vint anys (1980-2000), no observen diferències en salinitat ni en sodicitat llevat dels casos en què hi ha hagut un canvi d'ús del sòl.

Actualment, la superfície regada de Catalunya és el 25,7 % de la superfície agrícola, que al seu torn és el 30,4 % de la superfície total (251.070 ha). En el futur, podrà variar lleugerament amb les noves posades en reg (al canal Segarra-Garrigues, unes 40.000 ha). L'evolució dels tipus de reg (figura 12.2) mostra una tendència cap a regs més eficients.

El maneig de les àrees regades en l'escenari d'un canvi climàtic és especialment complex, perquè si, d'una banda, es tendeix a substituir els sistemes tradicionals per sistemes més eficients en l'ús de

2. Existeixen models d'evolució socioeconòmica i ambiental que consideren un conjunt de situacions pel que fa a l'evolució de la població, les fonts d'energia i l'economia, i que permeten fer projeccions de com podria evolucionar el sistema climàtic de la Terra. L'escenari A1B correspon a una previsió de creixement econòmic ràpid, que s'estabilitza a mitjan segle XXI i que combina les diferents fonts d'energia (fòssils i renovables).

l'aigua, que generen menys drenatge, aquest darrer és sempre necessari per a rentar les sals. A més, els cultius experimentaran més requeriments d'aigua, cosa que, juntament amb la disminució de la disponibilitat, obligarà a modificar cultius i sistemes de reg. En el cas del reg localitzat, si la fracció de rentatge aplicada no és suficient es provocarà una redistribució espacial de les sals al sòl i a la finca, perquè no s'eliminaran, i un augment de la dificultat en el maneig al llarg de les rotacions.³ S'han mesurat increments del 82 % en la salinitat del sòl a la vall de l'Ebre en reg deficitari controlat⁴ de fruiters amb aigua moderadament salina (cosa que no es produeix en la major part dels regs de Catalunya) del 2007-2012, davant d'un decrement del 75 % en sòls no regats (Aragüés *et al.*, 2015), causat, bàsicament, per les fraccions de rentatge més petites. Els mateixos autors preveuen dificultats serioses en el manteniment dels regadius en les condicions actuals a la vall de l'Ebre a final de segle (2071-2100) en els escenaris A2 i B2.⁵ En condicions de recursos hídrics limitats, la reutilització d'aigües residuals també pot ser una opció en algunes zones; caldrà tenir en compte les fraccions de rentatge corresponents per a evitar la salinització del sòl.

12.3. Processos que incideixen en el canvi climàtic. Emissions de GEH a partir del sòl

Els efectes dels processos edàfics en les emissions dels GEH sovint s'han basat en el balanç dels reservoris, sense tenir prou en compte que els reservoris mateixos depenen de l'entrada i dels fluxos d'energia en els sistemes. L'energia incident en el sòl es destina, en part, a la respiració d'organismes i, en part, a conservar l'estoc de matèria orgànica, el qual tendeix a un emmagatzematge

màxim de carboni per a entrades de matèria i d'energia constants (Janzen, 2015).

Els ecosistemes amb més carboni emmagatzemat no són, necessàriament, els de més qualitat. Un sòl amb menys carboni emmagatzemat però que recicli l'energia més ràpidament de vegades pot exercir més funcions i més importants per als ecosistemes que els sòls amb més carboni emmagatzemat però menys reactiu. En efecte, calen uns nivells mínims de mineralització per a assegurar el reciclatge de nutrients, el creixement de microorganismes, l'estabilitat estructural i la biodiversitat edàfica, entre d'altres. Per tant, el maneig de fluxos hauria de prevaler davant del maneig de reservoris (Janzen, 2015).

Quant a les emissions de GEH en agroecosistemes de secà, en un experiment a llarg termini en cereal a Agramunt, Plaza-Bonilla *et al.* (2014) mostren que el no-conreu produeix més emissions de CO₂ que el conreu convencional, però que amb referència al pes (kg) del gra produït, les emissions s'inverteixen a causa d'una producció més gran i una despesa energètica més petita en el no-conreu (0,51 i 1,07 kg CO₂ equiv./kg de gra). Aquestes emissions solen ocórrer en forma de pulsacions després de pluges (fins a 33,4 kg C-CO₂ ha⁻¹ dia⁻¹) o d'operacions de conreu. En general, el sòl actua com un embornal de CH₄ (-1,3 no-conreu i -0,58 conreu convencional, en kg C ha⁻¹ any⁻¹).

Una gestió correcta de la fertilització amb purins i d'altres adobs nitrogenats és molt important, indirectament, per a controlar les emissions de GEH. L'amoniac (NH₃) és un gas que s'emet normalment dels sòls tractats amb adobs amoniacals (com ara purins, gallinassa i minerals) i que un cop al sòl i a l'atmosfera es pot transformar en N₂O o en NO. A tall d'exemple, en un sistema cerealista de secà a Oliola (Noguera) la mitjana de les emissions de NH₃ acumulades durant un any, mesurades en experiments de fertilització amb purins, va ser més gran a l'estiu (122 kg N-NH₃ ha⁻¹) que a la primavera (99 kg N-NH₃ ha⁻¹), i va ser afectada pel grau d'incorporació dels purins al sòl (llaurat o no, després de la incorporació; Yagüe i Bosch, 2013). Les emissions de N₂O i de NO en sistemes de regadiu són més petites que les d'amoniac, però com que

3. Aquests efectes es produeixen, actualment, a Califòrnia, que pateix una sequera greu des de l'any 2012 (Wallander, 16 abril 2015). Les solucions que es duen a terme són: maneig acurat de l'aigua de reg, ús d'aigües residuals als cultius que ho permeten, eficiència en el rentatge de les sals i sistemes de reg més eficients com, per exemple, el reg subterrani.

4. Fa referència a l'aportació d'aigua per sota dels requeriments totals del cultiu, de manera que els efectes en la producció són negligibles i en alguns cultius (com ara fruiters, vinya i olivera) poden mantenir o millorar la qualitat.

5. Els escenaris A2 i B2 corresponen a previsions d'emissió de GEH mitjanes-altes i mitjanes-baixes, respectivament.

TAULA 12.2. Canvis d'usos del sòl (ha) a Catalunya entre el 1993 i el 2013

Usos	1993	2001	2005	2009	2013
Forestal i vegetació natural	(1.953.667)	2.370.831	2.094.387 (2.080.535)	2.161.397 (2.076.648)	2.160.924
Conreus:		937.312	917.132 (942.929)	856.609 (935.206)	836.736
— secà	(1.106.782)	661.200	655.961	586.014	
— regadiu		266.112	261.071	260.595	570.876
— arrossars			(22.105)	(22.197)	265.860
Urbanitzat i altres	(133.725)	207.526	196.926 (187.137)	201.198 (198.809)	211.545

Font: Elaborat a partir de les dades de l'Idescat i el CREAM. Entre parèntesis, dades de diferents edicions del *Mapa de cobertes del sòl de Catalunya* (CREAF).

produeixen un efecte d'hivernacle més gran que el CO₂ cal minimitzar-les.

12.4. Indicadors de canvis del reservori de carboni

12.4.1. Tendències actuals dels canvis d'usos del sòl

La taula 12.2 presenta un resum de la informació de l'Institut d'Estadística de Catalunya (Idescat) per al període 2001-2013 i dels mapes de cobertes del sòl del CREAM (1993-2009). L'ús d'aquestes dues fonts és necessari per a disposar d'una perspectiva temporal adequada. Tot i que les metodologies i les fonts d'informació són diferents, permeten arribar a conclusions similars respecte als canvis d'ús del sòl.

Es produeix un increment notable en la superfície de boscos i àrees de vegetació natural, i una regressió de les àrees cultivades (taula 12.2). Concretament, des del 1993 fins al present la superfície de conreus de Catalunya s'ha reduït

un 12,15 % (134.000 ha); mentre que el 1980 el 32,4 % del territori era agrari, el 2013 només ho era el 26,3 %. És ben evident que el creixement de les àrees de vegetació natural es produeix mercès a la disminució de les àrees marginals de conreu, especialment el de secà. No es disposa d'estudis acurats sobre el que això significa en termes d'emmagatzematge de carboni, si bé no cal pensar en canvis gaire significatius atesa la marginalitat i la baixa productivitat en biomassa de molts dels camps de conreu abandonats. Per tant, les àrees de conreu disminueixen i les de regadiu es mantenen, ja que les que es destrueixen pel creixement urbà i industrial es compensen amb nous regadius. Al territori català, augmenten les rompudes de terrenys forestals amb finalitats agropecuàries. Per a aconseguir l'autorització, quan afecten superfícies superiors a deu hectàrees cal presentar un pla de conservació del sòl. Encara que aquest canvi d'ús potencia l'emissió del carboni emmagatzemat als sòls forestals, de moment té poca rellevància perquè afecta anualment unes mil hectàrees.

TAULA 12.3. Canvis d'usos del sòl (ha) a l'àmbit metropolità de Barcelona (1956-2009)

Ús del sòl	1956	1993	2005	2009
Total forestal	165.489	184.538	193.474	192.361
Conreus	140.410	84.811	60.656	59.267
Improductiu artificial (urbà i industrial)	17.347	54.219	69.329	71.824

Font: CREAM.

Les àrees urbanes han experimentat un fort creixement que podria arribar a les quinze mil hectàrees en els darrers quinze anys. Cal destacar que alguns usos que contribueixen significativament al canvi climàtic, com ara els arrossars, es mantenen estables al llarg del temps.

En algunes àrees on s'han estudiat els canvis ocorreguts a partir del 1956 és possible constatar clarament el creixement urbà i industrial (bona part d'aquest creixement abans esmentat s'havia produït a l'àrea metropolitana de Barcelona) i el pas cap a la vegetació natural de la major part dels sòls agrícoles de secà (taula 12.3). A Itàlia s'ha constatat que els canvis en la quantitat total de carboni emmagatzemat al sòl van més lligats als canvis d'ús que no pas als increments de carboni en cada tipus de sòl. A Catalunya molt probablement s'arribaria a una conclusió similar.

12.4.2. Efectes del tipus de maneig dels sòls

En sòls agrícoles, un dels sistemes de maneig més estudiats és l'agricultura de conservació, que intenta minimitzar les operacions mecàniques i la intensitat del treball del sòl. En una metaanàlisi d'experiències en cultius de secà a la península Ibèrica, González-Sánchez *et al.* (2012) mostren increments de carboni al sòl de 0,08 a 0,96 Mg ha⁻¹ any⁻¹ en

no-conreu i de 0,02 a 0,77 Mg ha⁻¹ any⁻¹ en conreu mínim, ambdós respecte al conreu convencional en climes mediterranis.

A Catalunya, els conreus llenyosos amb algun tipus de pràctica de conservació ja ocupen el 68 % de la superfície (taula 12.4). En conreus extensius, per contra, només el 20 % és sembra directa, tot i que el conreu tradicional ja correspon al conreu mínim en molts indrets. Els canvis més notables des del 2007 a l'Estat espanyol han estat l'augment de les cobertes herbàcies en fruiters (tot i que el conreu mínim no varia) i l'augment d'un 5 % de la sembra directa en conreus extensius. De totes maneres, el conreu de conservació no és una tècnica de maneig adient per a tots els sòls, en particular per als sòls amb una susceptibilitat alta a la compactació.

La complexitat dels sistemes de regadiu implica que la interacció del reg amb altres factors (com ara la fertilització, el conreu o l'activitat dels organismes del sòl) també influeix molt en l'emmagatzematge de carboni orgànic, de manera que els balanços dels processos esmentats poden comportar un emmagatzematge positiu de carboni o emissions netes de CO₂ i d'altres GEH, segons la resta de condicions ambientals i el cost energètic de la posada en reg (Trost *et al.*, 2013). En tot cas, aquests autors constaten increments nets de car-

TAULA 12.4. Superfícies ocupades per diferents tècniques de conreu a Catalunya l'any 2014

	Tècniques en conreus llenyosos		Tècniques en guarets		Tècniques en conreus extensius		
	ha	%	ha	%		ha	%
Conreu tradicional	33.090	10,8	8.186	24,3	Sembra tradicional	320.038	80,4
Conreu mínim	94.943	30,9	8.438	25,1	Sembra directa	77.047	19,4
Coberta vegetal espontània	87.970	28,6	10.252	30,4	Sense informació	738	0,2
Coberta vegetal sembrada	640	0,2	—	—	—	—	—
Coberta inert	6.777	2,2	34	0,1	—	—	—
Sense manteniment	59.046	19,2	6.764	20,1	—	—	—
No-conreu	24.950	8,1	—	—	—	—	—
Sense informació	68	0,0	—	—	—	—	—
Total	307.484	100	33.674	100,0	—	397.823	100

boni orgànic al sòl en posar-los en reg, que són més grans com més àrid és el clima.

12.4.3. Gestió de residus orgànics al sòl i efectes en el reservori de carboni i en la qualitat del sòl

Una de les funcions del sòl és reciclar matèria orgànica i elements, però això no vol dir que pugui assimilar qualsevol mena de residus i en una quantitat il·limitada. Per a poder mantenir la qualitat del sòl sense perjudicar la de l'aigua o la de l'aire, només pot rebre residus orgànics⁶ de qualitat, lliures de substàncies indesitjables i en la dosi adequada. A Catalunya, la gestió de residus es va adaptant als objectius de la UE mitjançant el Programa General sobre Prevenció i Gestió dels Residus (PRECAT, 2014) i altres normes sobre la gestió dels residus ramaders. Els residus orgànics que es poden valoritzar al sòl i les quantitats valoritzables als sòls de Catalunya figuren al SICCC.

De les quasi tres milions de tones de residus biodegradables generades l'any 2011 (PRECAT, 2014), el 51 % foren d'origen municipal, el 30 %, d'origen industrial, i la resta, el 19 %, fangs d'estació depuradora d'aigües residuals (EDAR). La recollida selectiva dels residus municipals va augmentant a mesura que la recollida arriba a més habitants, i ha permès anar reduint la quantitat de residus destinada a dipòsits controlats i millorar-ne la qualitat i, per tant, les possibilitats de valoritzar-los al sòl. Avui dia, la fracció orgànica dels residus municipals (FORM) supera el 38 %, encara que amb disparitats territorials i lluny dels valors assolits en altres països europeus (més del 60 %). Les restes vegetals de jardineria i poda, anomenades *fracció vegetal*, també es recullen selectivament; actualment se'n recullen unes 20.000 t/any.

Abans de valoritzar els residus orgànics al sòl o com a substrat de cultiu, se n'han de sotmetre

molts (FORM, fracció vegetal i residus orgànics d'origen agroindustrial) a un tractament biològic.⁷ Cal destacar que l'any 2014 s'arribaren a gestionar unes 5.000 t de matèria orgànica en autocompostatge municipal. La valorització amb finalitats de comercialització és subjecta a la normativa espanyola de productes fertilitzants (Reial decret 506/2013, del 28 de juny, sobre productes fertilitzants) i de substrats (Reial decret 865/2010, del 2 de juliol, sobre substrats de cultiu). Les dejeccions ramaderes se solen aplicar al sòl sense tractament previ, per la qual cosa no han de seguir aquestes normes, i els fangs EDAR tenen normativa pròpia (Reial decret 1310/1990, del 29 d'octubre, pel qual es regula la utilització de llots de depuració en el sector agrari). Per assegurar que en el futur el compost produït a Catalunya tingui més bona qualitat (categories A i B, segons el Reial decret 506/2013 i el Reial decret 865/2010) es volen impulsar mesures dirigides als gestors d'instal·lacions de tractament perquè adoptin sistemes de garantia de qualitat.

Els residus no recollits selectivament (o fracció restant) encara són el 60 % del total. L'any 2014 menys de la meitat d'aquesta fracció rebé com a destinació la incineració o el dipòsit controlat, i el romanent fou sotmès a un tractament mecanicobiològic (la separació d'alguns materials valoritzables i la descomposició de la matèria orgànica) que produeix l'anomenat *residu bioestabilitzat*, que avui dia rep, majorment, la mateixa destinació que la fracció no tractada. Catalunya, com altres països europeus avançats, en prohibeix l'ús als sòls, que directament o indirectament esdevenen un suport per a la producció alimentària humana. En canvi, es busquen vies per a valoritzar-lo com a material que, utilitzat adequadament en determinades intervencions (com ara l'obra pública, la jardineria i la rehabilitació de sòls), pot comportar una millora dels sòls.

6. Els residus orgànics també s'anomenen *residus biodegradables* (perquè són susceptibles de degradació biològica), un concepte ampli que n'aplega molts d'altres, o *bioresidus* (residus biodegradables de jardins i parcs, residus alimentaris i de cuina procedents de llars, restaurants, serveis de restauració col·lectiva i establiments de consum al detall, i residus comparables procedents de plantes de transformació d'aliments), que és com els anomena la UE.

7. El tractament biològic consisteix en la degradació biològica de la matèria orgànica per compostatge (estabilització de la matèria orgànica en condicions aeròbiques controlades; el producte final és el compost, i se sol aplicar als RM) o per digestió anaeròbica (estabilització parcial de la matèria orgànica; el producte final és el digerit o digest, i se sol aplicar als purins de porcí). Alguns residus, com ara els d'origen agroindustrial o els fangs EDAR, es poden tractar amb qualsevol d'aquests dos sistemes i barrejats amb altres residus orgànics.

La generació de dejeccions ramaderes també és considerable a Catalunya, com ho és la riquesa d'elements fertilitzants que l'acompanyen (N i P). D'acord amb les directrius europees, les zones vulnerables als nitrats (Directiva 91/676/CEE) ocupen, actualment, el 70 % de la superfície agrària útil de Catalunya. La concentració de nitrats a les aigües subterrànies es manté estable, com succeeix en altres països comunitaris, la qual cosa obliga a revisar el Programa d'Actuació Aplicable a les Zones Vulnerables (Decret 136/2009, de l'1 de setembre, d'aprovació del programa d'actuació aplicable a les zones vulnerables en relació amb la contaminació de nitrats que procedeixen de fonts agràries i de gestió de les dejeccions ramaderes) per fer molt més eficient aquesta gestió tenint en compte, també, el creixement experimentat per la ramaderia. Dos fets importants han afectat significativament la gestió de purins i fangs EDAR. El primer és el tancament de plantes d'assecatge tèrmic quan es va modificar la regulació del sistema elèctric (Llei 15/2012, del 27 de desembre, de mesures fiscals per a la sostenibilitat energètica). El segon és l'alteració de les condicions per a la generació d'energia a partir del biogàs procedent de la digestió i la codigestió de residus orgànics (Reial decret 413/2014, del 6 de juny, pel qual es regula l'activitat de producció d'energia elèctrica a partir de fonts d'energia renovables, cogeneració i residus), que ha paralitzat les energies renovables, particularment les lligades al món agrari. Si aquestes limitacions persisteixen, els efectes ambientals s'agreujaran, perquè obliguen que ambdós residus s'apliquin a sòls propers i frenen el desenvolupament de les energies renovables, una alternativa energètica important per a la mitigació del canvi climàtic.

Si bé una aplicació eficient de residus orgànics al sòl permet mantenir el contingut de matèria orgànica i d'elements nutritius que li assegura una bona qualitat, no és fàcil quantificar-ne l'efecte sobre la mitigació del canvi climàtic. Per a poder fer-ne una estimació, no n'hi ha prou de conèixer la quantitat de residus orgànics aplicats, ja que el comportament al sòl depèn del tipus de residus orgànics, del tractament, de la dosi incorporada, de la tipologia del sòl receptor, de les condicions meteorològiques i, en el cas de la valorització agrícola, que és la majoritària, també depèn del conreu implantat i del maneig. A Catalunya, a mitjà i a llarg

termini la quantitat de carboni retinguda pel sòl pot representar del 25 al 30 % del carboni aportat pels residus orgànics, segons el grau d'estabilitat química dels residus orgànics. En principi, com més estable sigui la matèria orgànica del residu més quantitat en podrà retenir el sòl. En comptabilitzar els efectes sobre el canvi climàtic, també cal incloure-hi el cost energètic associat al transport i al tractament dels residus.

12.4.4. El biocarbó com a estratègia de mitigació dels efectes del canvi climàtic

El biocarbó (*biochar*) és la fracció sòlida de la transformació per piròlisi de diferents tipus de biomassa, destinada a ser aplicada al sòl com a esmena orgànica amb la finalitat de segrestar carboni i millorar-ne la fertilitat o bé a ser emprada com a substrat de cultiu alternatiu a la torba i altres productes d'origen forestal (com, per exemple, l'escorça tractada). Es pot considerar una etapa més dins d'una estratègia per a l'aprofitament complet de la biomassa, amb l'obtenció d'energia, biocombustibles o determinats productes químics, i el biocarbó (habitualment d'un 20 a un 40 % de la biomassa inicial). És una de les propostes que es consolida amb més possibilitats per a compensar els efectes del canvi climàtic, ja que permet un bon aprofitament de molts tipus de biomassa residual, a més dels beneficis derivats del segrest de carboni orgànic al sòl (Lehman *et al.*, 2015). Per a implementar-la, caldria un replantejament parcial dels plans energètics (com ara el Pla de l'Energia i Canvi Climàtic a Catalunya 2012-2020) que no ho preveuen explícitament, a fi que una part significativa de la biomassa residual destinada a finalitats energètiques fos processada per piròlisi en lloc de ser sotmesa a combustió. En la selecció del tipus de biomassa per a produir biocarbó, cal evitar la competència amb altres usos prioritaris, com ara la producció d'aliments. Queda un marge d'aprofitament de residus orgànics relativament ampli, com, per exemple, la biomassa forestal, un aspecte ja previst en l'aprofitament energètic dels boscos recollit en el Pla General de Política Forestal de Catalunya 2014-2024. Ens trobem, per tant, en la situació que hi ha un potencial de recepció de biocarbó als sòls de Catalunya i com a substrat de cultiu, que no es pot cobrir per la manca de producció local d'aquest producte acumulador de carboni orgànic temporalment estable.

TAULA 12.5. Segrest de carboni en diferents experiments de rehabilitació de sòls d'àrees afectades per activitats extractives a cel obert a Catalunya

Localitat	Tractament de rehabilitació	Temps (anys)	Segrest de carboni (Mg C ha ⁻¹)
Girona	Control	17	16
	Addició de 200 Mg ha ⁻¹ de fangs EDAR	17	24
	Addició de 400 Mg ha ⁻¹ de fangs EDAR	17	35
Alcover	Plantació de pins sobre regolita pedregosa	6	0,7
	Plantació de pins amb sòl de reposició	6	26
	Plantació de pins amb sòl adobat amb 22,5 Mg ha ⁻¹ de fangs EDAR	6	33
Alcover	Parcel·les amb addició d'un gradient de dosis de fangs EDAR	15	38
Alcover	Plantació mixta sobre sòl de reposició	18	19
	Plantació mixta sobre sòl esmenat amb fangs EDAR	18	26

Font: Ojeda *et al.*, 2015; Ortiz *et al.*, 2012, i dades dels autors.

Les propietats agronòmiques del biocarbó depenen del tipus de biomassa de partida i del procés de piròlisi emprat per a obtenir-lo (Lehman *et al.*, 2015). Per tant, per a l'aplicació al sòl cal que compleixi uns estàndards de qualitat, com proposen la Iniciativa Internacional del Biocarbó i el Ministeri d'Agricultura de Suïssa. Els més adients com a esmenes de sòls són els obtinguts per l'anomenada *piròlisi lenta*, que també permet produir determinats combustibles (com ara lignofuel i *syngas*⁸). A més del segrest de carboni en una forma temporalment estable, se n'obtenen beneficis indirectes de l'aplicació al sòl: a) millora la retenció d'aigua i l'estructura, la fa més porosa; b) augmenta la retenció de nutrients, especialment del N aportat pels fertilitzants, cosa que redueix les possibles pèrdues per lixiviació i/o emissions a l'atmosfera; c) les cendres que acompanyen el biocarbó contenen K i P aprofitables pels conreus; d) corregeix el pH en sòls àcids, i e) estimula l'activitat microbiològica en proporcionar microhàbitats. Aquestes millores provocades pel biocarbó semblen més clares en sòls àcids i de climes càlids i humits que no pas als de les zones temperades i semiàrides. Una metaanàlisi de resultats de diversos treballs d'aplicació de biocarbó sense l'addició de fertilitzants dona un increment de la producció agrícola del 10 % (Jeffery *et al.*, 2011).

8. El *syngas* o *gas de síntesi* és format, principalment, per una mescla d'hidrogen, CO i CO₂.

En resum, la implantació de la piròlisi com a tecnologia de valorització de la biomassa residual permetria aprofitaments molt interessants, com ara l'obtenció de determinats productes químics i biocombustibles (lignofuels), a més del biocarbó. Aquesta opció també és interessant per a un augment de la valorització dels boscos que doni nous aprofitaments a la biomassa forestal, cosa que revaloritzaria els treballs de gestió forestal a Catalunya, necessaris per a reduir el risc d'incendis. Per tant, el biocarbó és un element més, important dins de la concepció d'economia circular, que permetria un aprofitament complet de la biomassa residual, una alternativa complementària interessant per a la mitigació dels efectes del canvi climàtic i compatible amb el desenvolupament sostenible. Caldria fer una estimació de la capacitat de recepció de biocarbó dels sòls de Catalunya i establir un límit prudent que evités efectes potencials adversos. Això contribuiria al segrest de carboni orgànic, a més d'altres efectes beneficiosos per al sòl o com a alternativa a altres substrats de cultiu, sense esperar increments notables de la producció agrícola.

12.4.5. Rehabilitació de terrenys degradats en el marc del segrest edàfic de carboni

La recuperació del contingut de matèria orgànica en terrenys degradats pot tenir importància amb relació al segrest de carboni, que pot ser de diverses

desenes de Mg C ha⁻¹, sobretot gràcies a mecanismes de protecció física del carboni per a la formació d'agregats. En àrees molt degradades i en procés de recuperació, el retorn de carboni al sòl a partir de la biomassa vegetal produïda pot representar fins a un 88 % de l'estabilitzat (Gang *et al.*, 2012).

Una de les possibilitats efectives per a incrementar el contingut de matèria orgànica en la rehabilitació de sòls de mineria i de pedreres és l'aportació de fangs EDAR. A Catalunya, aquesta pràctica es realitza amb una certa regularitat des de final del 1992, fet que ha permès disposar d'àrees experimentals de prou edat (taula 12.5) per a poder valorar l'ordre de magnitud de la capacitat de segrest de carboni, a més de determinar la protecció física i la recalitrància química com les raons principals que l'expliquen.

L'aportació de matèria orgànica durant els treballs de rehabilitació crea unes condicions que afavoreixen la colonització de la vegetació i el desenvolupament de l'estructura edàfica, per bé que la quantitat total aportada no sembla que tingui un efecte directe en la quantitat de matèria orgànica que el sòl podrà estabilitzar. Un experiment de quinze anys de durada a Alcover (dades dels autors) va mostrar que els sòls que havien rebut aportacions relativament baixes de fangs continuaven acumulant matèria orgànica durant els anys següents, mentre que els que havien estat adobats amb quantitats més grans en mostraven una pèrdua neta. L'estabilització dels nivells de matè-

ria orgànica en aquell sòl, independentment de la quantitat de fangs aportada, se situava en tots els casos en valors molt similars als de sòls propers no pertorbats, de característiques litològiques similars i amb el mateix tipus d'ús.

12.5. Implementació de les mesures mitigadores del canvi climàtic

El darrer informe sobre l'estat del medi ambient a Europa (2015) publicat per l'Agència Europea del Medi Ambient reconeix que les llacunes legislatives fan perillar la conservació dels sòls i que no s'avança adequadament cap als objectius principals de les polítiques (taula 12.6).

12.5.1. Normatives sobre la protecció del sòl

El gruix més important de la legislació ambiental de la UE va dirigit a la protecció, la conservació i la millora dels recursos naturals, essencialment els recursos hídrics, l'aire i els hàbitats. La proposta en forma de directiva per a establir un marc per a la protecció del sòl [COM(2006) 232 final] ha fracassat, i no hi ha indicacions que a mitjà termini reïxi. A hores d'ara, l'*Estrategia Temàtica para la Protección del Suelo* [COM(2006) 231 final] és el pal de paller en què es fonamenten les polítiques de sòl de la UE, que s'estableixen, per exemple, per mitjà de la política agrícola comuna (PAC) i també de la del desenvolupament rural. Així, per exemple, atès que les activitats agrícoles són causa d'erosió o de pèrdua de matèria orgànica, des dels inicis s'incorporaren mesures preventives en la PAC. Altres

TAULA 12.6. Tendències i perspectives d'acord amb els principals objectius quant a l'ús i les funcions del sòl a Europa

Objectius	Tendències o perspectives	Conclusió
Amb objectius establerts	Tendències negatives entre cinc i deu anys: es manté la tendència cap a la pèrdua de funcions del sòl per ocupació (urbana) i per degradació (per exemple, causades per l'erosió o la intensificació d'ús); aproximadament una tercera part del paisatge està molt fragmentada.	No s'avança adequadament cap als principals objectius de les polítiques.
	Perspectives més enllà de vint anys: no s'esperen canvis favorables ni en l'ús i la gestió del sòl, ni en els factors ambientals i socioeconòmics que els impulsen.	
Sense objectius establerts	Avançament cap als objectius de les polítiques: l'únic objectiu explícit, no vinculant, per al sòl és arribar a «una ocupació zero» ⁹ l'any 2050 i restaurar almenys el 15 % dels ecosistemes degradats l'any 2020.	Ocupació zero i restauració del 15 %.

Font: AEMA, 2015.

9. Aturar la pèrdua de sòl per a usos urbans o artificials, cosa que significa: a) no incrementar les zones urbanes i b) en cas d'ocupació per noves infraestructures, fer-ho en emplaçaments de ruïnes industrials o compensar la pèrdua de sòl recuperant ruïnes industrials existents.

normes, com ara les relatives al canvi climàtic, a les emissions industrials, als productes químics i als residus, contribueixen indirectament a alleugerar les pressions sobre el sòl i la biodiversitat.

Des de la publicació de l'*Estrategia Temàtica para la Protección del Suelo* [COM(2006) 231 final] s'han establert pocs fets jurídics de protecció. Primer, la Comissió Europea manifestà la necessitat de considerar l'ús sostenible i eficient del sòl a l'*Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos* [COM(2011) 571 final], de manera que les polítiques de la UE fins a l'any 2020 tinguessin en compte l'impacte directe o indirecte que ocasionen en els usos del sòl, a més d'aturar l'ocupació neta (ocupació zero) del sòl l'any 2050 (taula 12.6). Aquesta comunicació donà un tractament integrat als recursos naturals. Després, el programa general d'acció en matèria de medi ambient viable fins al 2020, «Viure bé, respectant els límits del nostre planeta» (Decisió 1386/2013/UE) reiterà la voluntat de mantenir la qualitat dels sòls. En ser retirada la proposta de directiva de protecció del sòl (Resolució DOUE 153, del 21 de maig de 2014), si es volgués reprendre caldria endegar de nou el procés corresponent. L'absència d'aquesta directiva deixa els sòls en condicions febles davant de les pressions demogràfiques i econòmiques. Així mateix, si bé en el document de l'acord de la XXI Conferència Internacional sobre Canvi Climàtic, celebrada a París a final del 2015, no s'esmenta explícitament el sòl, en l'adaptació a casa nostra serà necessari tenir en compte la gestió del sòl com a embornal de carboni i com a emissor de GEH, i aplicar mesures mitigadores com les que es proposen més endavant en aquest text.

A Catalunya, el març del 2015 el Govern aprovà el Projecte de Llei del sòl d'ús agrari, que té com a objectiu l'ordenació i la gestió dels sòls sotmesos a aquest ús (sòls no urbanitzables, segons l'ordenament territorial actual), per a afavorir la producció respecte a la pèrdua de conreus, i l'avançament progressiu de boscos i prats. Pretén conservar només els sòls d'ús agrari valuosos i productius, i alhora contribuir a la preservació i a la millora dels valors paisatgístics i ambientals. El segellament o pavimentació (l'acció de cobrir un terreny amb materials impermeables com ara el formigó o l'asfalt)

és un dels processos de degradació del sòl més preocupants, perquè l'hipoteca per a qualsevol altre ús futur, agreuja el risc d'inundacions, amenaça la biodiversitat i contribueix al canvi climàtic. Quan afecta terrenys agrícoles fèrtils, és especialment alarmant. Fins ara, per competències en matèria urbanística (Llei 3/2012, del 22 de febrer, de modificació del text refós de la Llei d'urbanisme), es classifica el territori municipal en sòl urbà, urbanitzable i no urbanitzable; independentment dels atributs propis dels sòls i únicament amb finalitats d'ús. És aquí que caldria fer una intervenció més efectiva per a protegir no solament els sòls agraris valuosos, sinó també altres sòls que es vulguin ocupar especulativament per altres usos que, amb tota probabilitat, els malmetran. Cal esperar que la nova llei del territori, en preparació a Catalunya, doni al sòl el tractament que es mereix i el deixi de considerar únicament com un medi de suport per al planejament urbanístic, al marge de les altres funcions i els serveis ecosistèmics que proporciona. Paradoxalment, hi ha més sensibilitat social per a protegir boscos singulars o valuosos que no pas per a protegir els sòls, agrícoles o no, que ens sustenten i forneixen d'aliments. D'altra banda, el Projecte de Llei del canvi climàtic, aprovat pel Parlament el gener del 2016, identifica en el preàmbul els canvis d'usos del sòl com una causa d'emissions de GEH i el paper del sòl com a embornal de carboni, i proposa l'ús eficient com a mesura per a reduir les emissions de GEH. Per tant, per a assolir els objectius que fixa aquesta llei caldrà millorar i actualitzar els inventaris de carboni al sòl i generalitzar mesures de conservació i bones pràctiques de maneig del sòl com les que s'esmenten a continuació.

12.5.2. Mesures mitigadores del canvi climàtic que impliquen el sòl

Quasi totes les activitats humanes terrestres es realitzen sobre el sòl, des de la producció de biomassa (conreus, boscos i prats) fins al suport polivalent de nuclis urbans, indústries, infraestructures de transport, d'esbarjo o d'emmagatzematge (pantans, abocadors de residus, etc.). Però pel que fa als usos, l'agrícola i l'ocupació amb pavimentació (o segellament) posterior són els que tenen una afectació més rellevant en el canvi climàtic. A més, la intensificació de l'ús condueix generalment a la degradació del sòl. En el capítol 11 del SICCC es

presentà una síntesi dels efectes que l'aplicació de diverses polítiques de la UE havien tingut sobre el segrest de carboni al sòl, i els efectes negatius eren deguts a la política agrícola, la política de residus (foment de la valorització de residus al sòl, tractat anteriorment en l'apartat 12.4.3), els cultius per a biocarburants i el benefici energètic dels residus biodegradables.

Des dels inicis, la PAC és la política que més ha afectat els usos del sòl. Originàriament, un dels mandats era garantir l'autosuficiència a la UE i prevenir l'abandó de les terres agrícoles, de manera que es produïa un augment dels ingressos dels agricultors. La protecció de les pastures permanents servia per a evitar canvis d'ús, però ara això ho decideixen les forces del mercat. Actualment, la PAC conté mesures per a fer-la més sostenible i supedita els ajuts al compliment de la legislació ambiental. Les pràctiques agrícoles beneficioses per al clima i l'ambient que figuren en la reforma recent (període 2014-2020) no són pas més exigents del que ho foren anteriorment: diversificació de conreus, manteniment de pastures permanents i manteniment de superfícies d'interès ecològic a les explotacions. Així mateix, per tal de fomentar la captura de carboni, promou el manteniment de pastures permanents mitjançant la prohibició de llaurar i la conversió de zones sensibles des del punt de vista ambiental en zones protegides de la Xarxa Natura 2000.

Amb la finalitat de promoure l'ús eficient dels recursos naturals, convindria adoptar un plantejament més ambiciós a llarg termini que, entre d'altres, incorporés mesures per a regular l'ocupació i la conservació dels sòls, i la reducció de la dependència de fertilitzants i de plaguicides minerals en sòl agrícola. Una bona gestió dels sòls permetria que poguessin tenir un paper més actiu en la mitigació del canvi climàtic, per la reducció d'emissions o per l'absorció de GEH. Tot depèn, però, de les capacitats de cada sòl i del maneig que rebí.

Les crítiques i les pressions exercides contra el conreu d'espècies destinades a la generació de biocombustibles han tingut ressò, i la UE ha revisat la normativa encara vigent (Directiva 2009/28/CE i Directiva 2014/77/UE). La proposta d'una nova directiva, aprovada recentment [COM(2014)

748 final], estableix que a partir d'ara s'impulsarà la reducció d'emissions de GEH per l'ús de carburants i la notificació d'emissions indirectes pel canvi d'ús de les terres (sòl agrícola). Les reduccions aplicables a l'ús de carburants es faran d'acord amb l'origen: així, els de cultius (panís, blat, remolatxa, colza, etc.) es reduiran fins a un màxim d'un 7 %; en el cas dels biocarburants avançats (restes de biomassa, residus, algues, etc.), són els estats membres els que tenen potestat per a reduir el límit un 0,5 % fins al 2016 i un 2,5 % fins al 2020, i, finalment, la proposta no prefixa límits als carburants de segona generació (conreus herbacis, pinyó de l'Índia, etc.). Ara per ara, es desconeix l'efecte que el conreu de biocarburants a Catalunya pot haver tingut en el canvi climàtic, ja que sembla molt petit. Comptabilitzar-ho no és fàcil, de manera que en acabar d'harmonitzar el procés la UE ha establert una metodologia per a calcular (Decisió 529/2013/UE) l'emissió o l'absorció de GEH (CO₂, CH₄ i N₂O) pel sòl amb relació a les activitats d'ús o de canvi d'ús de les terres i la silvicultura.

12.5.3. *Polítiques, plans i programes*

La normativa d'avaluació de l'impacte ambiental de projectes, plans i programes públics i privats (Llei 21/2013, del 9 de desembre, d'avaluació ambiental, i les directives corresponents 2001/42/CE i 2011/92/UE que ho regeixen) ha d'incloure els efectes potencials sobre els sòls. A Catalunya, quan s'aplica aquest instrument de prevenció el sòl no sempre és tractat adequadament. A vegades això succeeix per la manca d'informació de base, però moltes altres, pel fet de considerar que no hi és aplicable. A fi d'assegurar la conservació d'aquest recurs natural tan preuat, fóra convenient corregir aquestes deficiències. L'èxit de les actuacions de prevenció només es pot garantir amb la intervenció de professionals especialitzats, els edafòlegs, que s'han d'integrar en els equips d'avaluació i assessorament de l'òrgan competent que finalment autoritza la consecució del pla o del programa amb criteris de protecció o de conservació, segons escaigui, així com continuant o reactivant els programes de cartografia de sòls que generin mapes a escales útils per a conèixer bé el recurs. Actuant en l'àmbit del planejament es podria treure més profit del paper del sòl en la mitigació del canvi climàtic.

12.6. Conclusions

La profusió de treballs publicats sobre els sòls i el canvi climàtic ha fet palesa la complexitat d'aquest tema. Els canvis d'ús del sòl, que també es relacionen amb el canvi climàtic, tenen un pes més gran que el canvi climàtic mateix en les emissions de GEH del sòl, per la qual cosa s'han de tenir molt en compte en els estudis i en les polítiques de mitigació.

Les reserves mitjanes de carboni orgànic dels sòls agrícoles de la Catalunya mediterrània i semiàrida són de 100 Mg ha⁻¹ (fins a 1 m de fondària). Per a poder estimar la capacitat de segrest de carboni dels sòls de tot el territori català, caldria processar les dades disponibles i integrar-les en models globals.

Les previsions de canvi climàtic a Catalunya indiquen que els nostres sòls experimentaran una pèrdua lenta de matèria orgànica per mineralització durant els propers decennis. No obstant això, l'ús d'adobs orgànics en sòls agrícoles, o d'esmenes orgàniques en la rehabilitació d'espais degradats, pot contribuir a mantenir el reservori de carboni orgànic al sòl.

Una certa pèrdua de biodiversitat edàfica pel canvi climàtic a mitjà o llarg termini és previsible, però més petita que la causada per canvis d'usos i altres activitats humanes. Això podria repercutir negativament en el cicle biogeoquímic d'alguns nutrients i en el reciclatge de residus, però encara no hi ha prou informació per a valorar-ho.

L'aplicació de biocarbó (*biochar*) al sòl és una opció de mitigació dels efectes del canvi climàtic. Caldria modificar els plans d'energia actuals per a incloure el processat per piròlisi de biomassa residual, del qual s'obté *biochar*, energia i altres productes químics. A més, caldria fer una estimació realista i prudent de la capacitat de recepció de *biochar* dels sòls de Catalunya i de l'ús com a substrat de cultiu.

La combinació dels factors climàtics i de la vegetació i l'evolució en un canvi climàtic continuen indicant una tendència cap a l'augment de l'erosió. Tot i això, l'efecte es podria atenuar mitjançant pràctiques adients de conservació de sòls.

Pel que fa al risc d'aridificació, els sòls més resilient serien els de la Catalunya humida, ja que encara tenen un marge d'utilització addicional d'aigua disponible. Les implicacions dels canvis en la precipitació i l'evapotranspiració potencial pel canvi climàtic als sòls de zones seques varien segons si es troben en àrees de regadiu o no. En el primer cas, caldrà una dotació més gran pel reg; en el segon, provocarà una disminució de la producció de biomassa i de coberta vegetal.

Quant a l'emissió de gasos nitrogenats, ajustar les dosis de N a les necessitats dels cultius és la manera més eficient de reduir les emissions. Particularment, és molt important evitar les emissions d'amoni del purí o altres adobs amoniacals.

Les millores introduïdes en la gestió dels residus orgànics (com ara la segregació, la recollida i el tractament) produeixen un augment de la qualitat del producte final (compost i digerit) que cal valoritzar al sòl i facilitar l'ús i el manteniment de la qualitat ambiental.

Ni el marc normatiu existent ni les propostes recents són les més adequades per a protegir el sòl i per a reforçar-ne el paper en la lluita contra el canvi climàtic. Manca informació sobre el sòl i sobre les mesures més adequades en les nostres condicions per a la protecció i, de retruc, per a l'adaptació i/o lluita contra el canvi climàtic.

12.7. Recomanacions

Pel que fa als sòls, les mesures de mitigació del canvi climàtic seran efectives segons l'escala espacial i temporal a què s'apliquin. Respecte a la temporal, cal plantejar-les a mitjà o a llarg termini, atès el temps llarg de resposta del sistema sòl. Respecte a l'espacial, si bé els processos d'emmagatzematge de carboni actuen principalment en àmbits més locals, les polítiques aplicables actuen a escala de paisatge mitjançant mesures de gestió territorial. Per tant, cal treballar amb coneixement del sòl a diferents escales per a poder integrar tots els mecanismes de mitigació del canvi climàtic que siguin compatibles amb l'ús del territori.

Mantenir la qualitat dels sòls és la millor recomanació perquè els agroecosistemes contribueixin a mitigar els efectes del canvi climàtic. Per tant,

accions sobre els usos i el maneig dels sòls, per mitjà de la fertilització, d'esmenes orgàniques als sòls amb més capacitat de segrest de carboni o del conreu de conservació, podrien ser les eines més eficaces de mitigació. En aquest sentit, cal esperar que l'aprovació de la futura llei del sòl d'ús agrari hi contribueixi.

Convindria elaborar una estimació més precisa de la capacitat de segrest i del carboni efectivament emmagatzemat als nostres sòls, diferenciant el potencial dels sòls agrícoles dels forestals. Caldria un doble impuls: d'una banda, obtenir dades de sòls poc estudiats i, de l'altra, explotar les que ja existeixen; per a poder integrar tota aquesta informació en models que permetessin estendre l'estimació dels reservoris de carboni orgànic a tot el territori.

Les previsions de canvi climàtic a Catalunya indiquen que els nostres sòls experimentaran una pèrdua lenta de matèria orgànica per mineralització durant els propers decennis. Per a compensar-la, l'ús de la dosi adequada d'adobs orgànics de qualitat (per exemple, ben estabilitzats per compostatge) en sòls agrícoles, o d'esmenes orgàniques en la rehabilitació d'espais degradats, pot contribuir a mantenir el reservori de carboni orgànic al sòl.

A curt termini, el decrement de matèria orgànica no hipotecarà significativament la qualitat dels sòls, però cal prendre mesures de mitigació aviat si no volem que molts, ja pobres en matèria orgànica, es trobin per sota del llindar crític que n'amenaça el desenvolupament de les funcions.

Respecte a la biodiversitat edàfica i a les funcions que realitza, convindria disposar d'una xarxa de seguiment de grups d'organismes clau, com la que existeix a altres països europeus i que permet disposar d'indicadors de la qualitat biològica del sòl.

Per a evitar les emissions de N_2O i de NO i les pèrdues de la qualitat del sòl, cal aplicar únicament residus orgànics o ramaders de qualitat, i en la dosi i de la manera adequades. Les mesures adreçades a l'ús eficient del N, com ara la incorporació del purí al sòl mitjançant el llaurat, passades del cultivador o l'aplicació localitzada, són altament recomanables.

Respecte al biocarbó com a opció de mitigació dels efectes del canvi climàtic, caldria revisar els plans d'energia a Catalunya per a possibilitar la implantació de la piròlisi com una tecnologia de valorització de la biomassa residual que permetria aprofitaments molt interessants, com ara l'obtenció de determinats productes químics i biocombustibles, a més del biocarbó. Aquesta opció també facilitaria nous aprofitaments de la biomassa forestal, cosa que permetria donar més valor als treballs de gestió dels boscos a Catalunya, necessaris per a reduir el risc d'incendis. Ara bé, s'hauria de fer més recerca sobre els efectes de la incorporació al sòl en les nostres condicions climàtiques i una estimació de la capacitat de recepció de biocarbó dels sòls de Catalunya que establís un límit prudent per a evitar efectes potencials adversos. Això contribuiria al segrest de carboni, a més d'altres efectes beneficiosos per al sòl, sense esperar increments notables de la producció agrícola.

D'altra banda, l'augment de la temperatura permetrà desplaçar activitats agrícoles cap a zones de més altitud, que a Catalunya també són les que tenen més risc d'erosió del sòl, perquè estan situades en zones de més pendents. Per tant, caldrà una combinació de mesures de conreu de conservació i d'abancalaments elaborades amb criteris tècnics (com, per exemple, la construcció de bancals i terrasses calculats amb criteris hidrològics, el control de l'escolament, el maneig agronòmic adequat, la gestió forestal amb criteris protectors, com ara cremes controlades, les tallades selectives, el maneig del sotabosc, etc.). A més, atès que un efecte global de l'aridificació és l'increment del risc d'erosió, caldrà tenir-ho en compte d'una manera general en les pràctiques de maneig del sòl i reforçar les actuacions de conservació de sòls.

El maneig de regadius amb sistemes de reg més eficients (com ara el reg localitzat, el reg per aspersió o el reg d'alta freqüència) ha de preveure fraccions de rentatge de sals que mantinguin la salinitat en nivells tolerables per als cultius i que no afectin la qualitat del sòl. En un clima més àrid, aquestes fraccions de rentatge implicaran, en aquests casos, més dotacions de reg.

També cal limitar el segellat permanent de sòls de qualitat per la construcció d'habitatges i infraes-

structures, atès l'impacte en les emissions de GEH, i per fer-ho s'ha de tenir en compte la informació de sòls disponible. La possible nova llei de protecció del sòl d'ús agrari pot ser una eina eficient per a aquest objectiu.

Cal donar un tractament legislatiu i de planificació adequat al sòl segons els nostres recursos i objectius econòmics i ambientals, sense esperar les directrius de la UE, atès que el Govern de Catalunya en té competències. S'ha de fer d'una manera equilibrada amb el que es fa amb l'aire i l'aigua, i també quan es generi legislació ambiental, especialment amb relació al canvi climàtic, com és el cas del Projecte de llei del canvi climàtic. A més, cal que s'apliqui d'una manera eficient i coordinada amb les altres normatives.

És important i, per tant, necessari integrar edafòlegs (especialistes en l'estudi del sòl) en els equips professionals d'avaluació d'impactes ambientals i en els que desenvolupin i implementin les polítiques relacionades amb el sòl, el seu ús i el canvi climàtic.

Referències bibliogràfiques

- AEMA = AGÈNCIA EUROPEA DEL MEDI AMBIENT (2015). *El medio ambiente en Europa: Estado y perspectivas 2015*. Copenhagen: AEMA.
- ARAGÜÉS, R.; MEDINA, E. T.; ZRIBI, W. [et al.] (2015). «Soil salinization as a threat to the sustainability of deficit irrigation under present and expected climate change scenarios». *Irrigation Science*, 33(1), p. 67-79.
- FANTAPPIÈ, M.; L'ABATE, G.; COSTANTINI, E. A. C. (2011). «The influence of climate change on the soil organic carbon content in Italy from 1961 to 2008». *Geomorphology*, 135(3), p. 343-352.
- GANGA, H.; XUE-YONG, Z.; YU-QIANG, L. [et al.] (2012). «Restoration of shrub communities elevates organic carbon in arid soils of NW China». *Soil Biology and Biochemistry*, 47, p. 123-132.
- GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, E. J.; ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R.; CARBONELL-BOJOLLO, R. [et al.] (2012). «Meta-analysis on atmospheric carbon capture in Spain through the use of conservation agriculture». *Soil and Tillage Research*, 122, p. 52-60.
- HAMDI, S.; MOYANO, F.; SALL, S. [et al.] (2013). «Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions». *Soil Biology and Biochemistry*, 58, p. 115-126.
- HERRERO, J.; CASTAÑEDA, C. (2013). «Changes in soil salinity in the habitats of five halophytes after 20 years». *Catena*, 109, p. 58-71.
- JANZEN, H. H. (2015). «Beyond carbon sequestration: Soil as conduit of solar energy». *European Journal of Soil Science*, 66, p. 19-32.
- JEFFERY, S.; GARDI, C.; JONES, A. [et al.] (ed.) (2010). *European atlas of soil biodiversity*. Luxemburg: European Commission. Publications Office of the European Union.
- JEFFERY, S.; VERHEIJEN, F. G. A.; VELDE, M. VAN DER [et al.] (2011). «A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis». *Agriculture Ecosystems and Environment*, 144, p. 175-187.
- LEHMANN, J.; STEPHEN, J. (ed.) (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation*. 2a ed. Londres: Routledge.
- MAGRAMA = MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2015). *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos: Informe sobre regadíos en España 2014*. Madrid: MAGRAMA. Secretaria General Técnica. Subdirección General de Estadística.
- ORTIZ, O.; OJEDA, G.; ESPELTA, J. M. [et al.] (2012). «Improving substrate fertility to enhance growth and reproductive ability of a *Pinus halepensis* Mill. afforestation in a restored limestone quarry». *New Forests*, 43, p. 365-381.
- OJEDA, G.; ORTIZ, O.; MEDINA, C. R. [et al.] (2015). «Carbon sequestration in a limestone quarry mine soil amended with sewage sludge». *Soil Use and Management*, 31, p. 270-278.
- PLAZA-BONILLA, D.; CANTERO-MARTÍNEZ, C.; BARECHE, J. [et al.] (2014). «Soil carbon dioxide and methane fluxes as affected by tillage and N fertilization in dryland conditions». *Plant and Soil*, 381(1-2), p. 111-130.
- TROST, B.; PROCHNOW, A.; DRASTIG, K. [et al.] (2013). «Irrigation, soil organic carbon and N₂O emissions:

- A review». *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), p. 733-749.
- VRIES, F. T. DE; BARDGETT, R. D. (2015). *Terrestrial biodiversity climate change: Impacts report card technical paper: Climate change effects on soil biota in the UK*. Manchester: Universitat de Manchester.
- WALLANDER, S. (16 abril 2015). «California drought: Farms». A: *United States Department of Agriculture. Economic Research Service* [en línia], <<http://www.ers.usda.gov/topics/in-the-news/california-drought-farm-and-food-impacts/california-drought-farms.aspx>> [Consulta: 24 febrer 2016].
- WARDLE, D. A. (2013). «Ecology: Drivers of decoupling in drylands». *Nature*, 502, p. 628-629.
- YAGÜE-CARRASCO, M. R.; BOSCH-SERRA, À. D. (2013). «Slurry field management and ammonia emissions under Mediterranean conditions: Short communication». *Soil Use and Management*, 29, p. 397-400.

