

# 3 Balanç de carboni: els embornals a Catalunya

## **Autors**

Jordi Vayreda	Maria Teresa Sebastià
Javier Retana	Eva Calvo
Robert Savé	Jordi Catalan
Inmaculada Funes	Meritxell Batalla

**Jordi Vayreda** és doctor en ecologia terrestre i investigador del Centre de Recerca Ecològica i d'Aplicacions Forestals (CREAF) des del 1991. Ha estat responsable dels càlculs, l'anàlisi i la publicació dels resultats dels inventaris forestals d'àmbit nacional. Ha participat en diferents projectes europeus, en projectes d'investigació finançats per diferents ministeris, l'Institut Nacional d'Investigació i Tecnologia Agrària i Alimentària (INIA) i la Fundació Biodiversitat, i en contractes amb l'Administració de l'Estat i amb la Generalitat de Catalunya. Ha estat responsable de diversos informes encarregats per la Generalitat de Catalunya sobre l'ús de la biomassa per a produir energia i el càlcul d'estocs i balanços de carboni dels boscos de Catalunya i d'Espanya. Desenvolupa la recerca en el camp de la macroecologia i estudia els impactes de les pertorbacions, la gestió forestal i el canvi global als boscos (declivi, vulnerabilitat i resiliència) amb relació als processos demogràfics i a la capacitat d'embornal.

**Javier Retana** és catedràtic d'ecologia de la Universitat Autònoma de Barcelona i director del CREAM des del juliol del 2005. Basa la recerca en l'estudi de la dinàmica forestal i l'efecte de les pertorbacions en les comunitats d'animals i plantes i en els recursos hídrics. Ha publicat més de dos-cents articles, més de cent cinquanta dels quals en revistes internacionals indexades. Ha estat i és l'investigador principal

de nombrosos projectes de recerca d'àmbit nacional i internacional. Concretament, ha estat coordinador del projecte MONTES, un gran projecte inclòs dins del programa CONSOLIDER, sobre els efectes del canvi global als boscos espanyols, que agrupava més de cent investigadors de moltes de les principals institucions espanyoles dedicades a la recerca en ecologia terrestre i forestal. Actualment, és investigador principal del projecte europeu BEWATER, sobre les adaptacions dels recursos hídrics al canvi global. Ha dirigit tretze tesis doctorals i nombrosos projectes de màster.

**Robert Savé** és doctor en biologia, amb més de trenta anys d'experiència en l'àrea de l'ecofisiologia, principalment en l'àmbit agropecuari, i coordinador científic del programa Vitivinicultura de l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA). És assessor de l'Agència Catalana de Seguretat Alimentària, membre del Grup de Canvi Climàtic de Catalunya, representant espanyol en el sector agroforestal a l'Aliança Global contra el Canvi Climàtic (OECC-MAGRAMA), membre de l'Observatori Metropolità pel Canvi Climàtic (METROBS), membre del grup de qualitat Relacions Hídriques del Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació, membre del Consell Assessor de l'Aigua per al Desenvolupament Sostenible de la Generalitat de Catalunya i editor de la secció «Agricultural environ-

ment and ecology» de l'*Spanish Journal of Agricultural Research*. També és professor d'ecologia a la Universitat Autònoma de Barcelona i a la Facultat Regional Multidisciplinària de la Universitat Autònoma de Nicaragua, i treballa en la resposta dels vegetals als estressos abiòtics i biòtics, des de la planta fins al paisatge.

**Inmaculada Funes** és llicenciada en ciències ambientals per la Universitat de Granada i màster en gestió i restauració del medi natural per la Universitat de Barcelona. Actualment cursa els estudis de doctorat sobre l'agricultura mediterrània com a embornal de carboni al Departament d'Ecologia Terrestre de la Universitat Autònoma de Barcelona, i treballa com a tècnica de suport a la recerca a l'IRTA, en el programa d'horticultura ambiental que participa en el projecte europeu LIFE-MEDACC.

**Maria Teresa Sebastià** és professora de la Universitat de Lleida (UdL). Coordina el grup de recerca Gestió i Anàlisi Multiescala de Biodiversitat i Serveis Ambientals als Sistemes Forestals i Agrícoles sota Canvi Global (GAMES) de la UdL, i el Laboratori d'Ecologia Funcional i Canvi Global (ECOFUN) del Centre Tecnològic Forestal de Catalunya. La recerca inclou les interaccions entre la biodiversitat i els cicles del nitrogen i el carboni en un context de canvi climàtic a pastures, boscos i conreus, temes dels quals disposa de nombrosos projectes dirigits i publicacions en revistes científiques.

**Eva Calvo** és llicenciada en ciències químiques per la Universitat Autònoma de Barcelona (1997) i doctora en ciències químiques per la Universitat Politècnica de Catalunya (2001). Entre el 2001 i el 2005 va realitzar una estada postdoctoral a l'Escola de Recerca en Ciències de la Terra de la Universitat Nacional Australiana i al Geoscience Australia (Canberra, Austràlia), i el 2006 es va incorporar a l'Institut de Ciències del Mar (CSIC) de Barcelona com a investigadora Ramón y Cajal, en el qual és membre del Grup de Recerca en Biogeoquímica Marina i Canvi Global i, des del

2015, científica titular. La seva recerca inclou l'estudi dels climes del passat i la relació amb les variacions de CO<sub>2</sub> atmosfèric, i també la resposta i la influència dels oceans en la variabilitat climàtica. És vicepresidenta del Comitè Espanyol de Future Earth i membre del Grup d'Experts en Canvi Climàtic de Catalunya.

**Jordi Catalan** és doctor en biologia per la Universitat de Barcelona (1987). Ha estat professor titular del Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona (1989-2001) i investigador del Centre d'Estudis Avançats de Blanes (2001-2012). Actualment és professor de recerca del CSIC al CREAM i responsable del Grup d'Ecologia dels Canvis Ambientals (GECA). Ha centrat la recerca en la biogeoquímica i la biodiversitat de les aigües continentals i ha contribuït al coneixement de la limnologia d'estanys remots, la contaminació atmosfèrica a llarga distància, la reconstrucció d'ambients del passat i l'ecologia teòrica. Aquesta recerca es caracteritza per una àmplia col·laboració amb científics de formació i procedència molt variades (com ara físics, químics, geòlegs, geògrafs i arqueòlegs). Ha publicat prop de dues-centes publicacions científiques i ha dirigit catorze tesis doctorals.

**Meritxell Batalla** és llicenciada en ciències ambientals per la Universitat de Barcelona (2009) i màster en teledetecció i sistemes d'informació geogràfica pel CREAM (2010). Té experiència en la gestió de bases de dades, l'ús d'eines SIG i la modelització geoespacial. Ha participat en diversos projectes d'investigació de la Universitat Autònoma de Barcelona i del GRUMETS-CREAM, tant en l'àmbit universitari com en l'empresarial, relacionats, sobretot, amb la modelització del clima i la vegetació, i també en la difusió per mitjà de navegadors de mapes. És coautora de l'*Atlas climàtic digital d'Andorra* i del *Mapa d'aptitud per la producció de fruita dolça a Catalunya* (Fruit-Map), i actualment participa en diversos projectes del Grup d'Ecologia dels Canvis Ambientals (GECA, CREAM-CEAB).

## Sumari

Síntesi .....	69
3.1. Introducció .....	70
3.2. Sistemes terrestres.....	70
3.2.1. Canvis en la superfície de les cobertes del sòl (1993-2009).....	70
3.2.2. Estocs i embornals de carboni als boscos i matollars.....	71
3.2.2.1. Embornals de carboni als boscos i matollars .....	71
3.2.2.2. Estocs de carboni als boscos i als matollars .....	72
3.2.2.3. Estocs de carboni als sòls forestals, la virosta i la fusta morta.....	73
3.2.2.4. El lidar i el futur dels inventaris forestals.....	73
3.2.2.5. Fins quan podran mantenir la capacitat d'embornal els boscos catalans? .....	74
3.2.2.6. Projecció de la capacitat d'embornal de carboni dels boscos a Catalunya fins al 2050 .....	75
3.2.3. Prats i pastures.....	75
3.2.3.1. Estocs i embornals de carboni als prats i pastures.....	76
3.2.3.2. Estabilitat de l'estoc i l'embornal als prats i pastures.....	78
3.2.3.3. Eines per a mantenir o millorar l'eficiència en la capacitat d'embornal i en el manteniment de l'estoc.....	78
3.2.4. Agricultura .....	78
3.2.4.1. Mètodes d'avaluació dels embornals agrícoles.....	78
3.2.4.2. Conreus llenyosos.....	80
3.2.4.3. Conreus herbacis.....	80
3.2.4.4. Estocs de carboni als sòls agrícoles.....	81
3.2.4.5. Interfase conreu/bosc .....	82
3.3. Aigües continentals .....	83
3.4. Sistemes marins.....	84
3.5. Conclusions .....	86
3.6. Recomanacions .....	87
3.6.1. Boscos i matollars.....	87
3.6.2. Prats i pastures.....	88

3.6.3. Agricultura .....	88
3.6.4. Aigües continentals.....	88
3.6.5. Sistemes marins .....	88
Referències bibliogràfiques .....	88

## Síntesi

En aquest capítol es determinen els estocs i els embornals de carboni (C) dels diferents sistemes terrestres i marins. El bosc és el sistema terrestre que manté en estoc més quantitat de carboni per hectàrea,  $149,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (en una proporció vegetació/sòl [v:s] de 60:100). Els prats ocupen la segona posició, amb  $121,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (v:s d'11:100), i a continuació trobem els conreus llenyosos i els matollars, amb  $104,0 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (v:s de 12:100) i  $112,1 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (v:s de 15:100), respectivament. En la darrera posició, hi ha els conreus herbacis, amb  $100,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (v:s d'1:100). La mar catalana ha anat augmentant l'estoc de carboni des del 1750 fins al 2001, amb un còmput acumulat de  $12 \text{ Mg C ha}^{-1}$ . Les praderies de fanerògames, que acumulen  $330 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (en una proporció planta/sediment de 4:100) són molt destacables. Les aigües continentals mantenen  $47,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , però una part molt elevada és carboni inorgànic dissolt del sistema carbònic-carbonats, que es calcula que pot ser trenta vegades superior al carboni orgànic.

En termes absoluts, és a dir, extrapolant-ho a la superfície que ocupa cada sistema, el que manté més estoc de carboni és el bosc, amb  $173 \text{ Tg}$ , seguit a força distància pels conreus, amb  $98 \text{ Tg}$ , i la mar catalana, amb  $92 \text{ Tg}$ . En les darreres posicions hi ha els matollars, amb  $60 \text{ Tg}$ , els prats i les pastures, amb  $21 \text{ Tg}$ , i, finalment, les aigües continentals, amb només  $0,33 \text{ Tg}$ . En el cas dels conreus,

els prats i les pastures, el principal contribuent és el sòl. En el cas de la mar catalana, el carboni es troba, sobretot, a l'aigua.

Pel que fa al segrest mitjà de carboni, els sediments de les aigües continentals són, clarament, els que més quantitat de carboni segresten per unitat de superfície,  $7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ , un valor set vegades superior al dels boscos,  $1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ , que, al seu torn, dupliquen la capacitat dels conreus llenyosos,  $0,4 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ .

Quan s'expressa en valor absolut, el bosc és, amb diferència, el principal embornal de carboni, amb  $1,3 \text{ Tg C any}^{-1}$ . En canvi, els sediments de les aigües continentals passen a darrer terme, amb  $0,12 \text{ Tg C any}^{-1}$ , però amb valors molt semblants als dels conreus de llenyoses, amb  $0,14 \text{ Tg C any}^{-1}$ . Pel que fa a la resta de compartiments i sistemes, s'assumeix que o bé la capacitat d'embornal és lleugerament positiva però propera a zero, com en el cas dels matollars i els prats, o bé és totalment neutra, com en el cas dels conreus d'herbàcies. Malauradament, per als sòls i els sistemes marins encara no hi ha estudis de prou abast que permetin estimar d'una manera fiable quina és la capacitat d'embornal.

## Paraules clau

boscos i matollars, conreus llenyosos i herbacis, prats i pastures, sòl, aigües continentals, sediments, praderies marines, sistemes marins

### 3.1. Introducció

Parlem de *reservori de carboni* o *estoc de carboni* (C) per referir-nos a la quantitat de carboni que té emmagatzemada un sistema o compartiment natural en un moment determinat. Parlem de *embornal de carboni* quan un reservori o estoc de carboni augmenta de mida amb el temps; el contrari és una *font de carboni*. El *segrest de carboni* és el terme que descriu els processos que capturen el CO<sub>2</sub> de l'atmosfera. Els principals embornals naturals de carboni són els oceans i els sistemes forestals. En el cas dels oceans, la transferència de CO<sub>2</sub> entre l'atmosfera i l'oceà s'esdevé per la diferència en la pressió parcial d'aquest gas entre l'aire i l'aigua. Mecanismes com la *bomba de solubilitat*, que fa referència a l'augment de la solubilitat del CO<sub>2</sub> en aigües fredes i a la transferència d'aquest CO<sub>2</sub> cap al fons, i l'anomenada *bomba biològica*, que té en compte la fixació de CO<sub>2</sub> per fotosíntesi o precipitació de carbonats en el fitoplàncton i el transport, si s'escau, cap a capes fondes, contribueixen a l'absorció de CO<sub>2</sub> per part dels oceans. Als continents, l'embornal principal de carboni és la vegetació (principalment, els boscos), que incorpora el CO<sub>2</sub> de l'atmosfera a la biomassa com a resultat net del balanç entre la fotosíntesi i la respiració. Part d'aquest carboni s'acumula al sòl en forma de matèria orgànica morta.

En aquest capítol es quantifiquen els canvis recents en les cobertes del sòl i es fa una estimació de la quantitat de carboni emmagatzemada i segrestada anualment als compartiments següents: els sistemes terrestres, desglossant-los en boscos, matollars, prats i conreus; els sistemes marins i les aigües continentals.

Per a cada compartiment, en aquest capítol també se'n discuteix el grau d'estabilitat en el passat, el present i el futur. Per tant, per a cadascun s'identifiquen, a escala catalana, els factors de canvi principals en el passat més recent en el context del canvi global. D'acord amb la literatura científica més recent, també es donen orientacions de quin en podria ser la dinàmica futura partint de les projeccions dels models climàtics regionalitzats. Finalment, en un darrer apartat es donen algunes orientacions de gestió, que es podrien dur a terme per aconseguir mantenir o millorar el segrest de

carboni o, almenys, mantenir segrestat el carboni que ja està emmagatzemat.

### 3.2. Sistemes terrestres

#### 3.2.1. Canvis en la superfície de les cobertes del sòl (1993-2009)

L'única base cartogràfica actualitzada que permet elaborar una quantificació acurada dels canvis recents en les cobertes del sòl, perquè manté una coherència cartogràfica i temàtica entre versions, és el *Mapa de cobertes del sòl de Catalunya* (MCSC, 1993-2009). Gràcies a les tres edicions que s'han publicat fins avui —la primera del 1993, la segona del 2005 i la tercera i més recent del 2009—, sabem que durant aquest període (taula 3.1) la superfície forestal arbrada ha augmentat prop de 130.100 ha (un 10,8 %), i ha passat del 38 % l'any 1993 al 42 % l'any 2009. Aquest increment s'ha produït, sobretot, en detriment del matollar (amb una reducció de 183.500 ha) i de l'abandonament de conreus (50.700 ha). Els matollars, en canvi, han reduït la superfície en 76.600 ha, i ha passat del 16,4 % al 14 % en aquests setze anys. Malgrat aquestes pèrdues en valor absolut, hi ha hagut un increment a costa de la superfície arbrada (77.700 ha), essencialment pels grans incendis (el 1994, el 1998 i el 2003), i de l'abandonament de l'activitat agrícola (61.200 ha). Els prats i les pastures han tingut un augment net de 28.600 ha, i ha passat del 4,1 % al 5 % el 2009. Aquest augment ha resultat, sobretot, de l'abandonament dels conreus (40.600 ha) i de la pèrdua de superfície de matollar per incendis (27.500 ha). La pèrdua de superfície de conreus en aquest període és, en valor absolut, la més significativa, passant d'1,1 Mha el 1993 a 934.000 ha el 2009; en valor relatiu això implica una pèrdua del 15,1 % dels conreus, malgrat que també hi ha hagut rompudes notables de terrenys forestals (20.700 ha de superfície que era arbrada i 20.600 ha de matollars). En valor absolut, les principals pèrdues s'han repartit en guanys en superfície de matollar (61.200 ha) i de bosc (50.700 ha), i, per tant, fruit de l'abandonament de l'activitat agrícola i en augment de l'improductiu artificial, que essencialment correspon a nova superfície urbana i a noves vies de comunicació (58.200 ha). Finalment, l'augment molt notable en valor relatiu de l'improductiu artificial (el 63,7 %

TAULA 3.1. Principals canvis de superfície per als grans tipus de cobertes del sòl del 1993 al 2009

Cobertes el 1993 (× 1.000 ha)	Cobertes el 2009 (× 1.000 ha)						Total del 1993	Percentatge
	Arbrat	Matollar	Prats i pastures	Altres cobertes naturals	Conreus	Improductiu artificial		
Arbrat	<b>1.086,4</b>	77,7	10,6	7,9	20,7	15,2	<b>1.218,5</b>	38,0
Matollar	183,5	<b>266,9</b>	27,5	16,7	20,6	12,0	<b>527,1</b>	16,4
Prats i pastures	12,9	29,2	<b>67,6</b>	14,6	3,5	4,4	<b>132,2</b>	4,1
Altres cobertes naturals	10,4	12,2	12,2	<b>62,3</b>	2,2	4,3	<b>103,6</b>	3,2
Conreus	50,7	61,2	40,6	6,5	<b>887,7</b>	58,2	<b>1.104,9</b>	34,4
Improductiu artificial	4,6	3,5	2,3	2,0	3,7	<b>106,4</b>	<b>122,5</b>	3,8
<b>Total del 2009</b>	<b>1.348,6</b>	<b>450,6</b>	<b>160,8</b>	<b>110,0</b>	<b>938,4</b>	<b>200,6</b>	<b>3.208,8</b>	100,0
Percentatge	42,0	14,0	5,0	3,4	29,2	6,3	100,0	—
Canvis del 1993 al 2009 (× 1.000 ha)	+130,1	-76,6	+28,6	+6,4	-166,5	+78,1	—	—
Canvis del 1993 al 2009 (%)	+10,7	-14,5	+21,6	+6,2	-15,1	+63,7	—	—
Taxa de canvi (× 1.000 ha any <sup>-1</sup> )	+8,1	-4,8	+1,8	+0,4	-10,4	+4,9	—	—

La coberta «arbrat» inclou els boscos amb recobriment de capçades > 5 %, les plantacions de plàtans i pollancre i els boscos de ribera; la coberta «altres cobertes naturals» inclou la vegetació d'aiguamolls, les zones acabades de cremar, els roquissars, les tarteres, els sòls nus forestals, les platges, les glaceres, les congestes i les aigües continentals, i la coberta «improductiu artificial» inclou les zones urbanitzades, les vies de comunicació, les zones esportives i lúdiques i les zones d'extracció minera.

d'augment en només setze anys) s'ha produït en detriment dels conreus, com ja s'ha dit, però també és destacable l'augment notable en detriment de la cobertes naturals (essencialment de boscos i matollars), amb 27,500 ha.

En resum, els canvis en les cobertes del sòl en aquest període han estat determinats, sobretot, per tres grans factors, dels quals el primer es contraposa als altres dos: I) un augment molt notable de la superfície artificial fruit de la gran activitat econòmica d'abans de la crisi, que va comportar la urbanització i la construcció de noves infraestructures; II) una reducció de l'activitat agrícola, que ha comportat l'abandonament de conreus amb l'augment consegüent de les cobertes forestal (prats, matollars i boscos), i III) la mateixa dinàmica natural dels ecosistemes en absència de grans perturbacions, que comporta canvis naturals de prats a matollars i de matollars a boscos.

### 3.2.2. Estocs i embornals de carboni als boscos i matollars

#### 3.2.2.1. Embornals de carboni als boscos i matollars

Un dels mètodes acceptats i utilitzats més àmpliament per a estimar la capacitat d'embornal dels boscos són els inventaris forestals per a la comparació de parcel·les permanents mostrejades periòdicament (habitualment cada deu anys). Un mostreig d'aquestes característiques, que compara l'estoc de carboni estimat entre les dues mesures i el divideix pel temps transcorregut, permet obtenir un valor del canvi en l'estoc com a mesura de la capacitat d'embornal. El *Segundo Inventario Forestal Nacional* (IFN2; Villaescusa *et al.*, 1998) i el *Tercer Inventario Forestal Nacional* (IFN3; Villanueva, 2005) van ser les fonts de dades principals que van permetre determinar amb precisió aquesta capacitat d'embornal per al període 1990-2000 en el



SICCC. Malauradament, de moment no es disposa de dades actualitzades perquè l'IFN4 encara està en fase de mostreig de camp, la qual es preveu que finalitzarà el 2016.

En una revisió posterior de la informació que ja es va publicar al SICCC, s'ha determinat que la taxa anual de segrest de carboni dels boscos de Catalunya per al període 1990-2000 va ser d'1,27 Tg C any<sup>-1</sup> de mitjana. Una hectàrea de bosc a Catalunya captura una mitjana d'1,04 Mg C ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup>. Aquests valors es corresponen a la part aèria i subterrània dels arbres de més de 7,5 cm de diàmetre normal dels boscos que ja eren boscos el 1990. És el resultat del balanç entre l'augment de la biomassa a causa del creixement dels arbres supervivents i dels que s'incorporen com a arbres de més de 7,5 cm de diàmetre normal a l'estrat arbori i de la disminució ocasionada per la mortalitat i la gestió forestal. Si bé aquest balanç inclou les pèrdues ocasionades per la disminució de la superfície arbrada a causa dels incendis forestals o altres perturbacions esdevingudes durant el període, no inclou, en canvi, el segrest de carboni que es produeix a la nova superfície forestal arbrada i que s'ha incrementat d'una manera notable (130.000 ha del 1993 al 2009). Aquesta estimació tampoc no incorpora el balanç de carboni del sòl forestal ni el CO<sub>2</sub> que hagi pogut segrestar el sotabosc, com ara el matollar i tots els arbres que encara no han arribat a la mida mínima de 7,5 cm.

Per tant, per a una avaluació completa de la capacitat d'embornal s'haurien de mesurar, també, els canvis als estocs de carboni de matollars i prats. Malauradament, les parcel·les de mostreig dels IFN només cobreixen d'una manera sistemàtica la superfície arbrada; la resta de superfície, amb vegetació natural i conreus abandonats, no es mostra sistemàticament, de manera que no hi ha cap informació dels canvis en l'estoc de carboni en aquests casos. No obstant això, la part del balanç de carboni, positiu o negatiu, que podria provenir dels canvis de cobertes del sòl és determinada, sobretot, pel balanç entre les pèrdues i els guanys de superfície de bosc, que és la que en bona part pot contribuir al segrest de carboni. Segons la comparació dels mapes de cobertes del sòl del 1993 i del 2009, els processos que han

dominat han estat les transicions cap a un tipus de vegetació amb estructures més complexes (de prat a matollar, de prat a bosc i de matollar a bosc), la qual cosa comporta que el segrest de carboni hauria de ser superior al valor mesurat per comparació entre l'IFN2 i l'IFN3.

Tot i aquestes mancances, tenint en compte que les emissions d'origen antropogènic dels catalans per al període (2009-2013) han estat de 47,8 Mt equiv. CO<sub>2</sub> any<sup>-1</sup> (vegeu el capítol 2 d'aquest mateix INFORME) i assumint que els boscos catalans segueixen capturant CO<sub>2</sub> al mateix ritme que durant el període 1990-2000, els boscos compensen prop del 9,7 % de les nostres emissions. Dit d'una altra manera, caldrien 10,3 vegades la superfície de bosc de Catalunya per a compensar el 100 % d'aquestes emissions.

### 3.2.2.2. Estocs de carboni als boscos i als matollars

De la mateixa manera que per al segrest de carboni, les darreres dades disponibles per a estimar l'estoc de carboni dels boscos provenen de l'IFN3 (2000-2001) i ja es van donar a conèixer en el SICCC. D'acord amb l'IFN3, l'estoc de carboni dels boscos (arbrat i sotabosc) és de 63,5 Tg C. D'aquesta quantitat, 49,2 Tg s'acumulen als arbres del bosc (el 70 % a la part aèria, al tronc, les branques i les fulles, i el 30 % restant a la part subterrània, a les arrels) i 14,3 Tg, al sotabosc (assumint, per al matollar, una relació subterrani/aeri de 1.837; Mokany *et al.*, 2006). Els boscos tenen un estoc mitjà de 56 Mg C ha<sup>-1</sup>: 43,3 Mg C ha<sup>-1</sup> a la part arbrada i 12,6 Mg C ha<sup>-1</sup> al sotabosc. Gairebé un 23 % de l'estoc total del bosc s'acumula al sotabosc.

Atès que els inventaris forestals nacionals no mostregen els matollars, es va dur a terme una estimació de l'estoc de carboni d'aquest tipus de vegetació utilitzant informació bibliogràfica. La metodologia va consistir a obtenir, d'una banda, la superfície dels diferents tipus de matollar presents a Catalunya a partir de la darrera versió de la *Cartografia dels hàbitats de Catalunya* (CHC50, 2008-2012) a escala 1:50.000, elaborada pel Grup de Recerca de Geobotànica i Cartografia de la Vegetació de la Universitat de Barcelona. Dels 63 hàbitats de matollars descrits a la llegenda es van seleccionar els 23 hàbitats més comuns, que re-



presenten el 84,7 % de la superfície de matollar. D'altra banda, es va fer una cerca bibliogràfica exhaustiva de la literatura científica que quantificava la biomassa aèria viva de matollars. Dels 90 articles obtinguts de diferents zones, principalment de la península Ibèrica, es va obtenir un valor mitjà de biomassa per tipus de matollar que, multiplicat per les concentracions de carboni proposades per Montero *et al.* (2013), va permetre obtenir el valor d'estoc mitjà aeri per hectàrea i tipus de matollar. Com en el cas del sotabosc, es va assumir una relació subterrani/aeri de 1.837 (Mokany *et al.*, 2006) i, finalment, es va multiplicar aquest valor per la superfície de cada tipus de matollar i es va assignar el valor mitjà ponderat de l'estoc del conjunt de matollars a la superfície de la resta de tipus de matollar. La quantitat absoluta va ser de 5,2 Tg C distribuïts en 378.400 ha de matollar (segons el CHC50), és a dir, 13,6 Mg C ha<sup>-1</sup>.

### 3.2.2.3. Estocs de carboni als sòls forestals, la virosta i la fusta morta

A partir de l'IFN3 s'ha pogut estimar la quantitat de carboni emmagatzemada a la fusta morta en peu. Els anys 2000 i 2001, el valor mitjà era de 0,8 Mg C ha<sup>-1</sup>, que en termes absoluts són 0,9 Tg C. D'altra banda, a l'Inventari Ecològic Forestal de Catalunya (IEFC) (Gracia *et al.*, 2004) es va mesurar la quantitat de virosta acumulada als boscos en 1.831 parcel·les. De mitjana, hi ha 4,7 Mg C ha<sup>-1</sup>, que en valor absolut representen 5,3 Tg C.

En un treball recent, dut a terme per Doblas-Miranda *et al.* (2013), s'ha pogut estimar l'estoc de carboni orgànic del sòl dels terrenys forestals (boscos, matollars i prats) per a tota l'Espanya peninsular a partir d'uns nou-cents perfils de sòl de diferents fonts bibliogràfiques. El model estadístic que es va obtenir va permetre elaborar un mapa de l'estoc de carboni del sòl segons el tipus de coberta vegetal, la temperatura mitjana anual, la precipitació total anual, l'altitud i la interacció entre aquestes dues darreres variables. Segons aquest mapa, a Catalunya la quantitat de carboni emmagatzemada és de 176,5 Tg C, que de mitjana representen 91,4 Mg C ha<sup>-1</sup>. Els sòls forestals ocupats per matollars emmagatzemen 90,4 Mg ha<sup>-1</sup>, que en valor absolut són 54,7 Tg C. D'altra banda, els sòls forestals arbrats emmagatzemen 87,9 Mg C ha<sup>-1</sup>, que sumats a la quantitat de virosta i fusta morta

representen 93,4 Mg C ha<sup>-1</sup>, i 109,2 Tg C en valor absolut.

El fet que el carboni del sòl es relacioni positivament amb la precipitació anual i negativament amb la temperatura mitjana comporta que hi hagi un gradient important amb valors elevats als Pirineus, que fàcilment dupliquen els valors de les terres baixes del sud i del litoral. Atès que les projeccions de canvi climàtic preveuen un augment de la temperatura i una reducció de la precipitació, és molt probable que hi pugui haver un impacte en el sòl que en redueixi la capacitat com a embornal de carboni. En qualsevol cas, aquesta primera aproximació, millorable a mesura que hi hagi més informació i més bona, permetrà estimar els canvis futurs a les existències de carboni del sòl i avaluar-ne la vulnerabilitat als diversos factors del canvi global.

### 3.2.2.4. El lidar i el futur dels inventaris forestals

Els inventaris forestals són, encara avui, la font d'informació principal i més fiable per a estimar la quantitat de carboni emmagatzemada y segregada pels boscos. No obstant això, en els darrers decennis ha aparegut un tipus de sensor actiu aerotransportat anomenat *lidar* (que prové de l'acrònim anglès LIDAR, *light detection and ranging*), que mesura la distància d'un objecte amb llum làser d'acord amb el temps transcorregut entre l'emissió del pols i la detecció (Montaghi *et al.*, 2013). El conjunt de polsos registrats pel lidar descriu la distribució vertical dels objectes interceptats, la qual cosa s'anomena *model digital de superfície* (MDS). De l'anàlisi del conjunt de polsos es pot diferenciar els que arriben a terra dels que es queden a mig camí, i obtenir, d'una banda, un model digital del terreny (MDT) de molta precisió i, a diferència de l'MDS, un model digital de la vegetació (MDV).

El CREAM, juntament amb l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), ha utilitzat la informació del vol lidar que es va fer per tot Catalunya amb una resolució de 0,5 polsos/m<sup>2</sup> i que va analitzar la distribució de les alçàries de la coberta de vegetació per un conjunt de parcel·les dels inventaris forestals (veritat terreny) distribuïdes per tot Catalunya i per un ampli ventall d'estructures

forestals i composició d'espècies. D'aquesta anàlisi s'han obtingut uns models estadístics precisos i fiables que descriuen l'alçària mitjana de la vegetació arbòria, el recobriment de les capçades, el volum de la fusta, la biomassa aèria i l'estoc de carboni, entre altres variables. Aquests models estadístics s'han aplicat al conjunt de dades del lidar de tots els boscos de Catalunya per obtenir la cartografia de vuit variables forestals molt rellevants, a una resolució de 20 x 20 m, de totes les zones arbrades de Catalunya, segons l'MCSC de l'any 2009. Aquesta cartografia es pot descarregar en format GeoTIFF, des de l'aplicació VISSIR ([www.icc.cat/vissir](http://www.icc.cat/vissir)).

En un futur pròxim, és molt probable que aquesta tecnologia permeti estalviar recursos econòmics, ja que reduirà l'esforç de mostreig dels inventaris forestals i millorarà molt significativament la precisió geogràfica en l'estimació de l'estoc de carboni de la vegetació. L'estimació de l'alçària de la vegetació amb aquesta tecnologia és prou precisa (10-15 cm d'error) per a obtenir estimacions fiables dels canvis en l'estoc de carboni de la part aèria dels boscos per mitjà de la diferència entre dues estimacions fetes entre cinc i deu anys de diferència.

### 3.2.2.5. Fins quan podran mantenir la capacitat d'embornal els boscos catalans?

Identificar els factors principals que recentment han determinat la capacitat d'embornal dels boscos, i en particular l'afectació de les tendències climàtiques a aquest patró al llarg del gradient d'humiditat nord-sud i la contribució de la gestió forestal a la mitigació dels efectes del canvi climàtic, ha estat objecte d'un treball recent basat en la comparació dels IFN a tota l'Espanya peninsular (Vayreda *et al.*, 2012). Entendre quins són aquests factors clau a escala espacial pot donar pistes sobre quins en podrien ser els efectes a escala temporal per als pròxims decennis. D'acord amb aquest estudi, els dos factors clau que governen la capacitat d'embornal són la densitat d'arbres per hectàrea i l'estoc de carboni en peu. Aquestes dues variables són el reflex de la història recent de la dinàmica, la gestió i les perturbacions naturals que han tingut lloc al bosc. La forta relació positiva i la interacció entre la capacitat d'embornal de carboni i aquestes dues variables estructurals suggereixen que els boscos catalans encara són prou joves per a

mantenir la capacitat d'embornal almenys a curt i a mitjà termini. Molts boscos encara es recuperen dels aprofitaments intensius dels anys 1950 i 1960, el període que marca l'inici de la recuperació dels boscos.

Ara bé, durant el període entre els dos inventaris forestals nacionals la temperatura mitjana ja va experimentar un increment de 0,5 a 2 °C respecte als valors mitjans dels trenta anys anteriors (1960-1990) (Vayreda *et al.*, 2012). Aquest escalfament va tenir un efecte en el creixement i la capacitat d'embornal especialment negatiu a les zones més humides del nord i el nord-oest peninsular i a les zones de muntanya, com ara els Pirineus. En aquestes zones els boscos són dominats per espècies eurosiberianes situades al límit sud de la seva àrea de distribució i, per tant, més sensibles i menys adaptades a condicions de sequera (Macias *et al.*, 2006; Andreu *et al.*, 2007; Linares *et al.*, 2009; Allen *et al.*, 2010). En canvi, l'escalfament a penes va tenir efecte en la capacitat d'embornal a les zones més seques, ja que en aquestes condicions climàtiques els boscos són dominats per espècies mediterrànies, més adaptades a suportar llargs períodes de sequera (Montero *et al.*, 2005).

En aquest estudi també es va provar l'efecte de la gestió forestal com a eina per a mitigar el canvi climàtic, i es va demostrar que, si bé no es va detectar cap benefici directe de la gestió forestal en la capacitat d'embornal, sí que es va detectar una reducció significativa de l'efecte de l'escalfament. És a dir, amb l'increment de la temperatura, l'abandonament de la gestió forestal va comportar una reducció de la capacitat d'embornal de carboni, probablement a causa de la disponibilitat més petita d'aigua. La gestió forestal, en canvi, va controlar aquest efecte negatiu i va contribuir al manteniment, o fins i tot a un petit augment, de la capacitat d'embornal.

Si bé encara no es disposa de les dades de l'IFN4, que permetrien actualitzar la informació per al període 2001-2015, és molt probable que els boscos catalans hagin mantingut la capacitat d'embornal. En primer lloc, perquè els boscos catalans encara són prou joves per a mantenir la capacitat de seguir creixent amb poca competència pels recursos

i, per tant, amb una mortalitat associada baixa. En segon lloc, perquè el ritme d'aprofitaments forestals s'ha mantingut baix i estable, amb valors propers als que es produïen entre el 1990 i el 2000 i que aleshores ja només representaven el 25 % del creixement del bosc. I, en tercer lloc, perquè no hi ha hagut grans pèrdues associades a grans incendis forestals (unes 28.000 ha de bosc cremades entre el 2001 i el 2014: menys de 2.000 ha any<sup>-1</sup>; Idescat) ni a altres perturbacions. En resum, aquestes pèrdues s'han compensat àmpliament amb l'augment de l'estoc als boscos no afectats, que segueixen creixent, i amb els guanys de superfície arbrada (vegeu la taula 3.1).

La magnitud i l'efecte dels factors que influeixen en la capacitat d'embornal han estat objecte de molts estudis recents, i l'efecte positiu suposat a mitjà i a llarg termini ja ha estat qüestionat (Allen *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2010; Nabuurs *et al.*, 2013); particularment, en els ecosistemes en què l'aigua és el factor limitant principal (Martínez-Vilalta *et al.*, 2008; Vayreda *et al.*, 2012). Segons les projeccions de canvi climàtic (vegeu el capítol 5 d'aquest INFORME), Catalunya, i la conca mediterrània en general (IPCC, 2013), serà una de les zones més castigades del món, ja que es preveu un augment de la temperatura i un descens generalitzat de la precipitació, sobretot durant els mesos d'estiu. En aquestes condicions es reduirà encara més la disponibilitat d'aigua per als boscos i l'escalfament produirà un increment de la demanda evaporativa. Ambdós factors, separadament o sinèrgicament, comportaran, amb molta probabilitat, episodis generalitzats de mortalitat (Martínez-Vilalta *et al.*, 2012). La densificació progressiva dels boscos, que ja es produeix per la manca de gestió forestal, comportarà una reducció de la disponibilitat de recursos per arbre, la qual cosa pot ser especialment greu en una bona part de Catalunya on l'aigua ja és el factor limitant principal. La conseqüència, a llarg termini, és que els boscos catalans poden perdre la capacitat d'embornal i convertir-se en emissors nets de CO<sub>2</sub> (Vayreda *et al.*, 2012).

### 3.2.2.6. *Projecció de la capacitat d'embornal de carboni dels boscos a Catalunya fins al 2050*

En un treball encarregat recentment per l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic (OCCC; Banqué *et al.*,

2014) es va utilitzar un model forestal (MPI-bosc; Molowny *et al.*, 2012) per a simular la dinàmica dels boscos tenint en compte les projeccions climàtiques del model ECHAM4 i els escenaris socioeconòmics A2, com a escenari pessimista, i B2, com a escenari optimista (IPCC, 2007). El model forestal permet fer simulacions de la dinàmica forestal de les espècies per a períodes de temps de deu anys, considerant no solament les anomalies climàtiques de temperatura o precipitació, sinó també el clima i el tipus i l'estructura del bosc, que determinen la competència pels recursos. Amb aquest model es van simular tots els encreuaments d'una malla d'1 × 1 km que corresponia a la superfície forestal segons la darrera versió de l'MCSC. En els casos en què ja hi havia bosc l'any 2000, la situació inicial era la que corresponia a la parcel·la de l'IFN3, i en els casos en què no n'hi havia, es va fer correspondre amb la probabilitat d'expansió del bosc des d'alguna parcel·la arbrada propera. En qualsevol de les dues situacions es van projectar les parcel·les des de l'any 2000 fins al 2050, fet que va implicar la simulació de 20.646 encreuaments 1 × 1 per a les tres situacions plantejades: el control i els dos escenaris A2 i B2.

D'acord amb els resultats de les simulacions, els boscos de Catalunya mantindran la capacitat d'embornal fins a l'any 2050, però a partir del decenni del 2020 aquesta capacitat minvarà. D'acord amb el model, la reducció de la capacitat d'embornal serà especialment dràstica en l'escenari A2 (de fins al 95 % respecte al control durant el període 2030-2040). En canvi, en l'escenari B2 la reducció seria menys acusada, de fins al 40 % respecte a l'escenari de control durant el període 2040-2050. Quan es té en compte el conjunt de la superfície forestal, és a dir, incloent-hi, també, la superfície que l'any 2000 no era bosc, la reducció de la capacitat d'embornal és menys acusada, perquè en cinquanta anys els boscos de nova aparició encara són joves, no hi ha competència pels recursos i mantenen un creixement elevat, fet que permet compensar, en part, la capacitat d'embornal que es perd als boscos adults.

### 3.2.3. *Prats i pastures*

Els prats i les pastures de Catalunya són ecosistemes molt heterogenis que comprenen prats permanents sembrats, herbassars i pastures herbà-

cies permanents seminatural, i matollars i boscos pasturats. La complexitat topogràfica i climàtica de Catalunya comporta una elevada diversitat paisatgística i ecosistèmica i permet que s'hi puguin trobar des de prats alpins que formen gespes més o menys denses i contínues fins a pastures mediterrànies i semiàrides de vegetació esparsa i discontinua. A les zones alpines la vegetació és dominada per herbàcies perennes, sovint gespes de gramínies, mentre que a les mediterrànies hi ha una diversitat elevada de tipus funcionals, incloent-hi herbes anuals i llenyoses (Bello *et al.*, 2005). La diversitat de formacions vegetals implica que la capacitat d'embornal també sigui molt diversa. Per aquesta raó, resulta complex quantificar els estocs i els embornals dels prats i les pastures i també la superfície que ocupen.

### 3.2.3.1. Estocs i embornals de carboni als prats i pastures

L'estoc de carboni als sòls de prats i pastures de Catalunya està ben establert (Smith *et al.*, 2014; Soussana *et al.*, 2007) i pot arribar a ser molt elevat, amb valors de 59 a 299 Mg C ha<sup>-1</sup>, i amb una mitjana de 153 Mg C ha<sup>-1</sup> a pastures pirinenques d'alta muntanya (Garcia-Pausas *et al.*, 2007). Aquests valors depenen de les condicions climàtiques i de la gestió (Doblas-Miranda *et al.*, 2013). Tanmateix, cal diferenciar entre l'estoc de carboni per unitat de superfície i l'estoc absolut, que dependrà de la superfície ocupada per aquestes comunitats. La superfície ocupada pot variar amb els canvis socioeconòmics i socioecològics que determinen els tipus d'ús i coberta

del sòl, que generalment presenten moltes incerteses (Doblas-Miranda *et al.*, 2013). Per aquesta raó, cal emfatitzar que el canvi climàtic coexisteix amb els canvis en l'ús del sòl, que en el cas dels prats i les pastures repercuteixen, sobretot, en una pèrdua per abandonament de les activitats agropecuàries i invasió del bosc. Álvaro Fuentes *et al.* (2011) detecten una pèrdua de gairebé el 8 % de la superfície de prats al nord-est peninsular durant el període 1997-2007, que es correspondria amb la disminució de les càrregues ramaderes i amb les pèrdues de les pastures en moltes zones. Tanmateix, l'MCSC indica un augment de la superfície d'aquestes comunitats lligat a l'abandonament de conreus i a l'efecte dels incendis, un augment que podria ser transitori en funció de la dinàmica posterior d'aquestes superfícies. Tot i que no és clar de quina manera l'abandonament de les pastures de muntanya afecta els estocs de carboni del sòl, els sòls de pastura colonitzats per arbusts semblen tenir un contingut de carboni als primers centímetres de sòl superior al de les pastures de l'entorn (Montané *et al.*, 2007). Concretament, aquests autors van estimar un increment anual de carboni en els primers quinze centímetres de sòl de 28 a 42 g C m<sup>-2</sup> any<sup>-1</sup> i van considerar una taxa d'acumulació lineal durant la vida dels arbusts, estimada entre dinou i trenta-dos anys.

Actualment, si tenim en compte el clima dominant a les diferents comarques de Catalunya, es pot estimar, a partir de les dades de l'MCSC més recent, que el 87 % dels prats són alpins en un sentit ampli

TAULA 3.2. Fluxos de CO<sub>2</sub> al pic de desenvolupament de la vegetació en prats pirinencs al llarg de gradients altitudinals mesurats en mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

Localitat	Altitud (m)	NEE (intercanvi net de l'ecosistema)	Reco (respiració de l'ecosistema)
Besora	712	-6,05	4,22
La Bertolina (Navès)	1.276	-9,51	5,43
Castellar de n'Hug	1.850	-10,16	13,50
Niu de l'Àliga (Bagà)	2.479	-3,23	3,26

Els valors negatius d'NEE indiquen l'absorció neta de CO<sub>2</sub> per l'ecosistema. L'NEE és la productivitat neta de l'ecosistema, és a dir, la diferència entre la producció bruta i la respiració, però amb signe contrari, ja que indica un flux. Els valors positius de Reco indiquen el flux de CO<sub>2</sub> cap a l'atmosfera. Si la producció bruta supera la respiració, el sistema actua com a embornal per al CO<sub>2</sub> i l'NEE és negativa.

Font: Debouk *et al.*, inèdit.

(unes 139.000 ha) i que el 13 % són prats i pastures mediterrànies o semiàrids (unes 20.900 ha). Això constitueix el 5 % de la superfície total, però aquestes dades no reflecteixen la importància real ni l'ocupació de les pastures a Catalunya, ja que no inclouen les zones de matollars i de boscos pasturats. D'altra banda, a Catalunya hi ha una superfície de conreus de farratgeres plurianuals (de la qual 26.019 ha són de secà i 22.597 ha, de regadiu), que es pot incloure en la categoria de prats permanents sembrats.

Dos treballs recents, que tenen en compte el territori de Catalunya, proporcionen una bona estimació dels estocs de carboni als sòls dels prats, basats en models empírics (Doblas-Miranda *et al.*, 2013) o mecanicistes (Álvaro-Fuentes *et al.*, 2011) desenvolupats a partir d'unes bases de dades que caldria ampliar. Doblas-Miranda *et al.* (2013) estimen que hi ha 112 Mg C ha<sup>-1</sup> als sòls dels prats peninsulars i 121,4 Mg C ha<sup>-1</sup> als de Catalunya. Álvaro-Fuentes *et al.* (2011) els estimen de 90 a 230 Mg C ha<sup>-1</sup> en

pastures alpines, una xifra que s'aproxima als valors trobats per Garcia-Pausas *et al.* (2007). En un estudi anterior (Rodríguez-Murillo, 2001), s'estimava que les pastures espanyoles acumulen 73,2 Mg C ha<sup>-1</sup>, amb una desviació típica de 56,7 Mg C ha<sup>-1</sup>.

Al contrari del cas dels boscos, als prats i les pastures el carboni acumulat a la biomassa és relativament baix. La quantitat de carboni acumulada a la biomassa aèria durant el màxim desenvolupament vegetatiu segons un estudi a pastures mediterrànies dels ports de Beseit fou de 4,1 Mg C ha<sup>-1</sup>, mentre que la quantitat de biomassa subterrània als primers vint centímetres del sòl de les mateixes pastures fou de 7,9 Mg C ha<sup>-1</sup> (Sebastià *et al.*, inèdit), és a dir, d'un total de 12 Mg C ha<sup>-1</sup>. En canvi, a pastures montanes i subalpines dels Pirineus es van trobar, en el mateix estudi, gairebé 6,9 Mg C ha<sup>-1</sup> a la part aèria i 7,8 Mg C ha<sup>-1</sup> a la part subterrània dels primers vint centímetres del sòl, és a dir, 14,7 Mg C ha<sup>-1</sup> en total (Sebastià *et al.*, inèdit). Si hi afegíssim els 93 Mg C ha<sup>-1</sup> trobats

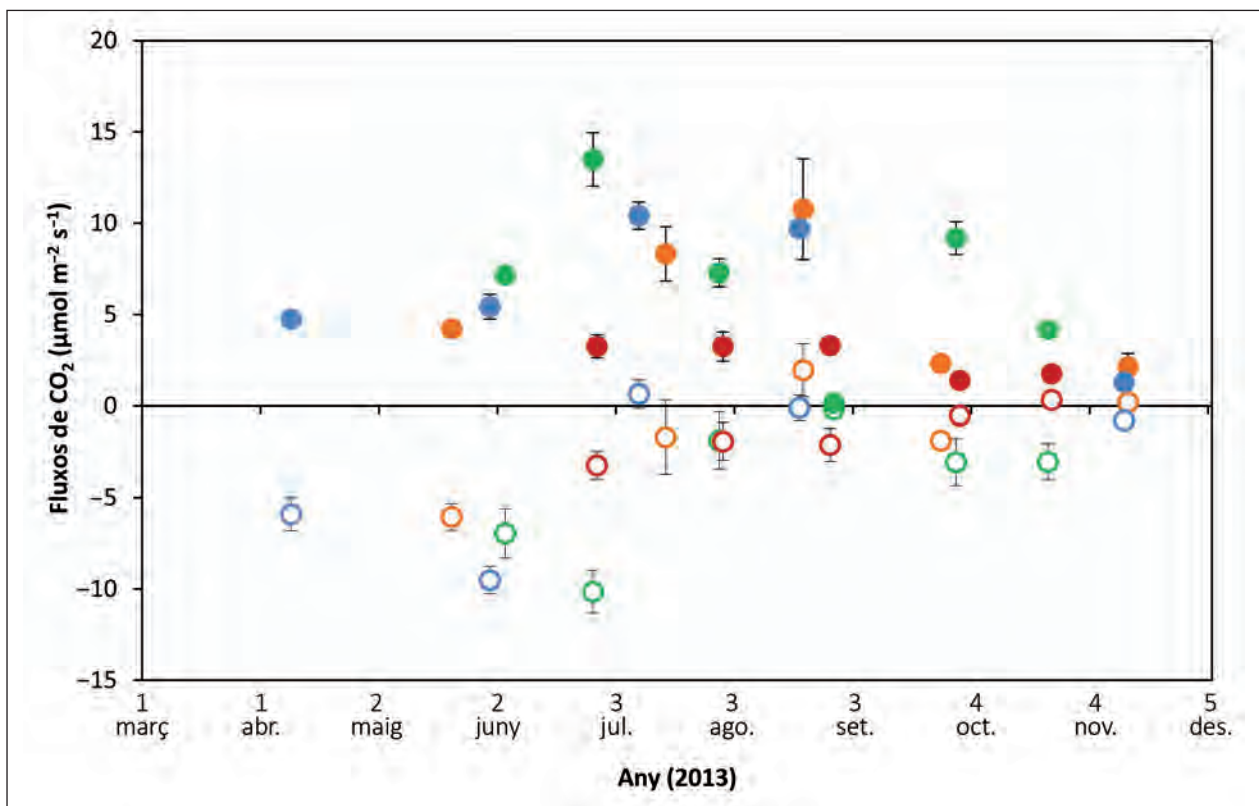


FIGURA 3.1. Fluxos de CO<sub>2</sub> mitjans a quatre pastures al llarg de gradients altitudinals i climàtics durant l'any 2013. Besora (712 m), rodones de color taronja; La Bertolina (1.276 m), rodones de color blau; prat de Ginebrers (1.850 m), rodones de color verd, i Niu de l'Àliga (2.479 m), rodones de color vermell. Les rodones buides representen l'NEE (intercanvi net de l'ecosistema) i les rodones plenes, la Reco (respiració de l'ecosistema). Es representen els valors mitjans ± 1SE.

Font: Debouk *et al.*, inèdit.



als sòls de la zona mediterrània i els 160 Mg C ha<sup>-1</sup> dels sòls dels Pirineus, obtindríem un total de 105 Mg C ha<sup>-1</sup> a les pastures mediterrànies i de 175 Mg C ha<sup>-1</sup> als prats alpins, respectivament, segons aquest estudi. Aquests valors s'ajusten als trobats en altres estudis i als estimats a partir dels models (Garcia-Pausas *et al.*, 2007; Álvaro-Fuentes *et al.*, 2011; Doblas-Miranda *et al.*, 2013). A diferència dels boscos, doncs, als prats els estocs de carboni principals es troben sobretot al sòl i, per tant, són relativament menys vulnerables que els acumulats a la biomassa dels boscos, per exemple, davant dels grans incendis.

Pel que fa als fluxos de CO<sub>2</sub>, les pastures catalanes semblen més aviat un embornal de carboni, però això també depèn del tipus de pastura i de la localitat on es troben. Debouk *et al.* (inèdit) troben que la productivitat neta de les pastures de muntanya augmenta amb l'altitud però torna a davallar a l'estatge alpi, on es troben les pastures d'altitud més elevada (taula 3.2 i figura 3.1).

### 3.2.3.2. Estabilitat de l'estoc i l'embornal als prats i pastures

Les estimacions de les variacions temporals dels estocs i els embornals dels prats i les pastures de Catalunya indiquen una pèrdua del carboni al sòl (Álvaro-Fuentes *et al.*, 2011). En un escenari de canvi climàtic, incloent-hi un augment de la temperatura i una disminució de la precipitació, el contingut de carboni al sòl podria disminuir (Debouk *et al.*, inèdit; Doblas-Miranda *et al.*, 2013; Sjögersten *et al.*, 2012). Si la temperatura pugés i la precipitació decreixés també es veurien amenaçades la biomassa aèria i la productivitat de les pastures, i les condicions de les zones mediterrànies actuals es tornarien més àrides, mentre que les de les zones alpines actuals esdevindrien més mediterrànies. Una pèrdua general de la productivitat comportaria menys carboni a la biomassa aèria i al sòl, tot i que sembla que l'estoc de carboni a la biomassa subterrània es podria mantenir en alguns casos (Sebastià *et al.*, inèdit).

### 3.2.3.3. Eines per a mantenir o millorar l'eficiència en la capacitat d'embornal i en el manteniment de l'estoc

La pèrdua de carboni als ecosistemes de prats i pastures, tant seminaturals com sembrats, en les

condicions de canvi climàtic esperades per a Catalunya es podria mitigar amb una gestió apropiada. Per tal de millorar la capacitat dels prats permanents sembrats d'emmagatzemar carboni al sòl, Lüscher *et al.* (2014) proposen un paquet de mesures que inclouen l'augment de la diversitat sembrada i la combinació d'espècies lleguminoses amb gramínies. A Catalunya, un estudi recent confirma que les barreges d'espècies farratgeres presenten un potencial elevat per a mitigar els gasos amb efecte d'hivernacle (Ribas *et al.*, 2015). Altres tècniques que s'han considerat favorables a l'emmagatzematge de carboni als sòls inclouen la sembra directa (Álvaro-Fuentes *et al.*, 2011). Una càrrega ramadera adequada també permetria mantenir l'estoc de carboni als sòls de les pastures, a més de mantenir la biodiversitat i altres béns i serveis d'aquests ecosistemes (Smith, 2014).

## 3.2.4. Agricultura

### 3.2.4.1. Mètodes d'avaluació dels embornals agrícoles

La metodologia emprada per a avaluar els sistemes agrícoles com a embornals de carboni va ser diferent segons la disponibilitat de la informació. En el cas dels conreus llenyosos, es van construir relacions entre la biomassa o, si no era possible, altres variables biomètriques i l'edat, partint d'informació cercada a la literatura i a les mesures de biomassa destructives i no destructives (Funes *et al.*, 2015). El conjunt de dades emprades per a construir aquestes relacions va ser heterogeni quant a les varietats, els marcs de plantació, els portaempelts, els règims de conreu, els sistemes de conducció, els tipus de sòl, etc., però sempre d'ambients mediterranis. Es van establir diferents equacions d'acord amb els diferents patrons dels conreus llenyosos: olivera, vinya, fruiters no cítrics de pinyol, fruiters no cítrics de llavor i fruiters cítrics (taula 3.3); i només es va avaluar la part llenyosa de les plantes (la part aèria i la part subterrània). Per a avaluar els fruiters de fruita seca (de closca), es van fer servir les equacions construïdes per als fruiters de pinyol, ja que no es disposava d'informació més específica. El segrest anual de cada tipus de conreu llenyós es va estimar ponderant-lo per la superfície segons els grups d'edat establerts i considerant els marcs de plantació més estesos al territori (taula 3.4).

TAULA 3.3. Equacions emprades per a estimar la biomassa aèria i subterrània dels conreus llenyosos

Conreu	Part aèria		Part subterrània	
Vinya	$Biomassa\ aèria = 9,7947e^{1,2506\ edat}$	fins als tres anys	[1]	$R:S = 1,743\ edat^{-0,344}$ <sup>a</sup>
	$Biomassa\ aèria = 1.814,9\ ln(edat) - 1.615,8$	dels quatre als trenta-cinc anys	[2]	
Olivera <sup>b</sup>	$ABT = 4,4888\ edat^{1,5636}$	fins als vuit anys	[3]	30 % de la biomassa aèria
	$ABT = 276,96\ ln(edat) - 479,96$	dels vuit als cent cinquanta anys	[4]	
Fruiters cítrics	$Biomassa\ aèria = 0,1718\ edat^2 - 0,8967\ edat$	fins als quinze anys	[5]	30 % de la biomassa total de la planta
Fruiters de llavor	$Biomassa\ aèria = 0,0086\ edat^2 - 0,6541\ edat$	fins als vint-i-cinc anys	[6]	30 % de la biomassa aèria
Fruiters de pinyol	$Biomassa\ aèria = 2,2633\ edat^2 - 5,1189\ edat + 3,2601$	fins als quatre anys	[7]	30 % de la biomassa total de la planta
	$Biomassa\ aèria = 24,506\ ln(edat) - 15,172$	dels quatre als quinze anys	[8]	

a. R:S és la relació entre la part subterrània de la biomassa i la part aèria de la biomassa (adimensional). L'equació número 9 va ser construïda a partir de dades de mesures destructives.

b. ABT és l'àrea basal del tronc (cm<sup>2</sup>). La biomassa aèria de l'olivera es va estimar a partir de l'ABT, fent servir una relació ABT-biomassa aèria publicada en la literatura. En totes les equacions de la taula la biomassa aèria és expressada en kg/arbre (pes sec) i l'edat, en anys. L'estimació de la part subterrània es basa en relacions amb la part aèria o el total de la planta publicades en la literatura: olivera (Nardino *et al.*, 2013), fruiters cítrics (Mattos *et al.*, 2013), fruiters de llavor (Panzzachi *et al.*, 2012) i fruiters de pinyol (Xiloyannis *et al.*, 2007).

TAULA 3.4. Segrest anual de carboni per tipus de conreu llenyós i trams d'edat

	Segrest (Mg C ha <sup>-1</sup> any <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup> per grups d'edat				Marcs de plantació <sup>b</sup>
	0-10 anys	11-20 anys	21-30 anys	> 30 anys	
Vinya	0,61	0,17	0,09	0,07	2.000-3.000 ceps ha <sup>-1</sup>
Olivera	<b>0-4 anys</b>	<b>5-11 anys</b>	<b>12-50</b>	<b>&gt; 50 anys</b>	100-200 arbres ha <sup>-1</sup>
	0,26	0,47	0,22	0,1	
Llavor	<b>0-9 anys</b>	<b>10-19 anys</b>	<b>19-25 anys</b>	<b>&gt; 25 anys</b>	1.000-3.000 arbres ha <sup>-1</sup>
	0,87	1,06	1,22	~ 0 <sup>c</sup>	
Pinyol	<b>0-5 anys</b>	<b>6-10 anys</b>	<b>11-16 anys</b>	<b>&gt; 16 anys</b>	500-1.000 arbres ha <sup>-1</sup>
	2,65	1,28	0,75	~ 0 <sup>c</sup>	
Closca	<b>0-9 anys</b>	<b>10-14 anys</b>	<b>15-19 anys</b>	<b>&gt; 20 anys</b>	100-300 arbres ha <sup>-1</sup>
	0,61	0,24	0,17	~ 0 <sup>c</sup>	
Cítrics	<b>0-5 anys</b>	<b>6-10 anys</b>	<b>11-15 anys</b>	<b>&gt; 15 anys</b>	500-1.000 arbres ha <sup>-1</sup>
	1,54	4,37	6,69	~ 0 <sup>c</sup>	

a. Pendent de la corba de l'equació per l'estimació de la biomassa (taula 3.3) per a cada tram d'edat.

b. Marc de plantació més representatiu del territori.

c. En tots els fruiters la corba de creixement s'acaba a partir d'aquesta edat perquè no disposem de més dades. Per tant, es considera que a partir d'aquí ja no hi ha creixement.



Per als conreus herbacis (cereals, conreus farratgers i conreus industrials), la metodologia es va basar en l'estimació de la producció primària neta (PPN) desenvolupada a Bolinder *et al.* (2007). La biomassa de conreus herbacis, com que la collita és anual, es va ponderar en funció dels mesos que el conreu es troba al camp durant un any segons el cicle vegetatiu. En tots els casos, la biomassa aèria i subterrània va ser transformada en contingut de carboni fent servir la relació: 1 g biomassa (pes sec) = 0,45 g C (Greer *et al.*, 2009).

El contingut de carboni a la biomassa de conreus llenyosos va ser regionalitzat a tot Catalunya a escala comarcal, partint de la informació oficial relativa a l'edat del conreu, la densitat de plantació i la superfície del conreu (de diferents registres agrícoles catalans, el SIGPAC i l'ESYRCE), i, en el cas dels conreus herbacis, de les dades oficials sobre produccions comarcals (d'estadístiques agràries i del DARP) i superfície (com ara el DUN-SIGPAC)

#### 3.2.4.2. Conreus llenyosos

L'estoc de carboni mitjà per hectàrea de la biomassa dels conreus llenyosos varia molt segons el tipus d'espècie i de variables agronòmiques com ara la densitat de plantació i l'edat. En el cas de la vinya, els valors es poden moure de 4,9 a 11,5 Mg C ha<sup>-1</sup> en vinyes madures (trenta-cinc anys), segons la densitat de plantació. Per a oliveres madures (més de cinquanta anys), els valors poden arribar fins a 18,7 o 26,7 Mg C ha<sup>-1</sup>, depenent de la densitat de plantació. Amb relació als fruiters, els valors varien segons el tipus de fruiter. Així, els de llavor poden arribar a valors de fins a 25,4 o 38,1 Mg C ha<sup>-1</sup>, depenent de la densitat de plantació, en sistemes madurs (vint-i-cinc anys); els de pinyol assolirien uns valors de 15 a 30 Mg C ha<sup>-1</sup> en conreus madurs (quinze anys), segons la densitat de plantació; els de closca podrien assolir valors de 8 a 16 Mg C ha<sup>-1</sup>, depenent de la densitat de plantació, en conreus de més de vint anys, i, finalment, els cítrics podrien emmagatzemar de 46,9 a 75 Mg C ha<sup>-1</sup> en conreus madurs (setze anys), segons la densitat de plantació. Tots aquests resultats estan en consonància amb els valors publicats en la literatura científica: per a la vinya (Williams *et al.*, 2011); l'olivera (Palese *et al.*, 2013); els fruiters cítrics (Quiñones *et al.*, 2013), els fruiters de llavor (Panzacchi *et al.*, 2012) i els fruiters de pinyol (Xi-

loyannis *et al.*, 2007). Actualment, a Catalunya el conreu de la vinya implicaria un estoc de carboni de 0,26 Tg C, el de l'olivera, d'1,68 Tg C, i el dels fruiters, de 2,11 Tg C; de manera que la totalitat dels conreus llenyosos sumaria uns 4 Tg C. Quant a la distribució geogràfica de l'estoc de carboni, destaquen les comarques de la plana de Lleida i del sud de Tarragona, on l'estoc de carboni és més elevat, ja que és en aquestes zones que es concentra la superfície més gran de conreus llenyosos, com ara els fruiters i l'olivera (figura 3.2). S'estima que a tot Catalunya actualment s'emmagatzemen 4,7 Mg C ha<sup>-1</sup>, 13,4 Mg C ha<sup>-1</sup> i 13,9 Mg C ha<sup>-1</sup>, en el cas de la vinya, l'olivera i els fruiters, respectivament. De mitjana, a Catalunya els conreus llenyosos mantenen un estoc de carboni mitjà de 12,1 Mg C ha<sup>-1</sup>.

El segrest anual mitjà dels conreus llenyosos comporta uns 0,42 Mg C ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup>. Els valors de segrest diferenciat per tipus de conreu són de 0,24, 0,16, 0,67, 0,88, 0,13 i 3,5 Mg C ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup> per a la vinya, l'olivera, els fruiters de pinyol, els fruiters de llavor, els fruiters de closca i els cítrics, respectivament. El valor absolut d'aquest segrest anual s'ha calculat multiplicant-lo per la superfície de cada tipus de conreu. En total, els conreus llenyosos catalans segrestarien uns 0,14 Tg C any<sup>-1</sup>, dels quals els fruiters no cítrics representarien més del 50 %, els cítrics, gairebé el 24 %, l'olivera, el 14 % i la vinya, el 10 %.

#### 3.2.4.3. Conreus herbacis

A Catalunya, aquests conreus ocupen una gran quantitat de superfície, de manera que representen un estoc de carboni gens negligible si tenim en compte la biomassa que es manté durant una època de l'any. Actualment, per a aquests conreus es pot considerar un estoc de carboni absolut de 0,42 Tg C, distribuït majorment per tota la plana central i les comarques gironines del nord-est (figura 3.3.b). Els estocs de carboni per hectàrea als conreus herbacis depenen molt del tipus d'espècie quant a la biomassa que són capaços de produir, de la localització (gradient altitudinal i latitudinal), del règim de cultiu i també de la durada del cicle vegetatiu (figura 3.3.a). D'aquesta manera, els conreus que poden assolir valors més elevats són el blat de moro, amb valors de fins a 2,2 Mg C ha<sup>-1</sup> a les comarques empordaneses, el sorgo o mel-

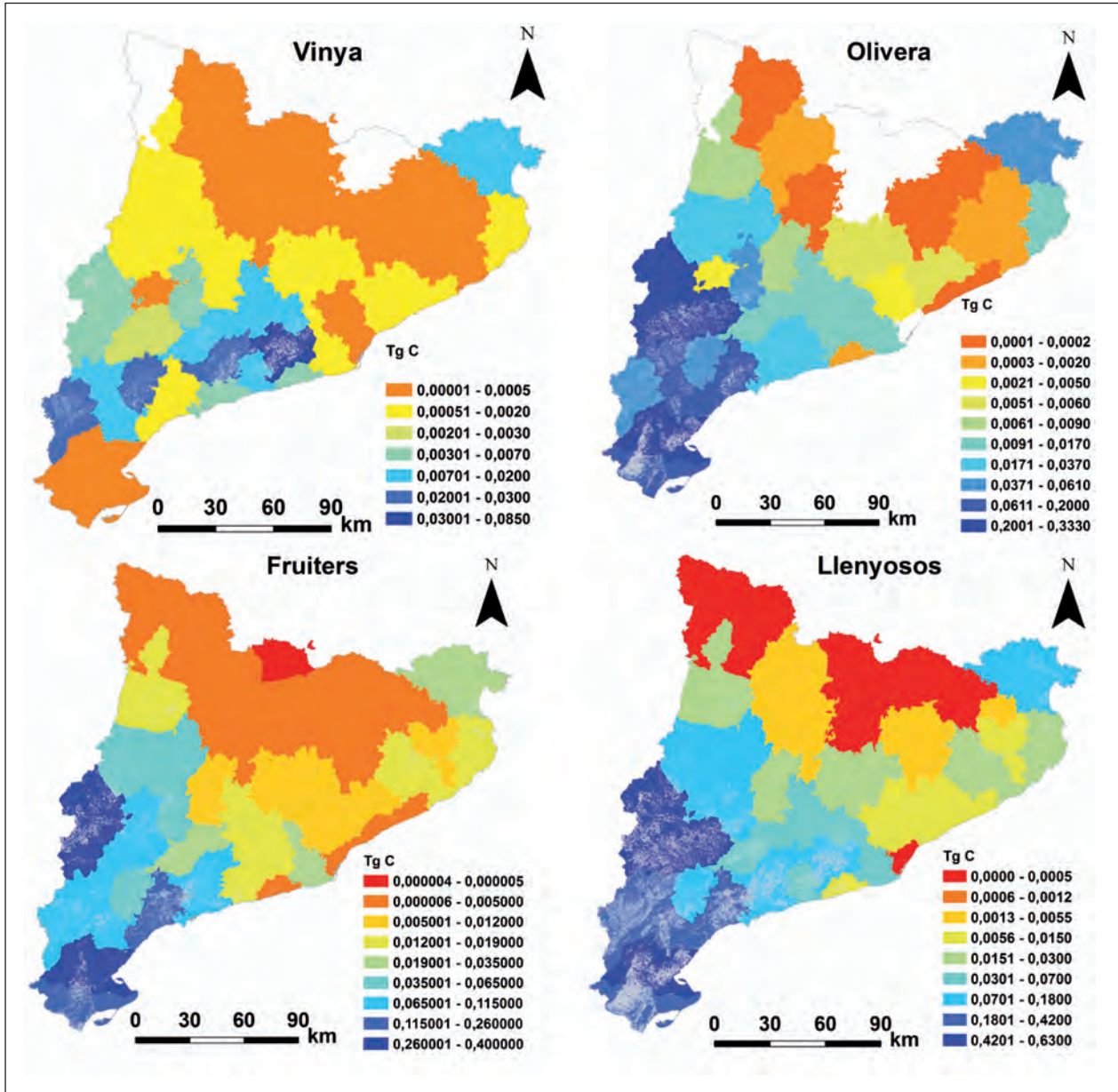


FIGURA 3.2. Distribució comarcal de l'estoc de carboni actual als conreus llenyosos a Catalunya. L'ombregat gris representa la distribució dels conreus. La superfície en blanc correspon a les comarques que no presenten aquest tipus de conreu, en el cas de la vinya i l'olivera.

ca, amb  $2,7 \text{ Mg C ha}^{-1}$  a l'Urgell, i l'arròs, amb  $1,37 \text{ Mg C ha}^{-1}$  al Montsià. En el cas dels cereals d'hivern, com ara el blat o l'ordi, els valors mitjans per a tot Catalunya són de  $0,80$  i  $1,16 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , respectivament. Per als conreus farratgers, com ara l'alfals, l'estoc mitjà és de  $0,41 \text{ Mg C ha}^{-1}$ .

A Catalunya els conreus herbacis mantenen en estoc  $0,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$  de mitjana. La distribució comarcal mostra que les comarques del nord de Girona, el Segrià i les comarques del sud de Tarragona presenten unes densitats de carboni més altes per

les característiques dels conreus herbacis de la zona: la distribució territorial, el tipus i el règim de conreu, el cicle, etcètera.

#### 3.2.4.4. Estocs de carboni als sòls agrícoles

En el SICCC es reflectia un progrés en la quantitat i la qualitat de les dades disponibles per a l'inventari de carboni orgànic dels sòls agrícoles. Les dades cobrien, principalment, els sòls agrícoles de les Terres de l'Ebre i de la franja occidental de Catalunya (Grañana *et al.*, 2009; Costa, 2004), i darrerament se n'han recollit més, de manera

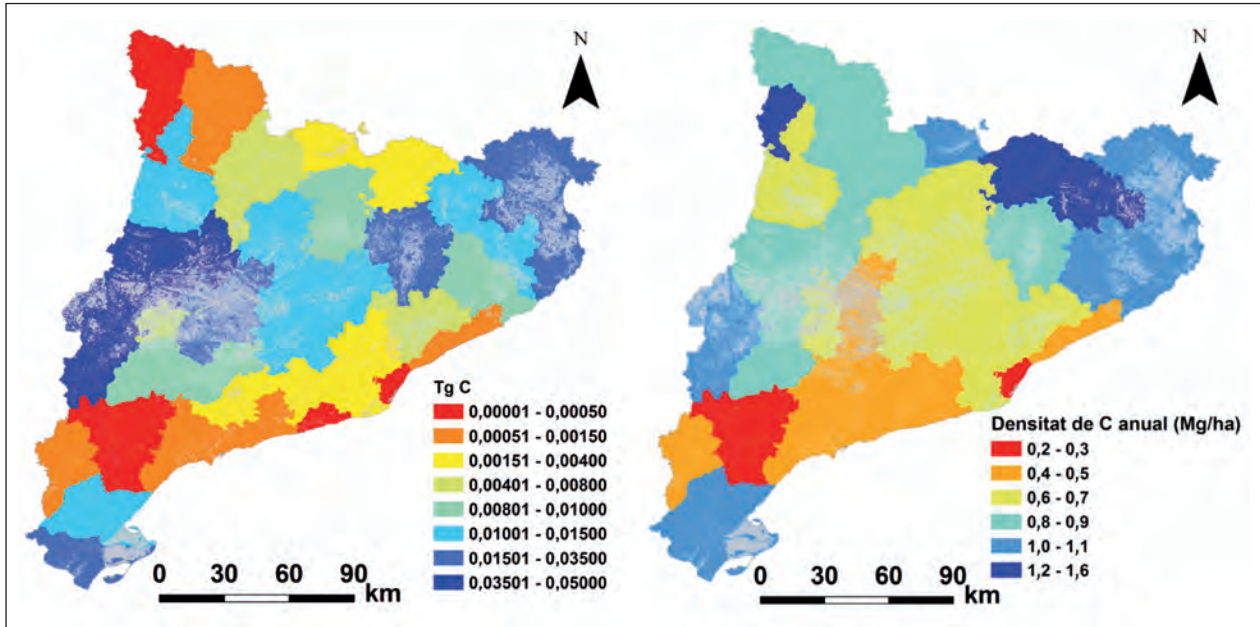


FIGURA 3.3. Distribució comarcal de l'estoc de carboni absolut en Tg C (a) i mitjana en tones de carboni per hectàrea (b) dels conreus herbacis a Catalunya. L'ombregjat gris representa la distribució dels conreus.

que cobreixen bona part del territori català. Les reserves mitjanes fins a 1 m de fondària, que podem considerar que s'apropen molt al total, són de  $93,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$  a la franja occidental de Catalunya i de  $107,0 \text{ Mg C ha}^{-1}$  a les Terres de l'Ebre. Es tracta de dades prou representatives dels sòls agrícoles de la Catalunya mediterrània semiàrida; per tant, manca processar les dades existents d'altres comarques més humides i integrar tota aquesta informació en models que permetin estendre a tot el territori l'estimació dels reservoris de carboni orgànic en sòls agrícoles, com ja s'ha fet als sòls forestals (Doblas-Miranda *et al.*, 2013).

#### 3.2.4.5. Interfase conreu/bosc

L'abandonament de zones agrícoles marginals de baixa productivitat i la construcció d'innombrables vies de comunicació provoca una heterogeneïtat espacial i una fragmentació del paisatge que pot tenir implicacions en el camp hidrològic, de la biodiversitat, dels fluxos d'energia i nutrients, etc. (Young, 2006). Aquesta fragmentació del paisatge provoca que hi hagi zones de transició o ecotons en què conviuen espècies de dos hàbitats diferents (com ara el conreu i el bosc), que no pertanyen a la mateixa successió (Forman, 2004). La relació que s'estableix en aquesta interfase bosc/cultiu és important no solament des del punt de

vista de la capacitat d'embornal, sinó per altres fenòmens com ara el risc d'erosió o d'incendi, la pèrdua o no de la diversitat, etcètera.

En estudis anteriors (Funes *et al.*, 2013), es van fer estimacions de l'estoc de carboni, d'una banda, en bosquines secundàries de pinedes de *Pinus nigra* i *P. halepensis* poc denses i joves, que poden aparèixer després de l'abandonament agrícola, i, d'altra banda, en conreus llenyosos de secà madurs, com ara la vinya (fins a trenta-cinc anys) i l'olivera (més de cinquanta anys). Els resultats van mostrar que la vinya pot arribar a emmagatzemar carboni en graus similars (fins a  $11,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) a les bosquines secundàries, les quals emmagatzemarien de 3,5 a  $16,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ . A més a més, aquests conreus ofereixen altres serveis ambientals i/o socioeconòmics afegits, com ara un risc més petit d'incendi, un valor econòmic més gran, la regulació del cicle de l'aigua, etc. La comparació de les bosquines secundàries encara és més desfavorable si es fa amb l'olivera, ja que el potencial que té com a embornal de carboni igualaria i, fins i tot, superaria (amb  $40 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) el de les pinedes de *P. halepensis* i *P. nigra*.

Amb relació a l'estabilitat dels estocs de carboni, els sistemes agrícoles tenen la mateixa durada i/o



feblesa temporal que les comunitats naturals, ja que cal no oblidar que són individus d'espècies naturals millorades per algunes característiques productives. Per tant, cal valorar que a les nostres condicions mediterrànies, a les quals les polítiques REDD no es tenen en compte, el manteniment de l'agricultura a molts llocs on el bosc (cal pensar que les masses de pins mediterranis són matollars alts) gairebé no és viable, a causa de trobar-se per sota dels 400 mm de pluja, és una manera de produir i guardar carboni en la temporalitat pròpia de cada espècie.

La temporalitat dels conreus llenyosos, tant en secà com en regadiu, es troba entre els vint-i-cinc i els trenta anys, un valor igual o superior al dels cicles de tala d'algunes espècies forestals i/o als incendis forestals, malauradament tan freqüents. Tanmateix, s'ha de valorar la funció socioeconòmica que aquests conreus generen, sempre molt superior a la de les masses forestals secundàries, generalment de pinàcies i/o de quercínies de creixement lent.

Cal valorar el paisatge agrícola actual perquè s'ha mostrat com un bon embornal de carboni, però sobretot per totes les altres funcions socioeconòmiques (com ara la generació de producte interior brut, l'establiment i el manteniment de població, el manteniment cultural, la salvaguarda del paisatge, etc.) i ecosistèmiques (com ara la regulació dels cicles d'aigua, nutrients i carboni, el manteniment de la biodiversitat, el control d'incendis, la reducció de l'erosió, etc.) que realitza.

### 3.3. Aigües continentals

Les aigües continentals són, en bona part, sistemes de transició que canalitzen el transport de carboni des dels sistemes terrestres cap als marins i que només segresten una fracció relativament baixa de carboni. La contribució com a embornal, sobretot, té lloc als sistemes lenítics (estanyes, embassaments i aiguamolls), on es produeix una acumulació constant, i habitualment permanent, de sediment. Als rius, la retenció de sediments és més feble i inestable. Una bona part del sediment acabarà a la zona de confluència amb el mar o es dipositarà a les vores. En el darrer cas, es convertirà progressivament en un sòl o serà transportat de nou riu avall durant episodis extrems de riuada.

Una altra qüestió són les aigües subterrànies i els aqüífers, que no tractem en aquest capítol.

Pel que fa a l'estoc, el carboni que observem en un volum d'aigua es pot trobar en forma inorgànica, al sistema carbònic-carbonats, i en forma orgànica, sia com a organismes aquàtics que formen part de la xarxa tròfica de l'ecosistema o bé com a carboni al·lòcton, com, per exemple, restes de vegetació o substàncies orgàniques dissoltes que s'han originat als sistemes terrestres. La quantitat de formes inorgàniques sobretot depèn de la naturalesa de la roca de la conca que recull l'aigua. Com que una gran part dels sistemes aquàtics de Catalunya es troben en conques amb abundància de roques carbonatades, el contingut de carboni inorgànic és normalment elevat, de prop de trenta vegades el contingut de carboni orgànic. Les aigües continentals habitualment es troben sobresaturades de  $\text{CO}_2$  i, per tant, són font i no pas embornal (Catalan *et al.*, 2014b; López *et al.*, 2011; Marcé *et al.*, 2015; Schiller *et al.*, 2014). Tot i això, l'estoc pot variar molt d'un any a l'altre segons el cabal dels rius i, en darrera instància, la precipitació i la forma en què es produeix (Gallart *et al.*, 2011). D'una manera només orientativa, per comparar-ho amb altres sistemes, als embassaments es poden estimar  $29 \text{ Mg C ha}^{-1}$  en forma inorgànica i  $1 \text{ Mg C ha}^{-1}$  en forma orgànica (Palau *et al.*, 2010). Als rius les quantitats no són gaire diferents, amb  $17$  i  $0,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , respectivament. Els estanys de muntanya són d'aigües poc mineralitzades i emmagatzemen poc carboni. Així, doncs, els ecosistemes aquàtics continentals de Catalunya deuen tenir un estoc en l'aigua de  $0,33 \text{ Tg C}$ , dels quals només d'un 3 a un 4 % es troba en compostos orgànics.

Cal considerar només els sediments de sistemes lenítics com a embornal propi dels sistemes aquàtics continentals. L'acumulació de carboni als sediments també es pot produir en forma de carboni orgànic o de carbonats precipitats. El carboni orgànic pot provenir de la fixació de  $\text{CO}_2$  al·lòcton a la part terrestre de la conca o a medis aquàtics tributaris a la massa d'aigua, o pot ser de producció autòctona, quan la fixació té lloc a la mateixa massa d'aigua. Normalment, excepte en aigües verdes molt productives, la primera sobrepassa la segona. Per tant, els sediments també emmagatzemen d'una manera permanent una part del car-

boni fixat per la vegetació terrestre. L'enterrament de carbonats només constitueix un embornal net de  $\text{CO}_2$  atmosfèric en la mesura que els cations que faciliten la dissolució de  $\text{CO}_2$  a l'aigua (formant bicarbonats i carbonats) provenen de la meteorització de roques no carbonatades (Catalan *et al.*, 2014a). Si no és així, si vénen de la meteorització de roques calcàries, no és un segrest net, atès que s'enretira una quantitat equivalent a la que primer s'ha alliberat en un altre punt. Per tant, l'acumulació de carboni orgànic als sediments és la que té més interès com a embornal de l'excés de carboni atmosfèric.

La deposició de carboni als sediments dels sistemes aquàtics continentals pot ser elevada per unitat de superfície, però com a embornals no acaben de ser rellevants perquè la superfície que ocupen és relativament petita. Si considerem tots els tipus de sistemes, incloent-hi les molles i els aiguamolls, que es troben a cavall del medi aquàtic i del terrestre, la superfície ocupada pels sistemes aquàtics continentals és de prop del 0,5 % del territori de Catalunya, segons l'MCSC més recent (2009). Dels que actuen com a embornals, els embassaments són els que ocupen més territori (0,2 %) i la resta queda molt repartida, sense diferències remarcables, entre els estanys i les basses d'alta muntanya, els estanys i les basses d'interior, les llacunes litorals, les basses i els estanyols salabrosos i les molles.

Els embassaments són els sistemes que més carboni segresten. Com que es troben intercalats en trams de rius amb un cabal considerable, hi ha una entrada important de matèria orgànica externa, una part de la qual pot sedimentar, i una càrrega de nutrients que pot donar lloc a una producció primària pròpia elevada. La quantitat que pot acabar enterrada per superfície de sediment és de 1.000 a 5.000  $\text{g C m}^{-2} \text{any}^{-1}$  (Palau *et al.*, 2010), tot i que variarà molt segons la situació de l'embassament i la situació de la cua a la presa. Els estanys, els estanyols i les basses presenten unes càrregues d'entrada molt inferiors a les dels embassaments, i això queda reflectit en la minsa capacitat per a segrestar carboni. Els estanys d'alta muntanya, molt poc productius i situats en conques poc vegetades, es mouen entre l'1 i els 10  $\text{g C m}^{-2} \text{any}^{-1}$  de superfície de sediment (Cata-

lan *et al.*, 2002). Només els situats en cotes més baixes i conques aforestades presenten valors més elevats i semblants als de la resta d'estanys i llacunes del territori, de 100 a 1.000  $\text{g C m}^{-2} \text{any}^{-1}$ . Les molles també es mouen en aquest interval, encara que el sediment és més orgànic, el creixement és lent i hi ha poc transport horitzontal que afegeixi material al·lòcton.

Per a passar d'aquestes taxes d'acumulació als sediments a unitats de superfície del que els sistemes ocupen al territori, cal tenir en compte que l'àrea d'acumulació permanent de sediment només és una fracció de tota la superfície del sistema. Les dues àrees poden ser molt similars, com en el cas de les molles, o la d'acumulació es pot reduir a una desena part de la total, com en alguns estanys profunds de muntanya. Tenint això present, podem estimar que els embassaments segresten prop de 20  $\text{Mg C ha}^{-1} \text{any}^{-1}$ . Els altres tipus de sistemes es trobarien en un interval de 0,01 a 0,55  $\text{Mg C ha}^{-1} \text{any}^{-1}$  per als estanys de muntanya poc productius, i de 2 a 6  $\text{Mg C ha}^{-1} \text{any}^{-1}$  per a la resta. Tot plegat, implica entre 0,05 i 0,19  $\text{Tg C any}^{-1}$  de segrest net per part de tots els sistemes aquàtics continentals de Catalunya, és a dir, en termes mitjans, 0,12  $\text{Tg C any}^{-1}$  o 7  $\text{Mg C ha}^{-1} \text{any}^{-1}$ , dels quals el 83 % té lloc als embassaments.

### 3.4. Sistemes marins

L'intercanvi de  $\text{CO}_2$  entre l'atmosfera i els oceans s'esdevé per la diferència en la pressió parcial d'aquest gas entre l'aire i l'aigua, i existeixen diversos mecanismes que afavoreixen aquesta transferència. D'una banda, el fet que quan el  $\text{CO}_2$  es dissol, a diferència d'altres gasos com ara l'oxigen, reacciona amb l'aigua, es dissocia i dona lloc a tres formes inorgàniques, lligades estretament entre si mitjançant equilibris químics: el bicarbonat (90 %), el carbonat (9 %) i el  $\text{CO}_2$  aquós (1 %), que integren el que anomenem *carboni inorgànic dissolt* (DIC). Aquesta dissociació permet que els oceans puguin absorbir fins a deu vegades més  $\text{CO}_2$  que en absència d'aquests equilibris. Un segon mecanisme, en aquest cas físic, és la bomba de solubilitat, que fa referència a la solubilitat més gran del  $\text{CO}_2$  en aigües fredes i a la transferència d'aquest  $\text{CO}_2$  en superfície cap al fons mitjançant la formació d'aigües profundes a les latituds altes. En tercer lloc, tenim la bomba biològica, en

la qual podem diferenciar la bomba del carboni orgànic i la bomba del carbonat. En el primer cas, ens referim a la fixació d'aquest  $\text{CO}_2$  per part dels organismes marins que el transformen en matèria orgànica per mitjà de la fotosíntesi, la qual posteriorment és exportada a capes més profundes dels oceans, on pot ser segrestada en escales més llargues de temps. La bomba del carbonat actua en sentit contrari: la precipitació d'esquelets carbonatats per part d'alguns organismes marins implica l'alliberament de  $\text{CO}_2$  a la columna d'aigua. L'eficàcia relativa d'aquests dos darrers processos serà, per tant, la que determinarà l'efecte net de la bomba biològica en el  $\text{CO}_2$  atmosfèric.

L'absorció i l'emmagatzematge de carboni es calcula a partir d'observacions i mesures de paràmetres del sistema del carboni oceànic, a més d'altres traçadors, recollits en unes dotze mil estacions distribuïdes per tots els mars i els oceans (GLODAP; Key, 2004). En aquests moments, la millor estimació pel que fa a l'inventari de carboni antropogènic és de  $155 \pm 31 \text{ Pg C}$  per al període 1750-2010 (Khatiwala *et al.*, 2013). No obstant això, regionalment la capacitat de mars i oceans per a actuar com a embornals és heterogènia, i en el cas de la mar Mediterrània, a més, aquesta informació és limitada. Malgrat que només representa el 0,8 % de la superfície global dels oceans, la mar Mediterrània té una elevada capacitat per a absorbir  $\text{CO}_2$  (Schneider *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2011). Això és degut, d'una banda, a l'alcalinitat més gran de les aigües, que permet absorbir més  $\text{CO}_2$  de l'atmosfera, i, de l'altra, a una circulació oceànica molt activa que transporta aquest  $\text{CO}_2$  cap a capes més profundes. Aquestes dues característiques ocasionen que l'absorció de  $\text{CO}_2$  hagi estat molt més ràpida a la Mediterrània que a la resta de mars i oceans, amb un inventari total de carboni d' $1,7 \text{ Pg}$  fins a l'any 2001, calculat a partir d'un transecte est-oest al llarg de la Mediterrània (Schneider *et al.*, 2010) i corresponent, aproximadament, a l'1,1 % del carboni antropogènic acumulat a tots els mars i oceans, malgrat que la mar Mediterrània tan sols conté el 0,3 % del volum d'aigua de tots els oceans. Pel que fa a la mar catalana (assumint una superfície de  $74.000 \text{ km}^2$  i a partir dels valors obtinguts per Schneider *et al.*, 2010), a la Mediterrània occidental podem obtenir una estimació aproximada de la capacitat d'embornal

de la nostra mar des del 1750 fins al 2001, que seria d'uns  $89 \text{ Tg C}$ .

I en el nostre entorn més proper, les fanerògames marines, els components principals de l'ecosistema marí costaner català, juguen un paper molt rellevant en el segrest d'aquest  $\text{CO}_2$ , que es coneix com a *blue carbon*. Concretament, la *Posidonia oceanica*, la fanerògama endèmica més abundant a la mar Mediterrània, forma extenses praderies des de la superfície fins a 40 m de profunditat i presenta una productivitat elevada. A més, aquestes praderies són altament estables (amb taxes de descomposició baixes), cosa que dóna lloc a la formació d'un dipòsit orgànic, conegut com a *matte* o *mata*, que es pot reservar al sediment durant milers d'anys (Mateo *et al.*, 1997; Serrano *et al.*, 2012), i constituir, així, un embornal important de carboni. S'estima que prop del 30 % de la producció total s'acumula al sediment (Pergent *et al.*, 1994). En aquest sentit, l'estudi realitzat en un testimoni de 475 cm obtingut en una praderia de *P. oceanica* de la badia de Portlligat mostra uns dels valors més alts d'acumulació de carboni, tant a la planta ( $7,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) com als sediments ( $372 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), quan el comparem amb un recull de praderies de tot el planeta (Lo Iacono *et al.*, 2008; Fourqurean *et al.*, 2012). A les illes Balears trobem el dipòsit sedimentari documentat més ric en carboni de totes les fanerògames estudiades, que correspon a una acumulació de  $700 \text{ Mg C ha}^{-1}$  en 10 m de sediment i quatre mil anys de creixement (Serrano *et al.*, 2014). Es calcula que la quantitat de carboni acumulat en aquestes praderies equival a cent cinc anys d'emissions de  $\text{CO}_2$  de les illes Balears (Pergent *et al.*, 2012), cosa que les converteix en un dels embornals de carboni més eficients del món (Serrano *et al.*, 2014). L'acumulació de carboni en praderies de *P. oceanica* a la mar Mediterrània és comparable amb l'acumulat a aiguamolls o torberes i fins i tot superior (Serrano *et al.*, 2014). En el cas de la mar catalana, podem fer una estimació de la capacitat d'embornal de les fanerògames marines a partir d'un treball recent en què s'ha estimat la superfície de les praderies de *P. oceanica* ( $6.123 \text{ ha}$ ) i *Cymodocea nodosa* ( $3.612 \text{ ha}$ ; Romero, *et al.*, 2015) al litoral català. Si prenem uns valors d'acumulació de carboni de 30 a  $37 \text{ kg C/m}^2$ , calculats a partir dels treballs realitzats a Portlligat (Lo Iacono *et al.*, 2008; Serrano *et*

al., 2012), les illes Medes i el cap de Creus (Mateo *et al.*, 1997), i assumim un gruix mitjà de mata de 2 m, obtenim una acumulació de carboni orgànic total d'1,8 a 2,3 Tg C en praderies de *P. oceanica* i de 2,9 a 3,6 Tg C si considerem, també, l'extensió de *C. nodosa*.

Malauradament, l'estabilitat d'aquests embornals de carboni es veu amenaçada per diverses pressions antròpiques, amb la pèrdua consegüent de la capacitat per a seguir segrestant carboni. Tot i que les causes principals de la desaparició de *P. oceanica* són degudes a impactes locals al litoral, com ara l'eutrofització, la construcció al llarg de la costa o el turisme, que degraden la qualitat de l'aigua i del sediment i augmenten l'erosió de les praderies, fenòmens d'un caràcter més global o regional, com ara l'arribada d'espècies invasores o l'augment de la temperatura i del nivell del mar, també amenacen seriosament aquests ecosistemes. Un treball recent apunta cap a una disminució del 13 al 38 % en l'extensió de praderies de *P. oceanica* de la Mediterrània occidental durant els darrers cinquanta anys (Marbà *et al.*, 2014). La degradació d'aquests ecosistemes allibera carboni, no solament associat a la pèrdua de la planta, sinó també a la remineralització de la matèria orgànica acumulada als primers metres de sediment. Es calcula que la pèrdua actual d'aquestes praderies a escala global, un 5 % cada any des del 1980 (Waycott *et al.*, 2009), podria comportar el 10 % de les emissions atribuïdes als canvis d'ús dels sòls (Fourqurean *et al.*, 2012).

### 3.5. Conclusions

En aquest capítol s'ha fet un esforç important per a elaborar una determinació raonada i raonablement fiable dels estocs i els embornals de carboni, tant en valor relatiu (per unitat de superfície) com en valor absolut, dels diferents sistemes tant terrestres com marins. En alguns casos, a causa de l'escassa informació de base existent, aquest esforç ha implicat partir d'unes assumpcions que inevitablement han comportat unes estimacions encara molt grolleres. En el futur s'espera que es puguin elaborar aproximacions més fiables i precises. Aquest esforç queda sintetitzat a la taula 3.5., en la qual es donen els valors globals per a tot Catalunya de la quantitat de carboni emmagatzemat (l'estoc de carboni) i de carboni segrestat

anualment (capacitat d'embornal) per a cada sistema i subsistema. Els casos per als quals encara no hi ha prou informació disponible s'han deixat en blanc. El detall de les diferents metodologies de càlcul, fonts d'informació utilitzades i assumpcions que s'han tingut en compte en cada cas es poden trobar en l'apartat corresponent d'aquest capítol.

Pel que fa a l'estoc mitjà de carboni (sumant la vegetació i el sòl), el sistema terrestre que més carboni manté en estoc, encara que per un marge estret, és el bosc, amb 149,5 Mg C ha<sup>-1</sup>, perquè és el que acumula més carboni a la vegetació (56 Mg C ha<sup>-1</sup>). Atès que els sòls dels prats són els que més carboni emmagatzemen (121,4 Mg C ha<sup>-1</sup>), els trobem en la segona posició. En un terme mitjà se situen els conreus llenyosos i els matollars, amb 104,0 Mg C ha<sup>-1</sup> i 112,1 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectivament. En la darrera posició hi ha els conreus herbacis, amb 100,8 Mg C ha<sup>-1</sup>, perquè mantenen menys d'1 Mg C ha<sup>-1</sup> a la vegetació.

La mar catalana ha acumulat, segrestant-lo de l'atmosfera des del 1750 fins al 2001, 12 Mg C ha<sup>-1</sup>, un valor molt semblant a l'estoc dels matollars o dels conreus de llenyoses. Encara són més destacables les praderies de *P. oceanica* i *C. nodosa*, que acumulen 330 Mg C ha<sup>-1</sup> (incloent-hi la planta i 2 m de sediment), un valor que quasi triplica el carboni del sòl dels prats i les pastures. Les aigües continentals mantenen 47,9 Mg C ha<sup>-1</sup>, però una part molt elevada és carboni inorgànic dissolt del sistema carbònic-carbonats, que es calcula que pot ser trenta vegades superior al carboni orgànic. Fent un càlcul senzill, el carboni orgànic que es manté emmagatzemat a l'aigua seria, de mitjana, 1,6 Mg C ha<sup>-1</sup>, proper al dels conreus herbacis.

Quan s'expressa en termes absoluts, és a dir, tenint en compte la superfície que ocupa cada sistema, el que més estoc de carboni manté emmagatzemat és el bosc, amb 172,7 Tg, seguit a força distància pels conreus de llenyoses i d'herbàcies, amb 98,3 Tg, i per la mar catalana, amb 92,3 Tg. En les darreres posicions hi ha els matollars, amb 59,9 Tg, i, finalment, els prats i les pastures, amb 21 Tg. En el cas dels conreus i dels prats i les pastures, el principal contribuent a l'estoc de carboni és el sòl, perquè la part corresponent a la vegetació és proporcionalment molt baixa en ambdós casos.



TAULA 3.5. Valors d'estoc i segrest de carboni mitjà i absolut a Catalunya per a cadascun dels sistemes analitzats

Sistemes terrestres		Estoc mitjà Mg C ha <sup>-1</sup>		Estoc absolut Tg C		Segrest mitjà Mg C ha <sup>-1</sup> any <sup>-1</sup>		Segrest absolut Tg C any <sup>-1</sup>	
		Vegetació	Sòl	Vegetació	Sòl	Vegetació	Sòl	Vegetació	Sòl
Bosc		56,0 <sup>1</sup>	93,4 <sup>2</sup>	63,5 <sup>1</sup>	109,2 <sup>2</sup>	1,04	—	1,27	—
Matollars		13,6	90,4	5,2	54,7	~0	—	~0	—
Prats i pastures		13,3	121,4	2,1	18,9	~0	—	~0	—
Agricultura	Conreus llenyosos	12,1	100,0	4,0	93,9	0,42	—	0,14	—
	Conreus herbacis	0,8		0,42		0	—	0	—
		Aigua	Sedi- ment	Aigua	Sedi- ment	Aigua	Sedi- ment	Aigua	Sedi- ment
Sistemes marins		12,0 <sup>3</sup>	330,0 <sup>4</sup>	89 <sup>3</sup>	3,3 <sup>4</sup>	—	—	—	—
Aigües continentals		47,9 <sup>5</sup>	—	0,33 <sup>5</sup>	—	~0	7	~0	0,12

1. Inclou arbres i sotabosc.
2. Inclou el carboni del sòl, de la virosta i de la fusta morta en peu.
3. Quantitat de carboni que s'ha absorbit de l'atmosfera entre el 1750 i el 2001.
4. Praderies de *Posidonia oceanica* i *Cymodocea nodosa* (incloent-hi la planta i 2 m de sediment).
5. Inclou el carboni inorgànic dissolt que pot ser trenta vegades superior al carboni orgànic dissolt.

El color associat a cada valor fa referència al grau de certesa: el verd, a un grau de certesa elevat; el taronja, a un grau de certesa mitjà, i el vermell, a un grau de certesa baix.

A la mar catalana, en canvi, el carboni és sobretot a l'aigua, en bona part per la gran superfície que ocupa (per al càlcul s'ha assumit una superfície de 74.000 km<sup>2</sup>, més del doble de la superfície de Catalunya, 32.000 km<sup>2</sup>).

Pel que fa al segrest mitjà de carboni, els sediments de les aigües continentals són, clarament, els que més quantitat de carboni segresten per unitat de superfície, amb 7 Mg C ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup>, un valor set vegades superior a la capacitat d'embornal dels boscos, d'1,04 Mg C ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup>, que, al seu torn, duplica àmpliament la no gens negligible capacitat dels conreus llenyosos, amb 0,42 Mg C ha<sup>-1</sup> any<sup>-1</sup>. Quan s'expressa en valor absolut, el bosc és, amb diferència, l'embornal de carboni principal, amb 1,27 Tg any<sup>-1</sup>. Els sediments de les aigües continentals, amb 0,12 Tg any<sup>-1</sup>, passen a darrer terme perquè ocupen una superfície molt petita, seguits de molt a prop pels conreus de llenyoses, amb 0,14 Tg any<sup>-1</sup>. Pel que fa a la resta, s'assumeix que o bé la capacitat d'embornal és lleugerament positiva però propera a zero, com en el cas dels mato-

llars i dels prats, o bé és totalment neutra, com en el cas dels conreus d'herbàcies. Malauradament, per als sòls i als sistemes marins encara no hi ha prou estudis locals que permetin estimar d'una manera raonable la capacitat d'embornal.

### 3.6. Recomanacions

#### 3.6.1. Boscos i matollars

Atès que la major part dels boscos ja pateixen l'efecte del canvi climàtic, és imprescindible realitzar una gestió forestal flexible i adaptada a cada espècie i zona geogràfica. En alguns casos caldrà augmentar la freqüència de les intervencions i en d'altres, la intensitat de les aclarides, per a evitar el declivi dels boscos, reduir el risc d'incendi i mantenir-ne, i si és possible millorar-ne, l'estat de salut.

Als boscos on es pugui maximitzar l'estoc de carboni, perquè hi ha un risc baix d'impacte de perturbacions, es recomana una gestió forestal més conservadora que mantingui períodes de rotació més llargs per a aconseguir un temps de residèn-

cia més gran de l'estoc de carboni en peu. Aquesta gestió hauria de permetre augmentar el nombre de classes diamètriques (diversitat estructural alta) i mantenir els arbres de més grandària. A les zones on fos possible, s'haurien d'afavorir les masses mixtes de coníferes i planifolis. També caldria evitar les rompudes, que, tot i ser necessàries per qüestions econòmiques o de planificació territorial per a evitar grans incendis forestals, comporten una pèrdua molt elevada del carboni emmagatzemat al sòl.

### 3.6.2. Prats i pastures

Les recomanacions per a mantenir els embornals de carboni als prats i les pastures catalans en condicions de canvi climàtic inclouen:

- El manteniment d'un ús sostenible d'aquests ecosistemes, amenaçats igualment per la intensificació i per l'abandonament.
- La introducció de diversitat als prats sembrats permanents i la protecció de la biodiversitat dels ecosistemes pràcticoles i les pastures.

### 3.6.3. Agricultura

En general, cal reduir les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle per a fer un balanç més positiu. En aquest sentit, l'agricultura de conservació, la incorporació de carboni al sòl (biocarbó o *biochar*, components orgànics, etc.) i l'agricultura de precisió, juntament amb les pràctiques agronòmiques que optimitzin la producció amb una reducció més petita de la biomassa, poden contribuir a les polítiques de mitigació, les quals, tanmateix, es poden englobar en un sol concepte: aplicar el sentit comú per a objectius clars, com ara l'increment de la productivitat específica, incloent-hi la fixació de carboni amb aportacions energètiques baixes.

### 3.6.4. Aigües continentals

El segrest de carboni als sediments pràcticament resulta permanent a les escales de temps d'interès per al canvi climàtic. Variacions importants del nivell de l'aigua als embassaments, o rentats de fons, podrien alliberar part de la retenció per l'erosió del sediment acumulat. És un factor més que cal considerar en la gestió d'aquests sistemes, tot i que no ha de ser prioritari.

L'estoc de carboni a l'aigua dels rius és probable que sigui molt fluctuant en el futur, en la mesu-

ra que ho siguin les precipitacions i els usos del sòl. Per unitat de volum, el carboni probablement augmentarà, atès que cal esperar una meteorització més elevada de les roques, més producció primària pròpia de les aigües i, possiblement, més exportació de carboni des dels sòls de la conca, en el cas de sequeres que malmetin la vegetació actual. Tot plegat pot tenir repercussions en el balanç de carboni a la zona costanera. S'hauria d'establir un seguiment més bo d'aquest procés.

### 3.6.5. Sistemes marins

Per a revertir la tendència actual de disminució de les praderies marines calen accions que minimitzin el deteriorament de la costa, però també calen polítiques i mesures a escala global per a limitar l'augment de les temperatures i l'impacte sobre la *P. oceanica*.

## Referències bibliogràfiques

- ALLEN, C. D.; MACALADY, A. K.; CHENCHOUNI, H. [et al.] (2010). «A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests». *Forest Ecology and Management*, 259, p. 660-684.
- ÁLVARO-FUENTES, J.; EASTER, M.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. [et al.] (2011). «Modelling soil organic carbon stocks and their changes in the northeast of Spain». *European Journal of Soil Science*, 62, p. 685-695.
- ANDREU, L.; GUTIÉRREZ, E.; MACIAS, M. [et al.] (2007). «Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests». *Global Change Biology*, 13, p. 804-815.
- BANQUÉ, M.; GARCIA CALLEJAS, D.; MARTÍNEZ-VILALTA, J. [et al.] (2014). *C-Bosc: Projeccions dels estocs i de la capacitat d'embornal de carboni a Catalunya fins al 2050* [en línia]. <[http://canviclimatic.gencat.cat/es/campanyes\\_i\\_comunicacio/publicacions-de-canvi-climatic](http://canviclimatic.gencat.cat/es/campanyes_i_comunicacio/publicacions-de-canvi-climatic)> [Consulta: 15 setembre 2015].
- BELLO, F. DE; LEPŠ, J.; SEBASTIÀ, M. T. (2005). «Predictive value of plant traits to grazing along a climatic gradient in the Mediterranean». *Journal of Applied Ecology*, 42, p. 824-833.
- BOLINDER, M. A.; JANZEN, H. H.; GREGORICH, E. G. [et al.] (2007). «An approach for estimating net pri-

- mary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada». *Agriculture Ecosystems Environmental*, 118, p. 29-42.
- CATALAN, J.; PLA, S.; RIERADEVALL, M. [et al.] (2002). «Lake Redo ecosystem response to an increasing warming in the Pyrenees during the twentieth century». *Journal of Paleolimnology*, 28, p. 129-145.
- CATALAN, J.; PLA, S.; GARCÍA, J. [et al.] (2014a) «Air temperature-driven CO<sub>2</sub> consumption by rock weathering at short timescales: Evidence from a Holocene lake sediment record». *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 136, p. 67-79.
- CATALAN, J.; SCHILLER, N. VON; MARCÉ, R. [et al.] (2014b). «Carbon dioxide efflux during the flooding phase of temporary ponds». *Limnetica*, 33, p. 349-359.
- COSTA, J. (2004). *Els sòls com a reservori de carboni. Aplicació en una franja occidental de Catalunya: Estat actual i potencial*. Projecte de final de carrera. Lleida: Universitat de Lleida.
- CREAF = CENTRE DE RECERCA ECOLÒGICA I D'APLICACIONS FORESTALS. *Mapes de cobertes del sòl de Catalunya* [en línia]. <<http://www.creaf.uab.es/mcsc>> [Consulta: 15 setembre 2015].
- DOBLAS-MIRANDA, E.; ROVIRA, P.; BROTONS, L. [et al.] (2013). «Soil carbon stocks and their variability across the forests, shrublands and grasslands of peninsular Spain». *Biogeosciences*, 10, p. 8353-8361.
- EEA = EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (2008). EEA Report núm. 4/2008, *Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment* [en línia]. <[http://www.eea.europa.eu/publications/eea\\_report\\_2008\\_4](http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_4)> [Consulta: 15 setembre 2015].
- FORMAN, R. T. T. (2004). *Mosaico territorial para la región metropolitana de Barcelona*. Barcelona: Gustavo Gili.
- FOURQUIREAN, J. W.; DUARTE, C. M.; KENNEDY, H. [et al.] (2012). «Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock». *Nature Geoscience*, 5, p. 1-5.
- FUNES, I.; SAVÉ, R.; ARANDA, X. [et al.] (2013). «Almacenamiento de carbono en la zona de transición agroforestal mediterránea». II Workshop Remedia sobre Mitigación de Emisión de Gases de Efecto Invernadero Provenientes del Sector Agroforestal. Campus d'Aula Dei, Saragossa.
- FUNES, I.; SAVÉ, R.; VAYREDA, J. [et al.] (2015). «Evaluación de la biomasa de cultivos leñosos como estoc de carbono en la cuenca mediterránea». IV Workshop Remedia sobre Mitigación de Emisión de Gases de Efecto Invernadero Provenientes del Sector Agroforestal. Escola Tècnica Superior d'Enginyers Agrònoms de la Universitat Complutense de Madrid.
- GALLART, F.; DELGADO, J.; BEATSON, S. J. V. [et al.] (2011). «Analysing the effect of global change on the historical trends of water resources in the headwaters of the Llobregat and Ter river basins (Catalonia, Spain)». *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, p. 655-661.
- GARCIA-PAUSAS, J.; CASALS, P.; CAMARERO, L. [et al.] (2007). «Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: Effects of climate and topography». *Biogeochemistry*, 82, p. 279-289.
- GRACIA, C.; BURRIEL, J. A.; IBÁÑEZ, J. J. [et al.] (2004). *Inventari ecològic i forestal de Catalunya: Mètodes*. Vol. 9. Bellaterra: Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals.
- GRAÑANA, I.; FONOLLOSA, S. (2009). *Avaluació d'indicadors de qualitat del sòl: Carboni orgànic, salinitat i sodicitat a les Terres de l'Ebre*. Projecte de final de carrera. Lleida: Universitat de Lleida.
- GREER, D. H.; SICARD, S. M. (2009). «The net carbon balance in relation to growth and biomass accumulation of grapevines (*Vitis vinifera* cv. Semillon) grown in a controlled environment». *Functional Plant Biology*, 36, p. 645-653.
- IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4)*. Edició de S. Solomon, D. Qin, M. Manning [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible a: <[https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/contents.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html)> [Consulta: 15 setembre 2015].
- (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel*

- on *Climate Change (AR5)*. Edició de T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible a: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1>> [Consulta: 15 setembre 2015].
- KEY, R. M.; KOZYR, A.; SABINE, C. L. [et al.] (2004). «A global ocean carbon climatology: Results from Global Data Analysis Project (GLODAP)». *Global Biogeochemical Cycles*, 18. DOI: 10.1029/2004GB002247.
- KHATIWALA, S.; TANHUA, T.; MIKALOFF FLETCHER, S. [et al.] (2013). «Global ocean storage of anthropogenic carbon». *Biogeosciences*, 10, p. 2169-2191, DOI: 10.5194/bg-10-2169-2013.
- LEE, K.; SABINE, C. L.; TANHUA, T. [et al.] (2011). «Roles of marginal seas in absorbing and storing fossil fuel CO<sub>2</sub>». *Energy & Environmental Science*, 4, p. 1133.
- LINARES, J. C.; CAMARERO, J. J.; CARREIRA, J. A. (2009) «Interacting effects of changes in climate and forest cover on mortality and growth of the southernmost European fir forests». *Global Ecology and Biogeography*, 18, p. 485-497
- LO IACONO, C., MATEO, M. A.; GRÀCIA, E. [et al.] (2008) «Very high-resolution seismo-acoustic imaging of seagrass meadows (Mediterranean Sea): Implications for carbon sink estimates». *Geophysical Research Letters*, 35, p. L18601.
- LÓPEZ, P.; MARCÉ, R.; ARMENGOL, J. (2011). «Net heterotrophy and CO<sub>2</sub> evasion from a productive calcareous reservoir: Adding complexity to the metabolism-CO<sub>2</sub> evasion issue». *Journal of Geophysical Research - Biogeosciences*, 116, p. G02021.
- LÜSCHER, A.; MUELLER-HARVEY, I.; SOUSSANA, J. F. [et al.] (2014). «Potential of legume-based grassland-livestock systems in Europe: A review». *Grass and Forage Science*, 69(2), p. 206-228.
- MACIAS, M.; ANDREU, L.; BOSCH, O. [et al.] (2006). «Increasing aridity is enhancing silver fir *Abies alba* mill.) water stress in its south-western distribution limit». *Climatic Change*, 79, p. 289-313.
- MARBÀ, N.; DÍAZ-ALMELA, E.; DUARTE, C. M. (2014). «Mediterranean seagrass (*Posidonia oceanica*) loss between 1842 and 2009». *Biological Conservation*, 176, p. 183-190.
- MARCÉ, R.; OBRADOR, B.; MORGUI, J. A. [et al.] (2015). «Carbonate weathering as a driver of CO<sub>2</sub> supersaturation in lakes». *Nature Geoscience* 8, p. 107-111.
- MARTÍNEZ-VILALTA, J.; LLORET, F.; BRESHEARS, D. D. (2012). «Drought-induced forest decline: causes, scope and implications». *Biology Letters*, 8(5), p. 689-691.
- Martínez-Vilalta, J.; López, B. C.; Adell, N. [et al.] (2008). «Twentieth century increase of Scots pine radial growth in NE Spain shows strong climate interactions». *Global Change Biology*, 14, p. 2868-2881.
- MATEO, M. A.; ROMERO, J.; PÉREZ, M. [et al.] (1997). «Dynamics of millenary organic deposits resulting from the growth of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44, p. 103-111.
- MATTOS, D.; GRAETZ, D. A.; ALVA, A. K. (2003). «Biomass distribution and nitrogen-15 partitioning in citrus trees on a sandy entisol». *Soil Science Society of America Journal*, 67, p. 555-563.
- MOKANY, K.; RAISON, R.; PROKUSHKIN, A. S. (2006). «Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes». *Global Change Biology*, 12, p. 84-96.
- MOLOWNY, R. (2012). *Modelos de proyección integral en bosques españoles*. Conferència convidada. Solsona: Centre Tecnològic i Forestal de Catalunya.
- MONTAGHI, A.; CORONA, P.; DALPONTE, M. [et al.] (2013). «Airborne laser scanning of forest resources: An overview of research in Italy as a commentary case study». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, p. 288-300.
- MONTANÉ, F.; ROVIRA, P.; CASALS, P. (2007). «Shrub encroachment into mesic mountain grasslands in the Iberian peninsula: Effects of plant quality and temperature on soil C and N stocks». *Global Biogeochemical Cycles*, 21, p. GB4016. DOI: 10.1029/2006GB002853.
- MONTERO, G.; PASALODOS-TATO, M.; LÓPEZ-SENEPLEDA, E. [et al.] (2013). «Ecuaciones para la estimación de la biomasa en matorrales y arbustados



- mediterràneos». VI Congreso Forestal Español, Vitòria.
- MONTERO, G.; RUIZ-PEINADO, R.; MUÑOZ, M. (2005). *Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles*. Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia, INIA.
- NABUURS, G.-J.; LINDER, M.; VERKERK, P. J. [et al.] (2013) «First signs of carbon sink saturation in European forest biomass» *Nature Climate Change*, 3, p. 792-796.
- NARDINO, M.; PERNICE, F.; ROSSI, F. [et al.] (2013). «Annual and monthly carbon balance in an intensively managed Mediterranean olive orchard». *Photosynthetica*, 51, p. 63-74.
- PALAU, A.; ALONSO, M.; CORREGIDOR, D. (2010). «Análisis del ciclo de carbono en embalses y su posible efecto en el cambio climático: Aplicación al embalse de Susqueda (Río Ter, NE España)». *Ingeniería del Agua*, 17, p. 247-255.
- PALESE, A. M.; PERGOLA, M.; FAVIA, M. [et al.] (2013). «A sustainable model for the management of olive orchards located in semi-arid marginal areas: Some remarks and indications for policy makers». *Environmental Science & Policy*, 27, p. 81-90.
- PANZACCHI, P.; TONON, G.; CECCON, C. [et al.] (2012). «Belowground carbon allocation and net primary and ecosystem productivities in apple trees (*Malus domestica*) as affected by soil water availability». *Plant and Soil*, 360, p. 229-241.
- PERGENT, G.; BAZAIRI, H.; BIANCHI, C. N. [et al.] (2012). *Mediterranean seagrass meadows?: Resilience and contribution to climate change mitigation*. Gland, etc.: IUCN.
- PERGENT, G.; ROMERO, J.; PERGENT-MARTINI, C. [et al.] (1994). «Primary production, stocks and fluxes in the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*». *Marine Ecology Progress Series*, 106, p. 139-146.
- QUINONES, A.; MARTÍNEZ-ALCANTARA, B.; FONT, A. [et al.] (2013). «Allometric models for estimating carbon fixation in citrus trees». *Agronomy Journal*, 105, p. 1355-1366.
- RIBAS, A.; LLURBA, R.; GOURIVEAU, F. [et al.] (2015). «Plant identity and evenness affect yield and trace gas exchanges in forage mixtures». *Plant and Soil*, 391, p. 93-108.
- RODRÍGUEZ-MURILLO, J. C. (2001). «Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain». *Biology and Fertility of Soils*, 33, p. 53-61.
- ROMERO, J.; PÉREZ, M.; ALCOVERRO, T. [et al.] (2015). «Praderas de angiospermas marinas de Cataluña». A: RUIZ, J. M.; GUILLÉN, J.; OTERO, M. M. [et al.] (ed.). *Atlas de las praderas de angiospermas marinas de España*. Murcia, etc.: IEO, IEL, UICN, p. 121-177.
- SABINE, C. L.; FEELY, R. A.; GRUBER, N. [et al.] (2004). «The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>». *Science*, 305, p. 367-371.
- SCHILLER, D. VON; MARCÉ, R.; OBRADOR, B. [et al.] (2014). «Carbon dioxide emissions from dry watercourses». *Inland Waters*, 4, p. 377-382.
- SCHNEIDER, A.; TANHUA, T.; KÖRTZINGER, A. [et al.] (2010) «High anthropogenic carbon content in the eastern Mediterranean». *Journal of Geophysical Research*, 115. DOI: 10.1029/2010JC006171.
- SERRANO, O.; LAVERY, P. S.; ROZAIMI, M. [et al.] (2014). «Influence of water depth on the carbon sequestration capacity of seagrasses». *Global Biogeochemical Cycles*, 28(9), p. 950-961.
- SERRANO, O.; MATEO, M. A.; RENOM, P. [et al.] (2012). «Characterization of soils beneath a *Posidonia oceanica* meadow». *Geoderma*, 185-186, p. 26-36.
- SJÖGERSTEN, S.; LLURBA, R.; RIBAS, À. [et al.] (2012). «Temperature and Moisture Controls of C Fluxes in Grazed Subalpine Grasslands». *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 44, p. 239-246.
- SMITH, P. (2014). «Do grasslands act as a perpetual sink for carbon?». *Global Change Biology*, 20, p. 2708-2711.
- SMITH, P.; BUSTAMANTE, M.; AHAMMAD, H. [et al.] (2014). «Agriculture, forestry and other land use (AFOLU)». A: IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Edició d'O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press, p. 1-179. També disponible a: <[https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_chapter11.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter11.pdf)> [Consulta: 15 setembre 2015].

- SOUSSANA, J.-F.; FUHRER, J.; JONES, M. [et al.] (2007). «The greenhouse gas balance of grasslands in Europe». *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121, p. 1-4.
- TAKAHASHI, T.; SUTHERLAND, S. C.; WANNINKHOF, R. [et al.] (2009). «Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO<sub>2</sub>, and net sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans». *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(8-10), p. 554-577.
- VAYREDA, J.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; GRACIA, M. [et al.] (2012). «Recent climate changes interact with stand structure and management to determine changes in tree carbon stocks in Spanish forests». *Global Change Biology*, 18, p. 1028-1041.
- VILLAESCUSA, R.; DÍAZ, R. (ed.) (1998). *Segundo Inventario Forestal Nacional (1986-1996)*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, ICONA.
- VILLALOBOS, F. J.; TESTI, L.; HIDALGO, J. [et al.] (2006). «Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europaea* L.) canopies». *European Journal of Agronomy*, 24, p. 296-303.
- VILLANUEVA, J. A. (ed.) (2005). *Tercer Inventario Forestal Nacional (1997-2007)*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.
- WAYCOTT, M.; DUARTE, C. M.; CARRUTHERS, T. J. B. [et al.] (2009). «Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, p. 12377-12381.
- WILLIAMS, J. N.; HOLLANDER, A. D.; O'GEEN, A. T. [et al.] (2011). «Assessment of carbon in woody plants and soil across a vineyard-woodland landscape». *Carbon Balance and Management*, 6, p. 11.
- XILOYANNIS, C.; SOFO, A.; CELANO, G. [et al.] (2007). «Absorption of atmospheric CO<sub>2</sub> in peach trees and partitioning in the different plant organs». A: HROTKO, K. (ed.). *Proceedings of the Eighth International Symposium on Canopy, Rootstocks and Environmental Physiology in Orchard Systems*. Leuven: International Society Horticultural Science.
- YOUNG, T. P. (2006). «Declining rural economies and the future of biodiversity: Missing the forest for the trees?». *Journal of International Wildlife Law and Policy*, 9, p. 319-138.
- ZHAO, M. S.; RUNNING, S. W. (2010). «Drought-Induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009». *Science*, 329, p. 940-943.