

## B10. El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic

**Josep Maria Alcañiz**

**Jaume Boixadera**

**Maria Teresa Felipó**

**Josep Oriol Ortiz**

**Rosa Maria Poch**

**Josep Maria Alcañiz Baldellou** (Barcelona, 1953) és doctor en Ciències Biològiques i catedràtic d'Edafologia i Química Agrícola de la Universitat Autònoma de Barcelona. Desenvolupa la seva activitat investigadora al Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF).

La seva recerca se centra en l'estudi de la matèria orgànica dels sòls, especialment de les substàncies húmiques i en l'aplicació de residus orgànics per regenerar sòls degradats. Ha treballat sobre les possibilitats d'aprofitament de fangs de depuradores urbanes, compost i altres residus orgànics per a la rehabilitació de sòls en pedreres, així com en els problemes de contaminació associats a l'aplicació d'aquests residus.

Ha participat en la publicació de tres llibres i una seixantena d'articles científics i capítols de llibres especialitzats. Ha dirigit diverses tesis doctorals i projectes de recerca sobre la dinàmica de la matèria orgànica en sòls i els efectes que produeixen els residus orgànics aplicats. Ha estat ponent en cursos internacionals sobre restauració de sòls degradats.

Ha actuat com a assessor de l'Administració i d'empreses en l'avaluació de la qualitat dels treballs de restauració d'activitats extractives a Catalunya.

**Jaume Boixadera Llobet.** Enginyer Agrònom per l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària de Lleida i Màster en Ciència del Sòl per la Universitat de Wageningen. És cap de la secció d'Avaluació de recursos agràries de la Generalitat de Catalunya i professor associat de la Universitat de Lleida, on centra la seva docència en cartografia i avaluació de sòls.

Responsable del mapa de sòls (1/25.000) de Catalunya, ha dirigit diversos treballs de prospecció de sòls i cartografia arreu de Catalunya. A més d'aquesta línia de treball ha participat en projectes sobre gènesi, avaluació de sòls, relació sòl-paisatge, salinitat, erosió i conservació de sòls. En els darrers anys ha centrat bona part de la seva activitat en el maneig de nutrients, les bones pràctiques agràries i la valorització de materials orgànics com a fertilitzants. Forma part de diversos grups d'experts sobre fertilització i cartografia de sòls, i ha actuat de consultor en temes de sòls a Síria, Namíbia i Bolívia.

Ha participat en la publicació, com autor o editor, de deu llibres, una dotzena de capítols de llibres i una vintena d'articles.

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

**Maria Teresa Felipó Oriol** (Manresa, 1947) és doctora en Farmàcia per la Universitat de Barcelona (any 1973). Des de 1969 ha exercit de docent en aquesta universitat, on també ha ocupat diversos càrrecs. Des de 1986 és catedràtica d'Edafologia i Química Agrícola del Departament de Productes Naturals, Biologia Vegetal i Edafologia a la Universitat de Barcelona. Així mateix, ha col·laborat i col·labora en la docència de diversos cursos de postgrau organitzats per altres institucions.

Inicialment centrà la seva recerca en l'estudi de la gènesi dels sòls, tot i que després l'orientà vers la caracterització de residus, l'estudi de determinades interaccions sòl-residu derivades de la reutilització agrícola de residus orgànics i la contaminació del sòl.

Ha realitzat estades postdoctorals en centres de recerca i universitats d'arreu d'Europa. Ha dirigit i/o ha participat en diversos projectes de recerca, treballs, articles científics i capítols de llibres especialitzats, així com alguns llibres docents i de divulgació.

**Josep Oriol Ortiz i Perpiñà** (Barcelona, 1968) és doctor en Biologia (opció ciència del sòl) per la Universitat Autònoma de Barcelona (any 1998). Actualment és professor d'Edafologia i Química Agrícola a la Facultat de Ciències de la Universitat Autònoma de Barcelona i des de 1994 és investigador del Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF).

La seva tesi doctoral va estar dedicada a l'activitat biològica i revegetació en sòls de pedreres de calcària restaurats amb fang de depuradora. La seva activitat de recerca bàsica i aplicada se centra en l'estudi de la dinàmica de la matèria orgànica del sòl, la restauració de sòls fortament degradats, especialment per activitats extractives a cel obert, la utilització de diversos tipus de residus orgànics per a la millora del sòl i, darrerament, la implementació d'assajos d'ecotoxicitat basats en la mesura de l'activitat biològica del sòl.

Ha participat en diversos projectes de recerca (CICYT-CIRIT, FEDER, etc.).

**Rosa Maria Poch Claret** (Barcelona, 1962) és enginyera agrònoma per la Universitat Politècnica de Catalunya (1987), Màster en Física i Química de Sòls (1989) i Doctora en Ciències del Sòl per la Universitat de Gant (Bèlgica, 1992). És professora i investigadora de l'ETS d'Enginyeria Agrària de la Universitat de Lleida i del Centre Tecnològic Forestal de Catalunya.

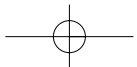
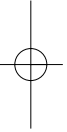
Les seves línies d'investigació se centren en els impactes del canvi d'ús del sòl en la generació d'escolament i balanços hídrics en conques forestals prepirinenques, en la rehabilitació de sòls afectats per mineria, en la micromorfologia de sòls aplicada a la interpretació de processos de formació de sòls i a l'arqueologia, i a l'ús de mapes de sòls i la informació territorial per a l'avaluació de recursos hídrics i en conservació de sòls i aigües en zones tropicals (Nicaragua, Togo). És responsable del Laboratori de Micromorfologia de Sòls de la Universitat de Lleida i ha estat coordinadora de la matèria Ciències de la Terra i del Medi Ambient a les Proves d'Accés a la Universitat a Catalunya.

És coautora de 5 llibres, 16 capítols de llibres i més de 25 articles. És professora convidada al *Master on Physical Land Resources*, impartit per la U.Gent-VU Brussels, així com a la Universidad Agraria (Managua, Nicaragua).

Síntesi	561
B10.1. Introducció	563
B10.1.1. El sòl, la seva gènesi i la seva variabilitat	563
B10.1.2. Funcions del sòl com a regulador del canvi climàtic	563
B10.1.3. Aptituds d'ús, qualitat i vulnerabilitat dels sòls	564
B10.1.4. El sòl com a agent i «pacient» del canvi climàtic	564
B10.1.5. Els sòls en l'avaluació i la mitigació del canvi climàtic	565
B10.1.6. Informació de base (necessària i disponible)	567
B10.2. El paper dels sòls de Catalunya en el cicle dels gasos amb efecte d'hivernacle	567
B10.2.1. Efecte relatiu dels diferents gasos amb efecte d'hivernacle	567
B10.2.2. Cicle del carboni: processos, reservoris i fluxos en el sòl	568
B10.2.2.1. Reservoiri orgànic	570
B10.2.2.2. Reservoiri inorgànic	572
B10.2.2.3. Processos del cicle del carboni al sòl	573
B10.2.2.4. Processos i pràctiques de gestió que afecten el carboni orgànic del sòl	573
B10.2.2.4.1. Processos d'emissió i segrest de CO <sub>2</sub>	573
B10.2.2.4.2. Processos d'emissió i absorció de CH <sub>4</sub>	576

B10.2.2.5. Processos i pràctiques de gestió que afecten al carboni inorgànic del sòl	576
B10.2.2.6. Descripció de reservoris i fluxos	579
B10.2.2.6.1. Reservoris	579
B10.2.2.6.2. Fluxos	581
B10.2.3. Cicle del Nitrogen: processos, reservoris i fluxos al sòl	581
B10.2.3.1. Formes i reservoris de nitrogen al sòl	582
B10.2.3.2. Processos i transferència de nitrogen entre reservoris	583
B10.2.3.3. Emissions de gasos nitrogenats pels sòls	583
B10.2.3.3.1. Amoníac	584
B10.2.3.3.2. Òxids de nitrogen	585
B10.2.3.4. Entrades de compostos nitrogenats al sòl	586
B10.2.3.4.1. Deposició de gasos nitrogenats	586
B10.2.3.4.2. Entrades de nitrogen per fertilitzants i adobs orgànics	586
B10.3. Usos del sòl i estimacions dels efectes del canvi climàtic	586
B10.3.1. Estimacions del contingut de matèria orgànica dels sòls en funció de diferents usos i superfícies ocupades	587
B10.3.2. Establiment d'escenaris representatius de diferents usos agraris del sòl	589
B10.3.3. Models de predicció dels fluxos de carboni i nitrogen	589
B10.3.4. Efectes del canvi d'ús sobre els fluxos i reservoris	591
B10.4. Efectes del canvi climàtic sobre el sòl	591
B10.4.1. Modificacions dels règims de temperatura i humitat del sòl	592
B10.5. Gestió del sòl per atenuar els efectes del canvi climàtic	592
B10.5.1. Grans línies d'actuació	593

B10.5.2. Minimització de les emissions de GEH i optimització del segrest de carboni	594
B10.5.2.1. Minimització de les emissions de N <sub>2</sub> O	594
B10.5.2.2. Optimització del segrest del carboni	594
B10.5.2.3. Minimització de les emissions de metà	597
B10.5.3. Normatives i estratègies d'actuació	597
B10.6. Conclusions	598
B10.7. Recomanacions o propostes d'actuació	599
Referències bibliogràfiques	600
Annexos	
Normativa generada per la Comissió Europea que afecta els sòls amb relació directa o indirecta al canvi climàtic, ordenada cronològicament en cadascun dels apartats	605
Acrònims	608



## Síntesi

El sòl juga un paper complex davant del canvi climàtic, ja que pot actuar com a emissor o embornal d'alguns dels gasos amb efecte d'hivernacle (GEH) i, al mateix temps, pot experimentar processos de degradació com a conseqüència dels efectes d'aquest fenomen. Per comprendre els possibles impactes del canvi climàtic sobre el sòl, cal tenir molt present la diversitat de sòls de Catalunya.

En aquest capítol s'han examinat els principals processos edàfics lligats als GEH, el grau de coneixement que se'n té i les possibilitats de quantificació. També s'ha recopilat la informació existent sobre els continguts de carboni dels sòls de Catalunya, i es plantegen alguns escenaris considerats significatius per al canvi climàtic així com les possibilitats d'actuació per atenuar-ne els efectes a partir de la gestió del sòl. Per poder fer un inventari de carboni al sòl i de les seves emissions de GEH cal integrar informació molt dispersa, heterogènia i incompleta. Per tant, les estimacions actuals són bastant incertes. Tot i la informació de sòls disponible i els estudis realitzats fins ara en el camp de l'agricultura i el medi ambient, pocs tenen l'orientació necessària per donar resposta a les necessitats de predicció dels efectes del canvi climàtic sobre el sòl.

La important diversitat de sòls a Catalunya limita la validesa de les estimacions globals de fluxos de GEH, que no tenen en compte aquesta diversitat, i posa de manifest la necessitat de completar els inventaris de sòls. Els principals riscos de degradació del sòl lligats al canvi climàtic estan associats a processos biològics i erosius. Per la llarga tradició agrícola de bona part dels sòls de Catalunya, on la matèria orgànica és escassa però estabilitzada, la seva pèrdua es produirà a un ritme lent. L'increment de la salinitat pot tenir importància local en determinades zones, però no de manera generalitzada.

El grau de coneixement que es té sobre el funcionament del cicle del carboni (C) en el sòl podria permetre unes primeres estimacions sobre la quantitat de C que es podria segrestar en un termini entre 10 i 100 anys en determinats escenaris significatius per a l'entorn català. Tot i així, hi ha un grau d'incertesa elevat sobre aquests valors i sobre la velocitat amb què aquest segrest es pot produir per manca d'una xarxa de seguiment sobre aquest tema a Catalunya.

En conjunt, els sòls de Catalunya tenen un potencial de segrest de C elevat, si bé la manca d'aigua en limita les entrades i la seva estabilització en forma d'humus al sòl. El reg és una de les pràctiques més efectives per augmentar les reserves de carboni al sòl, de manera que els sòls de les noves àrees regables es poden convertir en bons embornals de C. La limitació de les reserves d'aigua podria hipotecar aquestes previsions.

L'increment d'aridesa, que és possible que vagi associada al canvi climàtic, farà poc viable la implantació generalitzada a Catalunya de cultius de biocombustibles (com a alternativa als combustibles fòssils) atesa la disponibilitat limitada d'aigua de reg.

La textura del sòl és una propietat molt important a l'hora de considerar la capacitat de segrest de C estable al sòl (és més gran en sòls francs i argilosos). Als sòls de Catalunya, la protecció física de la matèria orgànica i la carbonització sembla que són dos dels processos que podrien incidir significativament en el segrest de carboni.

Es poden preveure pèrdues lleugeres de matèria orgànica del sòl a un termini mitjà per l'increment de la temperatura. Aquesta pèrdua pot tenir efectes en cadena sobre les propietats físiques del sòl i produir un increment de l'erosió, especialment a les zones de secà. Igualment, l'e-

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

rosió pot comportar una exportació de matèria orgànica dels sòls afectats, fet que agreujarà el problema.

Les mesures dels fluxos superficials de CO<sub>2</sub>, del sòl cap a l'atmosfera, presenten una gran heterogeneïtat i variabilitat en funció de les condicions ambientals i de mesura. Així, estimacions puntuals donen taxes d'emissió mitjanes anuals de CO<sub>2</sub> entre 75 i 122 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> en sòls forestals, mentre que s'han trobat valors de fins a 1.200 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> en parcel·les forestals de Catalunya.

Mesures puntuals d'emissions de N<sub>2</sub>O a Catalunya estan compreses entre 125 i 389 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, fet que pot representar unes pèrdues d'entre l'1,7 i el 13,6% del N aplicat com a fertilitzant. Les entrades per deposició d'amoníac o d'òxids de N al sòl són de l'ordre de 5-25 kg N ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup>, fet que es pot considerar com una fertilització que hauria de ser considerada en els plans d'adobat.

De l'estudi del comportament al sòl dels GEH i de les possibilitats de gestió es conclou que, avui dia, on hi ha possibilitats d'actuar és en augmen-

tar el segrest de C orgànic i en atenuar les emissions de gasos nitrogenats. Això és així perquè, malgrat la magnitud del reservori de C inorgànic als nostres sòls, les possibilitats d'actuació per a un segrest del C en formes minerals són limitades en terminis de 20 o 100 anys, i els efectes incerts.

Les activitats agràries constitueixen una font important del nitrogen que s'emet a l'atmosfera. Les emissions es relacionen estretament amb les pràctiques de fertilització, especialment orgànica. Les emissions són especialment remarcables en sòls sorrencs i rics en matèria orgànica.

El canvi d'ús del sòl sembla ser la principal via per modificar el segrest de C, a un termini mitjà i llarg. A Catalunya actualment hi ha superfícies importants -boscós i altres àrees amb vegetació 'natural' per sota els 1.500 metres d'alçada, que havien estat cultivades- que acumulen C orgànic al sòl, si bé aquest no està quantificat adequadament. És en aquestes àrees, juntament amb altres àrees agrícoles, on es poden produir canvis substancials en la productivitat (biomassa) o en la gestió (conreu de conservació), que poden convertir-se en eficients embornals de C.



### B10.1. Introducció

#### B10.1.1. El sòl, la seva gènesi i la seva variabilitat

L'espai que ocupen els sòls (l'edafosfera) és la interfase dinàmica entre el material geològic (la litosfera), l'aire (l'atmosfera), l'aigua (la hidrosfera), així com l'hàbitat dels organismes terrestres (la biosfera), de manera que es veu afectat per les modificacions del clima. El fet que un ecosistema terrestre i, per tant, el sòl, sofreixi canvis importants quan s'hi incorpora l'espècie humana i la seva empremta tecnològica, ha motivat que la intervenció humana es tracti com un factor a part dels altres. El sòl és, també, un sistema obert, capaç d'integrar la matèria i de dissipar l'energia, de manera que pot actuar de regulador de fluxos entre l'atmosfera i el medi terrestre. Aquí rau l'interès de considerar el paper que pot jugar en la mitigació dels efectes del canvi climàtic.

A Catalunya, els factors ambientals que han condicionat la formació dels sòls (especialment el clima i el material originari) han gaudit d'un marge de variabilitat molt gran. Això ha permès la formació i el desenvolupament d'una gran diversitat de sòls o edafodiversitat (Mapa de sòls CE, 1:1.000.000). Així, per exemple, en un territori relativament petit i aparentment homogeni com el municipi de Linyola s'han descrit 15 tipus de sòls, que pertanyen a 8 subgrups taxonòmics diferents (Herrero et al., 1993).

#### B10.1.2. Funcions del sòl com a regulador del canvi climàtic

El sòl és un recurs natural extraordinari, perquè és capaç de sostenir la vida, els ecosistemes terrestres i, alhora, suportar moltes activitats humanes. Aquest enorme potencial s'expressa, avui en dia, en la relació de funcions –ecològiques i socioeconòmiques– que pot desenvolupar. Dues d'aquestes funcions expressen la seva participació directa com a regulador del canvi climàtic (Blum, 1998):

- La producció de biomassa, que permet segregat carboni de l'atmosfera, que fixa en la matèria vegetal desenvolupada i que, posteriorment, s'incorpora al sòl en formes estables com l'humus.
- La capacitat per filtrar, emmagatzemar i transformar, atribucions que l'habiliten per interaccionar amb substàncies presents en altres components de l'ambient. Cal tenir molt present que la majoria dels cicles biogeoquímics rau, en algun moment, en el sòl. Des del punt de vista del canvi climàtic, els cicles que tenen una importància especial són els del carboni i del nitrogen.

Aquestes funcions han estat el motiu pel qual a determinats usos del sòl (agrícola, forestal) o a algunes pràctiques de conreu (aplicació de fertilitzants nitrogenats de síntesi o de residus orgànics) se'ls exigeixi la seva participació en la regulació de la concentració atmosfèrica de determinats ga-

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

sos amb efecte d'hivernacle, per la seva contribució en la reducció d'emissions de  $N_2O$  o de  $CH_4$  o pel seu paper com a embornal, atesa la seva capacitat de segrestar  $CO_2$  de forma directa en el propi sòl o a través de la biomassa que sustenta.

### **B10.1.3. Aptituds d'ús, qualitat i vulnerabilitat dels sòls**

Les actuacions humanes han transformat el paisatge des de temps remots i arreu es troben vestigis de la seva utilització secular. Durant els últims cinquanta anys, però, en algunes zones de Catalunya la demanda de sòl i la competència entre els usos del territori han anat augmentat dia a dia, sobretot a la franja costanera, tal com ha succeït en la majoria de regions del món amb un desenvolupament i densitat de població semblants a les de Catalunya. Quan els sòls han estat subjectes a actuacions humanes, generalment se'n modifiquen les característiques i propietats originals, en funció dels usos i del maneig a què han estat sotmesos. Aquests canvis d'usos tenen una incidència clara en el reservori de carboni i en les emissions de gasos per part del sòl.

Ni tots els sòls tenen les mateixes aptituds per a qualsevol ús ni el mateix grau de resistència a les pressions a què se'ls sotmet. Això pressuposa que per garantir un ús sostenible del sòl caldria planificar-lo d'acord amb les seves capacitats i, per tant, no utilitzar-lo per sobre d'aquell llindar que pugui portar-lo a un estat de degradació difícilment reversible (resiliència) que impossibiliti la seva recuperació i en limiti els usos potencials. Malauradament, però, actualment la normativa que estableix el règim del sòl encara el cataloga al marge dels seus atributs, classificant-lo en urbà, urbanitzable i no urbà.

### **B10.1.4. El sòl com a agent i «pacient» del canvi climàtic**

En funció de les característiques pròpies o de l'ús que se li dona, el sòl juga un paper actiu en l'emissió i captura dels gasos amb efecte d'hivernacle (GEH) i en el balanç energètic, via l'evaporació de l'aigua. Així, per exemple, els sòls dels

aiguamolls de Catalunya participen en les emissions de metà, mentre que els sòls forestals actuen d'embornal. La respiració del sòl, principal font edàfica de  $CO_2$ , és un procés molt sensible als canvis de temperatura i d'humitat, però només es coneix de forma local (Piñol et al., 1995) o s'estima per mitjà de models encara en validació. Menys coneguts són els efectes d'un increment de  $CO_2$  i d'altres fonts d'acidesa sobre la dissolució o reprecipitació de carbonats a l'interior del sòl. De fet, la precipitació de carbonats és un procés molt generalitzat als nostres sòls, però manca un coneixement detallat de la seva intensitat per poder predir els efectes sobre el balanç de carboni en un escenari de canvi climàtic.

Quan es demana al sòl que produeixi més biomassa per fixar carboni i s'apliquen fertilitzants en dosis no adequades es pot produir la paradoxa d'incrementar les emissions de C per respiració del sòl o per descomposició de l'adob orgànic aportat, així com també de nitrogen per volatilització, lixiviació o desnitrificació resultant en un balanç desfavorable. Es considera segrest de C (o de N) en el sòl el manteniment d'aquest element en una forma sòlida estable, sigui per reaccions químiques que transformen el  $CO_2$  en carbonats o per la fixació fotosintètica del carboni atmosfèric en la biomassa vegetal que posteriorment s'incorpora al sòl. Més tard, els processos de descomposició transformaran aquesta matèria orgànica alliberant una part de C en forma de  $CO_2$  per respiració. El segrest de C en el sòl serà el balanç positiu entre les entrades a partir de la biomassa o d'altres aportacions i les emissions en forma de gasos. La qualitat del segrest de carboni depèn del temps de residència dels compostos on es trobi. Temps de residència menors a 10 anys indicarien un segrest molt efímer.

Si el canvi climàtic arriba a afectar els sòls, les modificacions que es produirien primer afectarien aquells processos que són operatius en una escala de temps compresa entre 1 i 100 anys, inclosos aquells que fossin el resultat d'un canvi sobtat o catastròfic. A la taula B10.1 es relaciona

l'estimació qualitativa de la vulnerabilitat dels sòls front a diferents processos i escala temporal del canvi, en la qual els processos s'han ordenat en rang creixent.

#### B10.1.5. Els sòls en l'avaluació i la mitigació del canvi climàtic

A resultes de les conclusions de la Conferència de Bonn (1999), on s'establí l'important paper dels sòls en el segrest del CO<sub>2</sub> atmosfèric, la Comissió Europea, a través de la Direcció General de Medi Ambient i Seguretat Nuclear, elaborà unes primeres estimacions sobre aquesta capacitat d'absorció, indicant que la incorporació de canvis moderats en l'ús d'un 20% dels sòls agrícoles de la UE podien arribar potencialment a absorbir uns 7,8 Tg de C, la qual cosa contribuiria a una reducció del 8,6% del C atmosfèric (ECCP, 2003). Atesa la importància d'aquestes conclusions, s'acordà crear un subgrup de treball específic sobre sòl, independent del grup d'agricultura, que encara no ha publicat els seus

resultats. És per aquest motiu que en el present informe el paper dels sòls s'ha considerat en un capítol diferenciat.

De la mateixa manera que el sòl és fruit de l'acció de diferents factors ambientals i les funcions que té deriven del seu origen i composició, és pràcticament impossible desvincular-lo del conjunt d'activitats humanes que s'hi desenvolupen. Per això no és fàcil definir el paper que desenvolupa el sòl en el canvi climàtic, al marge dels usos (fonamentalment en l'agrícola i el forestal), ja que subministra elements nutritius i aigua per al desenvolupament de la biomassa, del maneig a què se'l sotmet (per exemple en l'ús agrícola, l'aplicació d'agroquímics, el reciclatge de residus orgànics, el tipus de llaurada, etc.) o de les pressions pel canvi d'ús a què està sotmès permanentment. Aquests fets són importants a Catalunya, ja que un 40% del territori està ocupat per activitats agrícoles i més del 50 % és forestal (una part important d'aquest suporta, però, formacions vege-

Procés o component afectat	Vulnerabilitat	Escala temporal (anys)
Salinització	++	0,1 a 10
Activitat biològica i biodiversitat	+++	1 a 10
Estabilitat estructural i retenció hídrica	++	1 a 10
Pèrdua de matèria orgànica	+++	1 a 25
Compactació	++	5 a 50
Quantitat i qualitat del reservori orgànic (C i N)	+++	5 a 50
Erosió	+++	10 a 50
Nivells de nutrients	++	10 a 100
Anegament de sòls deltaics	++	50 a 200
Modificació de la composició de la fracció mineral	+	>200
Modificació de la textura	+	> 1.000

Nota: +++ molt vulnerable; ++ vulnerable; + efecte lleuger.

Taula B10.1. Estimació qualitativa de la vulnerabilitat dels sòls davant de diferents processos i de l'escala temporal en la qual determinats processos o components del sòl resultaran afectats

Font: elaboració pròpia a partir de Scharpenseel et al., 1990.

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

ASPECTE A AVALUAR	DADES NECESSÀRIES	DADES DISPONIBLES				Observacions
		Fonts	Quantitat d'informació	Qualitat d'informació	Cobertura	
Característiques del sòl, superfícies ocupades	Propietats i tipus de sòl	Mapes de sòls 1:25.000. Estudis locals	Mitjana	Bona	Escassa	Només s'ha cartografiat un 15%, a escala 1:25.000, de tot el territori (40% de les àrees agrícoles)
<b>Inventaris de carboni i nitrogen</b>	% C orgànic i N en sòls	Serveis anàlisi sòls. Publicacions. Mapes de sòls i inventaris	Mitjana	Bona	Distribució de dades no ajustada a les necessitats	Problemes de georeferenciació en documents antics
	% C inorgànic en sòls	Serveis anàlisi sòls. Publicacions. Mapes de sòls i inventaris	Mitjana	Bona	Distribució de dades no ajustada a les necessitats	Difícil discriminar els CO <sub>3</sub> edàfics dels litològics
	Gruix horitzontal/sòl	Mapes de sòls. Publicacions	Poca	Bona	Escassa	
	Densitat aparent	Mapes de sòls. Treballs concrets	Molt poca	Baixa	Escassa	
	Pedregositat	Publicacions. Mapes de sòls 1:25.000	Mitjana	Mitjana	Escassa	Influeix molt, sobretot en sòls forestals
	Superfícies de cada tipus de sòl	Mapes sòl 1:25.000. Mapes sòl 1:1.000.000	Poca. Completa	Molt bona. Dolenta	30% sòls agrícoles. 100%	
	Cobertes/ usos sòl	Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya.	Completa	Limitada	100%	Poca diferenciació de classes en l'àmbit agrari
	Dejeccions ramaderes	Estadística DARP, Agència de Residus de Catalunya, plans de gestió de granges	Elevada	Bona	Quasi completa	
	Fangs EDAR	Estadístiques Agència de Residus de Catalunya, ACA	Completa	Bona	Completa	
	Compost RSU	Agència de Residus de Catalunya, gestors de residus	Completa	Bona	Completa	
<b>Efectes del canvi climàtic: temperatura i aridesa més elevades</b>	Adobs minerals	Estadístiques DARP/MAPA	Mitjana	Bona	Parcial	
	Restes de collita	Estimacions bibliogràfiques. Estadístiques DARP	Poca	Mitjana	Escassa	
	Aigua de reg	Dades ACA i CH de l'Ebre	Poca	Mitjana	Parcial	
	Producció de vinya en boscos	Dades IEF-CREAF	Mitjana	Mitjana	Completa (forestal)	
	Deposició atmosfèrica	Estudis tema CREAF/SCM	Poca	Bona	Escassa	
	Taxa de respiració	Treballs de recerca	Poca	Alta	Escassa	
	Evaporació	Models hidrològics	Mitjana	Alta		
	Balanc hídric	Treballs de recerca. Models	Mitjana	Alta	Parcial	
	Erosió	Treballs de recerca. Models	Mitjana	Mitjana	Parcial	
	CO <sub>2</sub> respiració	Treballs de recerca. Models	Poca	Alta	Escassa	
<b>Emissions de gasos</b>	CO <sub>2</sub> descarbonatació	Treballs de recerca	Molt poca	Mitjana	Molt escassa	Generalment migra en dissolució
	CH <sub>4</sub>	Treballs de recerca	Molt poca	Bona	Molt escassa	
	NH <sub>3</sub> volatilització	Treballs de recerca	Mitjana	Mitjana	Molt escassa	
	NOx desnitricació	Treballs de recerca. Models	Mitjana	Alta	Parcial	
	VOC (terpens, etc)	Treballs de recerca	Molt poca	Alta	Quasi inexistent	
<b>Seguiment i control dels efectes</b>	Parcel·les agrícoles	Camps experimentals. Finques pilot	Poca	Alta	Baixa	
	Parcel·les forestals	Parcel·les IEFCD CREAF. Parcel·les IFN	Limitada	Alta	Amplia	
<b>Inventari d'actuacions de mitigació</b>	Base de dades i SIG	Plans de gestió de dejeccions ramaderes	No disponible			

Taula B10.3. Informació de base necessària i disponible per avaluar els efectes del canvi climàtic als sòls de Catalunya.

Font: elaboració pròpia.

tals bastant recents, de les quals se suposa que fixen carboni). Al conjunt de la UE s'estima que el sector agrícola participa en un 10% de les emissions de GEH, però considerant també el sector forestal i el seu potencial de segrest de C, la contribució conjunta suposaria un 5% de compensació d'emissions globals d'altres sectors.

#### B10.1.6. Informació de base (necessària i disponible)

La taula B10.3 recull una primera aproximació a la informació disponible sobre els compartiments o els processos edàfics implicats en el canvi climàtic i sobre les limitacions de les dades a l'abast. El principal problema per poder fer un inventari fiable del C i N als sòls, així com de les entrades i sortides de GEH, és la manca de mapes de sòls amb un nivell de detall suficient per poder estendre a tot el territori català la informació obtinguda de sòls representatius.

Sobre alguns processos, com l'absorció de metà, la manca d'informació és quasi completa. Només es disposa d'estudis realitzats en d'altres països sobre sòls diferents als de Catalunya o en condicions de laboratori de difícil extrapolació a valors de camp.

#### B10.2. El paper dels sòls de Catalunya en el cicle dels gasos amb efecte d'hivernacle

Els sòls alliberen GEH com a resultat de la seva activitat metabòlica i, al mateix temps, tenen ca-

pacitat per retenir-los i/o transformar-los. El sòls són, per tant, esmorteïdors de l'efecte d'hivernacle, i per això darrerament són molt valorats com a segrestadors de CO<sub>2</sub> atmosfèric (ECCP, 2001; EuroCARE, 2002) o com a productors de cultius energètics (ECCP, 2003), que hom ha plantejat com una alternativa o complement als combustibles fòssils.

#### B10.2.1. Efecte relatiu dels diferents gasos amb efecte d'hivernacle

Tot i que el sòl té un paper molt actiu en la regulació del cicle hidrològic, segons els models climàtics és encara difícil estimar la contribució del vapor d'aigua en l'efecte d'hivernacle. Per tant a partir d'ara, aquest text avaluarà fonamentalment el paper del sòl en la dinàmica –emissió, retenció o transformació– de tres GEH que s'originen en sistemes naturals: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> i N<sub>2</sub>O. Tanmateix, el sòl no sembla que pugui tenir un paper rellevant en la regulació del contingut atmosfèric d'aquells gasos que, no tenint un origen natural (HCFC, PFC i SF<sub>6</sub>), també participen en el canvi climàtic. La Comissió Europea (EC, 2003), en elaborar els inventaris anuals d'emissions de GEH, ha incorporat també les emissions de CO, NO<sub>x</sub>, NMVOC i SO<sub>2</sub>, aquest últim pel paper dels aerosols en la formació dels núvols i llur reflexió de la llum solar. La taula B10.2 recull l'evolució de les estimacions de l'impacte relatiu dels diferents gasos.

GEH	Temps de residència (anys)	PEG relatiu, horitzó temporal (anys)			Augment anual des de 1980 (%)
		20	100	500	
CO <sub>2</sub>	5-200	1	1	1	0,4
CH <sub>4</sub> <sup>1</sup>	12 <sup>2</sup>	62	23	7	0,6
N <sub>2</sub> O	114 <sup>2</sup>	275	296	156	0,25

<sup>1</sup> Inclou la contribució indirecta en la producció d'aigua i ozó estratosfèric.

<sup>2</sup> Valors ajustats als efectes indirectes de l'emissió de cada gas en el seu propi període de vida.

Taula B10.2. Estimació del potencial d'escalfament global (PEG) dels gasos amb efecte d'hivernacle d'origen natural. Font: IPCC, 1997.

A la Unió Europea, els inventaris es realitzen d'acord amb la *Decisió 93/389/CEE*, i les conclusions extretes de l'últim inventari (EC, 2003) indiquen que durant l'any 2001 la seqüència d'emissions de GEH per sectors correspon a:

- 1) Energia (82%)
- 2) Agricultura (10%)
- 3) Processos industrials (6%)
- 4) Residus (5%)
- 5) Dissolvents i altres productes (1%)
- 6) Altres (0,05%)
- 7) Canvis d'ús del sòl i el sector forestal (- 5%).

El CO<sub>2</sub> és el GEH que s'emet amb més quantitat, concretament un 82% del total de les emissions. Respecte a les emissions de 1990, ha sofert un creixement de l'1,6%, que va ser compensat durant el mateix període per una reducció de les emissions en CH<sub>4</sub> (20,4 %) i N<sub>2</sub>O (15,8 %).

Al sector agrícola europeu se li atribueix una participació en l'efecte d'hivernacle del 10% respecte del total, un 5% a causa del N<sub>2</sub>O i un 4% al CH<sub>4</sub>. El balanç dels GEH és favorable en el conjunt dels sòls, ja que determinats canvis d'usos i l'absorció en el sector forestal suposen una reducció del 5% del total de les emissions europees. Dades recents estimades per a Catalunya indiquen un potencial menor de mitigació de les emissions pels canvis d'usos del sòl i sector forestal català (vegeu capítol A.5).

#### **B10.2.2. Cicle del carboni: processos, reservoris i fluxos en el sòl**

En el sòl, el carboni es troba en formes molt diverses, des de molt simples a molt complexes, amb graus d'estabilitat molt diferents i amb temps de residència que van de dies a mil·lenis. La importància del sòl com a reservori de carboni rau en la quantitat que hi ha emmagatzemada. Aquesta supera la dels reservoris atmosfèric i biosfèric plegats (figura B10.1), on les taxes de renovació són més ràpides, per la qual cosa petits canvis en el contingut del C del sòl afecten fortament la distribució del carboni en ambdós

medis (Lal, 2001a). La litosfera, per contra, és el reservori més gran, però amb temps de residència que es mesuren a escala geològica.

El carboni es troba al sòl en dues formes principals: el carboni orgànic i l'inorgànic. El primer és un component de la matèria orgànica del sòl i, des del punt de vista de la seva estabilitat, pot tenir temps de residència des de mesos (matèria orgànica làbil) fins a desenes de milers d'anys (matèria orgànica passiva, estabilitzada o inert). També comprèn el carbó procedent de cremes de la vegetació que ha passat a carbó recalcitrant. Part d'aquest carbó, producte de la combustió incompleta de la biomassa, es coneix com a *black carbon*. És resistent a l'oxidació química i microbiana, i pot ser erosionat amb el sòl, transportat i dipositat en sediments lacustres o marins.

El carboni inorgànic es troba en els sòls que s'han desenvolupat a partir de materials parentals carbonatats i que no s'han rentat (carboni litogènic), o bé en sòls on, fruit de processos edàfics, s'han acumulat carbonats (carboni edafogènic). La distribució relativa d'ambdues formes depèn, a escala planetària, dels sòls i del clima. En general el contingut de C orgànic en els sòls (COS) augmenta amb la precipitació i és més gran en climes humits i freds. Per contra, el C inorgànic (CIS) adquireix més importància en sòls de zones àrides i semiàrides (figura B10.2).

Des del punt de vista del segrest del C, els processos edàfics que interessen són aquells que:

- 1) Incorporen CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> al reservori de C edàfic o en limiten l'emissió a l'atmosfera.
- 2) Allarguen dins del sòl el temps de residència del C, estabilitzant tant les formes orgàniques com les inorgàniques.
- 3) Transfereixen el C a altres reservoris, com la hidrosfera, on eventualment pot ser emmagatzemat de forma més permanent.

També cal tenir en compte la durada dels processos edàfics i les possibilitats d'actuació: hi ha

El canvi climàtic a Catalunya El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic

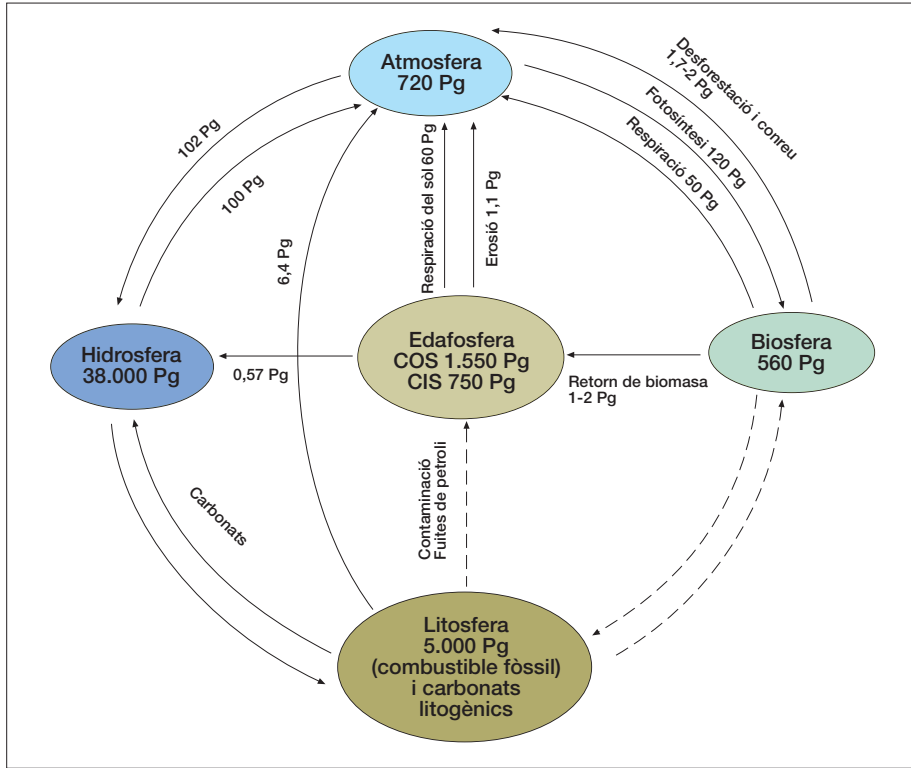


Figura B10.1. Principals reservoris i fluxos de C a la Terra (COS: carboni orgànic del sòl; CIS: carboni inorgànic del sòl). Font: Lal, 2001(a).

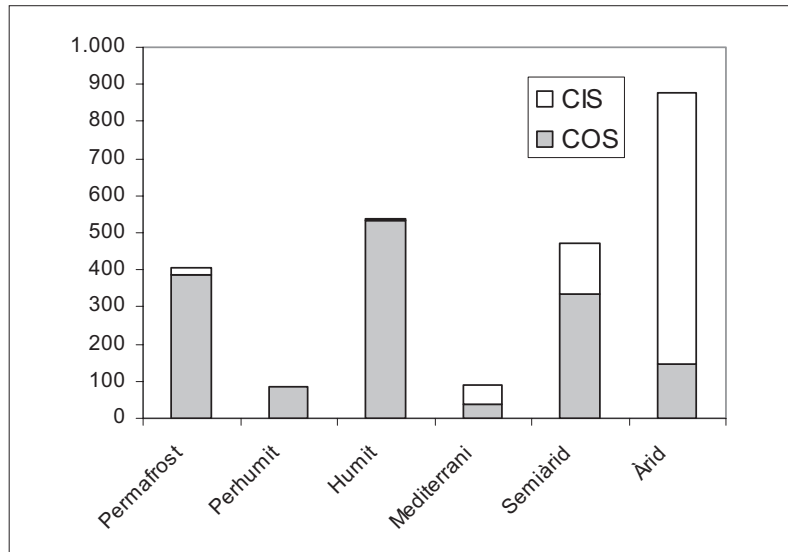


Figura B10.2. Reserves de carboni en el sòl (CIS: inorgànic; COS: orgànic) en funció del règim d'humitat climàtic, en petagramms de carboni (PgC). Font: Eswaran et al, 2000.

mecanismes molt efectius però que, per la seva lentitud (de l'ordre de centenars o milers d'anys) o per la poca extensió dels sòls on es produeixen, no tindrien implicacions en la reducció dels GEH en els terminis en què es preveu el canvi climàtic. A més, en els processos edàfics de transferència del C a altres reservoris s'hauria d'avaluar la seva evolució en els altres compartiments per a considerar-los o no com a segrest, la qual cosa queda fora de l'abast d'aquest capítol. En conseqüència, es considera com a segrest els processos esmentats que actuen en períodes de l'ordre de 100 anys, inclosos els de transferència.

Les estimacions de les reserves de carboni en els ordres de sòls de *Soil Taxonomy*, convertides a partir del mapa de sòls del món (FAO 1991), es mostren a la taula B10.4).

Les estimacions de carboni inorgànic no són tan exactes com les de l'orgànic, per la dificultat de distingir, a partir de la cartografia, els carbonats primaris dels edafogènics. Segons els autors, probablement el carboni segrestat com a carbonats no supera el 10% de les estimacions que figuren a la taula B10.4. Tot i això, la majoria de les reserves de carboni inorgànic es troben en els **aridisòls** i en els **entisòls**, concretament en **orthents** de zones mediterrànies i semiàrides, climes que afavoreixen la precipitació de carbonats, tal com es mostra a la figura B10.2, on s'indiquen les estimacions dels reservoris de carboni en funció del règim d'humitat.

#### **B10.2.2.1. Reservori orgànic**

La fracció orgànica del sòl està formada per les restes d'organismes vius –flora, fauna i microorganismes– i els productes de descomposició i transformació resultant. Alguns autors hi inclouen també la matèria orgànica viva, que sovint no passa del 4% del total del COS, en la qual el component majoritari són els microorganismes (Theng et al., 1989). La resta es classifica segons la seva mida i/o grau de transformació o neoformació. La humificació és el procés pel qual molè-

cules simples, producte de la degradació de la matèria orgànica fresca, es recombinen formant compostos orgànics complexos, més estables, anomenats humus.

La matèria orgànica sovint no supera el 10% dels components del sòl, però és clau en algunes de les propietats que en determinen la qualitat: augmenta la resistència davant l'erosió, la capacitat de reserva d'aigua, la capacitat d'intercanvi catiònic, i constitueix una reserva de nutrients en mineralitzar-se, de manera que el contingut de matèria orgànica es considera, sovint, com un indicador de la qualitat del sòl. No només actua com a reservori de carboni, sinó que també afavoreix el segrest de carboni per la biosfera en la mesura que augmenta el potencial productiu del sòl.

La matèria orgànica del sòl es pot dividir en les fraccions lleugera i pesada, que corresponen, a grans trets, a matèries orgàniques làbils o amb curt període de reciclatge (1 a 20 anys) generalment en partícules de mida grossa, superior a 50 µm (MOP, matèries orgàniques particulades, amb C/N elevats), i a matèries recalcitants, estables o passives, amb períodes de reciclatge més llargs (de 200 a 1.500 anys), sovint associades a partícules de llim i argila (Anderson i Ingram, 1989). No obstant això, de vegades dins de la fracció lleugera hi ha quantitats de partícules de carbó procedent d'incendis o de cremes, les quals formen part del carbó recalcitant tot i ser de mida petita. Aquest carbó, que es creia anecdòtic dins les estimacions del COS, constitueix la fracció més gran -de l'ordre d'un 30-35%- en alguns sòls sotmesos des de temps immemorial a pràctiques d'estassada i crema (Skjemstad et al., 2002).

La matèria orgànica humificada del sòl es classifica en tres fraccions: els àcids fúlvics, els àcids húmics i les humines. Des del punt de vista de la seva qualitat o afinitat amb la matèria mineral del sòl, les darreres serien les més estables: el seu temps de residència sovint supera els 2.000



anys, mentre que el dels àcids fúlvics i húmics estaria entre 250 i 800 anys (Zehnder, 1982).

Aquestes fraccions, definides per la seva solubilitat, no es corresponen realment a la seva dinàmica en el sòl, ja que entre altres raons, la degradació de les molècules orgàniques en el sòl es deu, bàsicament, a oxidacions i no tant a hidròlisi (Balesdent et al., 2002). Els temps de residència, però, no només depenen de la naturalesa de la fracció, sinó també del clima, de la mineralogia de les argiles i de la profunditat del sòl, entre altres. S'han estimat temps de 2.000 a 5.000 anys en sòls rics en al·lòfana, que són els silicats amb més poder de preservació de la matèria orgànica (Wada i Aomine, 1975). En general, l'efecte estabilitzant de les argiles disminueix segons aquesta seqüència (Van Breemen i Feijtel, 1990):

al·lòfanes > silicats i aluminats amorfs o poc cristal·lins > esmectites > il·lites > caolinites

La profunditat del sòl influeix en el grau de saturació de CO<sub>2</sub> de l'atmosfera del sòl, que és mínim a la superfície i va augmentant en profunditat, la qual cosa també fa augmentar els temps de residència de la matèria orgànica en els horitzons més profunds. En els horitzons minerals de sòls rics en partícules fines, la protecció física del carboni en complexos argilo-húmics esdevé el procés predominant (Rovira, 2001).

Les imprecisions en els càlculs de continguts del carboni del sòl deriven principalment dels mètodes d'anàlisi del C orgànic i dels factors de re-

Ordre	Àrea (%)	Carboni orgànic		Carboni inorgànic		Carboni total	
		Pg	%	Pg	%	Pg	%
Gelisòls	8,6	316	20,4	7	0,8	323	12,9
Histosòls	1,2	179	11,6	0	0,1	180	7,2
Espodosòls	2,6	64	4,1	0	0,0	64	2,6
Andisòls	0,7	20	1,3	0	0,0	20	0,8
Oxisòls	7,5	126	8,1	0	0,0	126	5,1
Vertisòls	2,4	42	2,7	21	2,3	64	2,6
Aridisòls	12,0	59	3,8	456	48,0	515	20,6
Ultisòls	8,4	137	8,8	0	0,0	137	5,5
Mol·lisòls	6,9	121	7,8	116	12,2	237	9,5
<b>Alfisòls</b>	<b>9,6</b>	<b>158</b>	<b>10,2</b>	<b>43</b>	<b>4,5</b>	<b>201</b>	<b>8,0</b>
<b>Inceptisòls</b>	<b>9,8</b>	<b>190</b>	<b>12,2</b>	<b>34</b>	<b>3,6</b>	<b>224</b>	<b>9,0</b>
<b>Entisòls</b>	<b>16,2</b>	<b>90</b>	<b>5,8</b>	<b>263</b>	<b>27,7</b>	<b>353</b>	<b>14,2</b>
Miscel·lanis	14,1	24	1,5	0	0,0	24	1,0
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>1.526</b>	<b>100,0</b>	<b>940</b>	<b>100,0</b>	<b>2.468</b>	<b>100,0</b>

Nota: En negreta es ressalten els tipus de sòls més rellevants a Catalunya.

Taula B10.4. Reserves de carboni orgànic i inorgànic del sòls del món.  
Font: elaboració pròpia a partir d'Eswaran et al, 2000.

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

cuperació quan es basen en oxidació humida, i de la manca de dades de densitat aparent en els mapes de sòls. S'ha estimat, però, que l'ús d'equacions de regressió en el seu càlcul origina un error d'un 10% en l'estimació de les reserves de carboni edàfic al Brasil (Bernoux et al., 2002). De la mateixa manera, la profunditat del sòl fins on es calcula la càrrega de carboni i la proporció de pedres són una altra font d'imprecisió.

Les reserves de COS oscil·len entre menys de 2 kg m<sup>-3</sup> en deserts a més de 35 kg m<sup>-3</sup> en tundres humides. Els valors mitjans per a les selves tropicals humides estan al voltant de 17 kg m<sup>-3</sup> (Post et al, 1985). En l'àmbit forestal, cal no sobreestimar la potencialitat del sòl per emmagatzemar carboni. Si bé tenim un predomini de boscos joves que aporten matèria orgànica al sòl, no està tan clar que pugui quedar estabilitzada, atesa la considerable activitat biològica dels sòls mediterranis. Així, un factor limitant dels sòls forestals per al segrest de carboni està en la lenta incorporació de la matèria orgànica als horitzons minerals, on pot quedar protegida durant un termini més llarg (Rovira, 2001). Els sòls forestals d'alta muntanya ja estan en una situació propera a l'equilibri orgànic, de manera que no són embornals importants a mitjà termini. Cal diferenciar les zones d'expansió del bosc sobre camps abandonats on sí que es pot incrementar, encara, la matèria orgànica del sòl.

#### **B10.2.2.2. Reservoiri inorgànic**

La majoria del carboni mineral del sòl es troba com a calcita. A Catalunya es considera que les pluges tenen un considerable poder neutralitzant, ja que sovint es tracta de pluges de fang riques en carbonats i bicarbonats càlcics. Al Montseny aporten uns 0,24 kmol<sub>c</sub>/ha/any de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Àvila i Rodà, 1991), mentre que al Solsonès s'han estimat en 0,77 kmol<sub>c</sub>/ha durant l'any 1999-2000 (Orozco 2003, Poch *com. pers.*).

Des d'un punt de vista genètic, el carboni litogènic és part del reservori de la litosfera, mentre

que l'edafogènic té en principi temps de residència més curts en aquells sòls on la redistribució de carbonats és un procés edàfic actual. De fet, però, des d'un punt de vista funcional, la mobilitat o reactivitat dels carbonats no es deu a la seva formació, sinó a la superfície específica o mida de les partícules, independentment del seu origen. En aquest sentit, els pseudomicel·lis de carbonats (edàfics) són més mòbils que roques calcàries dures, però sorres calcàries fines (carbonat litogènic) serien més mòbils que rizocrecions grosses (carbonats edafogènics).

El clima és el factor de formació del sòl que determina l'acumulació de carbonats a escala continental. En moltes àrees, el llinard de precipitació anual que divideix els sòls amb i sense acumulacions està al voltant de 500 mm (Birkeland, 1999), tot i que és molt variable en funció de la temperatura i drenatge del sòl, disponibilitat d'ions, característiques de la pluja i geomorfologia, entre altres. A Catalunya el límit és, probablement, superior a 600-700 mm i correspon a una altitud aproximada de 1.000 metres. Això es deu a la riquesa en materials carbonatats i a la moderada evolució dels nostres sòls, que no permet que la descarbonatació progressi en condicions menys extremes de rentat. A la conca de la Ribera Salada, situada a cavall del Solsonès i de l'Alt Urgell i amb una superfície de 222 km<sup>2</sup>, en altituds al voltant de 1.000 m l'exportació neta de bicarbonats és d'uns 300 kg/ha/any. Aquests provenen en part de la circulació de l'aigua de pluja per aqüífers càrstics de la capçalera i en part de la descarbonatació dels sòls (Orozco 2003). En efecte, en sòls calcaris sota bosc i pastures de la mateixa conca s'han estimat rentats nets de bicarbonats i calci de 46,7 i 13 kg/ha/any respectivament (Poch, *com. pers.*).

Els models de formació de carbonats s'agrupen en els processos *per ascensum*, *per descensum*, *in situ* i biogènics (Monger i Wilding, 2002), les característiques dels quals es mostren a la taula B10.5.

El ritme d'acumulació de carbonats oscil·la entre 0,1 i 12 g CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> any<sup>-1</sup> en diferents zones àrides dels Estats Units, procés que s'interpreta com unidireccional sota el clima actual (Monger i Gallegos, 2000). En molts sòls de Catalunya hi ha proves d'una aridificació del clima en forma de recarbonatació d'horitzons Bt d'acumulació d'argila, formats en règims més humits durant períodes interglacials del Plistocè. Per altra, però, també hi ha evidències de dissolució d'horitzons petrocàlcics, com a alguns horitzons Bkm del Pla de Lleida, que si bé poden deure's a un canvi en les condicions climàtiques, en molts indrets estan afavorits pel reg.

#### B10.2.2.3. Processos del cicle del carboni al sòl

El segrest del carboni al sòl implica la conversió de CO<sub>2</sub> de l'atmosfera en matèria orgànica o carbonats minerals a través de la fotosíntesi o de l'equilibri CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> – HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Tot i que els processos que regulen l'enriquiment o empobriment dels reservoris de C al sòl es donen en condicions naturals, la majoria de les activitats antròpiques afecten la seva magnitud.

La taula B10.6 mostra la complexitat de les relacions existents entre els principals processos de pèrdua o acumulació de carboni al sòl i algunes activitats humanes que les afecten. Algunes d'elles tenen efectes oposats, en funció de si es tracta de carboni orgànic o inorgànic, com la fertilització i el reg. Igualment, alguns processos, com la dissolució dels carbonats, també impliquen el segrest o l'alliberament de C en funció del grau d'humitat o la composició del medi on es troben. Aquesta significació varia fins i tot en funció de l'escala del procés. En efecte, essent el sòl un cos natural observable a diferents escales, un procés de pèrdua de C d'un horitzó pot representar un guany en una altra posició del paisatge edàfic o bé en un altre reservori com la hidrosfera o la geosfera.

#### B10.2.2.4. Processos i pràctiques de gestió que afecten el carboni orgànic del sòl

##### B10.2.2.4.1. Processos d'emissió i segrest de CO<sub>2</sub>

La mineralització i l'oxidació de la matèria orgànica són les principals causes d'emissió de C del

Tipus de model	Procés	Origen dels ions	Resultat
<i>Per descensum</i>	Dissolució de carbonats i posterior precipitació a certa fondària del sòl.	Horitzons suprajacents o flux lateral en vessants. Ca <sup>2+</sup> procedent de la meteorització de minerals primaris, de pols atmosfèrica o de l'aigua de pluja	Horitzons Bk i Bkm en ambients àrids. Acumulacions com a pseudomicel·lis, nòduls, calcària pulverulenta, cimentació per carbonats (Gile et al., 1966)
<i>Per ascensum</i>	Precipitació per l'ascens capil·lar de capes freàtiques en règims no percolants.	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> i Ca <sup>2+</sup> de la solució del sòl	Horitzons Bk i Bwk, rarament Bkm. Pseudomicel·lis, nòduls, rizocrecions.
<i>In situ</i>	Precipitació a partir d'ions del propi horitzó.	Meteorització de minerals primaris rics en calci. CO <sub>2</sub> procedent d'activitat biològica.	Horitzons Bk i Bwk, rarament Bkm. Pseudomicel·lis, nòduls, rizocrecions.
<b>Biogènics</b>	Dissolució de la calcita present en el sòl pel CO <sub>2</sub> procedent de la respiració o de l'excreció d'àcids orgànics. El Ca <sup>2+</sup> alliberat és absorbit per organismes on precipita com a calcita (Jaillard et al., 1991).	Minerals primaris del sòl, CO <sub>2</sub> de la respiració dels organismes del sòl.	Dissolució i reprecipitació de calcita a escala microscòpica. No implica cap flux net de carboni al sòl, llevat que el calci procedeixi d'una font no carbonatada.

Taula B10.5. Models de formació de carbonats en sòls.  
Font: elaboració pròpia, basada en Monger i Wilking, 2002.

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

Activitat	Carboni orgànic del sòl		Carboni mineral del sòl	
	Emissions	Entrades	Emissions	Entrades
Desforestació, llaurat	Mineralització, erosió i rentat		Erosió	
Drenatge de sòls orgànics i altres	Mineralització			
Combustió de biomassa, incendis	Oxidació i volatilització			
Metanogènesi	Carbó recalcitrant			
Reg		Humificació		Carbonatació
			Dissolució de carbonats	
Fertilització	Mineralització	Humificació i agregació	Acidificació	
Esmenes de sòls sòdics amb guix		Humificació i agregació		Carbonatació
Esmenes de sòls sòdics amb H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> o adobs en verd		Humificació i agregació	Dissolució	
Encalcat	Mineralització	Humificació i agregació	Calcificació. Producció d'esmenes	
Pluja àcida			Dissolució	
Restauració de sòls		Humificació i agregació		Carbonatació
Conreu de conservació		Humificació i agregació		
Immobilització				
Agricultura en medis saturats d'aigua	Metà			

Taula B10.6. Algunes activitats antròpiques i processos que afecten els fluxos de carboni al sòl.  
Font: elaboració pròpia.

sòl a l'atmosfera atribuïbles a les activitats antròpiques. La mineralització de la matèria orgànica s'afavoreix per la posada en cultiu, que exposa el sòl a la superfície, trenca els agregats i els posa a disposició de l'activitat microbiana i a l'acció dels agents atmosfèrics (Batjes i Bridges, 1992). Aquest és el principal procés d'alliberament de CO<sub>2</sub> com a conseqüència del canvi d'ús del sòl de forestal a agrícola o pastura, fet que s'agreuja en ambients àrids i semiàrids, on l'aigua és limitant per a la producció de biomassa i on la mineralització es veu molt afavorida.

Tanmateix, en el cas dels sòls amb ús agrícola, el tipus de maneig afecta fortament la distribució i contingut de matèria orgànica. En general, els sistemes agrícoles amb reg, aportacions regulars d'esmenes orgàniques, conreu reduït o no conreu, són els que potencialment poden segrestar més carboni. El reg és una de les pràctiques de maneig més efectives a l'hora d'augmentar les reserves de C al sòl. D'aquesta manera, per exemple, s'ha estimat que si en els propers 30 anys s'incrementava un 10% la superfície regada del món, es podria fixar en el sòl

un 5,9% del C emès (Entry et al., 2002). El maneig dels residus de collita i l'aportació ajustada de fertilitzants per produir nova matèria orgànica semblen les pràctiques més efectives pel que fa al segrest de carboni, sobretot en medis àrids i semiàrids (Bationo et al 2000, Stewart i Robinson, 2000).

En aquest sentit també s'ha trobat que sòls abançats en vessants de la conca mediterrània, que originàriament van comportar la desaparició de sòls forestals, han augmentat l'eficiència de l'aprofitament de l'aigua en els vessants i, per tant, el seu potencial de producció de biomassa és ara major. Per altra banda, també s'ha observat que l'aforestació de sòls agrícoles afavoreix el segrest de C i, per exemple, s'ha estimat que a la vall de Vallgorguina la plantació de *Pinus radiata* en antics conreus de vinya, d'entre 14 i 33 anys d'antiguitat, i de cereals, d'entre 4 i 7 anys, ocasionà un increment de C de l'ordre de 100 kg ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup> en els primers 5 cm del sòl (Romanyà et al., 2000).

La pèrdua anual de CO<sub>2</sub> deguda al drenatge i posada en cultiu de sòls orgànics s'estima en 0,15-0,18 Pg C any<sup>-1</sup>, que augmentaria fins a 3 Pg C any<sup>-1</sup> si es produïa el canvi climàtic (Post, 1990), amb un augment de temperatura i d'aridesa, per la qual cosa els sòls orgànics passarien de ser embornals a fonts de CO<sub>2</sub>. Per contra, la dessecació eliminaria l'emissió de CH<sub>4</sub> i podrien passar a ser embornals d'aquest compost. L'augment de temperatura en el marc del canvi climàtic fa preveure, en general, un augment de la mineralització de la matèria orgànica, que a la llarga podria representar un descens en la capacitat del sòl de subministrar nutrients. Això s'agreguaria pel fet que la matèria orgànica sintetitzada en una atmosfera més rica en CO<sub>2</sub> té quocients C/N majors i, per tant, és menys rica en nutrients (Sebastià et al., capítol B5 d'aquest llibre). Tanmateix, aquesta matèria orgànica, més rica en carboni, seria més resistent a la mineralització i, per tant, aquest efecte d'empobriment químic no és tan clar.

L'impacte del foc sobre la matèria orgànica del sòl és variable segons la intensitat del foc i la distribució de matèria orgànica en profunditat. Si bé els efectes directes comporten una disminució de matèria orgànica i l'alliberament de CO<sub>2</sub>, això afecta només els primers centímetres del sòl, a no ser que es tracti d'incendis recurrents d'alta freqüència. Els efectes indirectes a un termini mitjà i llarg són, però, més importants i poden ser positius per a l'emmagatzematge de carboni (conversió de C de la biomassa a formes de carbó recalcitrants en el sòl, augment de la fertilitat química en sòls àcids que incrementa el seu potencial productiu) o negatius (augment de l'erosió, reducció de la infiltració). Aquests darrers són els principals efectes en zones semiàrides i mediterrànies, on els incendis ocorren sovint en sòls forestals on la matèria orgànica es troba en els horitzons superficials, en zones de pendent susceptibles a l'erosió i on el clima no afavoreix la regeneració dels boscos.

L'erosió del sòl és un procés d'emissió de carboni reconegut, malgrat que no tots els mecanismes implicats actuen en el mateix sentit. Bàsicament, suposa l'alliberament i el transport de la matèria orgànica del sòl pel vent o l'aigua, processos durant els quals es mineralitza més ràpidament. Els efectes *in situ* són una disminució de la qualitat física, química i biològica del sòl i, per tant, del seu potencial per segrestar carboni. Tanmateix, depenent del lloc on es diposita, la matèria orgànica pot quedar segrestada (sediments de llacs, embassaments) o pot acumular-se en certs sòls tot millorant-ne la qualitat (peus de vessants, planes d'inundació, deltes). Aquestes àrees esdevenen embornals de carboni en la mesura que la matèria orgànica hi roman amb períodes de recurrència més llargs que al lloc on s'ha erosionat. Tot i això, l'erosió no es pot considerar com un simple procés de redistribució de matèria orgànica en el paisatge, ja que hi ha unes pèrdues irreversibles per mineralització (Lal, 2001b).

#### B10.2.2.4.2. Processos d'emissió i absorció de CH<sub>4</sub>

L'emissió de CH<sub>4</sub> o metanogènesi és un procés geoquímic que es dona en tots els ambients anaeròbics, on es descomposa matèria orgànica. En els sòls, el metà s'allibera principalment en els aiguamolls o en els camps d'arròs. La majoria dels balanços de metà mostren que els camps d'arròs i els remugants són les fonts més importants d'emissió.

Les estimacions de les emissions de metà dels camps d'arròs són molt variables: oscil·len entre 70 i 170 Tg CH<sub>4</sub> any<sup>-1</sup> (diferents autors, citat per Batjes i Bridges, 1992) Les mesures en camps d'arròs de l'Estat espanyol i Itàlia són sensiblement inferiors i donen estimacions entre 30 i 75 Tg CH<sub>4</sub> any<sup>-1</sup> (Holzapfel-Pschorn i Seiler, 1986). Això es deu probablement a la presència de sulfats, ja que són tòxics per als microorganismes metanògens i estan negativament correlacionats amb l'emissió de metà. Per contra, les pràctiques de conreu de l'arròs com la fertilització química i orgànica, el llaurat previ per crear una capa impermeable, sòls amb pH neutres a alcalins, làmines superficials d'aigua amb continguts d'oxigen elevats i temperatures d'entre 30 i 35°C afavoreixen la mineralització i degradació de la matèria orgànica. Igualment, les mesures d'emissions de metà de zones humides naturals són poc precises però semblants a les dels camps d'arròs, de l'ordre de 100 a 50 Tg any<sup>-1</sup> respectivament (Schütz et al., 1990).

En condicions aeròbiques, els sòls poden actuar també com a embornals de CH<sub>4</sub>, com a conseqüència de l'absorció d'aquest per part de bacteris metanotròfics aeròbics. Les estimacions globals d'absorció arriben fins a 56 Tg any<sup>-1</sup> (Schütz et al, 1990). Alguns ecosistemes de tundra funcionen alternativament com a emissors o immissors de metà al llarg de l'any, en funció del grau de saturació d'aigua del sòl (Harriss et al, 1982). En altres ecosistemes les dades són molt variables: com exemple, en sòls àrids i semiàrids oscil·len entre 0,3 i 2,4 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Seiler,

1984) i en boscos temperats entre 0,11 i 0,13 mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Stuedler et al, 1986). En conjunt es considera que els sòls forestals són embornals de metà.

#### B10.2.2.5. Processos i pràctiques de gestió que afecten al carboni inorgànic del sòl

L'equilibri carbonat-bicarbonat és el procés més important que regeix el potencial de segrest del carboni inorgànic en els sòls. És difícil qualificar les reaccions que s'hi donen com a segrest o emissió de carboni, ja que són processos que es mouen a cavall entre tres reservoris: l'atmosfera, l'edafosfera i la hidrosfera. Només es pot parlar clarament de segrest o emissió de carboni quan hi ha un intercanvi entre l'atmosfera i els altres dos reservoris. En canvi, els processos de transferència de carboni entre l'edafosfera i la hidrosfera són guanyos o pèrdues únicament quan representen un canvi en la seva estabilitat o susceptibilitat en tornar a l'atmosfera, la qual cosa és molt més variable i dependent de les condicions particulars del medi.

Les reaccions involucrades en els fluxos de carbonats, bicarbonats i anhídrid carbònic, vistes des del punt de vista del segrest de carboni, es mostren a la figura B10.3. En aquest equilibri cal tenir en compte tres fenòmens fonamentals des del punt de vista del segrest del carboni (Drees et al, 2001):

- 1) La majoria de les aigües segresten naturalment CO<sub>2</sub> de l'atmosfera de forma contínua.
- 2) L'àcid carbònic és un àcid feble que no allibera CO<sub>2</sub> quan reacciona amb els carbonats del sòl, sinó que produeix HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.
- 3) Un dels dos mols de bicarbonat que es produeixen en dissoldre la calcària procedeix de l'atmosfera. En conseqüència, la dissolució de carbonats per l'aigua de pluja bicarbonatada és un procés de segrest de carboni cap a la hidrosfera.

La precipitació de CaCO<sub>3</sub> es dona normalment per sobresaturació de solucions amb Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

En règims d'humitat del sòl sense falta d'aigua ( $P > ETP$ ), tots els carbonats es dissolen i passen a la hidrosfera. En funció del tipus de reservori –capes freàtiques profundes, aigües superficials– el carboni inorgànic de l'aigua precipita un altre cop, alliberant  $CO_2$  cap a l'atmosfera, o queda emmagatzemat durant un període de temps variable. És a dir, pot representar un segrest de carboni a la hidrosfera o bé resultar en un balanç zero després d'un període d'immobilització transitori. En règims d'humitat àrids, semiàrids i subhúmids ( $P \leq ETP$ ) el  $CaCO_3$  del sòl experimenta processos de dissolució-reprecipitació i, per tant, no hi ha guanys ni pèrdues de carboni, a no ser que els bicarbonats dissolts passin a la hidrosfera. En règims d'humitat àrids ( $P < ETP$ ), el progressiu enriquiment de  $CaCO_3$  del sòl només representa un guany net (segrest) quan el Ca no prové de materials originaris que ja contenen  $CaCO_3$  i que es disolen en el mateix sòl o en un altre punt del paisatge edàfic, ja que el  $CO_2$  atrapat i l'alliberat en la dissolució i precipitació respectives es compensen. Les fonts de Ca forani poden ser guix, clorur càlcic (tant naturals com aportats com a adobs o esmenes) o silicats rics en calci que l'alliberen en meteoritzar-se.

En deserts dels EUA, les velocitats de formació de carbonat inorgànic per aquesta via, amb calci procedent de la deposició atmosfèrica, oscil·len entre 1 i 5  $g\ m^{-2}\ any^{-1}$  (Marion, 1989). La formació de carbonats edafogènics en materials parentals carbonatats no suposa un segrest net de C, per la qual cosa no es pot considerar la precipitació de carbonats com un mecanisme efectiu, ara per ara, per augmentar el segrest de carboni en els sòls (Schlesinger, 2002). La complexitat d'aquestes reaccions i dels factors de control

fan que una mateixa pràctica agrícola o de maneig del sòl, pugui representar el segrest o l'alliberament de carboni inorgànic. En qualsevol cas, moltes d'aquestes pràctiques augmenten el potencial de producció de biomassa del sòl i, per tant, tenen un clar efecte de segrest de carboni orgànic (taula B10.6), mentre que l'efecte sobre l'inorgànic és variable i quantitativament menys important. La taula B10.7 mostra una ampliació dels tipus d'afeccions del maneig en el carboni inorgànic del sòl i les possibilitats d'intervenció.

Quan s'avalua l'efecte del reg sobre el CIS, els factors de control són el grau d'alcalinitat i l'eficiència del reg (Suárez, 1999), de manera que regs poc eficients amb altes fraccions de rentat i/o amb aigües poc carbonatades dissolen els carbonats de l'edafosfera i els passen a la hidrosfera. També s'ha de tenir en compte la procedència de l'aigua de reg: l'ús d'aigua d'aqüífers profunds provoca la seva desgasificació quan és bombejada a la superfície per la menor pressió parcial de  $CO_2$  de l'atmosfera.

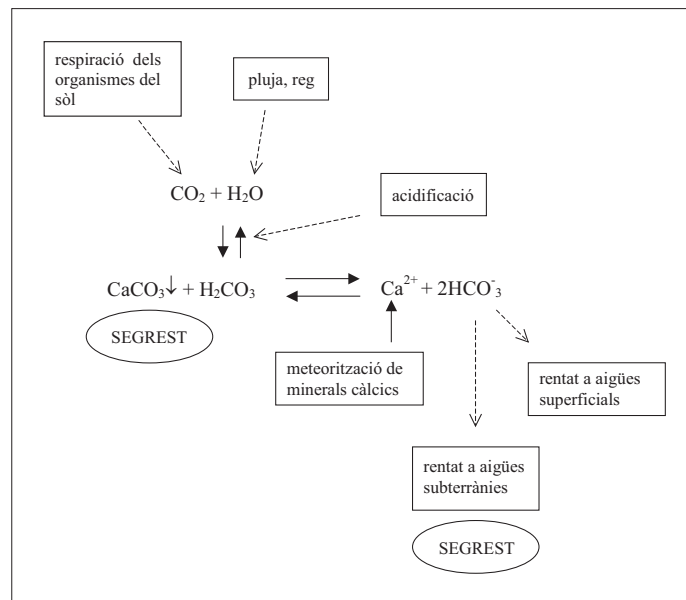


Figura B10.3. Reaccions entre carbonats, bicarbonats i  $CO_2$  del sòl.  
Font: elaboració pròpia.

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

Pràctica		Procés	Resultat	Importància	Possibilitats d'intervenció
Reg	Aigües carbonatades i/o regs d'alta eficiència	Precipitació de carbonats	Emissió	Emissió global de $3 \times 10^{13}$ gC any <sup>-1</sup> si es reguen totes les àrees amb déficit d'aigua (0,5% d'emissions de combustibles fòssils)	Baixes
	Aigües no carbonatades i/o regs de baixa eficiència	Dissolució de carbonats	Segrest a la hidrosfera		
Fertilització	Adobs acidificants, sulfurats o amoniacals	Dissolució de carbonats	Emissió	Mitjana-alta: emissió de l'ordre de 100 kg C ha <sup>-1</sup> any <sup>-1</sup>	Mitjana, en funció de l'àrea afectada
	Adobs nitrogenats -nitrícs	No afecta	No afecta	-	-
Millora de sòls sòdics	Esmenes de guix o clorur càlcic	Precipitació de carbonats	Segrest al sòl	Mitjana	Baixa, per la poca superfície de les àrees afectades
	Adobs en verd, esmenes àcides	Dissolució de carbonats	Emissió	Alta	
Millora de sòls àcids	Esmenes calcàries (Encalcat)	Precipitació de carbonats	Emissió	Alta si es tractessin tots els sòls àcids del planeta	Baixa en zones àrides i mediterrànies

Taula B10.7. Influència del maneig sobre el carboni mineral del sòl  
 Font: elaboració pròpia a partir de dades de Suárez 1999, 2002.

L'aplicació de fertilitzants acidificants en sòls calcaris provoca la dissolució de carbonats i l'alliberament net de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera, de l'ordre de 100 kg C ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup>, però que gairebé no afecta el reservori de CIS, ja que caldria vora d'un segle per a reduir un 1% del contingut de carbonats del sòl. Tanmateix, segons Suárez (1999) aquests processos no suposen fonts importants d'emissions a l'atmosfera.

Les esmenes càlciques i orgàniques són pràctiques comunes en la millora de sòls sòdics. L'aplicació de guix (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) o de clorur càlcic suposa la precipitació de CaCO<sub>3</sub> amb Ca forani i, per tant, segresten carboni al sòl. Per contra, l'aplicació de sofre, àcid sulfúric o adobs en verd promouen la dissolució dels carbonats i l'alliberament de CO<sub>2</sub> en quantitats elevades (dissolució de 400 – 800 kg CaCO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup>), però que no tenen un impacte important a causa de la superfície limitada on s'apliquen (Suárez 2002).

Les esmenes calcàries per augmentar el pH en sòls àcids comporten l'alliberament de carboni ja que desplacen la reacció mostrada a la figura B10.3 cap a l'esquerra. Fins i tot quan s'aplica CaO o Ca(OH)<sub>2</sub>, que no contenen carbonats, s'ha de considerar que aquestes esmenes ja han alliberat CO<sub>2</sub> durant la seva producció a partir de l'escalfament de la calcita. A Catalunya, la seva importància és limitada per la poca extensió dels sòls àcids.

En resum, de les taules B10.6 i B10.7 es desprèn que les possibilitats d'actuació sobre els processos del carboni mineral de cara al seu emmagatzematge o reducció d'emissió són minses, ja que els mecanismes de segrest més efectius són la dissolució de carbonats a escala regional, tant geològics (aquífers càrstics) com edàfics (descarbonatació de sòls a partir de certes altituds), sobre els quals la gestió del territori té poca capacitat d'actuació. En les zones més



àrides, la redistribució de carbonats en el sòl no suposa un emmagatzematge de carboni, ja que els materials parentals són calcaris i no hi ha segrest net de CO<sub>2</sub>. En les grans superfícies regades de Catalunya, la tendència desitjable d'optimització del reg disminuiria les dosis de rentat actuals i, per tant, reduiria la dissolució de carbonats.

L'aplicació d'esmenes, a causa dels efectes contraposats segons les condicions d'aplicació, la reduïda extensió on es duen a terme o la minsa magnitud dels fluxos, contribueixen en poca quantitat a l'emissió de GEH a partir del carboni inorgànic. En qualsevol cas, les pràctiques que milloren la qualitat del sòl i el seu potencial de producció de biomassa (reg, fertilització, aplicació d'esmenes, conreu de conservació) o la reforestació en certes condicions són les actuacions més efectives pel que fa a l'augment de la reserva de carboni orgànic del sòl i, per tant, és en aquest sentit que caldria orientar les polítiques de gestió (FAO, 2001).

#### **B10.2.2.6. Descripció de reservoris i fluxos**

##### **B10.2.2.6.1. Reservoris**

Les dades disponibles són, encara, fragmentàries, de diversa procedència i escasses per tenir una idea prou representativa de la quantitat de carboni emmagatzemada als sòls catalans. L'inventari de matèria orgànica dels sòls de l'Estat espanyol, endegat pel Ministeri de Medi Ambient, haurà d'intentar cobrir aquestes mancances.

A la taula B10.8 es presenten dades d'estimació dels reservoris de C en sòls de Catalunya corresponents a zones de domini forestal i agrícola. A tall d'exemple, inventaris de C orgànic en sòls agrícoles de la Garrotxa i Baix Empordà (4.300 ha) donen valors mitjans de 200 Mg COS ha<sup>-1</sup>, més elevats en sòls sobre materials detrítics terrígens per ser més profunds (Palou i Boixadera, 2002). En sòls forestals del Solsonès (2.100 ha), la mitjana és de 148 Mg COS ha<sup>-1</sup>. En aquest darrer cas no s'observen diferències substancials

entre els sòls de pastures i de boscos, la qual cosa s'ha atribuït al fet que la reforestació per abandonament encara no ha estat capaç de recuperar la matèria orgànica (Castelló, 1998).

En sòls de prats de muntanya pirinencs, García-Pausas et al. (2003) troben un rang de carboni total comprès entre 65 i 300 Mg ha<sup>-1</sup>, amb una mitjana de 153 Mg ha<sup>-1</sup>. A la zona de la Coma de Burg (Pallars Sobirà), que ocupa una extensió d'unes 3.000 ha de sòls forestals i de prats de muntanya, s'han mesurat continguts mitjans de 80 Mg COS ha<sup>-1</sup>. En les zones ocupades pel bosc fa més de 100 anys el contingut és més elevat (111 Mg COS ha<sup>-1</sup>), seguit del sòl de prats alpins i subalpins. Els continguts menors es troben a les zones de boscos recents (51 Mg COS ha<sup>-1</sup>) i sòls encara cultivats (31 Mg COS ha<sup>-1</sup>), fet que fa palesa la pèrdua de matèria orgànica en la transformació de bosc a prat i una recuperació parcial després de l'abandonament del conreu (Jiménez, 2004).

Aquestes dades estan d'acord amb els ordres de magnitud dels inventaris francesos, segons els quals els reservoris de C més pobres de França es troben a la regió de Llenguadoc-Rosselló, amb valors per sota de 40 Mg/ha (Expertise Scientifique Collective, 2002). Aquest inventari s'ha realitzat fins a 30 cm de profunditat i sense tenir en compte els horitzons orgànics.

A Catalunya, en parcel·les situades en zones restaurades després de la finalització de diverses activitats extractives, el contingut de COS en els primers 20 cm està comprès entre 0,65% i 2,24%, mentre que al sòl natural del voltant de les pedreres el contingut mitjà és de 3,97 (Ortiz i Alcañiz, 2001). Això equival a 22,8-58,6 Mg COS ha<sup>-1</sup> a les zones restaurades davant dels 79,4 Mg COS ha<sup>-1</sup> a les zones considerades de control. Aquestes dades poden servir per realitzar una primera aproximació als reservoris de carboni en les 3.800 ha restaurades, segons dades del Departament de Medi Ambient i Habitatge.

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

Zona	Usos dominants del sol	Superfície estudiada (ha)	Perfils (n°)	Gruix mitjà (cm)	COS (Mg ha <sup>-1</sup> )	CIS (Mg ha <sup>-1</sup> )	Observacions	Font
La Garrotxa i Baix Empordà	Agrícoles	4.300			200 (20-270)		Mapa sòls 1:25.000 Catalunya, DARP	Palou et al, 2002
Solsonès	Forestals	2.100	23	51	149 (13-585)	226,0 -614,2	Efectes canvi d'ús del sòl	Castello, 1998
Coma de Burg (Pallars Sobirà)	Forestals	3.072	47	55	81 (19-276)		Efectes canvi d'ús del sòl	Jiménez, 2004
Activitats extractives arreu	Matollars	100	27	33	13 (2-57)		Sense esmenes orgàniques	Alcañiz i Ortiz, 2003
Activitats extractives arreu	Matollars	300	57	20	19 (15-31)		Alguns amb adobs orgànics	Ortiz i Alcañiz, 2001
Litoral i Pre-Litoral calcarí	Forestal	50	9	20	51			Ortiz i Alcañiz, 2001
Isona	Agrícola cereals	1.200	42	20	28,8			Sabria, 1991
Berguedà	Agrícola cereals	1.400	87	20	32,6	70,4		DARP, 1991
Segarra	Agrícola cereals	12.450	249	20	31,8	110,8		DARP, 1990
Segarra	Agrícola cereals	7.100	71	20	24			LAF, 1994a
Vall del Corb (Urgell)	Agrícola cereals	11.450	229	20	29,6	134,6		DARP, 1997
La Cerdanya	Agrícola cereals	500	28	20	70,4	7,5		Sierra, 1987
La Cerdanya	Farratges i prats	2.500	100	20	72	1,0		Sierra, 1987
Pla d'Urgell	Agrícola regadiu	30.000	44	20	38,4		Adob orgànic	Torres, 1994
Pla d'Urgell	Agrícola regadiu	30.000	44	20	30,4		Adob mineral	Torres, 1994
Pla de Lleida	Agrícola regadiu	6.600	95	25	40		Adob orgànic	LAF, 1995
Pla de Lleida	Agrícola regadiu	6.600		20	32		Extensius de regadiu	LAF, 1995
Maresme	Agrícola regadiu	5.100	100	20	36,2			Virgili, 1994
Viladecans	Agrícola regadiu	2.000	50	20	37,9			DARP, 1988
Pla de Lleida	Agrícola regadiu	56.285		20	36,5	86,4	Fruita dolça	DARP, 1990
Pla d'Urgell i Segrià	Agrícola regadiu	30.000	93	25	25,6		Fruita dolça	LAF, 1994b
Camp de Tarragona	Agrícola regadiu	13.471	30	20	22,6	20,1	Avellaners	DARP, 1991
Alt Penedès	Agrícola seca	500	25	20	23,5	93,8	Vinya	DARP, 1991
Conca de Barberà	Agrícola seca	6.000	70	20	20,5	173,7	Vinya	DARP, 1991
Zones de muntanya	Pastures	126.547	18	25	56			MAPA, 2000

Nota: Les notes que fan referència al DARP, corresponen als estudis de zona corresponents a l'Inventari de Sòls de Catalunya i a l'any en què es dugueren a terme. Les del LAF, a estudis de sòls desenvolupats pel Laboratori d'Anàlisi i Fertilitat de Sidamón (Lleida).

Taula B10.8. Exemples de reservoris de carboni en sòls de Catalunya.

Font: recopilació de dades de treballs de l'Inventari de sòls del DARP i d'estudis locals de procedència diversa.

Una informació més precisa es pot obtenir a partir de mapes de sòls com els que s'estàn generant actualment a Catalunya, que tenen un nivell de detall més elevat. La taula B10.9 recull un resum sobre els continguts de carboni orgànic en funció del tipus de sòl dominant, fet que suposa disposar d'una informació més ponderada de la distribució del carboni orgànic en les diferents unitats cartogràfiques dels mapes de sòls. Cal aclarir que malgrat haver seleccionat dades amb valor estadístic i representatiu, en cap cas -llevat d'un parell- l'objectiu era estudiar el contingut de matèria orgànica amb relació al canvi climàtic, per la qual cosa el seu ús presenta certes limitacions. Els continguts són especialment baixos en els *entisòls* i moderats en la resta.

#### B10.2.2.6.2. Fluxos

En un estudi detallat en sòls forestals del Montseny i de Prades, s'han mesurat fluxos anuals mitjans compresos entre 75 i 122 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Piñol et al., 1995). Casals et al. 2000, analitzen la influència sobre l'eflux de CO<sub>2</sub> de la pedregositat d'un sòl mediterrani àrid de la zona de Maials. Estiarte et al. (2003) mesuren el flux de CO<sub>2</sub> en unes parcel·les experimentals del Garraf on es provoca un escalfament i un cert grau de sequera respecte a unes de control.

En 57 parcel·les situades en zones restaurades de pedreres, la respiració del sòl depèn molt del tractament de restauració utilitzat, tot i que en general no superen 1 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Ortiz i Alcañiz, 2001). Dins d'una mateixa activitat extractiva els fluxos són força variables, com per exemple a la zona restaurada de la mina a cel obert de Coll de Jou (Saldes) on el rang està comprès entre 290 i 1.174 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> mesures realitzades en un moment de màxima activitat biològica en el sòl. Tot això dificulta l'establiment de balanços d'emissions de CO<sub>2</sub> a partir del sòl. Considerant la superfície restaurada i la que està en explotació (unes 6.000 ha), fins i tot assumint que es recupera la mateixa superfície que s'explota anualment resulta en un balanç desfavorable per al segrest de C, tot i que es pot conside-

Subgrup	Mg/ha	n
Paleorthid	46,56	35
Calciorthid	37,60	25
Petrocalci Xerochrept	42,56	
Calcic Xerochrept	35,84	
Gypsic Xerochrept	44,32	
Fluventic Xerochrept	33,44	
Aquic Xerofluvent	36,48	
Typic Xerofluvent	31,20	48
Xerorthent	29,92	126
Torriorthent	23,84	35
RESUM PER ORDRES		
—Entisol	30,08	
—Inceptisol	38,24	
—Aridisol	36,96	

Taula B10.9. Contingut de carboni orgànic (Mg ha<sup>-1</sup>) en funció del tipus de sòl, a l'àrea regable del canal d'Urgell.

Font: elaboració pròpia.

rar que la majoria de sòls rehabilitats actuen com embornals.

La fertilització nitrogenada habitual sobre sòls calcaris també contribueix a les emissions. Per a una dosi de 100 unitats fertilitzants de N a un sòl calcari s'emeten de l'ordre de 150 kg de CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>.

#### B10.2.3. Cicle del nitrogen: processos, reservoris i fluxos al sòl

El sòl juga un paper clau en la regulació del cicle global del nitrogen. Conté la major part del nitrogen dels ecosistemes terrestres en formes orgàniques i és on es produeixen les transformacions a formes inorgàniques. D'aquestes, l'òxid nitrós (N<sub>2</sub>O), l'òxid nítric (NO) i l'amoniac (NH<sub>3</sub>) tenen, en bona part, el seu origen en activitats agràries i en determinats processos que es

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

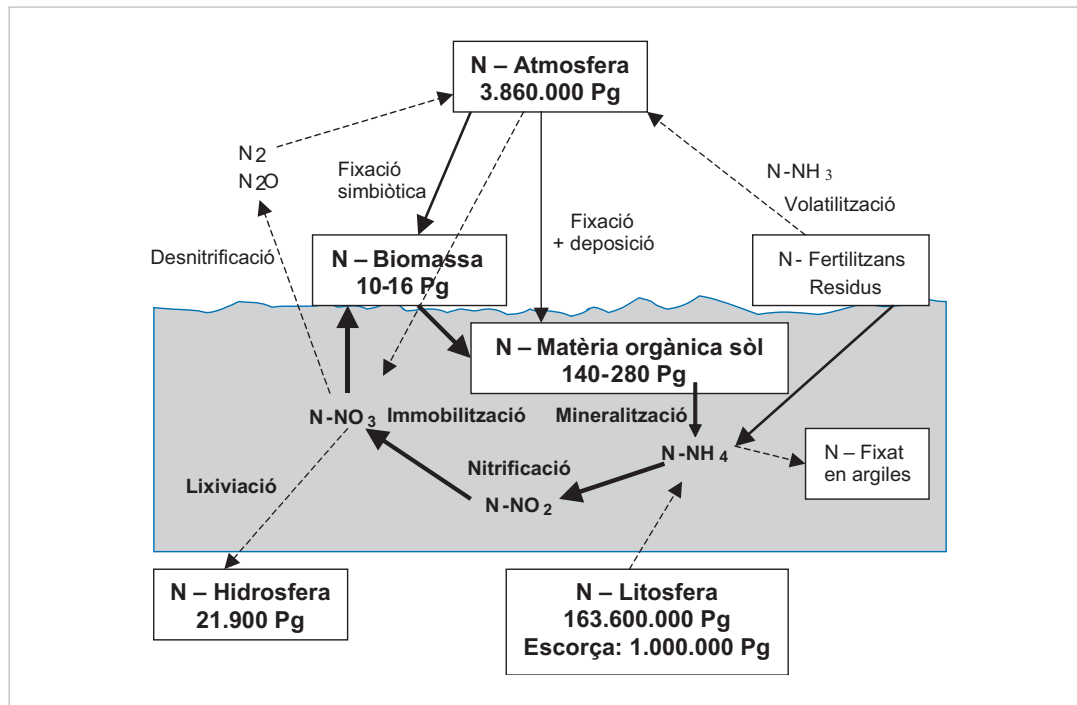


Figura B10.4. Cicle del nitrogen simplificat, amb dades sobre les estimacions dels principals reservoris. Font: Stevenson (1986) pel que fa als valors més baixos, i Batjes (1996) pel que fa als valors més elevats.

donen en sòls naturals. En els sistemes naturals és un cicle molt equilibrat, on les pèrdues són petites (figura B10.4).

Les activitats humanes han alterat significativament els fluxos, produint desajustos que es manifesten en forma de contaminació d'aqüífers i d'emissions antropogèniques de GEH. La fixació industrial de N atmosfèric en forma d'amoni i el seu ús com a fertilitzant, la utilització de combustibles fòssils, el reciclatge de residus orgànics rics en aquest element o la importació d'aliments d'unes regions a unes altres suposen unes transferències de nitrogen que desequilibren el funcionament natural del cicle.

#### B10.2.3.1. Formes i reservoris de nitrogen al sòl

Un 80% o més del nitrogen del sòl es troba formant part de la matèria orgànica i, per tant, de l'humus (Johnson, 1992). La mineralització afecta un 60-80% de les entrades anuals de nitro-

gen, depenent del tipus de matèria orgànica que s'hi incorpori, però sempre queda un romanent de N-orgànic associat a l'humus en formes molt estables. En sòls madurs aquest pot representar el 30% del que hi ha a les substàncies húmiques, és resistent a les hidròlisis àcides i té un temps de residència de l'ordre de segles. És, per tant, un procés d'estabilització química del nitrogen (Rovira, 2001). La composició d'aquest nitrogen no hidrolitzable encara no és ben coneguda. En canvi, el derivat de proteïnes i àcids nucleics és metabòlicament molt actiu i, per tant, està subjecte a una ràpida renovació. L'activitat biològica del sòl depèn en gran mesura de la disponibilitat d'aquest element.

Els sòls tenen també una certa capacitat de segrestar o immobilitzar N en formes inorgàniques. L'amoni pot quedar fixat entre les làmines de les argiles, substituint de forma estable al potassi o d'altres cations, fet que suposa un segrest

de N, tot i que no és un fenomen del tot irreversible. La immobilització depèn de la quantitat i tipus d'argiles que té el sòl (les il·lites i les vermiculites, per exemple, tenen una considerable capacitat de fixació). L'ús continuat d'adobs amoniacals pot conduir a la saturació de la capacitat de fixació d'amoni dels sòls.

La producció de GEH al sòl està molt condicionada per la quantitat i composició dels adobs aportats i per les condicions físico-químiques del mateix sòl. Es pot considerar que l'emissió de GEH nitrogenats és com una mena de vàlvula de seguretat del cicle del nitrogen en el sòl, que elimina l'excés d'aportacions, evitant que vagi a parar als aqüífers, molt sensibles a l'eutrofització.

#### **B10.2.3.2. Processos i transferència de nitrogen entre reservoris**

El cicle del nitrogen va associat, en moltes fases, al del carboni. Per això algunes estimacions globals dels reservoris de nitrogen s'han fet a partir dels continguts de carboni, utilitzant factors d'equivalència. Més recentment, s'han desenvolupat models basats en el propi cicle del nitrogen com el de Lin et al. (2000). A continuació s'apunten els principals processos implicats en la transformació del nitrogen al sòl (vegeu la figura B10.4), tot i que la seva descripció queda fora de l'abast d'aquest document:

- 1) Les entrades per fixació simbiòtica o lliure
- 2) La deposició atmosfèrica
- 3) Les aportacions de matèria orgànica i fertilitzants
- 4) La mineralització de les restes orgàniques que es dona en dues etapes: primer amonificació i, posteriorment, nitrificació
- 5) La immobilització en la biomassa microbiana o en l'humus
- 6) La desnitrificació fins a  $N_2$  o  $NO_x$
- 7) L'absorció per les plantes, que es pot considerar una extracció parcial
- 8) Les pèrdues per lixiviació
- 9) Les sortides per volatilització.

A Catalunya pocs sòls es poden considerar en una situació d'equilibri amb relació al cicle del N. En sòls agrícoles, les entrades de fertilitzants faciliten les sortides del sistema per volatilització o lixiviació, a més de les exportacions de la collita. Exemples ben coneguts són les contaminacions d'aqüífers per sobrefertilització (purins, adobs minerals, etc.). En sòls forestals, molts d'ells en estat de regeneració, la tendència és immobilitzar-lo en la pròpia vegetació o en la matèria orgànica del sòl.

A la taula B10.10 es presenten les intensitats dels fluxos de nitrogen corresponents als principals processos de transferència. Aquestes estimacions a escala mundial permeten conèixer la dimensió del problema, però tenen una utilitat molt limitada pel que fa a la gestió i a les polítiques d'actuació per mitigar els efectes sobre el canvi climàtic. A Catalunya s'han fet bastants estudis relacionats amb la dinàmica del nitrogen en boscos (Bonilla i Rodà, 1992; Serrasolsas et al., 1999; Avila et al., 2002), o en sòls agrícoles (Badia i Alcañiz, 1996; Forés, 1989; Garau et al., 1986; Garau i Felipó 1992), però n'hi ha pocs que tractin específicament les implicacions dels desajustos del cicle del nitrogen sobre el canvi climàtic (Saguer, 1997; Teira-Esmatges et al., 1998; Rodà et al., 2002). Poden servir d'orientació altres treballs realitzats a Europa sobre els fluxos de nitrogen en sòls agrícoles (Webb et al., 2000).

#### **B10.2.3.3. Emissions de gasos nitrogenats pels sòls**

L'IPCC (1997) recomana una metodologia que no sempre és fàcil d'aplicar per manca de dades. Les estimacions es basen en uns factors d'emissió per a cada activitat que generalment tenen una considerable incertesa. A escala europea s'estan fent propostes de models que milloren les prediccions actuals i permeten regionalitzar els càlculs per ajustar-los a unes condicions ambientals determinades. Així, Freibauer (2003) proposa un nou model per al càlcul de les emissions d'activitats agrícoles a Europa, compatible amb la metodologia de l'IPCC, que es basa en

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

factors d'emissió i regressions lineals que es multipliquen per les dades de cada activitat que genera GEH disponibles en les bases de dades dels estats membres de la UE.

A nivell del conjunt de sòls agrícoles d'Europa, la contribució dels GEH expressats com a equivalència en CO<sub>2</sub> suposen un pes específic del 89% pels òxids de nitrogen, davant d'un 11% pel CO<sub>2</sub> i un 1% pel CH<sub>4</sub> (Freibauer, 2003). Per tant, la gestió dels fertilitzants nitrogenats pot ser molt més efectiva i més viable que altres mesures en la mitigació dels efectes del canvi climàtic, especialment a l'Estat espanyol, que els darrers anys ha incrementat les seves emissions de N<sub>2</sub>O.

#### B10.2.3.3.1. Amoníac

Les activitats agrícoles i la ramaderia intensiva són les principals fonts d'amoníac a partir del

sòl. També els incendis forestals, les cremes prescrites o l'aplicació de residus orgànics com els fangs de depuradora i purins. De tota manera, com que l'amoníac es converteix ràpidament en NH<sub>4</sub><sup>+</sup> o és atrapat en forma d'aerosols, les concentracions atmosfèriques relativament elevades procedents de fonts agràries només es troben properes a les fonts (< 3 km) (Krupa, 2003). Per això, les emissions es transformen poc després en entrades de N a sòls de zones no massa allunyades. Hi ha, però, molta incertesa en les avaluacions de les emissions d'amoníac a partir dels sòls (Anderson et al., 2003).

La volatilització de nitrogen amoniacal en sòls és més important quan el pH és bàsic i hi ha una font de N-orgànic o d'amoní prop de la superfície. Les pèrdues poden ser molt variables depenent de la textura del sòl, de la forma nitrogena-

Compartiment	Entrades/sortides	Procés	Taxes (Tg/any)
Vegetació	Entrada	Absorció d'N	6.207
	Sortides	Producció de virosta	6.274
Matèria orgànica del sòl	Entrada	Acumulació de virosta	6.274
		Fixació d'N	211
	Sortides	Mineralització de virosta	3.544
		Mineralització d'humus	2.898
Sòl mineral	Entrades	Mineralització de virosta	3.544
		Mineralització d'humus	2.898
		Deposició atmosfèrica (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> i NO <sub>3</sub> )	116
	Sortides	Absorció vegetació	6.207
		Volatilització (NH <sub>3</sub> )	34
		Desnitricació (N <sub>2</sub> o NO <sub>x</sub> )	240
		Lixiviació (NO <sub>3</sub> )	5

Nota: no es consideren les perturbacions antròpiques.

Taula B10.10. Estimació de les taxes anuals de transferència de nitrogen entre els principals compartiments dels ecosistemes terrestres, a escala mundial.

Font: elaboració pròpia a partir de Lin et al., 2000.

da subministrada amb el fertilitzant i del moment de l'aplicació. Les pèrdues es redueixen molt per injecció de fertilitzants amoniacals o per l'enterrament dels adobs orgànics rics en nitrogen.

#### B10.2.3.3.2. Òxids de nitrogen

##### 1) N<sub>2</sub>O

Les activitats agràries són una font important d'emissions associada a les pràctiques de fertilització i les aplicacions d'adobs orgànics. En conjunt, l'agricultura dels països de la UE emet uns 0,84 Tg d'N<sub>2</sub>O l'any (Freibauer, 2003). Els sòls arenosos n'emeten més que els argilosos (Hellebrand et al., 2003). S'han mesurat pèrdues entre 0,4 i 5,2 kg N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup> en diferents conreus (Flessa et al., 2002), però són molt més altes en aiguamolls o prats hidròfils. Aquestes emissions poden representar entre un 0,5 i un 2,7% del nitrogen aplicat com a fertilitzant (Webb et al., 2000). En sòls tractats amb fangs d'indústria paperera com a esmena orgànica s'han mesurat emissions de N<sub>2</sub>O de 4,9 kg N ha<sup>-1</sup>, afavorides per l'addició de matèria orgànica làbil. L'increment d'ús de fertilitzants nitrogenats, per tant, augmenta les emissions globals de N<sub>2</sub>O, fet que pot contrarestar l'avantatge de la producció de biocombustibles d'origen vegetal respecte les emissions de CO<sub>2</sub> (ja que l'N<sub>2</sub>O contribueix unes 300 vegades més que el CO<sub>2</sub> a l'escalfament global, en un horitzó de 100 anys).

A Europa, els sòls agrícoles de clima atlàntic o subcontinental emeten menys N<sub>2</sub>O que els de les regions alpines (climes de muntanya) i de zones sub-boreals, on les glaçades hivernals, juntament amb els cicles de gel-desgel, afavoreixen les emissions (Freibauer i Kaltschmitt, 2002), fet que també es dona a bona part de Catalunya. Hi ha pocs estudis sobre les emissions d'N<sub>2</sub>O en sòls mediterranis. Arcara et al. (1999) obtingueren resultats moderats d'emissió en camps de la plana al·luvial del riu Po (Itàlia) fertilitzats amb purins.

A Catalunya, Saguer (1997) ha estudiat les pèrdues per desnitrificació en sòls agrícoles de l'Empordà (Mas Badia), a més d'altres de forestals, i posa de manifest la influència de la textura sobre les emissions d'N<sub>2</sub>O i l'efecte combinat del reg amb la fertilització nitrogenada. Teira-Esmatges et al. (1998), estudiant tres sòls agrícoles sotmesos a reg de la província de Lleida, trobaren pèrdues de 389 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> al Pinell, 144 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> a Barbens i 125 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> a Bellpuig. Aquestes pèrdues esdevenen quan el sòl té més d'un 70% de la porositat total ocupada per aigua (amb un contingut hídric més petit, per tant, les pèrdues són més reduïdes). El conjunt de pèrdues per desnitrificació representa entre un 1,7 i un 13,6% del nitrogen aplicat com a fertilitzant.

El model més recent (Freibauer, 2003) proposa diverses regressions per diferenciar les emissions dels sòls en funció de grans grups de climes i usos. Així a l'Estat espanyol (excepte les zones de muntanya) l'hi correspondria la següent:

$$\text{Emissió d'N}_2\text{O (kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}) = 0,6 + 0,002 \times \text{dosi de fertilitzant (kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}) + 12,7 \times \text{Corg (g kg}^{-1}) - 0,24 \times \text{Arena (g kg}^{-1})$$

L'error estàndard d'aquesta regressió és del 40-50%, però suposa una millora respecte a la metodologia de l'IPCC (1997). Independentment als ajustos que calgui fer, aquest procediment permet regionalitzar les emissions i, en últim extrem, hauria de permetre calcular-les en base a informació derivada dels mapes de sòls.

##### 2) NO

De forma similar al cas anterior, les emissions estan molt condicionades per l'aplicació de residus orgànics. Els valors d'emissió mitjans mesurats en sòls agrícoles dels EUA són de 69 ng N m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> durant els mesos d'estiu i representen el 60% del total anual (Roelle, 2002). Quan el sòl

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

està bastant sec, l'NO s'allibera durant el procés de la nitrificació, igual que una part de l'N<sub>2</sub>O (Garrido et al., 2002). Aquest fet és poc conegut i moltes vegades no es té en consideració en els balanços d'emissions.

#### B10.2.3.4. Entrades de compostos nitrogenats al sòl

##### B10.2.3.4.1. Deposició de gasos nitrogenats

La deposició atmosfèrica, per via seca o humida, de compostos nitrogenats i d'òxids de sofre, contribueix a l'acidificació del sòl. De la mateixa manera que es parla de càrregues crítiques d'acidesa i de contaminants, es pot parlar de càrrega crítica dels diferents gasos nitrogenats de l'atmosfera que retornen al sòl, que està relacionada directament amb l'acidificació (Tomlinson, 1991). Segons Krupa (2003), la deposició total d'N per via atmosfèrica pot situar-se en 5-10 Kg ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup> a les torberes i sistemes de la tundra, i en 10-20 kg ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup> als boscos boreals. A Catalunya s'han mesurat deposicions de 15-20 kg ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup> als alzinars del Montseny (Rodà et al., 2002). Actualment es considera que hi ha bastants ecosistemes forestals o comunitats naturals que estan saturats en nitrogen des del punt de vista de la regulació natural del sistema

Fangmeier et al. (1994) citen deposicions d'N-NH<sub>4</sub> d'uns 11 kg ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup> sota diverses cobertes vegetals. En els sistemes agrícoles, la deposició de N via atmosfèrica és equivalent a una fertilització.

Les entrades de nitrogen al sòl en forma d'òxids (NO i N<sub>2</sub>O) van associades a la deposició humida quan aquests reaccionen amb l'aigua. A Dinamarca s'han estimat unes entrades de l'ordre de 7 kg de N-NO<sub>x</sub> ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup>, bàsicament procedents de la crema de combustibles fòssils. Les entrades de nitrogen per la pluja en boscos del Solsonès s'ha estimat en 2,1 i 0,9 kg ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup> per nitrogen amoniacal i nítric, respectivament. Aquestes quantitats s'incrementen en 4,8 i 2,6 en travessar la capçada dels arbres, per la qual

cosa l'aportació total al sòl forestal és de 7,4 kg N ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup> (Orozco, 2003). Aquesta quantitat és retinguda per la vegetació, mentre que altres components són rentats del sòl, per la qual cosa en aquests ecosistemes el N seria encara limitant pel creixement de la biomassa (Poch, *com. pers.*).

##### B10.2.3.4.2. Entrades de nitrogen per fertilitzants i adobs orgànics

Davant de la importància en les emissions de GEH de sòls agrícoles, a continuació s'aporten estimacions globals de les entrades de nitrogen per adobat a sòls agrícoles en el conjunt de Catalunya.

Com es pot veure a la taula B10.11, les entrades de N procedent de la importació d'adobs minerals de síntesi és equivalent al N aportat per les dejeccions ramaderes. A més, cal tenir present que una part important del N dels residus ramaders prové de la alimentació amb pinsos importats.

#### B10.3. Usos del sòl i estimacions dels efectes del canvi climàtic

Aquest apartat se centra en els usos relacionats més directament amb el medi edàfic, és a dir, els agrícoles i els forestals. Cal recordar, però, que l'ús urbà o per vies de comunicació genera emissions importants de GEH, aspecte considerat en d'altres capítols d'aquest llibre. A la taula B10.12 es presenta un resum dels principals usos del sòl a Catalunya.

Material	Quantitat aportada Mg/any	Equivalent en N Mg/any
Adobs minerals de síntesi**		80.000
Fangs EDAR*	323.005	3.010
Compost*	215.782	4.628
Residus ramaders en origen**		80.000

Taula B10.11. Fertilitzants i residus aportats al sòl com a font de nitrogen.

Font: Junta de Residus, 2001 (\*) i MAPA (\*\*).



## El canvi climàtic a Catalunya El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic

Usos del sòl	Superfície 1997 (ha)	Variació 97-87	Superfície 1997 (%)	Diferència 97-87 (%)	MCSC 1993 (ha)
Aigües continentals (inclou neu)	14.985	-3.353	0,47	-0,10	15.947
Infraestructures viàries	24.370	17.295	0,76	0,54	15.500
Zones urbanitzades	118.377	37.532	3,69	1,18	100.322
Conreus herbacis de secà	482.715	-11.558	15,05	-0,33	1.105.043
Conreus de regadiu	261.733	2.009	8,16	0,08	
Fruiters de secà i vinya	306.102	-37.247	9,55	-1,14	
Prats supraforestals	69.634	-2.405	2,17	-0,07	129.513
Bosquines i prats	837.101	-3.512	26,11	-0,06	527.392
Bosc	982.749	14.909	30,65	0,52	1.218.527
Aiguamolls	3.649	-986	0,11	-0,03	2.629
Sorrals i platges	4.128	-1.175	0,13	-0,04	3.572
Zones nues o cremades	104.998	-18.737	3,27	-0,58	91.949
<b>Total</b>	<b>3.210.540</b>	<b>-7.228</b>	<b>100,13</b>	<b>-0,04</b>	<b>3.210.394</b>

Nota: a la taula, els conreus herbacis de secà corresponen a conreus totals per al MCSC.

Taula B10.12. Superfícies ocupades pels principals usos del sòl i la seva evolució entre 1987 i 1997.

Font: elaboració pròpia a partir dels mapes d'usos del sòl 1987, 1997 de l'Institut Cartogràfic de Catalunya, obtinguts d'imatges LANDSAT i del Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (MCSC) de l'any 1993 (DMA-CREAF, 2002).

Unes eines recents que poden ser molt útils per conèixer la potencialitat dels sòls de Catalunya a l'hora d'emmagatzemar carboni, són els mapes de sòls que va elaborant el DARP (<http://www.gencat.es/darp/sols.htm>), i el Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya DMA-CREAF (<http://www.creaf.uab.es/mcsc/>). A cada tipus de sòl o unitat cartogràfica se li pot assignar una capacitat de mitigació dels efectes dels gasos amb efecte d'hivernacle, així com un factor d'emissió determinat. Això permetria fer una primera aproximació basada en la realitat del territori català. Tot i ser més precís, el Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya de l'any 1993 no diferencia entre conreus de regadiu i de secà, aspecte molt important a considerar en la gestió de sòls agrícoles des del punt de vista dels efectes del canvi climàtic.

### B10.3.1. Estimacions del contingut de matèria orgànica dels sòls en funció de diferents usos i superfícies ocupades

La taula B10.13 (vegeu també la taula B10.8) posa de manifest que els continguts de C orgànic venen condicionats per l'ús, el tipus de sòl i l'altitud. D'aquestes dades es dedueix clarament l'increment notable secà/regadiu i també entre cultius, essent la pitjor situació la dels arboris de secà. En els diferents sistemes agrícoles considerats, la variació interna és similar (CV= 25-40%). Es disposa de poques dades de l'efecte d'algunes pràctiques agrícoles que incrementen el contingut de matèria orgànica, a més del reg. En el cas del no conreu en fruiters de regadiu, s'observa un cert increment, però la base de dades és insuficient. En el cas de l'aplicació d'adobs orgànics, els incre-

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

Ús o tipus de conreu	Superfície (ha) <sup>(1)</sup>	Rendiment <sup>(2)</sup> (Mg ha <sup>-1</sup> )	COS (Mg ha <sup>-1</sup> )	CIS (Mg ha <sup>-1</sup> )	Font	Observacions
<b>Cereals</b>	343.695					
Secà	257.396		28,8		Sabrià, 1991	Isona
			32,6	70,4	DARP, 1991	Berguedà
			31,8	110,8	DARP, 1990	Segarra
			29,6	134,6	DARP, 1992	Vall del Corb, Urgell També inclou vinya
			24		LAF, 1994	Segarra
			70,4	7,5	Sierra, 1987	La Cerdanya
Blat de moro	5.868	6.948				
Blat	64.124	2.704				
Ordi	172.322	2.481				
<b>Regadiu</b>	86.299	-	33,6	93,8	DARP, 1990	Extensions de regadiu. Pla de Lleida
			38,4		Torres (1994)	Orgànic. Pla de Lleida
			30,4		Torres (1994)	Mineral. Pla de Lleida
			40		LAF, 1995	Orgànic. Segrià
			32		LAF, 1995	Regadiu. Segrià
Blat	19.292	4.490				
Blat de moro	26.737	10.698				
Arròs	21.595	6.189				
<b>Alfals</b>						
Secà	19.026	21.548				
Regadiu	33.878	57.436				
<b>Altres farratges</b>	60.088		72	1,0	Sierra, 1987	Plana. La Cerdanya
<b>Hortícoles i tubercles</b>						
Secà	3.253		36,2			
Regadiu	22.497		37,9		Virgili, 1994	Maresme
			36,5		DARP, 1990	Viladecans
<b>Fruita dolça</b>	56.285		35,8	86,4	DARP, 1997	Regadiu. Pla de Lleida
					DARP, 1998	Pla de Lleida
<b>Cítrics</b>	8.486					
<b>Olivera</b>	128.102					
<b>Fruits secs</b>	92.665					
Ametllers	69.389					
Avellaners secà	8.969					
Avellaners reg	13.471		22,6	20,1	DARP, 1997	Camp de Tarragona
<b>Vinya</b>	64.625		23,5	93,8	DARP, 1991	Alt Penedès
			20,5	173,7	DARP, 1991	Conca de Barberà
<b>Prats naturals</b>	38.600					
<b>Pastures</b>	126.547		56		MAPA, 2000	

(1) Superfícies dels principals usos del sòl, DARP, 1986.

(2) Rendiment d'alguns cultius, DARP, 1996.

*Nota: Els valors han estat calculats considerant una densitat aparent de 1.400 kg/m<sup>3</sup> i 20 cm de fondària, que és com originalment es van prendre les mostres en la majoria dels casos. Les referències DARP i any corresponen als treballs de l'Inventari de Sòls de Catalunya. Les referències LAF a estu-  
dis del Laboratori d'Anàlisi i Fertililitat (Sidamón) Lleida.*

*Taula B10.13. Continguts de C orgànics (COS) i C mineral (CIS) en els horitzons superficials dels sòls a Catalunya, en funció del tipus d'ús agrícola  
Font: elaboració pròpia a partir de les fonts citades a la taula.*

ments són clars però s'ignora l'eficiència amb què han estat assolits. Un fet notable en aquest cas és que no s'observen increments per sota 20 cm (Torres, 1994). Una altre aspecte a remarcar és la magnitud del reservori de C mineral enfront del C orgànic. En qualsevol cas caldria disposar de xarxes de seguiment del carboni edàfic a llarg termini per poder millorar les estimacions sobre els canvis en aquest reservori (Falloon, 2003).

### B10.3.2. Establiment d'escenaris representatius de diferents usos agraris del sòl

A Catalunya hi ha uns models predominants d'agricultura i silvicultura que poden servir de referència a l'hora de proposar possibles actuacions de mitigació dels efectes del canvi climàtic (vegeu capítol B5 d'aquest llibre). Es poden considerar els següents escenaris en l'àmbit agrícola:

- 1) Conreu de conservació
- 2) Adobat mineral
- 3) Adobat orgànic
- 4) Reg
- 5) Conreu de conservació + adobat mineral
- 6) Conreu conservació + adobat mineral + adobat orgànic
- 7) Conreu de conservació + adobat orgànic
- 8) Conreu de conservació + adobat orgànic + reg
- 9) Crema de rostolls
- 10) Incorporació de rostolls.

La taula B10.14 recull els trets característics i les línies d'actuació possibles.

### B10.3.3. Models de predicció dels fluxos de carboni i nitrogen

Amb relació a la dinàmica d'elements relacionats amb els gasos amb efecte d'hivernacle (C i N), els models que els contemplen són essencialment models d'estudi de la matèria orgànica del sòl. Els canvis climàtic i d'ús i de gestió del sòl poden actuar sobre les taxes de mineralització i estabilització de la matèria orgànica. La capacitat de predir i avaluar aquests canvis és essencial per a la valoració de les conseqüències que poden tenir sobre el balanç d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle. En aquest context, s'ha plantejat la utilització de models matemàtics per predir els efectes de canvis ambientals, assajar escenaris de gestió o de canvis d'ús del sòl i, fins i tot, desenvolupar estratègies per mitigar els efectes del canvi climàtic.

Els principals problemes associats a la utilització de models es deriven de la seva especificitat. És a dir, sovint han estat parametritzats i validats per a un tipus de sòl, d'ús i de condicions climàtiques molt concretes. Per tal d'establir un marc de treball comú entre els investigadors que utilitzen aquests models i, en particular, validar-los en situacions diferents, a mitjans dels 90 es va

Ús del sòl	Àrea geogràfica	Precipitació (mm)	Temperatura (°C)	Tipus de sòl dominant	Producció gra/palla (t/ha)	Contingut m.o. al sòl (%)	Escenaris possibles
Cereals d'hivern	Depressió Central Catalana	500	13	Orthent	5,6/6,3	2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
Blat de moro	Depressió Central Catalana	350	14,5	Fluvent	12,3/24,7	2,1	1, 2, 3, 5, 7
Fruiters de secà	Depressió Central Catalana	350	13	Xerept		1,2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
Arròs	Delta de l'Ebre	550	16	Fluvents	7,3/-	3,2	2, 3, 4, 9, 10

Taula B10.14. Alguns escenaris agrícoles representatius a Catalunya per l'atenuació del canvi climàtic. Font: elaboració pròpia.

establir la xarxa SOMNET (*Soil Organic Matter Network*) (Smith, 1994). La SOMNET s'emmarca dins del Focus 3 del *Programa GCTE (Global Change and Terrestrial Ecosystems)* i participa, junt amb l'OECD, en el grup de treball de l'IPCC sobre metodologies per a la realització dels inventaris nacionals de CO<sub>2</sub>. Reconeix la matèria orgànica del sòl com a agent i pacient del canvi climàtic i es fixa com a objectius la validació de models matemàtics mitjançant l'ús de bases de dades procedents d'experiments de llarga durada, així com la generació de models de simulació del comportament de la matèria orgànica del sòl (GCTE, 2002).

En els seus inicis, la SOMNET va disposar de 12 bases de dades, que corresponien a diferents experiments a llarg termini desenvolupats en diferents usos del sòl (agrícola, forestal, pastures), zones climàtiques i pràctiques de gestió. Dels nou models disponibles inicialment, només quatre van poder simular tots els usos del sòl per als quals existien dades (RothC, NCSOIL, CENTURY i SOMM). A aquest grup es podien afegir altres models que van presentar una bona adaptació a les bases de dades disponibles (DAISY, CANDY i DNDC) (GCTE, 2003a). Les bases de dades de la SOMNET han estat utilitzades, també, per avaluar el potencial de segrest de carboni dels sòls d'Europa. Els estudis efectuats indiquen un potencial de segrest de carboni dels sòls agrícoles que correspon aproximadament a un 10% de les emissions europees anuals.

Actualment, SOMNET compta amb bases de dades corresponents a 120 experiments de llarga durada, distribuïts arreu del món, i més d'una trentena de models aplicables (GCTE, 2003b). Les bases de dades són utilitzades, entre altres, per parametritzar i validar els models disponibles per a diferents usos del sòl, pràctiques de gestió i característiques climàtiques. Així, aquests models poden ser utilitzats posteriorment per a la simulació d'escenaris concrets i valorar els efectes dels canvis en els usos i la gestió del sòl.

La utilització de models matemàtics ha ressaltat que l'augment de temperatures provoca un increment en la mineralització de la matèria orgànica del sòl (Lomander et al., 1998; Reichstein et al., 2000; Fang i Moncrieff, 2001), efecte que també pot ser produït per determinades pràctiques agrícoles, com el monocultiu (Huggins et al., 1998) o el guaret continu (Mikhailova et al., 2000). Aquests factors que incrementen la mineralització de la matèria orgànica i, en conseqüència, l'emissió de GEH, poden ser compensats per pràctiques de conreu com la llaurada mínima, la fertilització del sòl i la incorporació de les restes del cultiu, tal com mostren els resultats obtinguts per la modelització (Huggins et al., 1998).

En aquest sentit la fertilització mineral, combinada amb fems i adobs minerals, sembla que afavoreix un segrest de carboni més gran que no pas l'adobat estrictament mineral o orgànic (Powlson et al., 1998) i que l'ús de residus estabilitzats, com el compost, presenta una mineralització més petita que els residus no estabilitzats d'origen animal o vegetal (Thuriès et al., 2001). Aquests resultats estan d'acord amb els obtinguts per Evrendilek i Wali (2001), que afirmen que les incorporacions de compostos de carboni constitueixen la principal font de control de la quantitat de matèria orgànica al sòl. No obstant això, la certesa d'aquesta afirmació sembla que pot tenir un límit en boscos madurs (Foster i Morrison, 2002).

Malgrat els esforços realitzats, generalment en el marc de SOMNET, per a la validació de models matemàtics sobre la dinàmica del carboni i del nitrogen en els sòls, aquests models han estat poc aplicats als sòls i a les condicions climàtiques de Catalunya. Rovira (2001) ha demostrat recentment la capacitat dels sòls mediterranis per emmagatzemar carboni, tot utilitzant un model que simula processos de transport i la redistribució vertical de matèria orgànica, una de les limitacions que presenten habitualment els models que pretenen extrapolar resultats pun-

tuals a la totalitat del perfil o del paisatge (Pennock i Frick, 2001). Adequant-se a les condicions climàtiques de Catalunya, Sabaté et al. (2002) han desenvolupat el model GOTILWA+, que reconeix l'important efecte de les relacions hídriques i, per tant, de les sequeres mediterrànies com a factor limitant del desenvolupament dels ecosistemes i de la dinàmica del carboni (vegeu el capítol B9).

La informació que aporten tots aquests models és útil per visualitzar els processos edafogènics que afecten els cicles del C i l'N. La integració de la informació és objecte de treballs més amplis com el *Global Carbon Project* (Canadell et al., 2003).

#### **B10.3.4. Efectes del canvi d'ús sobre els fluxos i reservoris**

L'aforestació de sòls agrícoles és un dels canvis d'ús més estudiats en els darrers anys. S'ha demostrat que aquesta transformació redueix les emissions de CH<sub>4</sub> i N<sub>2</sub>O (Ball et al., 2002), probablement per la immobilització de matèria orgànica en formes estables (Ingram i Fernandes, 2001).

En sistemes agraris, també s'ha demostrat que la transformació d'agricultura convencional a orgànica redueix les emissions de GEH per unitat de superfície, malgrat que aquesta reducció no és aparent en termes d'emissions per unitat de producció (Flessa et al., 2002). Cal tenir en compte, però, que els sòls rics en matèria orgànica poden presentar pics d'emissions de GEH a causa d'alternances d'humectació-dessecació o de gel-desgel (Priemé i Christensen, 2001), condicions –sobretot les primeres– que no són estranyes a Catalunya. Aquestes emissions són molt més importants en sòls agrícoles que no pas forestals (Teepe et al., 2000).

Una possible via per fomentar el segrest de carboni i de nitrogen al sòl i, per tant, reduir les emissions netes de GEH, és la utilització d'esmenes orgàniques per a la recuperació de sòls de-

gradats. Aquesta pràctica, malgrat que utilitza residus orgànics fàcilment mineralitzables, es tradueix en un increment dels continguts de matèria orgànica del sòl i, per tant, en la immobilització de quantitats apreciables de C i N (Navas et al, 1999; Ortiz i Alcañiz, 2001).

Guo i Gifford (2002) han recopilat els resultats obtinguts en més de 70 treballs publicats en relació als efectes del canvi d'ús del sòl sobre l'emmagatzematge de carboni. Malgrat les importants diferències metodològiques en aquests tipus de treballs, que fan que els resultats que s'han revisat hagin de ser presos amb precaució, els autors conclouen, entre d'altres aspectes, que la transformació de pastures a pinedes implica pèrdues en la quantitat de carboni emmagatzemat. Passa el contrari en la transformació a boscos de fulla ampla, on el canvi cap a cultius implica una reducció d'un 50%, aproximadament, especialment en els horitzons més superficials. Quan aquest ús reverteix a plantacions o a boscos secundaris, es produeix una recuperació notable de la quantitat de carboni emmagatzemada. Els resultats més clars d'aquest estudi es mostren a la figura B10.5.

#### **B10.4. Efectes del canvi climàtic sobre el sòl**

A partir de les previsions d'increment de temperatura i de modificacions del règim de precipitacions citades al darrer informe de l'IPCC (2001), és molt difícil poder fer un pronòstic sobre el grau d'afectació a què estaran sotmesos els diferents sòls de Catalunya, amb diversa sensibilitat o vulnerabilitat als probables canvis, i més encara si considerem la gran variabilitat a escala regional o local en què poden produir-se en un país d'una orografia tan accidentada com és Catalunya. Tanmateix, la fragmentació del territori per la densa xarxa viària o la forta urbanització que hi ha en algunes zones i els canvis en els seus usos poden tenir un paper més rellevant sobre els sòls que el mateix canvi climàtic (i, en molts casos, agreujar-ne les conseqüències).

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

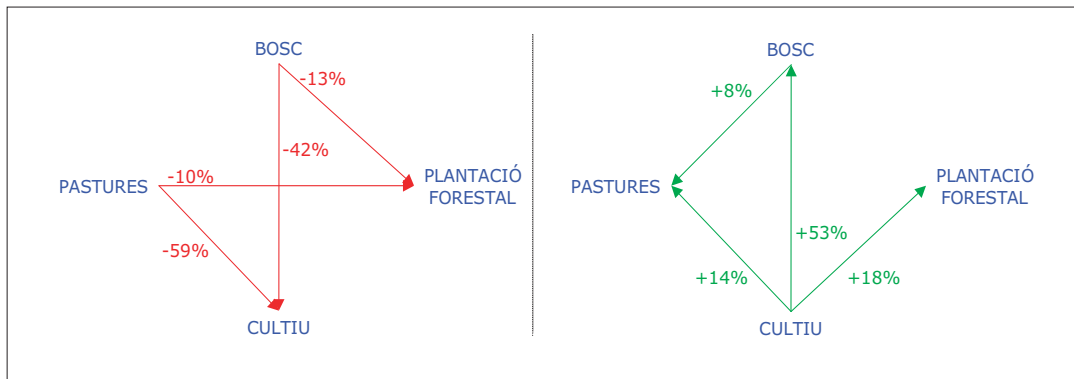


Figura B10.5. Principals efectes dels canvis en els usos del sòl sobre l'emmagatzematge de carboni. A l'esquerra de la imatge, en vermell, s'han dibuixat les transformacions que provoquen una reducció en els continguts de carboni, mentre que a la dreta, en verd, les que generen increments en la quantitat de carboni emmagatzemada.

Font: elaboració pròpia a partir de Guo i Gifford (2002).

#### B10.4.1. Modificacions dels règims de temperatura i humitat del sòl

La majoria dels processos físics, químics o biològics que es realitzen en el sòls (vegeu taula B10.1.) tenen una cinètica molt sensible als règims d'humitat i de temperatura, però atesa la capacitat esmorteïdora que té un sistema tan complex com és aquest, és molt probable i, per tant, previsible que la resposta tingui lloc molt lentament. Per arribar a condicions d'equilibri, els processos edàfics necessiten temps, però s'ha demostrat que existeix una gran variabilitat temporal, des de minuts fins a milers d'anys (Amacher, 1991). Tanmateix, per a la formació i diferenciació d'alguns horitzons molt freqüents en els sòls de Catalunya també calen milers d'anys (Alcañiz et al., 2005). Previsiblement, els processos biològics del sòls seran els més afectats.

A grans trets, pot suggerir-se la probabilitat que es produeixin les modificacions següents en alguns ambients: en aquells indrets on es redueixi (o simplement es mantingui) el règim de precipitacions, es pot incrementar l'aridesa, fet que afavorirà l'erosió i/o la salinització dels sòls. Aquest darrer supòsit es produiria en els sòls que s'hagin originat sobre materials salins o es trobin localitzats en zones afectades per sobre-exploatació d'aqüífers que han sofert intrusions

marines. El fet que es produís algun d'aquests processos tindria repercussions sobre la coberta vegetal, que es reduiria, i com a conseqüència disminuiria el contingut en matèria orgànica dels sòls i la biodiversitat edàfica. Aquesta seqüència de canvis conduirien els sòls cap a un estadi de desertificació. En la figura B10.6 es representa el conjunt de propietats del sòl que es poden veure afectades en el temps per les modificacions associades al canvi climàtic.

Un impacte previsible del canvi climàtic sobre els sòls mediterranis és la pèrdua de matèria orgànica per increment de mineralització i disminució de les aportacions de la vegetació. Atès que molts dels sòls de Catalunya ja en són pobres, aquesta pèrdua pot tenir efectes en cadena sobre propietats físiques com l'estabilitat de l'estructura, el risc d'erosió o la disminució de les taxes d'infiltració, entre altres.

#### B10.5. Gestió del sòl per atenuar els efectes del canvi climàtic

La gestió del sòl va més enllà del que és el conreu dia a dia, i té a veure molt amb els canvis d'ús a un termini mitjà i llarg que poden influir en el segrest de C, com per exemple va succeir amb els canvis lligats a l'expansió del cultiu de la vinya a finals segle XIX, l'abandonament poste-

rior, el canvi a pastures i boscos de moltes de les terres de la muntanya mitjana en la segona meitat del segle XX, i les crisis d'incendis forestals dels darrers 25 anys, que han creat unes orientacions del flux de C cap el sòl que és bàsic considerar abans que tot, i que també són gestió.

De la mateixa manera, els canvis en la forma de treballar el sòl (període 1950-1960, introducció de la maquinària; període 1990-2000, expansió del cultiu mínim, manteniment de la coberta del sòl amb herbicides, etc.) i en la fertilització (període 1950-60, expansió dels adobs minerals; anys 80, ramaderia intensiva) conformen el marc d'uns processos –encara en curs– que determinen l'actual balanç d'emissions de C i N a l'atmosfera. Per tant, l'efecte del canvi d'ús va molt més enllà, i els seus efectes es deixen sentir en períodes de temps molt llargs abans no s'assoleixen noves situacions d'equilibri en el contingut de C orgànic al sòl.

### B10.5.1. Grans línies d'actuació

Cal tenir una visió holística d'aquesta gestió del sòl, en diversos aspectes:

- 1) Els sistemes agraris no estan isolats, sinó que interaccionen amb el seu entorn més immediat. Per exemple, el grau de reciclatge a través del sòl de les matèries orgàniques dels RSU i fangs de depuradores afecta molt el balanç d'emissions de CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>O. Caldria valorar en aquest cas, per exemple, el resultat de portar-los a l'abocador.
- 2) Dins d'un sistema agrari concret, augmentar el contingut de C al sòl o reduir les emissions no poden ser mai un objectiu absolut, sinó que caldrà combinar-ho amb objectius productius i econòmics.
- 3) Les estratègies de gestió de residus orgànics presentades com alternatives per a la lluita contra el canvi climàtic han de ser avaluades de manera global (per exemple, el compostatge).

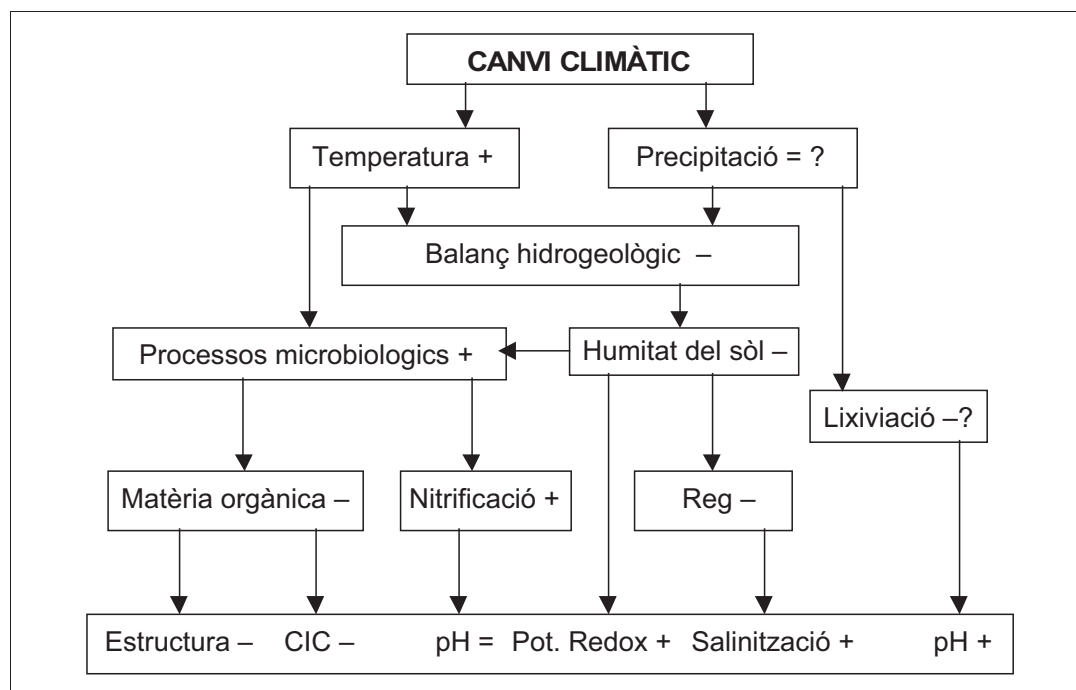


Figura B10.6. Seqüència d'esdeveniments que el canvi climàtic pot ocasionar en els sòls. Els signes indiquen la possible tendència del procés afectat (+ increment, - pèrdua o disminució).

Font: modificat a partir de Stigliani et al., 1991.

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

4) Els efectes finals de moltes pràctiques agràries de gestió del sòl que afecten al canvi climàtic són, en molts casos, de resultats ambientals contradictoris. Caldrà avaluar i valorar els resultats globals assolits.

#### **B10.5.2. Minimització de les emissions de GEH i optimització del segrest de carboni**

Partint de la revisió realitzada fins ara, l'estratègia d'atenuació del canvi climàtic a través de la gestió del sòl passa per maximitzar l'acumulació de C orgànic al sòl i minimitzar les emissions d' $N_2O$  i  $CH_4$ .

Les possibilitats d'acumular C mineral al sòl, tal com s'ha posat de relleu anteriorment, són incertes, d'una magnitud desconeguda, si bé presumiblement escassa, i difícilment gestionables. És per això que no s'inclouen en aquest apartat, per més que en algun moment s'hi faci referència.

##### **B10.5.2.1. Minimització de les emissions d' $N_2O$**

La contribució dels sòls a l'emissió total d' $N_2O$  és del 90%. Per una altra banda, les quantitats emeses encara no són del tot conegudes, tot i que en general es poden relacionar amb les quantitats totals d'N aplicades en una determinada superfície.

Els factors clau que controlen els processos d'emissió d' $N_2O$  estan lligats a:

- L'existència de condicions reductores, a la totalitat del sòl o en microllocs o, si més no, continguts d'aigua que superin el 15% de l'espai de porus del sòl.
- L'abundància de nitrats com a substrat per a la desnitrificació.
- La matèria orgànica fàcilment disponible.

Les possibilitats d'actuació se centren, doncs, en:

- Utilitzar el nitrogen aplicat al sòl de la forma més eficient possible, evitant l'acumulació excessiva de nitrats al sòl.

- Maximitzar l'eficiència en l'ús de l'N dins dels sistemes agraris, assegurant el màxim de reciclatge.
- Gestionar el reg i el drenatge de manera combinada amb la fertilització de manera que siguin mínimes les situacions que condueixen a la desnitrificació.

Certes pràctiques agràries que en una primera aproximació podria semblar que afavoreixen la desnitrificació ( $N_2O$ ) –com, per exemple, adob mineral vs adob orgànic, reg a tesa vs reg localitzat, fems compostats vs purins– requereixen una curiosa avaluació en què es tinguin en compte aspectes temporals, espacials i de globalitat del procés.

Algunes pràctiques agràries, com el reg, que són tingudes com un dels factors de desnitrificació, són bàsiques per incrementar la productivitat i segrestar C al sòl. D'altra banda, alguns estudis realitzats indiquen que les emissions d' $N_2O$  a partir de sistemes de reg no són necessàriament més elevades que les que es donen a partir de sistemes agraris en climes que no necessiten reg i, fins i tot, en sòls no cultivats (no adobats) en zones més humides. Tot i això, la incertesa de la magnitud de la desnitrificació i l'extensió d'aquesta (fins a  $N_2$  o fins a  $N_2O$ ) és gran.

Pel que fa al cultiu de l'arròs, important en algunes àrees catalanes, genera unes elevades taxes de desnitrificació, però és extremadament complicat adoptar mesures per disminuir-les sense afectar greument altres aspectes ambientals importants. La presència de sulfats en aquest sòls pot contribuir a reduir-hi les emissions. La contribució a la desnitrificació del cultiu de l'arròs, és majoritàriament en forma de  $N_2$ , de manera que la seva rellevància com a cultiu contribuïdor a l'efecte d'hivernacle s'ha de modular en funció de la gestió de l'aigua i de la fertilització que es fa.

##### **B10.5.2.2. Optimització del segrest del carboni**

La magnitud de l'acumulació de C orgànic al sòl depèn de la magnitud de les entrades, que cal maximitzar, i de la minimització de les sortides.



Els continguts actuals de C orgànic de molts dels nostres sòls reflecteixen unes condicions d'equilibri lligades a un balanç *input-ouput* per a uns determinats règims d'humitat o temperatura i per a unes certes pràctiques de gestió. Aquests continguts totals de C orgànic són més baixos que en altres indrets més freds i humits a causa del règim d'humitat i temperatura naturals del sòl.

En bona part de Catalunya, el factor limitant per a la producció de biomassa que posteriorment s'humificarà és la disponibilitat d'aigua i això tant en sòls cultivats com en sòls que tenen una vegetació «natural». En aquest sentit, la introducció del reg és bàsica per incrementar l'entrada de biomassa al sòl i permetria augmentar el contingut de C orgànic.

En la línia de les entrades, cal parar atenció al destí que té la biomassa produïda. Moltes vegades és exportada, per diverses raons, com a subproducte de poc preu i no és retornada al sòl; en altres es dedica a combustible. En qualsevol cas, el destí d'aquesta biomassa s'ha d'avaluar curosament, també des del punt de vista del segrest del C. Finalment, és interessant analitzar el retorn d'altres materials humificables -com els residus orgànics urbans- al sòl, ja que poden contribuir a incrementar-hi el contingut de C orgànic.

També és interessant analitzar la qualitat de la virosta, ja que més qualitat pot significar més quantitat de C orgànic estable. Com a norma general, això és vàlid per la biomassa més lignificada i, per tant, una de les estratègies és permetre -sempre que sigui possible- que la vegetació arribi a aquest estadi abans d'incorporar-la al sòl.

En la gestió de la vegetació natural -des del punt de vista del segrest del C- interessen més aquells sistemes que tendeixen a acumular més C a l'interior del sòl, en detriment dels que ho fan en la biomassa aèria, més susceptible de passar a l'atmosfera a causa d'un incendi.

Els sòls amb més capacitat, pel que fa al segrest de C, són els de textura fina, amb uns continguts de C més baixos i a on es produeix un canvi que afavoreix l'acumulació de C. Per contra, en sòls que ja tenen un contingut elevat de C per les seves condicions edafoclimàtiques, és més difícil aconseguir-hi increments significatius de C.

El treball del sòl juga un paper fonamental en la mineralització de la matèria orgànica. Diversos autors han observat com el treball freqüent del sòl provoca una forta mineralització. En les condicions semiàrides que presenta per Catalunya, per tant, si el que es vol és acumular C orgànic cal reduir el treball del sòl al mínim possible.

De tot això es desprèn l'interès per les tècniques de no conreu, conreu mínim, etc. (conreu de conservació). El seu potencial és elevat, com ho posen de relleu nombrosos estudis. Partint de dades no publicades, facilitades per Cantero, sobre els diferents camps d'assaig que la UdL-IRTA té a la Segarra per estudiar els efectes del conreu sobre la matèria orgànica del sòl, es poden apuntar aports de l'ordre de 500 kg COS ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup> (sembra directa). Aquest valor es redueix a uns 170 kg per conreu mínim si es compara amb l'estàndard actual, que és un conreu de cultivador i subsolador. Si la comparació es fa a partir de la tècnica anterior, de vertedera i cultivador, aquests valors s'incrementen notablement.

Als secans àrids del Segrià, Tarragó et al. (1996) van observar -de manera similar a Cantero- com la sembra directa produeix una estratificació clara de la matèria orgànica, amb increments notables en superfície. En el conjunt del sòl, però, aquesta diferència no és evident. El que sí hi ha són diferències clares respecte al guaret químic amb sembra bianual, on l'acumulació de C orgànic és de l'ordre d'uns 350 kg C ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup>, posant així de relleu la importància del retorn de la biomassa al sòl. Aquestes tècniques tenen en certs casos una elevada dependència dels herbicides, però també hi ha la possibilitat de

dur-les a terme, almenys en part, per mitjans mecànics.

El segrest del C orgànic al sòl és més o menys permanent en funció del seu grau d'integració amb la matèria mineral. D'aquí la importància de la textura del sòl. S'ha de tenir present que aquest segrest de C al sòl és més intens als primers anys, i disminueix amb el pas del temps. Alguns autors han afirmat que la formació de microagregats és un procés tan important com la fotosíntesi. Sense caure en aquests extrems, però, aquesta forma de segrest físic representa un segrest a molt llarg termini.

A un altre nivell, el fet que molts dels sòls catalans tinguin un llarg historial de cultiu permet pensar que el C orgànic que contenen es troba en formes molt estables i, per tant, no és probable una ràpida descomposició d'aquestes davant, per exemple, el canvi climàtic. A aquest fet hi contribueix l'abundància d'una gran quantitat de Ca al sòl, que fa més estables els agregats i els compostos húmics.

En general, en totes aquelles pràctiques agràries que afavoreixin la creació de biomassa s'ha de considerar si el que es busca és el segrest del C orgànic, no perdent de vista que en les condicions climàtiques de Catalunya, de subhúmedes a àrides, la producció de biomassa en termes d'aigua té uns costos més elevats que en altres indrets més humits, com per exemple al nord d'Europa.

El reciclatge i el tractament o compostatge de residus redueixen l'emissió neta de gasos amb efecte d'hivernacle si es compara amb l'abocament de residus, a causa de la reducció d'emissions dels abocadors clàssics. Tanmateix, aquestes emissions es poden reduir millorant el disseny dels abocadors, on s'afavoreix l'oxidació o la recuperació del metà. A més, el segrest de carboni és màxim en els abocaments en condicions anaeròbiques, comparat amb l'aplicació de compost al sòl, que es mineralitzen més ràpidament.

La reducció màxima d'emissió de gasos s'assoleix quan es preseleccionen els residus en origen i es reciclen, es composten o es digereix anaeròbicament la resta. Si això no és possible, l'abocament sota condicions òptimes ofereix taxes d'emissió semblants. La incineració amb producció d'energia només representa una reducció d'emissió quan pot substituir energia procedent de combustibles fòssils (Smith et al, 2001).

En un últim nivell es poden situar pràctiques més radicals i que hom pot qualificar de conreu de C orgànic al sòl:

- El treball del sòl per enterrar horitzons on s'ha acumulat el C orgànic.
- El cultiu de plantes per a biomassa, que s'enterrarà al sòl.
- L'aplicació de polímers per estabilitzar la matèria orgànica.

La seva viabilitat requereix una avaluació acurada. La seva promoció es pot associar a mesures agroambientals lligades, o no, a la Política Agrícola Comunitària (PAC).

A nivell forestal, cal no sobreestimar la potencialitat del sòl per emmagatzemar carboni. Si bé tenim un predomini de boscos joves que fixen C i aporten matèria orgànica al sòl, no està tan clar que aquesta pugui quedar estabilitzada durant períodes llarg de temps, atesa la considerable activitat biològica dels sòls mediterranis. La producció d'humus és lenta i els seus efectes es veuen a llarg termini. El principal factor limitant dels sòls forestals està en la lenta incorporació de la matèria orgànica als horitzons minerals, on pot quedar protegida un termini més llarg. Rovira i Vallejo (2002) indiquen el limitat transport vertical de carboni des de la superfície cap a l'interior dels horitzons A en sòls forestals mediterranis. Els sòls forestals d'alta muntanya estan ja en una situació propera a l'equilibri orgànic, de manera que no són embornals importants a mitjà termini. Cal diferenciar les zones d'expansió del bosc sobre camps abandonats,

on sí es pot incrementar la matèria orgànica del sòl.

L'aforestació amb *Pinus radiata* en diferents conreus abandonats ocasiona un segrest de C de 100 kg any<sup>-1</sup> en els 5 primers cm del sòl. L'enriquiment en C és molt superior en la virosta, amb valors d'entre 190 i 410 kg ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup>, respectivament, en antics conreus de cereals i de vinya. Les diferències s'atribueixen al millor estat en elements nutritius dels antics sòls de vinya. Els diferents models emprats per quantificar aquestes estimacions (Romanyà et al., 2000) permeten afirmar que en 20 anys el potencial de segrest serà d'entre 700 i 950 kg de C per hectàrea i any, valors més importants que els que s'obtidrien en boscos autòctons de *Quercus ilex*.

Els incendis forestals suposen un retorn ràpid de carboni a l'atmosfera però, en contrapartida, deixen un residu de carbó que representa un carboni altament recalitrant que quedarà molt de temps en el sistema. A Catalunya, la importància d'aquest fenomen no ha estat, encara, prou ben estudiada.

#### B10.5.2.3. Minimització de les emissions de metà

A Catalunya, les àrees de producció de metà a partir del sòl són els arrossars i els aiguamolls, i els principals factors de control semblen ser l'existència de perllongades condicions de reducció, força elevades, i la disponibilitat de C orgànic làbil.

Les mesures de control s'haurien d'adreçar als arrossars, ja que per altres aspectes ambientals es considera que la recuperació dels aiguamolls és bàsica. En els arrossars aquestes mesures s'haurien d'adreçar al control del règim hídric, disminuint les condicions de reducció, i a la disminució de les disponibilitats del C làbil.

Cal recordar, també, que els sòls forestals són eficients embornals de CH<sub>4</sub> com a conseqüència dels bacteris metanotròfics que contenen.

Pràctica
<ul style="list-style-type: none"> <li>Incrementar les entrades de materials orgànics de qualitat al sòl (restes de collita, fems, etc.), afavorint la productivitat mitjançant bones pràctiques de reg, fertilització, etc.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximitzar el retorn de residus orgànics humificables al sòl.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Afavorir la producció de biomassa que segresti més C per unitat de superfície.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Primar les aportacions de material humificable en aquells sòls on el segrest sigui més gran.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Gestionar el bosc per assegurar el màxim de matèria orgànica al sòl en detriment de la biomassa aèria.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimitzar el treball del sòl, adoptant tècniques de no conreu, conreu mínim, conreu de conservació, etc.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Revegetació d'àrees marginals i denuadades.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Permetre la instal·lació de vegetació herbàcia (natural o sembrada), sempre que sigui possible, especialment en els cultius arboris.</li> </ul>

Taula B10.14. Propostes per optimitzar el segrest del C al sòl.  
Font: elaboració pròpia.

#### B10.5.3. Normatives i estratègies d'actuació

La Comissió Europea ha preparat estratègies d'actuació sectorials i transversals per a la prevenció, protecció i conservació del medi ambient i moltes d'elles s'han convertit en normatives de compliment obligatori per part dels estats membres, els quals han fet les transposicions pertinents per adaptar-les al règim legislatiu corresponent. El fet que Catalunya hagi rebut un traspàs important de competències ha estat motiu que s'hagi generat també molta legislació.

L'annex 1 recull, de forma abreujada, la normativa generada per la Comissió Europea que afecta els sòls en allò que fa referència directa o indirecta al canvi climàtic. Per la seva actualitat es pot destacar la Comunicació de la Comissió titulada *Cap a una estratègia temàtica per a la protecció del sòl* (COM/2002/179 final), on s'apunten les principals amenaces actuals al sòl, algunes de les quals tenen relació amb els possibles efectes del canvi climàtic.

### B10.6. Conclusions

Per poder fer un inventari de C en el sòl i de les seves emissions de GEH cal integrar informació molt dispersa, heterogènia i incompleta, de manera que les estimacions actuals són bastant incertes. Tot i la informació de sòls disponible i els estudis realitzats fins ara en el camp de l'agricultura i el medi ambient, pocs tenen l'orientació necessària per donar resposta a les necessitats de predicció dels efectes del canvi climàtic sobre el sòl. D'altra banda, la important diversitat de sòls a Catalunya limita la validesa de les estimacions globals de fluxos de GEH que no tenen en compte aquest fet i posa de manifest la necessitat de completar els inventaris de sòls.

Els principals riscos de degradació del sòl lligats al canvi climàtic estan associats a processos biològics i erosius. Per la llarga tradició agrícola de bona part dels sòls de Catalunya, on la matèria orgànica és escassa però estabilitzada, la seva pèrdua es produirà a un ritme lent. L'increment de la salinitat pot tenir importància local en zones determinades, però no de manera generalitzada.

El grau de coneixement que es té sobre el funcionament del cicle del C en el sòl podria permetre unes primeres estimacions sobre la quantitat de C que es podria segrestar en un termini comprès entre 10 i 100 anys en determinats escenaris significatius per a Catalunya. Tot i així, existeix un elevat grau d'incertesa sobre aquests valors i sobre la velocitat amb què aquest segrest es pot produir per manca d'una xarxa de seguiment d'aquest tema en l'àmbit català.

En conjunt, els sòls de Catalunya tenen un potencial de segrest de C elevat, tot i que la manca d'aigua en limita les entrades i la seva estabilització en forma d'humus al sòl. El reg és una de les pràctiques més efectives per augmentar les reserves de carboni al sòl, de manera que els sòls de les noves àrees regables es poden convertir en bons embornals de C. La limitació de les reserves d'aigua pot hipotecar aquestes previsions.

L'increment d'aridesa, que és possible que vagi associada al canvi climàtic, farà poc viable la implantació generalitzada a Catalunya de cultius de biocombustibles (com a alternativa als combustibles fòssils), ja que la disponibilitat d'aigua de reg és limitada. Els efectes d'un increment d'aridesa sobre el cicle del C en sòls forestals podrien quedar prou ben avaluats amb l'aplicació de models com el GOTILWA+, desenvolupat per als boscos de Catalunya.

El segrest de carboni en els sòls és quasi sempre de millor qualitat que en la biomassa, ja que el seu temps de residència és més llarg, sigui per estabilització en forma de substàncies húmiques, per protecció física en associacions amb minerals o en forma de carbó procedent dels incendis recurrents i pràctiques de crema. Des del punt de vista de la mitigació dels efectes dels GEH, el segrest de carboni amb una residència menor a 10 anys no s'hauria de considerar com a tal.

La textura del sòl és una propietat molt important a l'hora de considerar la capacitat de segrest de C estable en els sòls, més important en els sòls francs i argilosos. Als sòls de Catalunya, la protecció física de la matèria orgànica i la carbonització sembla que són dos dels processos que podrien incidir significativament en el segrest de carboni.

Es preveuen pèrdues lleugeres de matèria orgànica del sòl a termini mitjà com a conseqüència de l'increment de temperatura. Aquesta pèrdua pot tenir efectes en cadena sobre les propietats físiques del sòl i produir un increment de l'erosió, especialment a les zones de secà. Igualment, l'erosió pot comportar una exportació de matèria orgànica dels sòls afectats, fet que agreujarà el problema.

Les mesures dels fluxos superficials de CO<sub>2</sub>, del sòl cap a l'atmosfera, presenten una gran heterogeneïtat i variabilitat en funció de les condicions ambientals i de mesura. Així, estimacions pun-

tuals donen taxes d'emissió mitjanes anuals de  $\text{CO}_2$  entre 75 i  $122 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  en sòls forestals, mentre que s'han trobat valors de fins a  $1200 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  en parcel·les forestals de Catalunya.

Mesures puntuals d'emissions d' $\text{N}_2\text{O}$  a Catalunya estan compreses entre 125 i  $389 \text{ g N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , fet que pot representar unes pèrdues entre 1,7 i 13,6% del N aplicat com a fertilitzant. Les entrades per deposició d'amoníac o d'òxids de N al sòl són de l'ordre de  $5\text{-}25 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ , fet que es pot considerar com una fertilització que hauria de ser considerada en els plans d'adobat.

Les bases de dades i models de predicció de la xarxa SOMNET poden ser una bona manera d'avaluar el potencial de segrest de C, sempre que es pugui subdividir el territori en sectors més homogenis pel que fa al tipus de sòl, i disposar de dades de cada zona diferenciada, conjuntament amb experiments de llarga durada que permetin un calibratge acurat dels models actualment disponibles.

Per extrapolació de dades generades en d'altres països en sòls equivalents, és previsible que les emissions de metà de fonts edàfiques siguin absorbides amb escreix pels sòls forestals. Les emissions de metà en sòls d'aiguamolls de Catalunya poden estar reduïdes per la presència de sulfats en aquells sòls.

De l'estudi del comportament al sòl dels GEH i de les possibilitats de gestió es conclou que, avui per avui, es pot intentar augmentar el segrest de C orgànic i atenuar les emissions de gasos nitrogenats. Això és així perquè, malgrat la magnitud del reservori de C inorgànic als nostres sòls, les possibilitats d'actuació per a un segrest del C en formes minerals són limitades en terminis de 20 o 100 anys i els efectes incerts.

Les activitats agràries constitueixen una font important del nitrogen que s'emet a l'atmosfera.

Les emissions es relacionen estretament amb les pràctiques de fertilització, especialment orgànica. Les emissions són especialment remarcables en sòls sorrencs i rics en matèria orgànica.

El canvi d'ús del sòl sembla ser la principal via per modificar el segrest de C, a un termini mitjà i llarg. Actualment, a Catalunya existeixen superfícies importants -boscós i altres àrees amb vegetació natural per sota 1.500 metres d'alçada que havien estat cultivades- que acumulen C orgànic al sòl, si bé manca una adequada quantificació. Són aquestes àrees, junt amb altres àrees agrícoles on es poden produir canvis substancials en la productivitat (biomassa) o en la gestió (conreu de conservació), que poden convertir-se en eficients embornals de C.

#### **B10.7. Recomanacions o propostes d'actuació**

1. Entre les mesures més immediates cal esmentar la necessitat de completar els inventaris de sòls de Catalunya per poder calcular unes taxes d'emissió de GEH i el potencial de segrest de carboni més ajustades a la realitat. Igualment, les mesures de mitigació han d'estar basades en les possibilitats de cada sòl, per la qual cosa és imprescindible completar el coneixement sobre aquest recurs natural.
2. Cal promoure estudis de base dels sòls de Catalunya per millorar el grau de comprensió i poder quantificar els processos edàfics que es veuen afectats o són agents del canvi climàtic. Com queda palès en aquest informe, la utilització de dades generades d'estudis de sòls del centre d'Europa o d'arreu del món té una utilitat limitada, i fa que els models de simulació de processos edàfics que utilitzen aquesta informació portin associada una gran incertesa en les prediccions.
3. La gestió dels fertilitzants nitrogenats pot ser molt més efectiva i viable que altres mesures en la mitigació dels efectes del canvi climàtic, ja que els òxids de nitrogen suposen una con-

- tribució específica del 89% en les emissions de GEH a partir de sòls. Cal aprofundir especialment en aquest tema i fer complir les mesures agroambientals i les bones pràctiques agrícoles establertes.
4. Algunes de les pràctiques suggerides per atenuar els efectes del canvi climàtic requereixen una avaluació global i creuada amb altres pràctiques, ja que sovint presenten efectes contradictoris i en alguns casos els beneficis esperats no són clarament superiors a d'altres alternatives.
  5. És necessari desenvolupar i aplicar pràctiques agràries en els aspectes relacionats amb l'ús eficient dels fertilitzants nitrogenats, el reciclatge de residus orgànics ramaders i urbans, combinat amb tècniques de conreu adequades per facilitar la integració i manteniment del carboni orgànic en el mateix sòl. En aquest sentit, les tècniques de conreu mínim, ecològic o de no conreu semblen les més adients per a aquells tipus de cultius on són aplicables. Per poder implementar aquestes tecnologies davant de l'agricultura convencional serà necessari establir incentius.
  6. Cal establir i mantenir una xarxa de seguiment (monitorització) en parcel·les experimentals, adequada a les característiques dels principals sistemes agraris de Catalunya, on es quantifiquin els canvis, es mesurin els processos i es posin a punt les tecnologies. Igualment cal donar continuïtat a microconques i parcel·les forestals que monitoritzin propietats importants amb relació al canvi climàtic. Cal que aquestes àrees pilot s'integrin en les xarxes de seguiment estatals i europees.
  7. Cal aprofitar els instruments de política agrària i ambiental per assegurar el segrest del C o fer una correcta gestió del sòl, primant aquelles pràctiques amb un efecte més destacat sobre el canvi climàtic.
  8. És necessari endegar una campanya d'educació ambiental informativa dirigida als agricultors per implementar el Codi de Bones Pràctiques en relació al nitrogen d'ús agrari. Igualment, s'ha de sensibilitzar la població en general de la necessitat de consolidar la recollida selectiva de RSU per tal que puguin ser aprofitats, previ tractament, com a adobs per incrementar el contingut orgànic del sòl i reduir així les necessitats d'altres fonts de nitrogen.
  9. Cal controlar millor l'aplicació generalitzada al sòl de fangs residuals utilitzant aquells que hagin sofert un procés d'estabilització que asseguri la permanència de la matèria orgànica i del nitrogen al sòl.

#### Referències bibliogràfiques

- ALCAÑIZ J.M.; BOIXADERA J.; FELIPÓ, M.T.; ORTIZ, O.; POCH, R.M. (2005). «Els sòls». A: *L'estat del Medi Ambient a Catalunya*. UAB.
- ALCAÑIZ, J.M.; ORTIZ, O. (2003). Avaluació dels treballs de rehabilitació de sòls en àrees afectades per activitats extractives a Catalunya: criteris de qualitat de la restauració. *ORSIS*, núm. 18, p. 63-75.
- AMACHER, M.C. (1991). «Methods of obtaining and analyzing kinetic data». A: SPARK, D.L. i SUAREZ, D.L. (eds). *Rates of Soil Chemical Processes*. SSSA Special Publication n° 27. SSSA. Madison.
- ANDERSON, J.M.; INGRAM, J.S. (eds) (1989). *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. Wallingford: CAB International.
- ANDERSON, N.; STRADER, R.; DAVIDSON, C. (2003). «Airborne reduced nitrogen: ammonia emissions from agriculture and other sources». A: *Environment International*, núm. 29 (2-3) p. 277-286.
- ARAN, M.; PORTA, J.; VILLAR, J.M. (1985). *Estudio de suelos de la Cerdanya. Evaluación para el riego*. Lleida: IRDYA.
- ARCARA, P.G.; GAMBA, C.; BIDINI, D.; MARCHETTI, R. (1999). «The effect of urea and pig slurry fertilisation on denitrification, direct nitrous oxide emission, volatile fatty acids, water-soluble carbon and anthrone-reactive carbon in maize-cropped soil from the Po plain (Modena, Italy)». *Biology and Fertility of Soils*, núm. 29, p. 270-276

- ÀVILA, A.; RODÀ, F. (1991). «Red rains as major contributors of nutrients and alkalinity to terrestrial ecosystems at Montseny (NE Spain)». *ORSIS*, núm. 6, p. 215-229
- ÀVILA, A.; RODRIGO, A.; RODÀ, F. (2002). «Nitrogen circulation in a Mediterranean holm oak forest, La Castanya, Montseny, northeastern Spain». *Hydrology and Earth System Sciences*, núm. 6, p. 551-557.
- BADIA, D.; ALCANIZ, J.M. (1996). «Response to  $\text{NH}_4\text{-N}$  fertilization of Xeric Torriorthent soils from middle Ebro Basin (Spain)». *Fertilizer Research*, núm. 43, p. 217-221.
- BALESDENT, J.; SOUSSANA, J.F.; CIAIS, P.; ARROUAYS, D. (2002). «Cycle du carbone». A: *Expertise Scientifique Collective: Stocker du carbone dans les sols agricoles de France?* INRA. p. 45-56
- BALL, B.C.; MCTAGGART, I.P.; WATSON, C.A. (2002). «Influence of organic ley-arable management and afforestation in sandy loam to clay loam soils on fluxes of  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  in Scotland». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, núm. 90, p. 305-317.
- BATIONO, A.; BANI, S.P.; BIELDERS, C.L.; VLEK, P.L.G.; MOKWUNYE, A.U. (2000). «Crop residue and fertilizer management to improve soil organic carbon content». A: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; STEWART, B.A. (eds) *Global climate change and tropical ecosystems. Advances in Soil Science*. CRC Press. p. 117-146.
- BATJES, N.H., BRIDGES, E.M. (1992). *A review of soil factors and processes that control fluxes of heat, moisture and greenhouse gases*. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre (Technical Paper, 23).
- BATJES, N.H. (1996). «Total carbon and nitrogen in the soils of the world». *European Journal Of Soil Science*, núm. 47 (2), p. 151-163.
- BERNOUX, M.; SANTANA CARVALHO, M.C.; VOLKOFF, B.; CERRI, C.C. (2002). «Brazil's Soil Carbon Stocks». *SSSAJ*, núm. 66, p. 888-896.
- BIRKELAND, P.W. (1999). *Soils and Geomorphology*. Oxford: Oxford University Press. (3a ed.).
- BLUM, W.E.H. (1998). «Soil degradation caused by industrialization and urbanization». *Advances in Geoecology*, núm. 31, 755-766; A: BLUME H.P. et al. (eds).
- BONILLA, D.; RODÀ, F. (1992). «Soil nitrogen dynamics in a holm oak forest». *Vegetatio*, núm. 99/100, p. 247-258.
- CANADELL, J.; DICKINSON, R.; HIBBARD, K.; RAUPACH, M.; YOUNG, O. (eds) (2003). *Global Carbon Project: Science framework and implementation*. Canberra: Earth System Science Partnership Report n°1, GCP Report n° 1.
- CASALS, P.; ROMANYÀ, J.; CORTINA, J.; BOTTFNER, P.; COÛTEAUX, M.M.; VALLEJO, R. (2000). « $\text{CO}_2$  efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I Seasonality and effects of stoniness». *Biogeochemistry*, núm. 48, p. 261-281.
- CASTELLÓ, M. (1998). *Estudi de la matèria orgànica: Anàlisi de casos en el Solsonès*. Lleida: Universitat de Lleida, ETSE Agrària. (Treball Pràctic Tutorat).
- DARP, (1996). *L'agricultura a les comarques de Catalunya. Any 1996*. Barcelona: Generalitat de Catalunya, Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca.
- DMA – CREAM. (2002). *Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (1a ed.)*. <<http://www.cream.uab.es/mcsc/>>
- DREES, L.R.; WILDING, L.P.; NORDT, L.C. (2001). Reconstruction of soil inorganic and organic carbon sequestration across broad geoclimatic regions. A: LAL ET AL (ed). «Soil Carbon Sequestration and the greenhouse effect». *SSSA Special Pub.*, [Madison], núm. 57, p. 155-172.
- EC. (2003). *Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2001 and inventory report 2003* (Final draft, submission to the UNFCCC Secretariat). Technical report n° 95. <[http://reports.eea.eu.int/technical\\_report\\_2003\\_95/en/tech\\_95.pdf](http://reports.eea.eu.int/technical_report_2003_95/en/tech_95.pdf)>
- ECCP. (2001). *European Climate Change Program. Long Report*. <<http://www.europa.eu.int/comm/environment/climat/eccpreport.htm>>
- ECCP. (2003). *Working Group Sinks Related to Agricultural Soils, Final Report*. European Climate Change Program. <<http://www.europa.eu.int/comm/environment/climat/agriculturalsoils.htm>> <[http://www.europa.eu.int/comm/environment/climat/forest\\_sinks\\_final\\_report.pdf](http://www.europa.eu.int/comm/environment/climat/forest_sinks_final_report.pdf)>
- ENTRY, J.A.; SOJKA, R.E.; SHEWMAKER, G.E. (2002). «Management of irrigated agriculture to increase organic carbon storage in soils». *SSSAJ*, núm. 66, p. 1957-1964.
- ESTIARTE, M.; PEÑUELAS, J.; LLORENS, L.; RODÀ, F.; PRIETO, P.; LLUSIÀ, J. (2003). «Efectos del cambio climático (sequía i calentamiento) en los procesos del suelo de ecosistemas arbustivos». A: *Actas del Congreso de la Asociación Española de Ecología Terrestre*. Bellaterra, junio 2003 (CD rom).
- ESWARAN, H.; REICH, P.F.; KIMBLE, J.M.; BEINROTH, F.H.; PADMANABHAN, E. i MONCHAROEN, P. (2000). «Global carbon stocks». A: LAL R, KIMBLE JM, ESWARAN H i STEWART, B.A. (eds). *Global climate*

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

- change and pedogenic carbonates. Lewis Publishers, p. 15-26.
- EuroCARE. (2002). *Towards an Analytical Capacity in Costing of Abatement Options for Forestry and Agricultural Carbon Sinks*. European Commission. DG Environment.
- EVRENDILEK, F.; WALI, M. K. (2001). «Modelling long-term C dynamics in croplands in the context of climate change: a case study from Ohio». *Environmental Modelling and Software*, 16, p. 361-375.
- EXPERTISE SCIENTIFIQUE COLLECTIVE (2002). *Stocker du carbone dans les sols agricoles de France?* INRA.
- FALLOON, P. (2003). «Accounting for changes in soil carbon under the Kyoto Protocol: need for improved long-term data sets to reduce uncertainty in model projections». *Soil Use and Management*, núm. 19(3), p. 265.
- FANG, C.; J. B. MONCRIEFF. (2000). «The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature». *Soil Biology and Biochemistry*, núm. 33, p. 155-165.
- FANGMEIER, A.; HADWIGER-FANGMEIER, A.; VAN DER EERDEN, L.; JÁGER, H.-J. (1994). «Effects of atmospheric ammonia on vegetation-a review». *Environmental Pollution*, núm. 86, p. 43-82.
- FAO 1991. The digitized soil map of the world. World Soil Resources Report 67/1 (Release 1.0). Roma: Food and Agriculture Organization.
- FAO 2001. «Soil Carbon Sequestration for Improved Land Management». World Soil Resources Report n. 96. Roma: Food and Agriculture Organization.
- FLESSA, H.; RUSER, R.; DORSCH, P.; KAMP, T.; JIMENEZ, M. A.; MUNCH, J. C.; BEESE, F. (2002). «Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) from two farming systems in southern Germany». *Agriculture, Ecosystems & Environment*, núm. 91 (1-3), p. 175-189.
- FORÉS, E. (1989). *Cicles del Nitrogen i del Fòsfor en el sistema dels arrossars del Delta de l'Ebre*. Barcelona: Universitat de Barcelona. (Tesi Doctoral).
- FOSTER, N. W.; MORRISON, I. K. (2002). «Carbon sequestration by a jack pine stand following urea application». *Forest Ecology and Management*, núm. 169, p. 45-52.
- FREIBAUER, A.; KALTSCHMITT, M. (2003). «Controls and models for estimating direct nitrous oxide emissions from temperate and sub-boreal agricultural soils in Europe». *Biochemistry*, núm. 63, p. 93-115.
- FREIBAUER, A. (2003). «Regionalised inventory of biogenic greenhouse gas emissions from European agriculture». *European Journal of Agronomy*, núm. 19 (2) p. 135-160.
- GARAU, MA.; FELIPÓ, M.T.; RUIZ DE VILLA, M.C. (1986). «Nitrogen mineralization of sewage sludges in soil». *Journal of Environmental Quality*, núm. 15 (3), p. 225-228.
- GARAU, MA.; FELIPÓ, M.T. (1992). «El valor fertilizant nitrogenat en la reutilització agrícola de fangs residuals». *Quaderns agraris*, núm. 15, p. 23-28.
- GARCÍA-PAUSAS J.; CASALS P.; CAMARERO L.; HUGUET C.; ROMANYÀ J. (2003). «Contenido de carbono edáfico en sistemas de montaña de los Pirineos». A: *Actas del Congreso de la Asociación Española de Ecología Terrestre*. Bellaterra, junio 2003 (CD rom).
- GARRIDO, F.; HENAULT, C.; GAILLARD, H.; PEREZ, S.; GERMON, J. C. (2002). «N<sub>2</sub>O and NO emissions by agricultural soils with low hydraulic potentials». *Soil Biology and Biochemistry*, núm. 34 (5), p. 559-575.
- GCTE. (2002). <<http://www.nmw.ac.uk/GCTEFocus3/Publications/implan/a33.htm>> [17/04/2003].
- GCTE. (2003a). <<http://www.nmw.ac.uk/GCTEFocus3/networks/somnet.htm>> [17/04/2003].
- GCTE. (2003b). <<http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/aen/somnet/intro.html>> [17/04/2003].
- GILE, L.H.; PETERSEN, F.F.; GROSSMAN, R.B. (1966). «Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils». *Soil Science*, núm. 101 (5), p. 347-360
- GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. (2002). «Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis». *Global Change Biology*, núm. 8, p. 345-360.
- HARRIS, R.C.; SEBACHER, D.I.; DAY, F.P. (1982). «Methane flux in the great dismal swamp». *Nature*, núm. 297 (5868), p. 673-674.
- HELLEBRAND, H.-J.; KERN, J.; SCHOLZ, V. (2003). «Long-term studies on greenhouse gas fluxes during cultivation of energy crops on sandy soils». *Atmospheric Environment* 37 (12), p. 1635-1644.
- HERRERO, C.; BOIXADERA, J.; DANÉS, R.; VILLAR, J.M. (1993). *Mapa de Sòls de Catalunya 1.25.000, full 360-1-2 (65-28)*, Bellvis. Barcelona: Generalitat de Catalunya, Direcció General de Producció i Indústries Agroalimentàries i ICC.
- HOLZAPFEL-PSCHORN, A.; SEILER, W. (1986). «Methane emissions during a cultivation period from an Italian rice paddy». *Journal of Geophysical Research* 91, 11803-11814



- HUGGINS, D. R.; G. A. BUYANOVSKY, G. H. WAGNER, J. R. BROWN, R. G. DARMODY, T. R. PECK, G. W. LESOING, M. B. VANOTTI i L. G. BUNDY (1998). «Soil organic C in the tallgrass prairie-derived region of the corn belt: effects of long-term crop management». *Soil & Tillage Research*, núm. 47, p. 219-234.
- INGRAM, J. S. I.; FERNANDES, E. C. M. (2001). «Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, núm. 87, p. 111-117.
- IPCC (1997). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Workbook*. Paris: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2001). *Climate Change, Third Assessment Report, Contribution by working group 1, Climate Change 2001: The Scientific Basis, Summary for Policymakers*. WHO, UNEP, IPCC. <<http://www.ipcc.ch/pub/un/ipccwg1s.pdf>>
- JAILLARD, B., GUYON, A.; MAURIN, A.F. (1991). «Structure and composition of calcified roots, and their identification in calcareous soils». *Geoderma*, núm. 50, p. 197-210.
- JIMÉNEZ, I. (2004). *Contribució a l'estudi dels sòls de la Coma de Burg. Descripció i anàlisi de l'acció antròpica sobre l'edafogènesi*. Universitat Autònoma de Barcelona. (Treball de recerca de Tercer Cicle).
- JOHNSON, D.W. (1992). «Nitrogen retention in forest soils». *Journal of Environmental Quality* núm. 21, p. 1-12.
- KRUPA, S.V. (2003). «Effects of atmospheric ammonia (NH<sub>3</sub>) on terrestrial vegetation: a review». *Environmental Pollution*, núm. 124 (2), p. 179-221.
- LAF (1995). *Estudi dels efectes en els sòls agrícoles de l'aplicació de purins a la comarca del Segrià*. Sidamon: Consell Comarcal del Segrià.
- LAL, R. (2001a). «Soils and the greenhouse effect». A: LAL et al. (eds.) *Soil Carbon Sequestration and the greenhouse effect*. SSSA Special Pub. [Madison], núm. 57. p.1-8
- LAL, R. (2001b). *Myths and facts about soils and the greenhouse effect*. SSSA Special Pub. [Madison], núm. 57, p. 9-26.
- BIN LE, L.; SAKODA, A.; SHIBASAKI, R.; GOTO, N.; SUZUKI, M. (2000). «Modelling a global biogeochemical nitrogen cycle in terrestrial ecosystems». *Ecological Modelling*, núm. 135 (1), p. 89-110.
- LOMANDER, A.; KÄTTERER, T.; ANDRÉN, O. (1998). «Modelling the effects of temperature and moisture on CO<sub>2</sub> evolution from top- and subsoil using a multi-compartment approach». *Soil Biology and Biochemistry*, núm. 30, p. 2023-2030.
- MAPA, (2000). *Estudio de los niveles de metales pesados en la provincia de Lleida*. MAPA. (Inèdit).
- Mapa de sòls 1:1.000.000 de la Comunitat Europea (Soil Map of the European Communities 1:1.000.000*. <<http://leu.irnase.csic.es/mimam/seisnet.htm>> [19/05/2003].
- MARION, G.M. (1989) «Correlation between long-term pedogenic CaCO<sub>3</sub> formation rate and modern precipitation in deserts of the American Southwest». *Quaternary Research*, núm. 32, p. 291-295.
- MIKHAILOVA, E.A.; BRYANT, R.B.; DEGLORIA, S.D.; POST, C. J.; VASSENEV, I.I. (2000). «Modelling soil organic matter dynamics after conversion of native grassland to long-term continuous fallow using the CENTURY model». *Ecological Modelling*, núm. 132, p. 247-257.
- MONGER, H.C.; GALLEGOS, R.A. (2000). «Biotic and abiotic processes and rates of pedogenic carbonate accumulation». A: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; ESWARAN, H.; STEWART, B.A. (eds). *Global climate change and pedogenic carbonates*. Lewis Publishers, pp 273-289.
- MONGER, H.C.; WILDING, L.P. (2002). «Inorganic carbon: composition and formation». *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker Inc. p. 701-705.
- NAVAS, A.; MACHÍN, J.; NAVAS, B. (1999). «Use of biosolids to restore the natural vegetation cover on degraded soils in the badlands of Zaragoza (NE Spain)». *Bioresource Technology*, núm. 69, p. 199-205.
- OROZCO, M. (2003) *Hidroquímica de las aguas superficiales y usos del suelo en la cuenca de la Ribera Salada (El Solsonès, NE España)*. Lleida: Universitat de Lleida. (Tesi doctoral).
- ORTIZ, O.; ALCANIZ, J.M. (2001). «Aplicación del flujo de CO<sub>2</sub> como indicador de la calidad de la restauración en actividades extractivas a cielo abierto». *Edafología*, núm. 8(3), p. 71-81.
- PALOU, O.; BOIXADERA, J. (2002). «Els sòls agrícoles de les comarques del Baix Empordà i La Garrotxa com a reservori de carboni orgànic». Jornada L'estat i la gestió dels sòls de Catalunya. Institució Catalana d'Estudis Agraris.
- PENNOCK, D.J.; FRICK, A.H. (2001). «The role of field studies in landscape-scale applications of process models: an example of soil redistribution and soil organic carbon modeling using CENTURY». *Soil & Tillage Research*, núm. 58, p. 183-191.

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

- PIÑOL, J.; ALCANIZ, J.M.; RODÀ, F. (1995). «Carbon dioxide efflux and pCO<sub>2</sub> in soils of three *Quercus ilex* montane forests». *Biogeochemistry*, núm. 30, p. 191-215.
- POST, W.M. (1990). *Report of a workshop on climate feedbacks and the role of peatlands, tundras and boreal ecosystems in the global carbon cycle*. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory. (Environmental Sciences Division Publ. 3.289).
- POST, W.M., PASTOR, J., ZINCKE, P.J.; STANGENBERGER, A.G. (1985). «Global patterns of soil nitrogen». *Nature*, núm. 317, p. 613-616.
- POWLSON, D. S.; SMITH, P.; COLEMAN, K.; SMITH, J. U.; GLENDINING, M. J.; KÖRSCHENS, M.; FRANKO, U. (1998). «A European network of long-term sites for studies on soil organic matter». *Soil & Tillage Research*, núm. 47, p. 263-274.
- PRIEMÉ, A.; CHRISTENSEN, S. (2001). «Natural perturbations, drying-wetting and freezing-thawing cycles, and the emissions of nitrous oxide, carbon dioxide and methane from farmed organic soils». *Soil Biology and Biochemistry*, núm. 33, p. 2083-2091.
- REICHSTEIN, M.; BEDNORZ, F.; BROLL, G.; KÄTTERER, T. (2000). «Temperature dependence of carbon mineralisation: conclusions from a long-term incubation of subalpine soil samples». *Soil Biology and Biochemistry*, núm. 32, p. 947-958.
- RODÀ, F.; ÀVILA, A.; RODRIGO, A. (2002). «Nitrogen deposition in Mediterranean forests». *Environmental Pollution*, núm. 118, p. 205-213.
- ROELLE, P.A.; ANEJA, V.P. (2002). «Nitric oxide emissions from soils amended with municipal waste biosolids». *Atmospheric Environment*, núm. 36 (1), p. 137-147.
- ROMANYÁ, J.; CORTINA, J.; FALLOON, P.; COLEMAN, K.; SMITH, P. (2000). «Modelling changes in soil organic matter after planting fast-growing *Pinus radiata* on Mediterranean agricultural soils». *European Journal of Soil Science*, núm. 51, p. 627-641.
- ROVIRA, P.; VALLEJO, V.R. (2002). «Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach». *Geoderma*, núm. 107, p. 109-141.
- ROVIRA, P. (2001). *Descomposició i estabilització de la matèria orgànica als sòls forestals de la Mediterrània: qualitat, protecció física, i factor fondària*. Barcelona: Universitat de Barcelona. (Tesi Doctoral).
- SABATÉ, S.; GRACIA, C.A.; SÁNCHEZ, A. (2002). «Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region». *Forest Ecology and Management*, núm. 162, p. 23-37.
- SABRIÀ, J. (1991). *Estudi de la fertilitat a Isona (Pallars Jussà)*. *Classificació automàtica i cartografia de malla quadrada*. Lleida: Universitat de Lleida, ETSEA, TPT.
- SAGUER, E. (1997). *Emissions de N<sub>2</sub>O i desnitrificació en sòls agrícoles i d'ecosistemes naturals. Factors de regulació*. Girona: Universitat de Girona. (Tesi Doctoral).
- SCHARPENSEL, H.W., SCHOMAKER M.; AYOUB, A. (eds.) (1990). «Soils on a Warmer Earth». *Development in Soil Series* n° 20. Elsevier.
- SCHLESINGER, W.H. (2002). «Inorganic carbon and the global cycle». *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker Inc. p. 706-708.
- SCHÜTZ, H., SEILER, W.; RENNEBERG, H. (1990). «Soil and land use related sources and sinks of methane (CH<sub>4</sub>) in the context of the global methane budget». A: BOUWMAN, A. F. (eds.). *Soils and the greenhouse effect*. Chichester: John Wiley and Sons, p. 269-285.
- SEILER, W. (1984). «Contribution of biological processes to the global budget of CH<sub>4</sub> in the atmosphere». A: M.J. Klug i C.A. Reddy (eds.) *Current perspectives in microbial ecology*. Washington DC: American Society for Microbiology, p. 468-477.
- SERRASOLSAS, I.; DIEGO, V.; BONILLA, D. (1999). «Soil nitrogen dynamics». A: RODÀ, F.; RETANA, J.; GRACIA, C.; BELLOT, J. (eds.) *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Berlin: Springer, p. 223-235.
- SIERRA, R. (1987). *Clasificación automática y cartografía de la fertilidad de los suelos de la Cerdeña (Gerona-Lérida)*. Lleida: Universitat de Lleida, ETSEA, TPT.
- SKJEMSTAD, J.O.; REICOSKY, D.C.; WILTS, A.R.; MCGOWAN, J.A. (2002). «Charcoal carbon in US agricultural soils». *SSSAJ*, núm. 66, p. 1249-1255.
- SMITH, P. (1994). <<http://www.ibiblio.org/london/agriculture/composting/1/msg00021.html>> [17/04/2003].
- SMITH, A.; BROWN, K.; OGILVIE, S.; RUSHTON, K.; BATES, J. (2001). *Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission*. DG Environment. AEA Technology.
- STEUDLER, P.A.; BOWDEN, R.D.; MELLILO, J.M.; ABER, J.D. (1986). «Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils». *Nature*, núm. 341, p. 314-316.
- STEVENSON, F.J. (1986). *Cycles of Soil*. New York: Wiley-Interscience.
- STEWART, B.A.; ROBINSON, C.A. (2000). «Land use

impact on carbon dynamics in soils of the arid and semi-arid tropics». A: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; ESWARAN, H.; STEWART, B.A. (eds). *Global climate change and tropical ecosystems. Advances in Soil Science*. CRC Press, p. 251-260.

STIGLIANI, W.M., DOELMAN, P., SALOMONS, W., SCHULIN, R., MEULEN-SMIDT, G.R.B.; SEAMT, Z. (1991). «Chemical time bombs -predicting the unpredictable». *Environment* 33 (4), p. 4-9 i p. 26-30.

SUAREZ, D.L. (1999). «Impact of agriculture on CO<sub>2</sub> as affected by changes in inorganic carbon». A: LAL, R., KIMBLE, J.M., ESWARAN, H.; STEWART, B.A. (eds). *Global climate change and pedogenic carbonates*. Lewis Publishers, p 257-272.

SUAREZ, D.L. (2002). «Inorganic Carbon: Land use impacts». *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker Inc., p. 714-717.

TARRAGÓ, R. (1996). *Efectes sobre les propietats del sòl i la flora després de 10 anys d'aplicar tres sistemes de conreu en un secà d'Alfès (Lleida)*. Lleida: Universitat de Lleida, ETSEA, PFC.

TEEPE, R.; BRUMME, R.; BEESE, F. (2000). «Nitrous oxide emissions from frozen soils under agricultural, fallow and forest land». *Soil Biology and Biochemistry*, núm. 32, p. 1807-1810.

TEIRA-ESMATGES, M.R.; VAN CLEEMPUT, O.; PORTA-CASANELLAS, J. (1998). «Fluxes of nitrous oxide and molecular nitrogen from irrigated soils of Catalonia (Spain)». *Journal of Environmental Quality*, núm. 27, p. 687-697.

THENG, B.K.G., CHURCHMAN, G.J.; NEWMAN, R.H. (1989). «Constituents of organic matter in temperate and tropical soils». A: COLEMAN, D.C., OADES, J.M.; UEHARA, G. (eds) *Dynamics of organic matter in temperate and tropical soils*. University of Hawaii, NITRAL Project, p. 5-32.

THURIÈS, L.; PANSU, M.; FELLER, C.; HERRMANN, P.; RÉMY, J.-C. (2001). «Kinetics of added organic matter decomposition in a Mediterranean sandy soil». *Soil Biology and Biochemistry*, 33, p. 997-1010.

TOMLINSON, G.H., (1991). «Nutrient disturbances in forest trees and the nature of the forest decline in Quebec and Germany». *Water, Air and Soil Pollution*, 54, p. 61-74.

TORRES, A. (1994). *Estudi ambiental sobre l'efecte de l'aplicació de purins en les propietats del sòl. Aplicació al Pla d'Urgell*. Lleida: UdL, ETSEA. Inèdit.

UE, DG XI. (1998). Options to reduce methane emis-

sions (Final Report) <<http://www.europa.eu.int/comm/environment/climat/studies.htm>>.

UE, DG XI. (1998). Options to reduce nitrous oxide emissions (Final Report) <<http://www.europa.eu.int/comm/environment/climat/studies.htm>>.

VAN BREEMEN, N.; FEIJTEL, T.C.J. (1990). «Soil processes and properties involved in the production of greenhouse gases, with special relevance to soil taxonomic systems». A: Bouwman, A.F. (ed) *Soil and the greenhouse effect*. Chichester: John Wiley and Sons. P. 195-223.

VIRGILI, J.M. (1994). *Aprofundiment en el coneixement d'aspectes de la fertilitat dels sòls a Catalunya*. Lleida: Universitat de Lleida, ETSEA.

WADA, K.; AOMINE, S. (1975). «Soil development during the quaternary». *Soil Science* núm. 116, p. 170-177.

WEBB, J.; HARRISON, R.; ELLIS, S. (2000). «Nitrogen fluxes in three arable soils in the UK». *European Journal of Agronomy* 13 (2-3), p. 207-223.

ZEHNDER, A.J.B. (1982). «The carbon cycle». A: HUTZINGER, O. (ed) *The handbook of environmental chemistry*. Vol 1B. Springer Verlag, p. 83-110.

## Annexos

### Normativa generada per la Comissió Europea que afecta els sòls amb relació directa o indirecta al canvi climàtic, ordenada cronològicament en cadascun dels apartats

#### Política ambiental

- Decisión 2179/98/CE, de 24 de septiembre, relativa a la revisión del Programa comunitario de política y actuación en materia de medio ambiente y desarrollo sostenible «Hacia un desarrollo sostenible». 5è Programa d'Acció sobre Medi Ambient.
- Decisión 1600/2002/EC, 22 de junio, relativa al 6º Programa de Acción sobre Medio Ambiente (2002-2012) «Medio Ambiente 2010: El futuro está en nuestras manos». Considera el canvi climàtic com un objectiu prioritari.

#### Desenvolupament rural, mesures agroambientals, i reforestació:

- Directiva 91/676/CEE, de 12 de diciembre, relativa a la protección de las aguas contra la contami-

nación producida por nitratos utilizados en la agricultura.

- Reglamento 2092/91/CEE, de 24 de junio, sobre la producción agrícola ecológica y su indicación en los productos agrarios y alimenticios. Modificat pel Reglamento (CE) 599/2003.
- Reglamento 2078/92/CEE, de 30 de junio, sobre métodos de producción agraria compatibles con las exigencias de la protección del medio ambiente y la conservación del espacio natural. Derogat pel Reglamento (CE) 1257/1999.
- Reglamento 2080/92/CEE, de 30 de junio, por el que se establece un régimen de ayudas a las medidas forestales en agricultura.
- Reglamento 2158/92/CEE, de 23 de julio, relativo a la protección de los bosques comunitarios contra los incendios.
- Reglamento 3508/92/CEE, de 27 de noviembre de 1992, por el que se establece un sistema integrado de gestión y control de determinados regímenes de ayuda comunitarios. Modificat reiterativament.
- Resolución 97/C 76/01, de 24 de febrero, sobre una Estrategia Comunitaria de Gestión de Residuos.
- Reglamento 435/97/CE, de 6 de marzo, por el que se modifica el Reglamento (CE) 746/96 por el que se establecen disposiciones de aplicación del Reglamento 2078/92/CEE sobre métodos de producción agraria compatibles con las exigencias de la protección del medio ambiente y la conservación del espacio natural.
- Reglamento 950/97/CE, de 20 de mayo, relativo a la mejora de la eficacia de las Estructuras Agrarias.
- Reglamento 1257/1999/CE, de 17 de mayo, sobre la ayuda al desarrollo rural a cargo del Fondo Europeo de Orientación y de Garantía Agrícola (FE-

OGA) y por el que se modifican y derogan determinados Reglamentos.

- Reglamento 1259/1999/CE, de 17 de mayo, por el que se establecen las disposiciones comunes aplicables a los regímenes de ayuda directa en el marco de la política agrícola común. Incorpora el marc de l'Agenda 2000. Bases per als ajuts agroambientals. Modificat pel Reglamento 1244/2001/CE.
- Reglamento 2603/99/CE, de 9 de diciembre de 1999, por el que se establecen disposiciones transitorias para la ayuda al desarrollo rural prevista por el Reglamento 1257/99/CE. Modificat per: Reglamento 1929/2000/CE, Reglamento (CE) 2055/2001.
- Reglamento 445/2002/CE, de 26 de febrero, por el que se establecen disposiciones de aplicación del Reglamento 1257/99/CE. Programa de Desenvolupament Rural 2002-2006.
- Reglamento 599/2003/CE, de 1 de abril, que modifica el Reglamento 2092/91/CEE sobre la producción agrícola ecológica y su indicación en los productos agrarios y alimenticios.

#### Altres sectors

- Decisión 93/389/CEE del, de 29 de octubre, relativa a un mecanismo de seguimiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de otros gases de efecto invernadero en la Comunidad. Modificada per Decisión 99/296/CE.
- Directiva 96/61/CE, de 24 de septiembre, relativa a la prevención y control integrado de la contaminación (PPIC). Coneguda a Catalunya com a Llei de la intervenció integral de l'Administració ambiental (IIAA). Millors tècniques disponibles per millorar l'eficiència energètica.
- Directiva 97/11/CE, de 3 de marzo, por la que se modifica la Directiva del 85/337/CEE, de 27 de junio, relativa a la evaluación de las repercusiones

de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.

- Directiva 97/62/CE, de 27 de octubre, por la que se adapta al progreso científico y técnico la Directiva 92/43/CEE, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. Incorpora hàbitats naturals aquàtics i terrestres.
- Decisión 98/746/CE, de 21 de diciembre, relativa a la aprobación en nombre de la Comunidad de la modificación de los Anexos II y III del Convenio de Berna relativo a la conservación de la vida silvestre y del medio natural de Europa, adoptada durante la decimoséptima reunión del Comité Permanente del Convenio.
- Directiva 99/31/CE, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos.
- Decisión C(2000) 2004, de 17 de julio, relativa a la realización de un inventario europeo de emisiones contaminantes (EPER) con arreglo al artículo 15 de la Directiva 96/61/CE relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (IPPC). Coneguda a Catalunya com a Llei de la intervenció integral de l'Administració ambiental.
- Directiva 2000/60/CE, de 23 de octubre, por el que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Modificada per Decisión 2455/2001/CE.
- Directiva 2000/76/CE, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos.
- Directiva 2001/42/CE, de 27 de junio, relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.
- Directiva 2001/81/CE, de 23 de octubre, sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos. Emissions de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COV, NH<sub>3</sub>.

- Decisión 2002/358/CE, de 25 de abril, relativa a la aprobación en nombre de la Comunidad Europea del Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y al cumplimiento conjunto de los compromisos contratados con arreglo al mismo.

#### **Estratègies, normativa en fase de preparació o pendent d'aprovació i informes**

- COM/91/42 final. Propuesta de Directiva por la que se modifica el anexo II de la Directiva 79/409/CEE relativa a la conservación de las aves silvestres. Protecció de zones humides.
- COM/98/ 42 final. Comunicación sobre una estrategia de la Comunidad Europea en materia de biodiversidad.
- COM/98/0353 final. Comunicación – El cambio climático – Hacia una estrategia post-Kioto.
- COM/1999/752 final. Informe de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo relativo a la aplicación de la legislación comunitaria en materia de residuos: Directiva 75/442/EEC relativa a los residuos, Directiva 91/689/EEC relativa a los residuos peligrosos, Directiva 75/439/EEC relativa a la gestión de aceites usados y Directiva 86/278/EEC relativa a la protección del medio ambiente y, en particular de los suelos, en la utilización de lodos de depuradora en agricultura, durante el periodo 1995-1997.
- COM/2001/264 final. Desarrollo sostenible en Europa para un mundo mejor: Estrategia de la Unión Europea para un desarrollo sostenible.
- COM/2001/579 final. Propuesta de Decisión relativa a la aprobación, en nombre de la Comunidad Europea, del Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático y al cumplimiento conjunto de los compromisos contraídos con arreglo al mismo.
- COM/2001/547 final. Comunicación de la Comisión al Parlamento europeo, al Consejo, al Comité

El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic Josep M. Alcañiz, Jaume Boixadera, M. Teresa Felipó, Oriol Ortiz i Rosa M. Poch

- Económico y Social y al Comité de las Regiones relativa a los combustibles alternativos para el transporte por carretera y a un conjunto de medidas para promover el uso de biocarburantes. Per esmenar la Directiva 92/81/CEE.*
- *COM/2001/0581 final. Propuesta de Directiva por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo.*
  - *COM/2002/179 final. Comunicación de la Comisión al Consejo, el Parlamento Europeo, el Comité Económico y Social y el Comité de las Regiones «Hacia una estrategia temática para la protección del suelo».*
  - *COM/2002/404 final. Propuesta de Reglamento sobre el seguimiento de la interacción de los bosques y del medio ambiente en la Comunidad.*
  - *COM/2003/0023 final. Propuesta de Reglamento por el que se establecen disposiciones comunes aplicables a los regímenes de ayuda directa en el marco de la política agrícola común (PAC) y por el que se instauran regímenes de ayuda a los productores de determinados cultivos.*
  - *COM/2003/51 final. Propuesta de Decisión del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a un mecanismo de seguimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Comunidad y de la aplicación del Protocolo de Kyoto.*

## ACRÓNIMS

CREAF	Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions forestals
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
CTFC	Centre Tecnològic Forestal de Catalunya
DARP	Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca, Generalitat de Catalunya
DMA	Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya
EEA	European Environmental Agency
FAO	Organització de les Nacions Unides per a l'Agricultura i l'Alimentació
GC	Generalitat de Catalunya
ICC	Institut Cartogràfic de Catalunya
IEC	Institut d'Estudis Catalans
IRTA	Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentària
ISRIC	International Soil Reference and Information Center
ISSS	International Society of Soil Science
LAF	Laboratori d'Anàlisi i Fertilitat de Sòls
MACS	Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl de la UdL
MAPA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
MCSC	Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya
SIG	Sistema d'Informació Geogràfica
UAB	Universitat Autònoma de Barcelona
UB	Universitat de Barcelona
UdG	Universitat de Girona
UdL	Universitat de Lleida
USEPA	Agència dels Estats Units d'Amèrica per a la Protecció del Medi Ambient