

5. Embornals

Carles Gràcia^{1, 2}

Amb contribucions de:

Santi Sabaté^{1, 2}, **Jordi Vayreda**², **Teresa Sebastià**³, **Robert Savé**⁴, **Miquel Alonso**¹
i Montse Vidal¹

¹ Departament d'Ecologia, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona

² Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF)

³ Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (CTFC)

⁴ IRTA, Ecofisiologia/Horticultura Ambiental, Àrea de Medi Ambient i Canvi Global

Carles A. Gràcia és professor d'Ecologia Forestal de la Universitat de Barcelona i membre del Consell de Direcció del Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF). El seu treball de recerca es concentra principalment en l'anàlisi i modelització dels aspectes ecològics de la fotosíntesi, la respiració i els mecanismes implicats en el creixement dels arbres. És autor de nombroses publicacions i coautor del model GOTILWA+, un model de simulació del creixement forestal. Va promoure i va dirigir l'Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya dut a terme per l'administració forestal entre els anys 1990 i 2000. Una part de la seva recerca l'ha dut a terme com a professor visitant a diferents universitats d'Austràlia, Sudamèrica i Filipines. Ha estat vicepresident de la *Asociación Española de Ecología Terrestre (AEET)* i membre de la Junta Directiva de la *Sociedad Española de Ciencias Forestales*. Ha participat a les Conferències de les Parts de Bonn i Marrakesh de la UNFCCC com a membre de la Delegació Espanyola en les negociacions del Protocol de Kyoto. Actualment és membre de l'equip assessor del *European Forest Institute (EFI)*, així com de la *Mediterranean Regional Office (EFIMED)* of EFI.

Santi Sabaté Professor titular del Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona i investigador del CREAF (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals), especialitzat en ecologia forestal. La seva activitat de recerca i docència es centra en l'estudi de l'estructura i funció dels ecosistemes, els balanços de carboni, aigua i nutrients, així com les respostes ecofisiològiques dels boscos al canvi climàtic, la sequera, els incendis i la gestió. Aquesta activitat es desenvolupa tant en treballs experimentals com en el camp de la modelització. És coautor de GOTILWA+, un model de simulació del creixement dels boscos sota diferents escenaris de gestió i condicions ambientals (inclosos escenaris de canvi climàtic). Ha participat i continua actiu en nombrosos projectes de recerca.

Jordi Vayreda és investigador del CREAF des de 1995. Ha estat responsable dels càlculs i l'anàlisi dels resultats dels inventaris forestals nacionals i de la gestió de les bases de dades que se'n deriven. Ha desenvolupat aplicacions informàtiques per fer cerques a través d'Internet. Ha partici-

pat en diferents projectes europeus i en diferents projectes de recerca. Ha publicat 11 articles en revistes SCI. Actualment desenvolupa la seva recerca dins del projecte Consolider MONTES sobre els impactes recents del canvi global (gravetat) balanços de carboni (creixement, mortalitat, regeneració) dels boscos espanyols a partir dels dos darrers inventaris forestals nacionals (IFN2 et IFN3) on s'analitza també la vulnerabilitat i la sensibilitat de les diferents espècies forestals.

M. Teresa Sebastià Professora titular de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària de la Universitat de Lleida des de 1998, dirigeix un grup de recerca al Centre Tecnològic Forestal de Catalunya des de 1997. Doctora en Ciències Biològiques per la Universitat de Barcelona, va fer un postdoctorat sobre la resposta de les plantes al canvi climàtic a la Universitat de Harvard els anys 1995-1997. Ha estat professora convidada a la Universitat de Harvard i a la Universitat College Dublin. Actualment és membre, entre d'altres, del comitè espanyol del *Global Land Project*, i de DIVERSITAS, del comitè assessor de l'Observatori Pirinenc de Canvi Climàtic, i del Grup d'Experts en Canvi Climàtic a Catalunya. A més, desenvolupa tasques de coordinació en diversos projectes sobre els efectes del canvi climàtic i d'ús del sòl sobre la dinàmica del carboni i la biodiversitat en ecosistemes agrícoles, pastorals i forestals a la península Ibèrica i a l'Àfrica. Té més de cent publicacions científiques, incloent-hi llibres, capítols de llibres i articles.

Robert Savé Montserrat (Barcelona, 1954) és llicenciat en Biologia i doctor en Ciències Biològiques per la UAB. Ha treballat en el departament d'Ecologia de la UAB, en el Servei d'Investigació Agrària del Departament d'Agricultura de la Generalitat de Catalunya, i des de 1985 a l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA). Des del 2008 és coordinador del Programa d'Horticultura Ambiental i director del subprograma d'Ecofisiologia de l'Àrea de Medi Ambient i Canvi Global de l'IRTA. Membre del Consell de Direcció del CREAF, és professor col·laborador al departament d'Ecologia de la UAB i en la Universitat de les Illes Balears. Treballa en l'horticultura entesa com un component del paisatge, concretant-ho en l'estudi de les relacions hídriques.

Miquel Alonso és doctor en Biologia i especialista en Limnologia. Membre del Departament d'Ecologia de la universitat de Barcelona, pertany a onze associacions científiques. Ha dedicat els últims 32 anys a l'estudi de llacs i embassaments. Té una àmplia experiència internacional. Ha participat en més de 200 projectes relacionats amb temes limnològics per al sector públic i el privat, tant a Catalunya i Espanya com a 23 països més d'Europa, Amèrica, Àsia i Àfrica. És editor associat de *Zootaxa*, autor de 46 publicacions científiques i d'un llibre monogràfic sobre crustàcids d'aigües continentals.

Montserrat Vidal és professora titular del Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona, especialitzada en ecologia, biogeoquímica marina i oceanografia. El seu interès científic es centra en l'estudi de la capacitat productiva dels ecosistemes marins i en la seva importància en la regulació del CO₂ atmosfèric. Ha estudiat els fluxos d'elements nutritius i de carboni en diferents regions oceàniques i costaneres. En particular, investiga els processos físics i biològics implicats en l'emmagatzematge de carboni a l'oceà.

Resum	139
Introducció	141
5.1. Processos que determinen el potencial d'embornal dels ecosistemes	142
5.1.1. Absorbir CO ₂ no equival a fixar-lo	144
5.1.2. Embornals a Catalunya	146
5.1.3. Increment anual de la biomassa aèria i subterrània i del carboni fixat	151
5.1.4. La contribució del sotabosc	154
5.1.5. Carboni fixat anualment als boscos de Catalunya	154
5.1.6. Què representa el carboni fixat als boscos?	155
5.1.7. El futur dels boscos de Catalunya com a embornals de CO ₂	155
5.2. El carboni als prats i les pastures de Catalunya	164
5.2.1. Capacitat d'embornal dels prats i les pastures a Catalunya	165
5.2.2. Interacció dels embornals de carboni de prats i pastures de Catalunya amb factors del medi abiòtics	165
5.2.3. Interacció dels embornals de carboni de prats i pastures de Catalunya amb els canvis de gestió i d'ús del sòl	167
5.2.4. Interacció dels embornals de carboni de prats i pastures de Catalunya amb la biodiversitat	168
5.3. Sistemes agrícoles	168
5.4. Sistemes aquàtics continentals com a embornals de CO ₂	171
5.4.1. Influència de llacs i embassaments	173
5.5. Embornals marins	174
5.5.1. El medi costaner	175
5.5.2. El medi oceànic	176
5.5.3. La connexió costa-oceà	176
5.5.4. Avaluació de la capacitat d'embornal de la mar catalana	177
Referències	178

Resum

Els boscos acumulen uns 95 Mm³ de fusta, unes 97,5 Mt de biomassa; el 70% correspon a la part aèria i un 30% a la subterrània (arrels gruixudes), equivalents a 49,2 Mt C. El 21% correspon a alzinars, el 19% a boscos de pi roig i el 13% a boscos de pi blanc. Entre les tres espècies sumen més del 50% del carboni total dels boscos catalans. La part aèria del sotabosc acumula 11,5 Mt de biomassa (equivalents a 5,6 Mt C). Aquestes xifres reflecteixen la quantitat acumulada a cada tipus de bosc al llarg de períodes de creixement o règims de gestió molt diferents. Comparant la biomassa acumulada amb la producció es despren una mitjana ponderada d'edat dels boscos de Catalunya d'entre 32 i 33 anys. Existeix una marcada diferència entre el carboni acumulat a les comarques de la meitat nord de Catalunya i les de la meitat sud i terres de l'interior, reflex del paper crucial de l'aigua en el control dels processos de fixació i acumulació de carboni a les forests. Dels 49,2 Mt C, el 36% (17,5 Mt) es troben a Girona, el 30% a Lleida (14,6 Mt), el 27% a Barcelona (13,4 Mt) i un 8% a Tarragona (3,7 Mt). Gairebé el 56% correspon a boscos de coníferes, un 25% a escleròfil·les, i un 19% a caducifolis. De 1989-90 a 2000-01, el volum de fusta al bosc (volum amb escorça) ha augmentat un 35%, un augment mitjà (creixement net) de 2,12 Mm³/any. De mitjana, la mortalitat durant aquest període ha estat de 0,272 Mm³/any, i els aprofitaments de 0,782 Mm³/any. En total, l'augment ha estat de 3,17 Mm³/any. Les espècies amb un creixement net més important en valor absolut han estat *Pinus sylvestris* (563 milers de m³/any), *Pinus halepensis* (359 milers de m³/any), i *Quercus ilex* (253 milers de m³/any). Entre les 3, el 55,4% del total. Els boscos de Catalunya fixen anualment, de mitjana, 1,34 t C/ha/any. L'espècie que més en fixa és *Pinus radiata* (5,42 t C/ha/any) i la que menys *Quercus suber* (0,78 t C/ha/any). En conjunt, els boscos de Catalunya fixen 1,5 Mt C/any.

Si s'hi afegeix el carboni del sotabosc, hi contribueix amb 11,45 Mt de biomassa (5,65 Mt C). La contribució del sotabosc de les pinedes de *Pinus halepensis* (1,38 Mt C) i dels alzinars (*Quercus ilex*, 1,11 Mt C) representa un 50% del total. En conjunt, el carboni retintut a la biomassa dels arbres representa el 89,7% del total (68,8% la part aèria i 31,2% la part

subterrània) i la biomassa del sotabosc afegeix un 10,3% al carboni total retintut als boscos. Una hectàrea de bosc fixa 134 t C/any (4,93 t de CO₂), és a dir, la meitat de les emissions anuals mitjaneres de cada habitant de Catalunya, molt properes a 10 t CO₂ habitant /any. Els resultats dels models fisiològics de simulació del creixement forestal indiquen que és previsible que en les condicions futures d'ambient més sec i càlid i menys precipitacions, les taxes de fixació de carboni es redueixin (per la menor disponibilitat d'aigua) i augmentin les taxes de respiració (per l'augment de la temperatura), d'on se'n deriva una reducció de l'efecte d'embornal dels boscos.

Considerant les dates d'inici i final del període vegetatiu entre 1990 i 2000, l'inici del període vegetatiu es retarda de Sud a Nord. Si al Sud de Catalunya pot començar la darrera setmana de març o a principis d'abril, al Pirineu no comença, de mitjana, fins ben iniciat el maig. A més a més, es dona un cert retard en direcció est-oest en els boscos propers a la costa respecte dels situats més a l'interior. A la franja costanera l'inici es dona majoritàriament a finals de març, i a les comarques interiors es retarda fins a la primera quinzena d'abril. Aquest patró es repeteix, poc o molt, al final del període vegetatiu: comença al Pirineu, segueix per les comarques de l'interior, i finalment es manifesta en els boscos propers a la costa en un procés que dura dues o tres setmanes.

Pel que fa a les projeccions futures, si es compara la durada del període vegetatiu de l'any 1990 amb l'estimada per a 2020, 2050 i 2080, es veu clarament com el període vegetatiu comença a allargar-se pel Sud i la zona costanera (2020), i aquest augment és progressiu. Els resultats de les simulacions projecten per a l'any 2080 augments d'entre un i dos mesos respecte de 1990. L'allargament de l'activitat de la vegetació es tradueix en un període més llarg de potencial consum d'aigua, i això en un escenari en què els models projecten una reducció de les precipitacions i una reducció de la reserva d'aigua al sòl de fins a un 35% a finals del present segle respecte de les actuals. Aquesta disminució en comportarà una altra de la producció. Al mateix temps, i considerant el previsible augment de la temperatura, vindrà acompanyat d'un augment de fins a un 23% de la respiració de l'ecosistema, situació que en conjunt

fa preveure una dràstica reducció de l'escassa capacitat d'embornal dels nostres boscos.

Estudis recents demostren la capacitat d'embornal dels sòls de prats i pastures a Europa, tot i que la importància de les pastures per a la mitigació del canvi climàtic es veu disminuïda quan es té en compte el paper d'altres gasos com el CH₄ i els NO_x. A diferència dels boscos, que acumulen força carboni a la biomassa aèria (fusta), els prats i pastures (que ocupen al voltant del 20% del territori) acumulen proporcionalment més carboni als sòls. Segons sembla, aquests ecosistemes es comporten com a embornals; tot i que el coneixement sobre la seva capacitat d'embornal ha augmentat, encara queden moltes llacunes. Al Pirineu català, la biomassa aèria mitjana dels prats de muntanya al pic de la vegetació és d'uns 400 g·m⁻²; la biomassa subterrània acumulada als 10 cm superiors del sòl és de 2.000 g, i als 20 primers cm d'uns 3.000 g·m⁻². Pel que fa al sòl, un estudi als prats d'altitud pirinencs per sobre dels 1.850 m trobà entre 6 i 30 kg·m⁻² de carboni orgànic. En un de menys exhaustiu dut a terme a pastures de les muntanyes litorals meridionals del sud de Catalunya s'han trobat valors d'entre 6 i 15 kg·m⁻².

Els prats i altres ecosistemes pastorals també acumulen una bona quantitat de carboni al sòl, però la capacitat d'embornal de carboni sembla dependent del tipus de gestió. Alguns autors troben un augment en el carboni orgànic emmagatzemat al sòl amb l'augment de la pressió ramadera. A Catalunya, també se n'ha descrit un increment a mesura que augmenten les càrregues ramaderes, però només en pendents moderats i valors de diferència tèrmica estacional baixos. Tots aquests canvis d'ús i de gestió dels prats i pastures poden modificar la quantitat de carboni al sòl. En pastures abandonades des de fa més de 40 anys, i que constitueixen ja pinedes més o menys denses, s'ha trobat una concentració mitjana de carboni de 13,5 g·m⁻² a les muntanyes litorals meridionals, amb una elevada variabilitat. A la muntanya mitjana del Pirineu Oriental els valors trobats en aquest tipus de pinedes són d'11 g C·m⁻². Finalment, a freixenedes joves del Pirineu Central establertes sobre prats de dall abandonats, els valors mitjans als 20 primers centímetres del sòl són ja d'11,8 ± 0,111 g C·m⁻².

La producció total pels diferents conreus de Catalunya es pot xifrar en 6,9 10⁶ t·any⁻¹, que dona, sense distingir entre conreus de secà i regadiu, 6,62 t de matèria fresca·ha⁻¹·any⁻¹; considerant el percentatge d'aigua equivaldria a unes 3,31 t de matèria seca

ha⁻¹·any⁻¹, i unes 1,39 t de C·ha⁻¹·any⁻¹. Aquestes grans xifres indicarien que la producció agrícola efectiva, estaria al voltant del 20 % de la producció agrícola total. De la potencial producció primària anual, 2,89 i 1,48 t C·ha⁻¹ de secà·any⁻¹ i 7,21 i 371 t C·ha⁻¹ de regadiu·any⁻¹ es localitzen en la part aèria i subterrània, és a dir el 67 i el 33 % respectivament.

A Catalunya hi ha 30 embassaments que cobreixen 98 km², un 0,3% del total del territori. La superfície ocupada pels llacs, quasi tots al Pirineu, és probablement menor. Els llacs pirinencs són oligotròfics per la qual cosa la fixació de CO₂ deu ser insignificant en el context general del país. Els embassaments emeten CO₂, però prové de la conca drenant, o sigui que pertany al cicle actual del carboni. De no haver estat transportat cap a l'embassament, hauria estat probablement emès a altres parts de la conca. Els embassaments poden immobilitzar, als sediments anòxics, part d'aquest carboni provinent de la conca i fixat pel propi ecosistema aquàtic. N'hi ha poques dades, però s'ha comprovat que l'embassament de Susqueda reté als sediments 665 g·C·m⁻² any. Aquesta capacitat d'embornal és molt superior al rang normal de sedimentació en llacs (entre 60 i 200 g·C·m⁻² any) i probablement també superior a la dels ecosistemes terrestres substituïts pels embassaments. Tot i aquests valors, el paper de les aigües continentals resulta insignificant en un context global.

El principal procés d'incorporació de CO₂ a les aigües fonderes de la Mediterrània occidental té lloc a la zona del Golf de Lleó, i per tant no es poden donar dades específiques per a la mar catalana. La Mediterrània occidental conté una de les poques regions del món on es dona el fenomen de la convecció profunda de mar obert. Es localitza a una zona situada entre els 41,5° i els 42,5° de latitud N i els 4° i els 6° de longitud E. Les aigües fonderes oceàniques i els sediments costaners formen els principals embornals marins de carboni. El transport/enterrament de carboni dins d'aquest reservori té lloc a partir de tres mecanismes singulars: la convecció hivernal de mar obert, les cascades d'aigua densa costanera, i l'enterrament de restes orgàniques a les praderies de *Posidonia oceanica*. El Golf de Lleó és una regió paradigmàtica en aquest sentit, ja que hi són representats tots tres mecanismes. Si en considerem tota l'àrea, el transport anual de carboni cap a l'embornal de les aigües fonderes arriba als 120 × 10¹⁰ g C. Quant als sediments costaners, les praderies de *P. Oceanica* (que cobreixen un 10% dels sediments) aporten uns 10¹⁰ g·C·any.

Introducció

El CO₂ es localitza al nostre planeta en tres compartiments principals: el primer, per la importància de la seva magnitud, és el que formen les aigües oceàniques. La quantitat de CO₂ dissolt als oceans s'ha estimat en unes 34 teratones (1 teratona = 10¹² tones), la major part dels quals es localitzen a les aigües intermèdies i profundes. Li segueix en importància el carboni acumulat a la matèria orgànica del sòl, que representa 1,2 teratones més. L'atmosfera acumula una quantitat aproximada de 740 gigatonnes (1 gigatona = 10⁹ tones).

Els oceans absorbeixen 115 gigatonnes de carboni, una quantitat equivalent a l'absorció dels ecosistemes terrestres, encara que retornen a l'atmosfera 113 gigatonnes. La diferència incrementa la biomassa dels productors marins i els sediments, i una petita fracció s'acumula possiblement a les aigües profundes. Un 30% aproxima-

dament de les emissions antropogèniques de CO₂ entre els anys 1800 i 1994 ha anat a parar a l'oceà (Sabine *et al.* 2004). És per això que l'oceà es considera un embornal de carboni de primera magnitud, comparable al que globalment formen els ecosistemes terrestres. El principal magatzem marí de carboni està format pel carboni dissolt a les aigües fones que circulen a través de totes les conques oceàniques. Es tracta d'un reservori mòbil, ben diferent del continental.

Els ecosistemes terrestres i principalment els boscos afecten de manera important el cicle del carboni en el planeta. Acumulen a la seva biomassa unes 550 gigatonnes de C. Cada any aquests ecosistemes absorbeixen 110 gigatonnes, es a dir, de mitjana, una quantitat equivalent al 20% del carboni emmagatzemat a la seva biomassa. No obstant aquesta absorció no equival a un segrest net del carboni atmosfèric. Una part d'aquest carboni absorbit retorna a l'atmosfera per la respira-

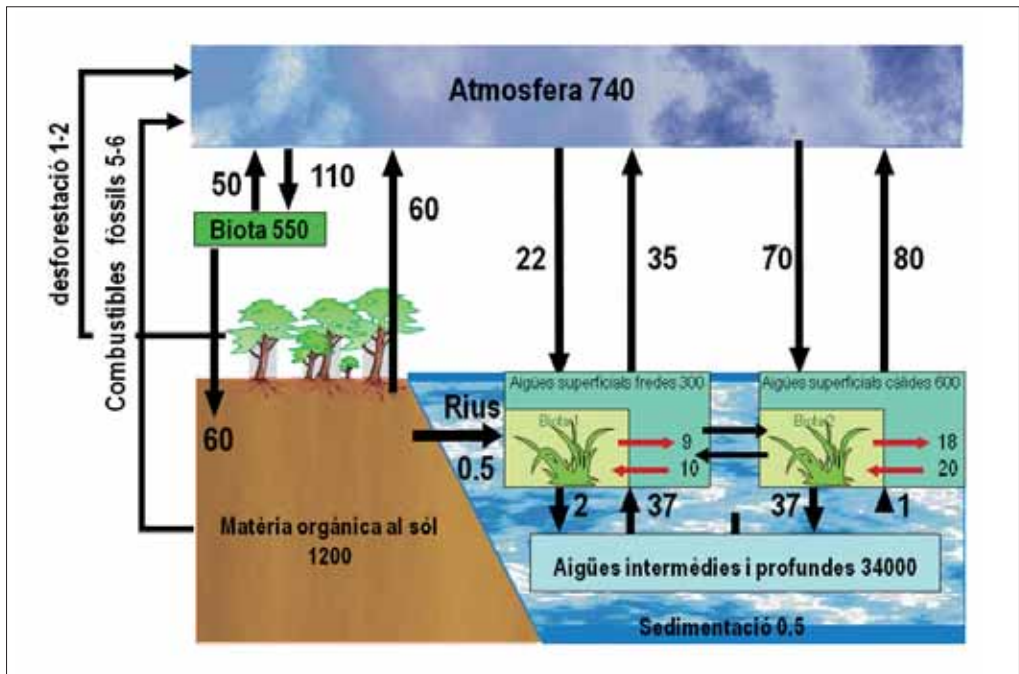


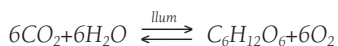
Figura 1. El cicle del carboni al planeta. Es pot apreciar que els tres compartiments més importants són, per aquest ordre, els oceans, el sòl i l'atmosfera. La crema de combustibles fòssils suposa unes emissions de C a l'atmosfera de 6 gigatonnes anuals a les quals hem d'afegir 1,5 gigatonnes més com a conseqüència de la desforestació. (Tots els valors són en gigatonnes (10⁹ tm) de C o milers de milions de tones de C).

ció de les plantes, anomenada respiració autotròfica, (48,5 Gt de C) i per la descomposició de la fullaraca i altres restes de matèria orgànica que cauen al terra i que, amb més o menys inèrcia, són descompostos per bacteris i fongs per acabar retornant a l'atmosfera (unes 60 Gt de C) en el procés conegut com a respiració heterotròfica. Amb aquestes dades es comprèn que, a escala global, les entrades i sortides de carboni dels ecosistemes terrestres representen un equilibri dinàmic en el qual l'acumulació neta de carboni ja sigui a la biomassa o als sòls és molt escassa. Bona prova d'aquesta afirmació la tenim en la coneguda corba de Keeling que reflecteix la concentració de CO₂ a Mauna Loa. En aquesta corba les diferències entre els màxims i els mínims anuals de concentració de CO₂ ve a ser d'unes 8 ppm, i malgrat l'augment notable de CO₂ atmosfèric experimentat al llarg dels anys, aquestes diferències romanen aproximadament constants, indicant una capacitat limitada dels ecosistemes per absorbir CO₂, bona part del qual retornen posteriorment a l'atmosfera. Això no obstant, a escala regional, es donen diferències importants entre diferents biomes i entre els diferents ecosistemes d'un bioma determinat.

5.1. Processos que determinen el potencial d'embornal dels ecosistemes

Resulta clar que el balanç de carboni d'un ecosistema qualsevol, el seu potencial d'embornal, depèn de dos processos essencials que formen part de l'activitat dels organismes: la fotosíntesi i la respiració.

En el procés de la fotosíntesi l'energia de la llum absorbida per la planta s'acumula en forma de molècules de carbohidrats que contenen elevades quantitats d'energia als seus enllaços químics: unes 10 kilocalories per cada gram de carboni fixat. La reacció d'assimilació del CO₂ es pot resumir com:



El resultat és la formació de la matèria orgànica que donarà lloc als teixits vegetals en la composició dels quals el carboni constitueix el 50%, valor pràcticament invariable entre espècies o entre teixits d'una mateixa espècie. Tant per for-

Quadre 1. Termes relacionats amb la fixació de carboni per les plantes

Producció Primària Bruta, PPB Quantitat total de CO₂ que les plantes fixen mitjançant el procés de la fotosíntesi. Es pot expressar en unitats de carboni o de pes sec de matèria orgànica (p.e. gC·m⁻² de fulla·any⁻¹ o gPS·m⁻² de fulla·any⁻¹) o en unitats d'energia per unitat de superfície foliar o de superfície de sòl (p.e. cal·m⁻²·any⁻¹). L'equivalència entre aquestes diferents unitats és tal que, molt aproximadament, 1g de C equival a 2g de pes sec de matèria orgànica, i 1gC = 10 kcal.

Respiració, R Quantitat de CO₂ que desprèn un organisme o sistema com a conseqüència de la seva activitat metabòlica. S'expressa en les mateixes unitats que la PPB. Es consideren diferents components de la respiració, en funció dels organismes que la originen i dels processos en els quals intervé:

Respiració autotròfica, R_a Respiració dels organismes autòtrofs, és a dir, de les plantes.

Respiració heterotròfica, R_h Respiració dels organismes heteròtrofs. Per la seva importància quantitativa relativa, la respiració heterotròfica s'associa moltes vegades a la respiració dels microorganismes que descomponen la matèria orgànica del sòl.

Respiració de formació o de creixement, R_f Respiració metabòlica lligada a la formació de nous teixits.

Respiració de manteniment, R_m Respiració associada al manteniment dels teixits funcionals un cop que aquests ja s'han format.

Producció Primària Neta, PPN Producció primària que queda una cop descomptades les despeses en respiració derivades del metabolisme de la planta (la respiració autotròfica). Per tant, **PPN = PPB - R_a**

Producció Neta de l'Ecosistema, PNE Quantitat de producció primària que queda un cop descomptada la respiració de l'ecosistema. Per tant, **PNE = PPB - (R_a + R_h)**

mar els teixits de la planta com, un cop formats, per mantenir-los funcionalment actius, la planta requereix energia química que obté oxidant els carbohidrats de reserva a les mitocondries: és el procés conegut com a respiració, que té lloc simultàniament a la fotosíntesi, de manera que la planta fixa carboni al mateix temps que en va retornant a l'atmosfera.

En la respiració s'oxiden les molècules orgàniques amb oxigen de l'aire per tal d'obtenir l'energia necessària per als processos vitals. En aquest procés es consumeix O₂ i es desprèn CO₂,

raó per la qual podem considerar que la respiració és, en certa manera, el procés contrari a la fotosíntesi, que absorbeix CO_2 y desprèn O_2 . No obstant això convé indicar que, encara que pels seus resultats ho sembli, fixació i alliberament de carboni de l'ecosistema no són passos inversos del mateix procés. Són processos independents en la seva evolució, bioquímica i localització: la fotosíntesi té lloc als cloroplastos en tant que respiració es produeix a les mitocondries.

La quantitat de carboni fixat en la fotosíntesi és controlada principalment per la radiació incident i la temperatura, i és limitada per la disponibilitat d'aigua i de nutrients. La temperatura controla directament les taxes de producció bruta i respiració ja que l'activitat dels enzims implicats en aquests processos depèn de la temperatura. A més a més, determina la taxa de fotosíntesi neta: el balanç entre el carboni atmosfèric fixat per les plantes, la fotosíntesi bruta, i el carboni retornat per la planta durant el procés de la respiració. De mitjana, les plantes aprofiten només l'1% de la radiació que arriba a la superfície de la Terra, fet que hauria de fer pensar als

que pretenen abordar els problemes de l'escassetat d'energia fent servir processos en els que intervé la fotosíntesi, ja sigui aprofitant la biomassa directament o per produir biocombustibles ja que el baix rendiment de la fotosíntesi constitueix un coll d'ampolla de difícil o impossible solució.

Ara bé, hi ha un punt crucial que tot sovint s'oblida: l'entrada de carboni al cloroplast es produeix en el procés d'intercanvi de gasos de tal manera que quan la planta obre els estomes transpira una quantitat considerable d'aigua. Sovint les limitacions en la disponibilitat hídrica actuen forçant el tancament estomàtic i limitant l'entrada i absorció de CO_2 . Per comprendre el paper d'embornals dels ecosistemes mediterranis resulta fonamental entendre el paper de l'aigua en l'absorció de CO_2 des d'una perspectiva quantitativa.

La pèrdua d'aigua per transpiració a través dels estomes és la conseqüència inevitable de l'obertura estomàtica per tal de permetre l'entrada de CO_2 , d'aquí que existeixi una estreta relació entre fotosíntesi i transpiració, ambdues dependents de

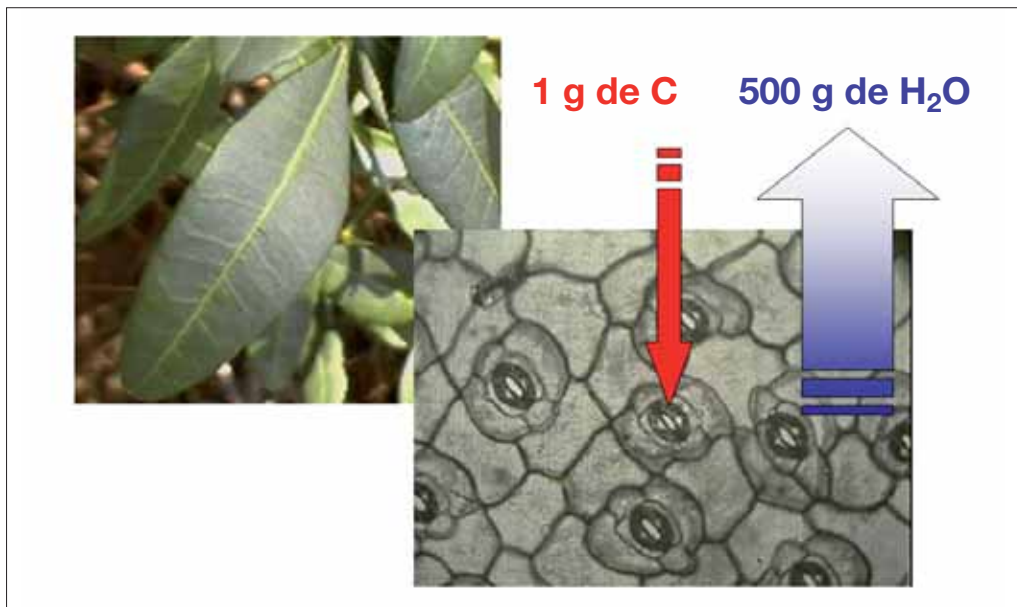


Figura 2. La fixació de carboni pels vegetals en el procés de la fotosíntesi és enormement costosa en termes d'aigua. A l'obrir els estomes per permetre l'entrada de CO_2 , es produeix una pèrdua d'aigua. De mitjana, per cada gram de carboni fixat es perden al voltant de 500 grams d'aigua. L'eficiència en l'ús de l'aigua expressa aquest balanç entre carboni fixat i aigua transpirada.

la conductància estomàtica. La planta ha de regular els estomes de tal manera que minimitzi la pèrdua d'aigua i alhora maximitzar l'entrada de carboni. La quantitat de carboni que una planta és capaç de fixar per unitat d'aigua consumida es denomina 'eficiència en l'ús de l'aigua' i és un valor extraordinàriament baix en totes les espècies. Per terme mitjà, per fixar entre 2 i 3 grams de carboni, la planta ha de transpirar de l'ordre de 1.000 g d'aigua, o sigui, al voltant de 500 vegades el seu pes. El carboni constitueix el 50% de la biomassa seca de les plantes, de manera que amb 1 gram de carboni la planta produirà 2 grams de matèria orgànica. En altres paraules, resulta alligador veure que la producció d'un gram de matèria orgànica requereix transpirar entre 150 i 200 vegades el seu pes en aigua.

Aquesta enorme desproporció entre aigua transpirada i carboni absorbit és la causa de que les plantes resultin tan absolutament dependents de la disponibilitat hídrica. Quan el sòl s'asseca, o l'ambient és molt sec, les plantes tanquen els estomes. Tancar estomes per manca d'aigua significa tancar el pas a l'entrada de CO₂ i limitar la fotosíntesi, juntament amb altres processos com l'escalfament foliar, l'epinàstia, el recargolament foliar, variacions de la capa limítrof i la conductància del mesòfil, que encara limitaran més la captació de carboni (Bradford i Hsiao, 1982; Nobel, 1991).

5.1.1. Absorbir CO₂ no equival a fixar-lo

Fins aquí hem vist les bases que permeten entendre els punts clau relacionats amb les entrades i sortides de carboni de l'ecosistema i, per tant, amb el seu possible potencial d'embornal. Una planta típicament mediterrània, amb una eficiència en l'ús de l'aigua que li permet fixar 1 g de carboni per cada 300 g d'aigua transpirada, que rebí una precipitació anual de 600 mm, i que sigui capaç de captar amb les seves arrels fins el 85% d'aquesta precipitació pot arribar a assolir una producció bruta de 17 t C/ha anuals, a condició, això sí, que altres factors com la manca de fòsfor o de nitrogen al sòl o les baixes temperatures no la limitin. No està pas gens malament, 17 tm·ha⁻¹·any⁻¹ de carboni equivalen a 34 tm·ha⁻¹·any⁻¹ de matèria orgànica i gairebé a 62 tm·ha⁻¹·any⁻¹ de CO₂ absorbits anualment per una hectàrea de

vegetació vivint en les condicions que hem descrit. Però, malauradament, absorbir CO₂ no equival a fixar-lo permanentment, com alguna vegada s'interpreta erròniament. Una part molt considerable d'aquest CO₂ absorbit és retornat a l'atmosfera en els processos de respiració. La pregunta pertinent és, per tant, quina és es la quantitat retornada i, en tot cas, quina és l'absorció neta d'una hectàrea de bosc? Mentre les entrades de CO₂ a la planta es limiten a la producció bruta i es veuen, tot sovint, limitades per la disponibilitat d'aigua, les sortides es produeixen per vies múltiples i alternatives com es veu a la figura 3.

Per una banda es retorna una fracció de CO₂ a l'atmosfera cada vegada que se sintetitza una fracció de nous teixits de la planta. És el que s'anomena respiració de formació o respiració de creixement, i aquesta respiració no representa una fracció sense importància. Per cada gram de matèria orgànica que la planta sintetitza es retornen a l'atmosfera 0,23 g de C o 0,84 g de CO₂. Dit d'una altra manera: la síntesi d'1 kg de fusta, de fulles o d'arrels representa retornar a l'atmosfera 230 g de carboni o 843 g de CO₂. A més a més, els teixits formats s'han de mantenir permanentment, fet que significa utilitzar més matèria orgànica de la que la planta ha fixat en la fotosíntesi per tal de recuperar l'energia fixada en forma química amb la qual es podran reparar les proteïnes, àcids nucleics i, en general, totes les molècules i teixits que requereixen reparacions o substitucions. És la denominada 'respiració de manteniment'. Si el cost de formació és molt poc variable entre plantes i fins i tot entre teixits d'una mateixa planta, el cost de manteniment resulta molt més variable. Depèn de la temperatura —en general, a més temperatura més elevada es la respiració— ja que depèn de la composició química dels teixits que s'han de mantenir i de la seva biomassa. Mantenir les fulles i arrels fines de l'arbre —amb diferència els teixits fisiològicament més actius, ve a costar entre 10 i 200 g de CO₂ al dia per cada kg de teixit a una temperatura de 15 °C. Aquests valors es dupliquen per cada 10 °C d'augment de la temperatura (Q₁₀ = 2) o sigui que, a una temperatura de 25 °C mantenir la mateixa quantitat de teixit viu implica retornar a l'atmosfera entre 20 i 400 g de CO₂ diaris (López *et al.* 1997, 1998, 2001a 2001b).

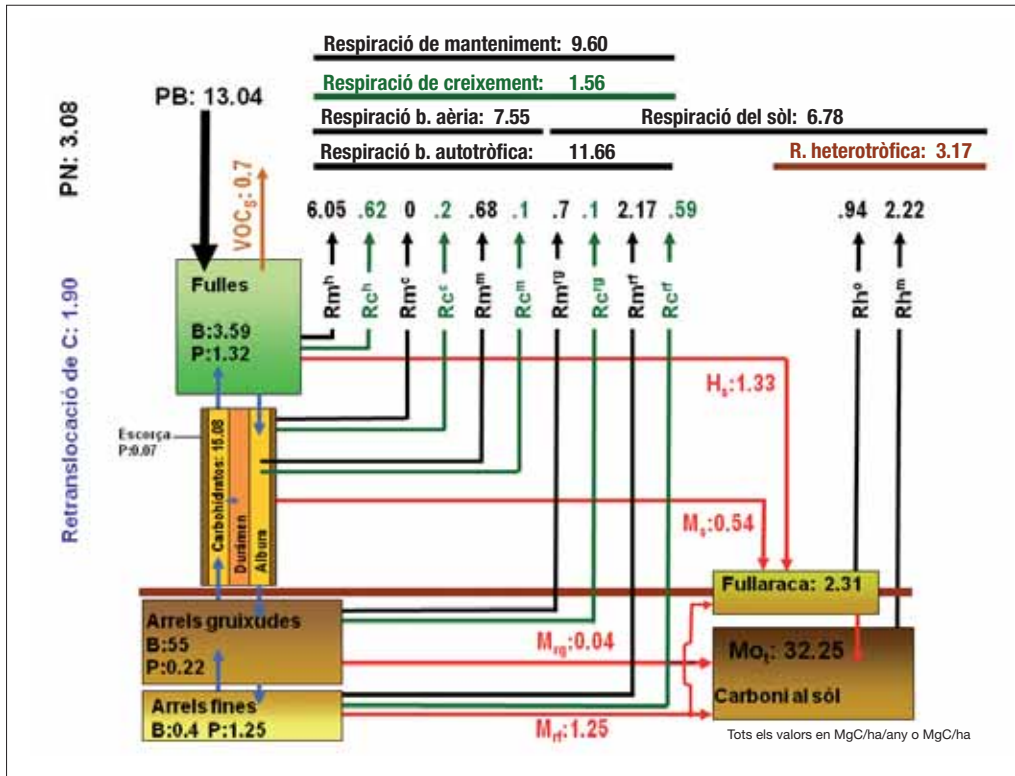


Figura 3. Principals fluxos de carboni que tenen lloc en un bosc i dels que depèn el balanç final de carboni d'aquest. La producció bruta (PB) constitueix l'única entrada de carboni al sistema. Una fracció dels carbohidrats sintetitzats a les fulles és retranslocada als teixits llenyosos vius del tronc i de les arrels (fletxes blaves). La caiguda de fullaraca (H_f), de teixits llenyosos morts (M_j) i d'arrels gruixudes i fines (M_{ig}, M_{if}) constitueixen els aports de carboni als horitzons orgànics del sòl; d'aquí és parcialment transferit als horitzons minerals més profunds (fletxes vermelles). Gran part del carboni fixat al bosc acaba retornant a l'atmosfera com a resultat de la respiració de manteniment (fletxes negres, R_m) i de la respiració de creixement (fletxes verdes, R_c) dels diferents teixits de l'arbre. Els valors de la figura il·lustren el cas d'un bosc típicament mediterrani: l'alzinar de les muntanyes de Prades.

La producció primària neta representa la construcció de les estructures de l'ecosistema però també, si els compostos de carboni són mòbils, com ara els carbohidrats, constitueixen la reserva d'energia que la planta pot utilitzar en períodes en que la fotosíntesi no resulta possible, ja sigui perquè és de nit o per tractar-se d'un període d'estrès hídric. La respiració depèn del substrat (la matèria orgànica que s'oxida i de l'oxigen que abunda en l'atmosfera. En aquest cas no resulta necessària ni radiació ni el CO_2 (poc abundant si es compara amb l'oxigen), ni l'aigua, a no ser la que està present a la matriu cel·lular. Com a resultat, la respiració, com la fotosíntesi, ve condicionada per la temperatura, que afecta subs-

tancialment l'activitat metabòlica, però no pels restants factors que modulen la fotosíntesi, i no s'atura mentre l'organisme disposi de substrat per respirar. Per tant, la respiració augmenta amb l'augment de temperatura. Ara bé, amb un augment qualsevol, la respiració augmenta més que no la fotosíntesi. Aquesta diferència determinarà que, com a conseqüència de l'augment de temperatura consegüent al canvi climàtic, encara que ambdós processos podran incrementar-se, la respiració augmentarà en major proporció que la fotosíntesi. L'augment de la temperatura és una de les variables més acceptades del canvi climàtic, i molts models preveuen una disminució de la producció primària neta en no augmentar,

de manera equivalent, la fotosíntesi. Es més, si ens trobem en condicions de reducció de disponibilitat hídrica, en què la fotosíntesi es veu limitada mentre que la respiració continua activa, la producció primària neta pot veure's sensiblement afectada. Si la respiració autotròfica va consumint les reserves de carboni, el bosc pot anar perdent estructura, per exemple una part de les seves fulles, i fins i tot experimentar episodis de mortalitat si el consum de les reserves d'alguns individus és total. És per això que les reserves de carbohidrats són tant importants per explicar la superació d'episodis d'estrès ambiental.

La respiració és la via mitjançant la qual els organismes aprofiten l'energia química emmagatzemada a la matèria orgànica. Aquest procés és molt general, i no només l'utilitzen les plantes que duen a terme la fotosíntesi, també l'utilitzen els animals i els microorganismes (bacteris i fongs). De manera simplificada podem dir que al oxidar-se la matèria orgànica es consumeix oxigen i es produeixen CO_2 i aigua, i es recupera l'energia química del carboni reduït durant la fotosíntesi. D'aquesta manera el CO_2 troba el seu camí de retorn a l'atmosfera. Per tant, els productors primaris fan fotosíntesi i respiren, i depenen d'ells mateixos per produir matèria orgànica i utilitzar l'energia química emmagatzemada en les seves molècules. Per aquesta raó se'ls anomena autòtrofs i la seva respiració es coneix com a respiració autotròfica. La diferència entre el carboni fixat en la fotosíntesi (producció primària bruta) i la respiració autotròfica constitueix la denominada producció primària neta. Aquest balanç ens explica el creixement i el manteniment de la biomassa. Per tal que un sistema, bosc, brolla, pastura o conreu mantingui o augmenti la seva estructura, la producció primària neta no pot ser negativa. A més a més, com que d'aquest balanç positiu de carboni depenen els altres organismes de l'ecosistema, s'ha de produir suficient com per compensar també el creixement i la respiració dels restants organismes de l'ecosistema que no són autòtrofs: els anomenats heteròtrofs. Aquests organismes depenen de la matèria orgànica fixada pels productors primaris i, a la seva respiració, que funciona igual que la de les plantes, se l'anomena heterotròfica. La producció neta de l'ecosistema és la diferència

entre la producció primària neta i la respiració heterotròfica.

5.1.2. Embornals a Catalunya

Bosc, matollars, pastures, conreus i sistemes aquàtics continentals i oceànics constitueixen els sistemes naturals principals, si no únics, embornals de CO_2 a Catalunya. Per la seva importància quantitativa, i per la biomassa que acumulen, els boscos són el principal embornal actual i potencial. Per determinar tant els fluxos com el carboni emmagatzemat als ecosistemes forestals de Catalunya ens hem basat en diverses fonts d'informació, principalment l'Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya, el Segon i Tercer Inventaris Forestals Nacionals, i el Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya.

L'Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya (IEFC, Gràcia *et al.* 2004, 2005) va constituir el primer mostreig extensiu dels boscos de Catalunya que es va dur a terme entre els anys 1990 i 1998. Es troba informació detallada de la metodologia de l'IEFC a Gràcia *et al.* (2004, volum de mètodes). Es van mostrejar 10.644 parcel·les forestals, a raó d'una parcel·la per cada 100 ha. de superfície forestal arbrada on, entre altres variables, es va mesurar per primer cop de manera extensiva la biomassa de branques i fulles. A més a més, es van mesurar el diàmetre normal (DN), l'alçada (H) i el coeficient de forma (Cf) del tronc de diferents arbres seleccionats a cada parcel·la. Paral·lelament, a l'IEFC també es van mesurar la densitat de la fusta i el contingut de carboni de les diferents espècies. Aquestes mesures van permetre establir, per a totes les espècies de Catalunya, les equacions que expressen la biomassa aèria total (BAT) en funció del diàmetre normal (DN) i l'alçada (H) dels arbres:

$$BAT = a \cdot DN^b \cdot H^c$$

Els treballs de camp del segon Inventari Forestal Nacional (IFN2) a Catalunya es van dur a terme entre els anys 1989 i 1990. El tercer (IFN3, Villaescusa i Díaz, 1998, Villanueva 2005) es va dur a terme entre els anys 2000 i 2001. El mostreig en ambdós casos consisteix en una xarxa sistemàtica de parcel·les permanents situades sobre terreny forestal arbrat a raó d'aproximadament una par-

cel·la per cada 100 ha de superfície forestal arbrada. A l'IFN3, es van mesurar 11.278 parcel·les a Catalunya, 9.968 de les quals són parcel·les amb peus majors, és a dir, de diàmetre normal de més de 7,5 cm. Atès que les parcel·les de mostreig de l'IFN son permanents, resulta possible repetir les mesures en successius inventaris. De les 11.278 parcel·les mesurades a l'IFN3, 8.726 havien estat mesurades a l'IFN2.

La superfície forestal arbrada prové del Mapa de Cobertes del Sòl (1993). Per a la comparació entre els dos inventaris la superfície forestal arbrada és directament la de l'any 1993, és a dir, 1.214 milions d'hectàrees. Per al càlcul del carboni acumulat la superfície està actualitzada a l'any 2001, restant la superfície forestal arbrada afectada per incendis ocorreguts entre els anys 1994 i 2000, i així la superfície forestal arbrada disminueix fins a 1.135 milions d'hectàrees.

Per calcular tant la biomassa com el carboni emmagatzemats al bosc s'ha utilitzat informació addicional d'estudis previs que es descriuen breument a continuació:

Montero *et al.* (2005) van mesurar arbres, d'un ampli rang de diàmetres, de les espècies més abundants a la península. Aquests arbres es van tallar, es van separar en fraccions (tronc, fulles, branques) i es va determinar la biomassa de cada fracció. Una submostra de cada fracció es va pesar en fresc i posteriorment en sec per tal d'estimar la biomassa en pes sec. Alguns d'aquests arbres també es van desenterrar de manera que es van pesar les arrels gruixudes. A partir d'aquesta informació es van generar les equacions potencials que relacionen el DN amb la biomassa aèria total (BAT):

$$1) \quad BAT = a \cdot DN^b$$

i amb la biomassa d'arrels (BST):

$$2) \quad BST = a' \cdot DN^{b'}$$

Posteriorment, amb aquesta informació es va determinar l'equació que permet estimar la biomassa subterrània de qualsevol arbre, si es coneix la seva biomassa aèria, molt més fàcil de determinar:

$$3) \quad BST = a \cdot BAT^{-b}$$

on la biomassa subterrània s'estima com a proporció de la biomassa aèria.

Sempre que ha resultat possible s'han utilitzat les equacions de biomassa obtingudes a l'Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya perquè es tracta d'un mostreig extensiu centrat a Catalunya que recull l'àmplia varietat de condicions geogràfiques, topogràfiques i estructurals dels nostres boscos. La biomassa subterrània que no va resultar possible de mesurar als treballs de camp de l'IEFC s'ha estimat mitjançant les equacions de Montero *et al.* (2005).

El sotabosc és un component, sovint quantitativament important, de la biomassa del bosc mediterrani. Armand *et al.* (1993) van mesurar l'alçada (H) i l'àrea ocupada per la capçada (A) de diferents individus d'espècies arbustives mediterrànies. Posteriorment van tallar aquests individus, es van assecar a l'estufa, i se'n va determinar el pes sec. Aquesta informació va permetre obtenir, per a cada espècie, una equació que estima la biomassa aèria (BA) en funció del volum aparent, entenent per volum aparent el producte de l'alçada per la projecció de la capçada de la planta o àrea ocupada ($V_{ap} = A \cdot H$).

$$4) \quad BA = a \cdot (A \cdot H)^b$$

El volum amb escorça (VAE) de cada arbre mesurat de, al menys, 7,5 cm de diàmetre s'ha obtingut aplicant l'equació:

$$5) \quad VAE = \pi \cdot (DN/2)^2 \cdot H \cdot C_f$$

on

- DN és el diàmetre normal del peu
- H, és l'alçada total del peu
- C_f : és el coeficient de forma del tronc.

S'estima la biomassa aèria de cada arbre mesurat a cada parcel·la de mostreig aplicant l'equació 1, i la biomassa subterrània aplicant la 4. El contingut de carboni s'obté multiplicant la biomassa pel valor de la concentració de carboni de cada espècie, valor sempre molt proper al 50%.

La biomassa aèria dels arbres menors de cada espècie (els que tenen un diàmetre normal compès entre 2,5 i 7,5 cm) s'obté aplicant la mateixa equació biparamètrica utilitzada en el càlcul del

Espècie principal	Volum amb escorça (m ³)		Canvi en el volum amb escorça (m ³ /any)			Nre. de parcel·les
	IFN2 (1989-90)	IFN3 (2000-01)	Mortalitat	Aprofitaments o pèrdues per pertorbacions	Creixement net	
<i>Pinus sylvestris</i>	17.045.967	23.658.865	44.796	145.444	563.022	1.506
<i>Pinus halepensis</i>	9.037.806	13.197.661	50.854	111.867	358.578	1.951
<i>Quercus ilex</i>	7.079.226	10.061.616	19.754	76.569	252.562	1.362
<i>Pinus uncinata</i>	6.372.243	8.124.309	32.654	14.621	147.084	438
Roures	4.819.152	6.544.426	13.928	47.662	146.975	687
<i>Pinus nigra</i>	8.620.440	10.212.521	43.781	179.453	130.041	1.118
<i>Fagus sylvatica</i>	3.886.807	5.229.787	10.574	31.954	114.226	200
Altres planifolis	2.544.989	3.733.806	15.859	41.076	99.086	319
<i>Abies alba</i>	2.962.048	3.722.258	17.388	4.688	63.282	83
<i>Pinus pinea</i>	2.570.375	3.299.589	6.294	29.361	63.078	291
<i>Quercus suber</i>	3.761.185	4.444.646	7.689	53.284	56.631	526
<i>Pinus pinaster</i>	1.064.864	1.734.434	2.238	21.369	55.920	127
<i>Castanea sativa</i>	575.219	968.905	4.238	13.038	32.558	70
Altres coníferes	330.164	688.028	2.293	4.232	30.124	35
<i>Pinus radiata</i>	177.106	246.583	0	7.301	5.936	13
Catalunya	70.847.590	95.867.435	272.339	781.920	2.119.104	8.726

Taula 1. Volum amb escorça i components del canvi al segon i al tercer inventari forestal nacional (IFN2, IFN3).

carboni dels arbres majors (equació 1). El valor individual de biomassa aèria es multiplica pel nombre d'arbres per obtenir els valors per hectàrea. Finalment, es multiplica per la concentració de carboni corresponent a l'espècie. La biomassa de sotabosc és la suma del matollar i del peus menors.

Per estimar el carboni acumulat al sotabosc es calcula, per a cada espècie llenyosa present al matollar, el volum aparent ocupat multiplicant el recobriment per la seva alçada mitjana. Al resultat obtingut se li aplica l'equació 5 per obtenir el valor de biomassa. La suma dels valors de totes les espècies presents a la parcel·la es divideix per 2 (el 50% de la biomassa és carboni) per expressar-ho en unitats de carboni.

A la taula 2 es mostren els valors del volum amb escorça (m³), la biomassa i el carboni acumulat al bosc (Mg), tant a la part aèria com subterrània dels arbres i el carboni del sotabosc, desglossant la informació per espècies d'acord amb les dades de l'IFN3 (2000-01). Als boscos s'hi acumulen gairebé 95 milions de m³ de fusta (volum de tronc amb escorça) que traduït a bio-

massa, incorporant la biomassa de les branques i la biomassa de les arrels, s'apropa a 97,5 milions de tones, un 70% de les quals és la part aèria (tronc, branques i fulles) i un 30% és subterrani (arrels gruixudes). Traduït a carboni, significa que els boscos de Catalunya n'acumulen 49,2 milions de tones. El 21% del carboni acumulat correspon als alzinars, el 19% als boscos de pi roig, i el 13% als boscos de pi blanc. Entre les tres espècies sumen més del 50% del carboni total dels boscos de Catalunya. Al sotabosc (només la part aèria) s'hi acumulen 11,5 milions de tones de biomassa que equivalen a 5,6 Mt de C.

Abies alba, amb 106,6 tones de C/ha és l'espècie que concentra més carboni per unitat de superfície. Tot i això, el seu paper com a embornal de carboni resulta poc rellevant atesa l'escassa representació dels boscos d'aquesta espècie al país: aquesta espècie tan sols ocupa un 1,26% de la superfície forestal. A l'extrem oposat, els boscos de *Pinus halepensis* només acumulen 27,8 tones de C/ha. Ponderant la quantitat de carboni de cada espècie per la superfície que ocupa (figura 4) obtenim la quantitat mitjana de carboni present als

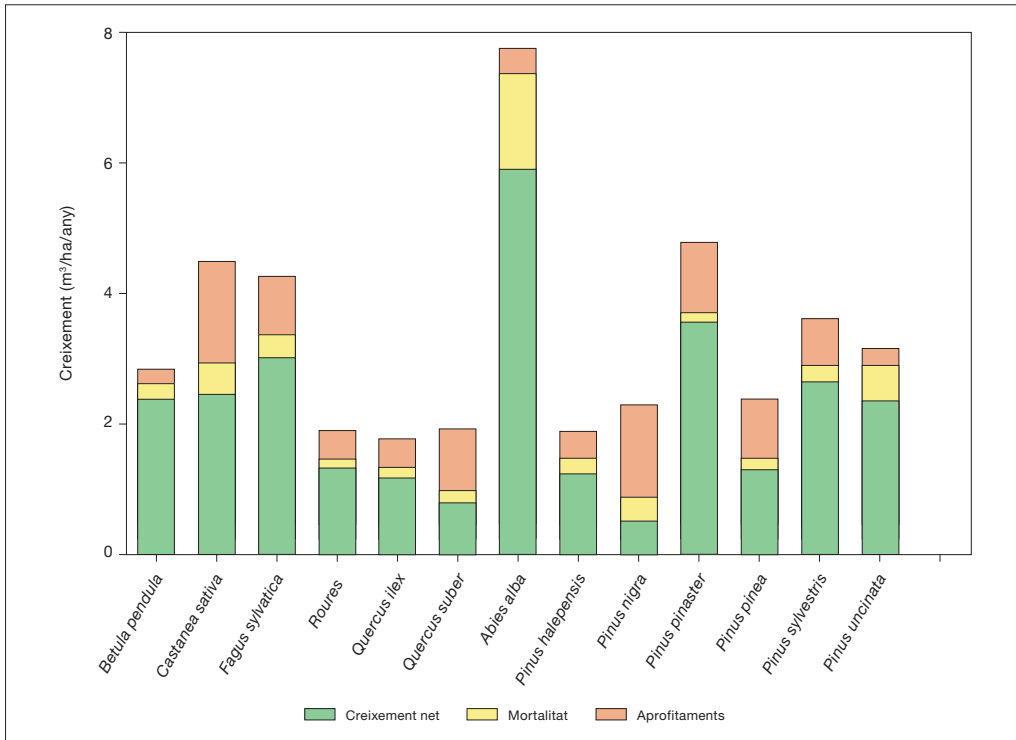


Figura 4. Creixement net, Mortalitat i aprofitaments dels boscos de Catalunya (incloses les pèrdues per perturbacions com ara allaus o incendis forestals, segons es desprèn de la comparació entre el segon i el tercer inventaris forestals nacionals. Noteu que *Pinus nigra* és l'única espècie en la qual mortalitat i aprofitaments són superiors al creixement net.

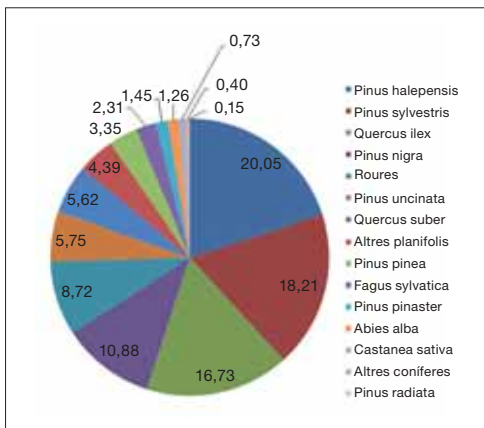


Figura 5. El bosc a Catalunya ocupa una superfície total d'1.134.972 hectàrees, que representen aproximadament un terç de la superfície total del país. L'espècie més abundant és *Pinus halepensis*, que ocupa el 20,05% de la superfície forestal, seguit de *Pinus sylvestris* (18,21%) i *Quercus ilex* (16,73%). Les tres espècies més abundants ocupen, en conjunt, el 55% de la superfície forestal de Catalunya.

boscos de Catalunya, que és de 43,35 tones de C/ha. Tenint en compte que la superfície forestal de Catalunya és d'1.134.972 hectàrees, els boscos de Catalunya acumulen, en conjunt, 49,2 Mt de C. La distribució per comarques del carboni total (Mg) acumulat als boscos de Catalunya, tal i com queda reflectida a la figura 8 esquerra evidencia que existeix una marcada diferència entre el carboni acumulat a les comarques de la meitat nord de Catalunya i l'acumulat a la meitat sud i terres de l'interior, reflectint el paper determinant de l'aigua en el control dels processos de fixació i acumulació de carboni als ecosistemes forestals, tal i com hem descrit prèviament.

Ara bé, aquest carboni que trobem acumulat als boscos de Catalunya és el resultat de la producció neta acumulada al llarg dels anys, que ens informa del carboni que retorna a l'atmosfera quan es destrueix totalment un bosc, sigui per un foc forestal o per qualsevol altra causa,

Espècie principal	Superfície (ha)	VAE (m ³)	Biomassa (Mg)				Carboni (Mg)				Augment VAE (m ³ /any)	Augment de carboni (Mg/any)			Nre. parcel·les
			Sotabosc	Arbòria aèria	Arbòria subterrània	Arbori total	Sotabosc	Arbòria aèria	Arbòria subterrània	Arbori total		Arbòria aèria	Arbòria subterrània	Arbori total	
<i>Abies alba</i>	14.350	3.994,060	63.139	2.520,651	559.487	3.080,138	30.900	1.244,361	285.929	1.530,290	94.159	30.146	7.097	37.243	121
<i>Castanea sativa</i>	8.245	866,629	77.648	664,369	436.270	1.100,639	37.776	321.324	235.669	556.993	36.729	13.852	10.369	24.221	71
<i>Fagus sylvatica</i>	26.212	4.632,862	165.395	3.388.416	1.791.649	5.180.065	80.184	1.648.331	962.885	2.611.216	112.880	40.670	24.276	64.946	226
<i>Pinus halepensis</i>	227.535	13.520,450	2.769.613	9.418.173	3.286.012	12.704.184	1.375.654	4.662.739	1.657.689	6.320.428	460.998	161.033	56.205	217.238	1.969
<i>Pinus nigra</i>	123.480	9.947,018	1.015.859	6.675.311	1.976.026	8.651.336	503.849	3.362.465	1.042.774	4.405.239	364.691	124.370	38.646	163.016	1.112
<i>Pinus pinaster</i>	16.451	1.682,986	270.744	1.079.868	343.072	1.422.940	134.188	544.811	182.534	727.345	95.177	31.749	10.655	42.404	143
<i>Pinus pinea</i>	38.048	3.213,703	423.101	2.251.663	641.280	2.892.942	209.047	1.127.662	340.664	1.468.326	98.637	35.306	10.554	45.859	324
<i>Pinus radiata</i>	1.656	365,081	17.282	217.063	63.041	280.104	8.528	107.743	34.511	142.254	21.578	6.695	2.274	8.969	15
<i>Pinus sylvestris</i>	206.635	22.873,364	1.524.809	14.399.509	4.162.081	18.561.590	751.111	7.242.801	2.050.717	9.293.518	760.567	245.634	69.213	314.847	1.824
<i>Pinus uncinata</i>	65.273	8.075,189	173.256	5.056.642	1.395.926	6.452.568	86.508	2.541.849	622.313	3.164.161	188.758	61.188	14.478	75.667	571
<i>Quercus flex</i>	189.874	9.944,812	2.265.834	11.111.662	8.814.376	19.926.038	1.109.441	5.306.356	5.089.927	10.396.283	249.468	133.618	129.317	262.936	1.626
<i>Quercus suber</i>	63.809	3.992,989	1.165.427	2.882.452	1.239.911	4.122.363	577.005	1.377.120	685.927	2.063.047	96.033	33.422	16.499	49.921	593
Roures	99.009	6.404,260	986.624	5.591.903	2.257.137	7.849.040	483.186	2.706.474	1.214.408	3.920.881	174.978	74.330	33.854	108.184	847
Altres coníferes	4.519	767,064	27.033	403.646	167.894	571.541	13.419	202.534	90.136	292.671	48.195	13.239	6.053	19.293	40
Altres planifolis	49.874	4.284,411	501.994	2.999.127	1.627.074	4.626.200	245.313	1.447.320	858.686	2.306.006	172.106	57.313	33.278	90.591	486
Catalunya	1.134.972	94.534.879	11.447.757	68.660.454	28.761.236	97.421.690	5.646.110	33.843.890	15.354.767	49.198.657	2.974.953	1.062.566	462.768	1.525.334	9.968

Taula 2. Superfície forestal, volum amb escorça, biomassa i carboni acumulat als arbres (part aèria i subterrània) i al sotabosc (només part aèria) i augment anual a l'estrat arbori dels boscos de Catalunya en funció de l'espècie dominant.

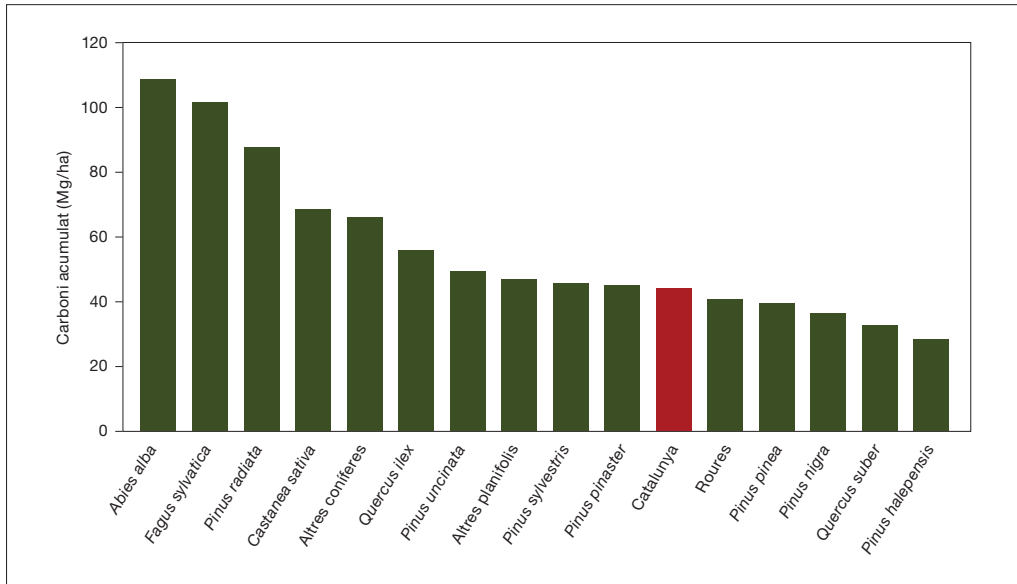


Figura 6. Carboni acumulat per unitat de superfície als arbres dels boscos de Catalunya.

però no ens diu res de la capacitat dels nostres boscos per absorbir i fixar carboni en cada moment. O sigui que per respondre a la pregunta *quin és el balanç de carboni dels nostres boscos?* o, dit d'una altra manera, *quina és la capacitat d'embornal dels boscos de Catalunya*, haurem de recórrer a una anàlisi més detallada del ritme de l'augment anual de la biomassa, tant l'aèria com la subterrània, i el seu equivalent en termes de carboni.

5.1.3. Increment anual de la biomassa aèria i subterrània i del carboni fixat

Tradicionalment, l'augment anual de la biomassa dels arbres s'estima a partir de l'augment anual del volum que es pot determinar, ja sigui analitzant els anells de creixement o comparant les dades de dos inventaris forestals successius com ara l'IFN2 i l'IFN3 que, com ja hem descrit, es realitzen partint de parcel·les permanents. Per avaluar el potencial d'embornal dels nostres boscos hem calculat l'augment anual de volum del tronc com la diferència del volum amb escorça (VAE) entre l'IFN3 i l'IFN2 dividit per l'interval de temps transcorregut entre els dos mostresos. Aquestes dades bàsiques s'han de corregir per comptabilitzar l'augment que aporten els arbres

incorporats a la població durant el temps transcorregut entre inventaris. A més a més, cal considerar la quantitat que s'extreu en els aprofitaments de fusta i llenya. Es pot determinar comparant arbre a arbre les parcel·les mostrejades als dos inventaris. D'aquesta manera es determina quants arbres han sobreviscut i han continuat creixent; quants arbres s'han incorporat de nou a la població, quants han mort i, finalment, quants arbres han desaparegut fruit d'algun aprofitament o aclarida, o fruit d'alguna pertorbació com allaus o focs forestals. Fent la diferència entre els valors dels dos inventaris forestals i dividint pel temps transcorregut entre ambdós s'obté el balanç net a cada parcel·la.

Com ja hem vist a la taula 1, des del període 1989-90 al 2000-01 el volum de fusta al bosc (volum amb escorça) ha augmentat un 35%, fet que representa un augment mitjà (creixement net) de 2,12 milions de m³/any. De mitjana, la mortalitat durant aquest període ha estat de 272.000 m³/any, i els aprofitaments de 782.000 m³/any. En total, l'augment del volum de fusta al llarg del període ha estat de 3,17 milions m³/any. Les tres espècies que han tingut un creixement net més important en valor absolut han estat *Pinus sylvestris*, amb 563.000 m³ /any, seguida de *Pinus halepen-*

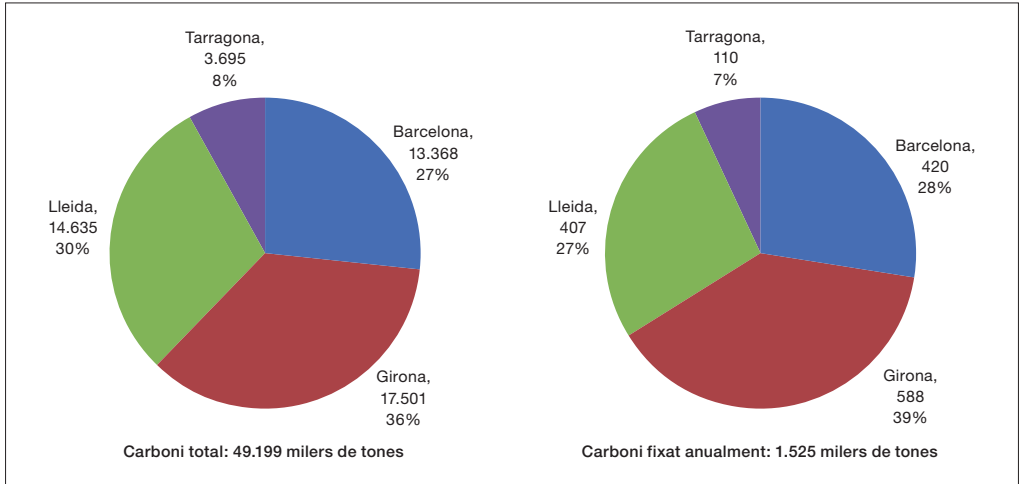


Figura 7. Carboni acumulat als arbres dels boscos de cadascuna de les quatre províncies de Catalunya (esquerra) i carboni fixat anualment (dreta). Valors en milers de tones i percentatges de cada província respecte del total de Catalunya.

sis, amb 359.000 m³/any i *Quercus ilex*, amb 253.000 m³/any; entre les 3 sumen el 55,4% del total. *Pinus nigra*, amb 179.000 m³/any, és l'espècie que ha estat sotmesa a més aprofitaments durant aquest període, una dada enganyosa ja que en bona part està reflectint els efectes dels incendis dels anys 1994 i 1998, que van cremar grans

extensions on aquesta espècie era dominant. La segueixen *Pinus sylvestris*, amb 145.000 m³/any, i *Pinus halepensis*, amb 112.000 m³/any. Entre les 3 sumen el 56% del total dels aprofitaments del bosc a Catalunya. Dels 272.000 m³ que hem estimat com a mortalitat anual, 51.000 corresponen a *Pinus halepensis*, 45.000 a *Pinus sylvestris*,

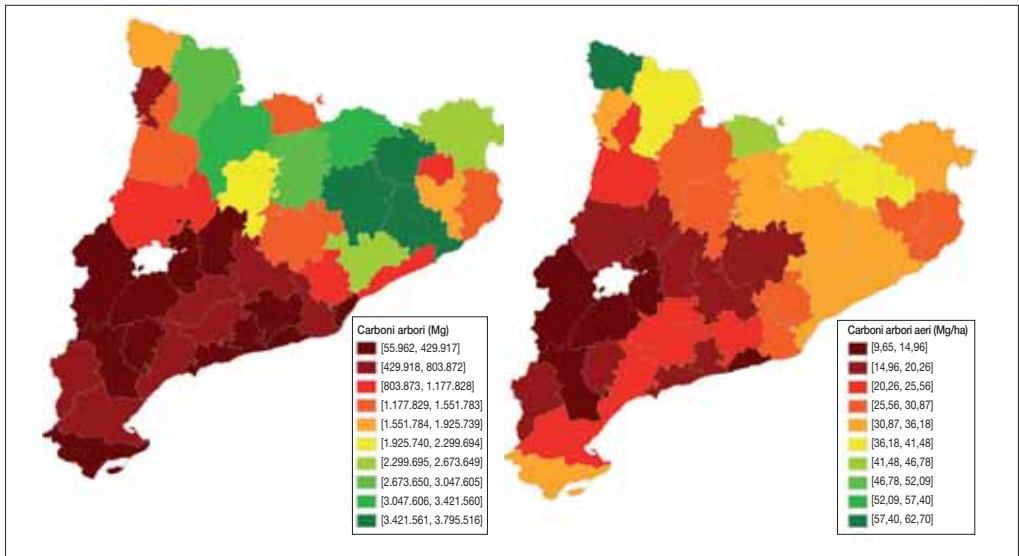


Figura 8. Distribució per comarques del carboni total (Mg) acumulat als arbres de totes les espècies (esquerra) i quantitat de carboni per hectàrea acumulat als arbres (dreta). En ambdós casos hi ha una marcada diferència entre el carboni acumulat a les comarques de la meitat nord de Catalunya i l'acumulat a la meitat sud, el que posa de manifest el paper determinant de la disponibilitat hídrica en el control dels processos de fixació i acumulació de carboni als ecosistemes forestals.

Província	Grups funcionals	Superfície (ha)	VAE (m³)	Biomassa (Mg)			Carboni (Mg)			Augment VAE (m³/any)	Augment de carboni (Mg/any)			Nre parcel·les
				Aèria	Subterrània	Total	Aeri	Subterrani	Total		Aeri	Subterrani	Total	
Barcelona	Caducifoli	43.138	3.620.832	2.911.030	1.365.265	4.276.296	1.412.402	732.599	2.145.001	102.546	40.068	21.054	61.122	396
	Conifera	221.167	18.036.351	11.825.815	3.717.296	15.543.111	5909.136	1.883.886	7.793.022	645.794	214.657	67.144	281.801	1.958
	Esclerofil·le	62.818	3.762.557	3.856.741	2.761.940	6.618.681	3.429.880	1.843.668	1.586.212	3.429.880	83.640	41.271	35.563	76.834
Girona	Caducifoli	75.353	8.907.073	6.668.916	3.391.394	10.060.310	3.228.025	1.820.233	5.048.258	297.624	105.311	59.862	165.173	673
	Conifera	111.550	13.146.090	8.320.490	2.670.573	10.991.063	4.161.113	1.361.440	5.522.554	531.580	171.607	57.408	229.015	972
	Esclerofil·le	130.951	8.460.862	7.990.598	5.447.168	13.437.767	3.810.945	3.119.111	6.930.057	231.593	105.949	88.197	194.146	1.196
Lleida	Caducifoli	56.203	3.459.189	2.825.548	1.217.373	4.042.922	1.369.027	646.668	2.015.695	75.241	30.804	14.651	45.455	471
	Conifera	259.468	27.529.206	17.769.353	4.862.157	22.631.509	8.922.033	2.383.404	11.305.437	787.360	262.119	70.722	332.841	2.209
	Esclerofil·le	44.276	991.436	1.333.622	1.170.507	2.504.129	636.654	676.851	1.313.506	21.691	14.040	14.620	28.660	361
Tarragona	Caducifoli	3.153	163.040	133.132	67.825	200.956	64.708	36.029	100.738	5.638	2.188	1.161	3.350	30
	Conifera	108.855	5.794.952	4.208.719	1.392.007	5.600.725	2.095.379	706.111	2.801.489	174.764	64.070	21.512	85.582	1.009
	Esclerofil·le	18.040	663.291	816.491	697.731	1.514.222	390.799	402.221	793.020	17.483	10.483	10.873	21.356	175
Catalunya	Caducifoli	177.847	16.150.134	12.538.626	6.041.858	18.580.684	6.074.163	3.235.530	9.309.693	481.049	178.371	96.728	275.099	1.570
	Conifera	701.040	64.506.599	42.124.376	12.642.032	54.766.408	21.087.661	6.334.841	27.422.502	2.139.498	712.453	216.787	929.239	6.148
	Esclerofil·le	256.084	13.878.145	13.997.452	10.077.346	24.074.798	6.682.066	5.784.396	12.466.462	354.406	171.742	149.253	320.996	2.250

Taula 3. Superfície forestal, volum amb escorça, biomassa i carboni acumulat als arbres (part aèria i subterrània) i augments anuals a l'estrat arbore per grups funcionals i demarcacions.

i 44.000 a *Pinus nigra*; entre les tres sumen el 51% del total.

A la taula 3 es mostren els valors desglossats per les quatre demarcacions, separant els boscos de coníferes, caducifolis i escleròfil·les. En conjunt, aquesta biomassa dels boscos de Catalunya (figura 7) representa 49,2 Mt de C, el 36% de les quals (17,5 Mt) es localitzen a Girona, el 30% a Lleida (14,6 Mt), el 27% a Barcelona (13,4 Mt), i un 8% a Tarragona (3,7 Mt). Dels 49,2 Mt de C dels boscos de Catalunya, gairebé el 56% correspon a boscos de coníferes, un 25% a boscos d'escleròfil·les i un 19% a caducifolis. Dels 27,4 Mt de C dels boscos de coníferes, el 41% són a la demarcació de Lleida, el 29% a Barcelona, el 20% a Girona i finalment el 10% restant a Tarragona. El 54% dels boscos de caducifolis són a la demarcació de Girona, el 23% a Barcelona, el 21% a Lleida i només un 1% a Tarragona. El 56% dels boscos d'escleròfil·les es troben a la Demarcació de Girona, un altre 27% a Barcelona, un 11% a Lleida, i a Tarragona el 6% restant.

A la taula 4 es mostren els valors desglossats per comarques. Les comarques de la Garrotxa i d'Osona, amb 3,8 i 3,5 Mt de C, respectivament, són les que més carboni acumulen a la biomassa arbòria. Les quantitats de carboni acumulat a les comarques de la Selva, l'Alt Urgell i el Ripollès oscil·len entre 3,2 i 3,4 Mt de C. Un tercer grup el conformen les comarques de l'Alt Empordà, Berguedà, Pallars Sobirà i Valles Oriental, amb valors que oscil·len entre els 2,5 i 2,8 Mt de C (figura 8). La comarca de la Selva és la que destaca més pel que fa als augments anuals de carboni de la biomassa arbòria, amb 134.000 tones anuals. Les comarques d'Osona i la Garrotxa, amb 111.000 i 110.000 tones, respectivament, ocupen també un lloc destacat. Altres comarques com l'Alt Urgell, el Berguedà i el Ripollès presenten augments al voltant de 100.000 tones anuals de carboni. La figura 8 representa la distribució comarcal del carboni acumulat als boscos de Catalunya. Existeix un marcat contrast entre les comarques de la meitat nord de Catalunya i les de la meitat sud, fet que posa de manifest l'acusat efecte de la disponibilitat hídrica en els processos d'absorció, fixació i retorn del CO₂ a l'atmosfera, tant als boscos com a la resta de

comunitats naturals, com ja hem comentat prèviament.

5.1.4. La contribució del sotabosc

Al carboni fixat anualment o acumulat als arbres cal afegir-hi el carboni del sotabosc que, en el cas del bosc mediterrani, pot arribar a representar-ne una fracció gens menyspreable, ja que s'aproxima al 10% del carboni total acumulat a la biomassa. En conjunt, el sotabosc a Catalunya contribueix amb 11,45 Mt de biomassa que, en termes de carboni, representen 5,65 Mt. La contribució del sotabosc de les pinedes de *Pinus halepensis* (1,38 Mt de C) i dels alzinars (*Quercus ilex*, 1,11 Mt de C) representa pràcticament la meitat del total. En conjunt, el carboni retintut a la biomassa dels arbres representa el 89,7% del total (68,8% d'aèria i 31,2% de subterrània), i la biomassa del sotabosc afegeix un 10,3% al carboni total acumulat als boscos (taula 2 i figura 9).

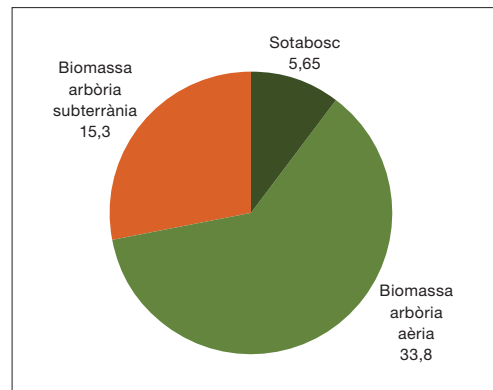


Figura 9. La biomassa dels boscos de Catalunya acumula, en conjunt, 54,8 Mt de C. Els arbres en retenen 49,2 Mt (el 89,7 del total) i el sotabosc el 10,3 restant. Del carboni retintut als arbres, 33,8 milions de tones (el 68,8%) es concentren a la biomassa aèria, i 15,3 milions de tones (el 31,2%) a la biomassa subterrània.

5.1.5. Carboni fixat anualment als boscos de Catalunya

Els boscos de Catalunya fixen anualment, de mitjana, 1,34 tones de carboni/ha/any (figura 10). L'espècie que més carboni fixa és *Pinus radiata* (5,42 tones de C/ha/any) i la que menys

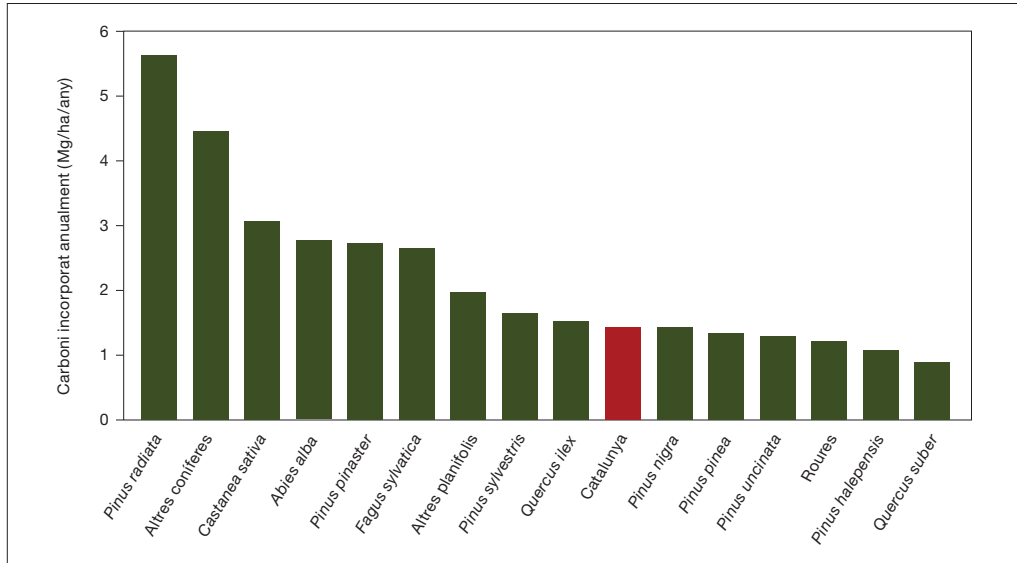


Figura 10. Carboni que fixen diverses espècies presents als boscos de Catalunya.

Quercus suber (0,78 tones de C/ha/any). En conjunt, els boscos de Catalunya fixen anualment 1,5 Mt de C.

5.1.6. Què representa el carboni fixat als arbres dels boscos?

La quantitat de carboni fixat anualment per una hectàrea de bosc, 1.34 tones de C/ha/any equival a 4,93 tones de CO₂, valor que aproximadament equival a la meitat de les emissions anuals mitjanes de cada habitant de Catalunya que resulten ser molt properes a 10 tones de CO₂ per habitant i any. Aquesta xifra ens permet comprendre millor la importància relativa dels boscos com a embornals de carboni. Donada la població de Catalunya d'uns 7 milions d'habitants, es compren que els boscos estan molt lluny de tenir capacitat per compensar les emissions de CO₂ de la població de Catalunya. En efecte, per compensar les seves emissions, els 7 milions d'habitants requereixen una superfície forestal de aproximadament 14,2 milions d'hectàrees de bosc, valor 12,5 vegades superior als 1.13 milions d'hectàrees de bosc present a Catalunya. Dit d'un altra manera, la fixació de carboni dels boscos catalans només serveix per compensar el 8% de les emissions anuals de CO₂ de Catalunya.

5.1.7. El futur dels boscos de Catalunya com a embornals de CO₂

Peñuelas i Boada (2003) han comparat la distribució de la vegetació actual del Montseny (Barcelona) amb la distribució de 1945 i han pogut apreciar una progressiva substitució dels ecosistemes temperats (fagedes) per altres de més mediterranis (alzinars). Les fagedes s'han desplaçat en altitud uns 70 m fins arribar a les altituds culminals (1.600-1.700 m). A altituds mitjanes les fagedes es veuen progressivament reemplaçades per les alzines, de manera que aquesta espècie es troba ja a altituds tan inesperades com els 1.400 m. Les condicions progressivament més càlides i àrides, junt amb els canvis d'usos del sòl entre els quals cal destacar l'abandonament de la gestió tradicional i la pràctica desaparició dels incendis associats a la ramaderia (actualment prohibits al Montseny), expliquen aquests canvis en un clar exemple paradigmàtic de com interactuen els diferents components del canvi global.

L'augment de la temperatura es reflecteix clarament en la resposta fenològica de les plantes, ja que la fenologia es particularment sensible a les variacions de temperatura. El problema és rellevant per les implicacions que se'n deriven tant pel que fa als diferents processos associats a

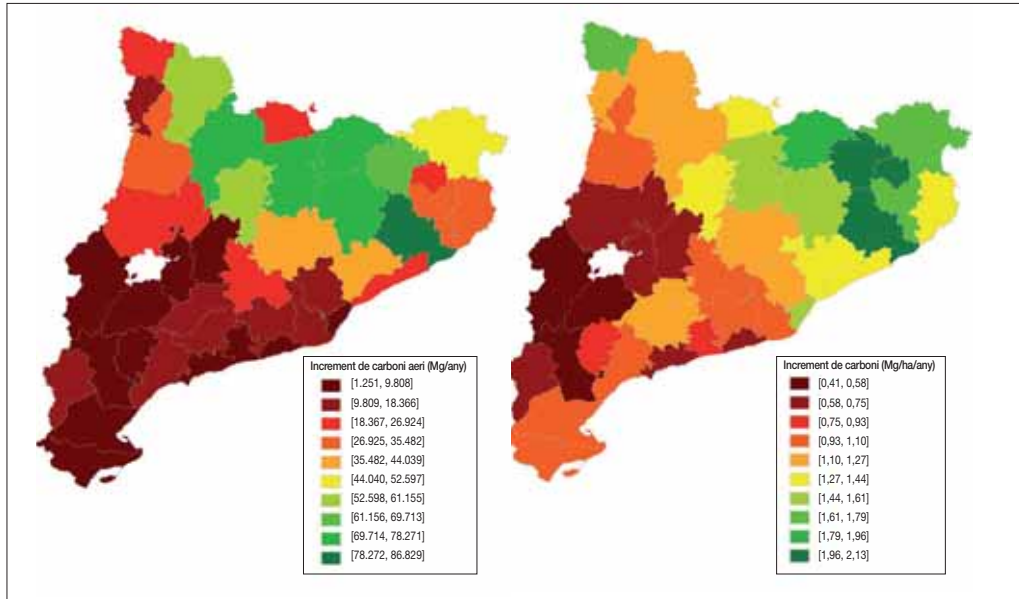


Figura 11. Augment anual de carboni (Mg) als arbres (totes les espècies) (esquerra) i augment anual per hectàrea (dreta) en les comarques de Catalunya.

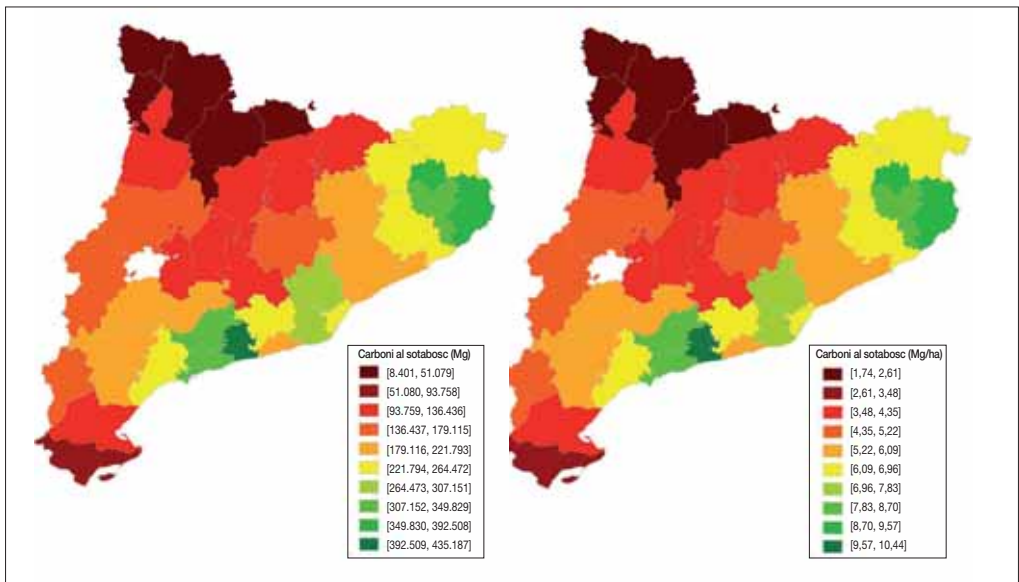


Figura 12. Carboni total (Mg) acumulat (totes les espècies, esquerra) i quantitat de carboni per hectàrea (dreta) present al sotabosc dels boscos de Catalunya.

l'absorció, fixació i retorn del CO_2 a l'atmosfera per part de la vegetació, com per la supervivència de moltes masses forestals. El problema pot resultar encara més crític en el cas del Mediterrani,

on com hem vist, l'absorció de carboni està limitada per la disponibilitat hídrica. Una vegetació activa durant un període de temps cada cop més llarg, a conseqüència d'una elongació del període

Comarca	Superfície (ha)	VAE (m²)	Biomassa (Mg)		Carboni (Mg)		Augment VAE (m³/any)	Augment de carboni (Mg/ha)		Nre. parcel·les		
			Aèria	Subterrània	Aeri	Subterrani		Aeri	Subterrani		Total	
Alt Camp	12.494	812.816	627.610	279.140	906.750	309.371	148.319	457.690	9.922	4.580	14.501	117
Alt Empordà	46.669	3.767.978	3.077.233	1.752.293	4.829.526	1.486.614	976.872	2.463.486	26.121	31.220	80.785	421
Alt Penedès	13.963	872.244	606.721	206.974	300.874	813.518	104.565	405.440	32.562	3.828	11.350	97
Alt Urgell	83.528	7.627.097	5.082.413	1.605.991	6.688.404	2.549.245	811.222	3.360.467	223.491	76.220	23.523	765
Alta Ribagorça	13.561	1.381.000	943.960	293.848	1.237.808	469.625	145.452	615.077	35.358	12.173	15.822	101
Anoia	26.717	1.348.657	997.538	339.579	1.337.116	495.186	174.173	669.359	52.235	19.347	6.574	225
Bages	51.946	2.822.963	1.992.362	706.288	2.698.650	990.826	366.770	1.357.596	121.652	14.440	14.440	500
Baix Camp	15.921	800.383	677.641	345.315	1.022.956	333.037	188.691	521.728	25.801	10.610	5.687	163
Baix Ebre	12.835	905.793	651.556	220.358	871.914	325.626	115.268	440.894	24.591	8.922	3.054	100
Baix Empordà	32.802	2.087.095	1.829.871	739.834	2.569.711	894.984	400.125	1.295.109	82.974	29.129	12.630	273
Baix Llobregat	12.907	1.020.085	676.113	333.528	933.843	333.528	132.703	466.232	30.175	9.967	3.850	84
Baix Penedès	4.284	241.262	168.646	53.985	222.631	83.667	26.307	109.973	8.136	910	3.781	22
Barcelona	1.314	109.678	83.896	42.172	126.068	40.947	23.090	64.037	3.255	614	1.925	12
Berguedà	60.932	6.005.834	4.149.996	1.392.234	5.542.231	2.074.245	707.212	2.781.457	218.457	71.177	23.396	606
Cerdanya	20.831	3.147.139	1.907.493	532.601	2.440.093	957.887	246.083	1.203.970	74.961	23.587	6.043	184
Conca de Barberà	18.158	1.120.890	919.870	451.601	1.371.471	452.063	244.830	696.893	34.276	7.055	20.811	169
Garraf	3.485	131.902	91.255	27.732	118.986	45.316	13.403	58.719	4.717	507	2.229	24
Garrigues	14.031	444.673	368.087	133.538	501.625	181.714	67.171	248.885	13.215	2.008	7.570	114
Garrotxa	54.599	5.209.038	4.576.118	2.827.146	7.403.264	2.206.738	1.588.778	3.795.516	152.223	64.351	46.198	496
Gironès	33.575	2.630.223	2.008.170	1.088.796	3.046.966	975.696	578.255	1.553.952	98.091	19.204	54.565	293
Maresme	21.149	1.864.062	1.493.930	684.263	2.178.193	730.915	381.733	1.112.648	51.107	19.851	9.536	158
Moixà	5.258	508.780	349.979	121.023	471.002	175.439	64.246	239.685	11.472	4.030	5.594	57
Nouguera	41.407	1.555.961	1.320.913	649.416	1.970.329	650.240	357.925	1.008.164	50.589	10.057	30.684	301
Osona	73.155	6.178.432	4.782.485	2.240.133	7.022.618	2.340.023	1.215.992	3.556.015	203.962	74.683	36.514	654
Pallars Jussà	41.523	2.591.904	2.087.093	872.959	2.960.052	1.028.233	468.322	1.496.755	77.114	29.611	11.885	323
Pallars Sobirà	57.163	6.576.687	4.321.560	1.311.888	5.633.448	2.156.484	646.268	2.802.752	164.106	54.982	16.237	522
Pla de l'Estany	13.438	1.562.600	1.100.764	588.800	1.659.572	537.446	305.948	843.394	56.309	18.709	9.888	122
Priorat	16.758	597.226	517.478	260.776	778.254	254.150	141.447	395.597	19.760	8.377	4.405	137
Ribera d'Ebre	19.268	564.739	442.619	152.180	594.799	218.910	75.881	294.791	17.487	6.875	2.354	197
Ripollès	56.702	6.811.099	4.586.220	1.746.057	6.332.277	2.271.053	897.054	3.168.108	230.571	77.300	29.248	487
Segarra	9.687	435.122	318.678	113.885	432.563	158.637	60.420	219.058	14.416	5.259	1.861	55
Segrià	6.324	172.877	123.430	39.057	162.488	61.009	18.926	79.935	5.349	606	2.577	51
Selva	66.209	5.965.028	4.470.036	2.291.935	6.761.971	2.169.156	1.266.326	3.435.481	248.283	86.829	47.102	625
Solsonès	52.453	4.616.728	3.180.234	1.018.304	4.198.538	1.595.386	533.627	2.129.013	157.809	54.626	17.421	473
Tarragonès	3.045	162.382	107.500	32.655	140.155	53.359	15.801	69.159	4.545	1.525	448	18
Terra Alta	22.025	907.012	695.443	240.530	935.973	345.263	123.571	468.835	25.696	9.854	3.490	234
Urgell	3.068	101.309	82.303	30.488	112.791	40.596	15.366	55.962	3.278	1.374	509	16
Val d'Aran	20.299	3.955.181	2.580.234	755.033	3.335.267	1.272.775	384.793	1.657.558	79.820	25.902	7.503	169
Valles Occidental	23.710	1.909.069	1.374.995	615.678	1.990.673	675.264	329.903	1.005.167	51.138	18.178	8.622	216
Valles Oriental	47.777	4.111.931	3.288.005	1.779.190	5.067.195	1.602.361	991.740	2.594.101	112.518	42.588	24.489	387
Catalunya	1.134.972	94.534.879	68.660.454	28.761.236	97.421.690	33.843.890	15.354.767	49.198.657	2.974.953	1.062.566	462.768	9.968
												1.525.334

Taula 4. Distribució comarcal de la superfície forestal, volum amb escorça, biomassa i carboni acumulat als arbres (part aèria i subterrània) i augments anuals a l'estrat arbori.

vegetatiu durant les properes dècades, implica una major demanda hídrica per part dels boscos. Més demanda hídrica, en un ambient que es preveu més sec, amb menys precipitacions, representarà unes condicions cada cop més desfavorables a la vegetació. Els resultats dels models fisiològics de simulació del creixement forestal indiquen que és previsible que aquestes condicions desfavorables es puguin traduir en reducció de les taxes de fixació de carboni (al haver-hi menys aigua disponible) i un augment de les taxes de respiració (derivades de l'augment de la temperatura) el que ha de tenir com a conseqüència una reducció de l'efecte d'embornal dels nostres boscos. Cal tenir en compte les variacions en la freqüència i intensitat de les glaçades tardanes i primerenques, que podran experimentar un augment interactuant amb la fenologia i l'estat vegetatiu de les espècies vegetals (EEA, 2008).

D'aquí que resulti interessant explorar alguns trets del futur dels nostres boscos en un context de canvi climàtic. Els canvis que pugui experimentar el període vegetatiu resulten particularment importants per entendre el comportament de la vegetació en les dècades futures. Durant les darreres dècades son cada cop més abundants les observacions basades en la Xarxa Internacional de Jardins Botànics Fenològics creada al 1957 per Schnelle. Aquesta xarxa porta a terme observacions sistemàtiques de les dates en què tenen lloc les diferents fases fenològiques de moltes espècies de plantes.

Es pot anticipar que un augment de la temperatura anticiparà el començament i endarrerirà el final, el que provocarà un augment de la durada del període d'activitat de les plantes. Tant les dates de començament com de final del període vegetatiu estan molt estretament controlades per la temperatura. Les fases fenològiques que tenen lloc a la primavera, com la brotada de les fulles, o l'activació dels borrons, resulten molt més sensibles a les variacions de temperatura que les fases que tenen lloc a la tardor, com la caiguda de la fulla en el cas dels caducifolis, que difereixen molt poc entre espècies.

Utilitzant les observacions de la Xarxa Internacional de Jardins Botànics Fenològics, Menzel i Fabian (1999) han posat de manifest que la brotada de la fulla i altres fases primaverals s'han

avançat a Europa una mitjana de 6,3 dies en el període de 1959-1996, o sigui, uns 0,21 dies/any de mitjana. Paral·lelament, les fases de tardor s'han allargat 4,5 dies durant el mateix període de temps o, el que és el mateix, 0,15 dies/any, d'on es dedueix que el període vegetatiu s'ha allargat 10,8 dies des dels anys 60 (figura 13). Ni totes les espècies responen de la mateixa manera ni els canvis observats es produeixen a totes les latituds amb la mateixa intensitat.

Aquesta elongació del període vegetatiu comporta una major capacitat de transpirar una quantitat suplementària d'aigua. En les condicions mediterrànies, en què l'aigua resulta avui per avui el factor més limitant per a la vegetació, i on tant els models com les observacions empíriques indiquen una reducció de la disponibilitat hídrica, el conflicte entre augment de la demanda d'aigua i disminució de la disponibilitat pot tenir com a conseqüència condicions localment difícils o impossibles de superar per part d'algunes espècies. La exploració d'aquestes condicions futures resulta complexa ja que, per una banda, les respostes no són lineals, i per l'altra, les interaccions entre diferents processos fisiològics compliquen enormement l'anàlisi.

Chmielewski y Rotzer (2002) i Chmielewski (1996) han analitzat les dades existents a Europa sobre les dates d'inici i final del període vegetatiu i altres variables fenològiques. Al conjunt de

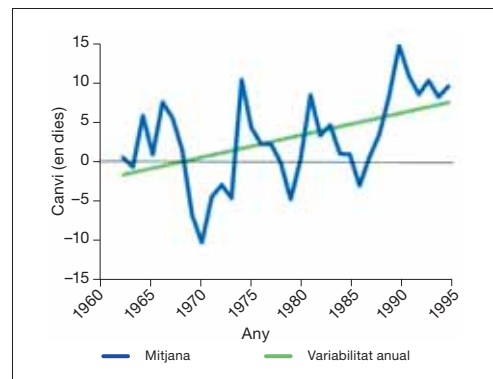


Figura 13. Observacions de la Xarxa Internacional de Jardins Botànics Fenològics d'Europa excepte França, la península ibèrica, Sud d'Itàlia i Grècia. D'acord amb les observacions, la durada del període vegetatiu a Europa mostra una clara tendència a augmentar.

Font: Menzel (2002) i Menzel i Fabian (1999).

jardins botànics de la Xarxa es va plantar un total de 23 espècies d'arbres reproduïts vegetativament. En un rang de 28 latituds des d'Escandinava fins a Macedònia, i en un rang de 37 longituds, des d'Irlanda fins a Finlàndia al Nord, i des de Portugal a Macedònia al Sud. Aquests autors han relacionat les fases fenològiques d'aquest conjunt d'espècies entre els anys 1961 a 1998 amb variables com l'altitud i la latitud de cada lloc, i han trobat una dependència molt estreta tal, i com caldria esperar atesa la dependència fenològica respecte de la temperatura i la dependència d'aquesta respecte de les coordenades geogràfiques.

A mida que ens desplacem de sud a nord, una distància de 100 km, el començament del període vegetatiu s'enredereix 2,3 dies. A més a més, un augment de 100 m en altitud, es tradueix en un retard de 3,1 dies. A mida que ens desplacem cap a l'est, el gradient de continentalitat es tradueix en un retard del començament del període vegetatiu de 0,5 dies per cada 100 km. Segons aquestes relacions, el dia de l'any que correspon al moment inicial del període vegetatiu es pot formular així:

$$I_{pv} = 0.5 \cdot LON' + 2.3 \cdot LAT' + 3.1 \cdot ALT - 32.6$$

on la variable LON' és la longitud equivalent expressada com la distància del punt al meridià de Greenwich en centenars de quilòmetres (km/100), LAT' és la latitud equivalent expressada anàlogament com la distància del punt a l'Equador en centenars de quilòmetres, i ALT' és l'altitud equivalent expressada anàlogament en centenars de metres (m/100). Segons aquests autors podem escriure l'equació que defineix el final del període vegetatiu de manera anàloga a com hem definit el començament:

$$F_{pv} = 0,2 \cdot LON' - 0,1 \cdot LAT' - 1 \cdot ALT + 310,6$$

El final del període vegetatiu s'avança 0,1 dies a mida que ens desplacem de sud a nord una distància de 100 km. Un augment de 100 m en altitud es tradueix en un avançament d'un dia. A mida que ens desplacem cap a l'oest el gradient de continentalitat es tradueix en un avançament de 0,2 dies per cada 100 km de desplaçament o, el que és el mateix, si sumem els 0,5 dies de re-

Quadre 2. La resposta fenològica de la vegetació

La temperatura és la variable més estretament relacionada amb la fenologia dels arbres. Aquests actuen com a integradors de les condicions de temperatura que van experimentant. L'estat vegetatiu d'una espècie en un moment qualsevol de l'any és el resultat de la integració dels efectes de la temperatura fins a aquest moment.

L'estat vegetatiu V_d d'una espècie determinada, en un punt qualsevol, el dia de l'any d , ve donat per l'expressió

$$V_d = V_{d-1} + \Delta V_d$$

on ΔV_d representa l'efecte fenològic de la temperatura del dia d sobre l'espècie. Si la temperatura mitjana del dia d , en què la temperatura és t_d °C, el seu efecte sobre l'estat vegetatiu de l'arbre experimenta un canvi equivalent a

$$\Delta V_d = \frac{t_d - t_0}{t_1 - t_0} \cdot V_{d-1}$$

on t_0 i t_1 són les temperatures llindar a les quals la taxa fotosintètica de l'espècie assoleix els seus valors mínim i màxim respectivament. L'efecte de la temperatura t_d depèn, naturalment, del rang de temperatures ($t_0 - t_1$) a les quals l'espècie resulta sensible i de l'estat fenològic (V_{d-1}) assolit per la planta el dia $d-1$. El terme τ reflecteix la inèrcia temporal amb què l'espècie respon als canvis diaris de temperatura. Un cop s'assoleix un llindar determinat, específic de cada espècie, es desencadena la brotada de les fulles, i anàlogament les diferents fases fenològiques. L'inici de la caiguda de les fulles, en el cas dels caducifolis, ve igualment determinada per un valor llindar.

Partint d'una sèrie de temperatures diàries s'obté una funció d'estat vegetatiu com la que es mostra a la figura 2.1. En qualsevol moment de l'any, l'estat vegetatiu de l'espècie ve determinat pel valor de V_d . Si $V_d < 0$ l'activitat de la planta es nul·la. Els valors $0 \leq V_d < 1$, corresponen a les condicions de transició del repòs a l'activitat en primavera o de la activitat al repòs a la tardor. Quan $V_d \geq 1$, la planta es troba potencialment en plena activitat.

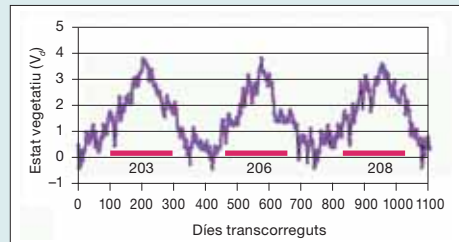


Figura 2.1. Evolució de l'activitat vegetativa de *Quercus ilex* entre els anys 1995 i 1997 a les muntanyes de Prades (Tarragona) calculada en base a les temperatures diàries de la regió. Les temperatures llindar resulten ser $t_0=6^\circ\text{C}$, $t_1=12^\circ\text{C}$ y $\tau=3$. Les bandes de color gris representen la durada del període vegetatiu de cada any, que va ser de 203, 206 i 208 dies, respectivament.

tard del començament als 0,2 dies d'avançament del final, resulta que el període vegetatiu s'escurça 0,7 dies per cada 100 km que ens desplaçem cap a l'est com a conseqüència del gradient de continentalitat.

Per les característiques físiques d'Europa, on el mar Mediterrani té un paper preponderant a latituds inferiors als 45 °, la presència del Mediterrani condiciona el gradient de continentalitat de manera que, en les zones properes a la costa, les diferències est-oest es manifesten, si ho fan, de manera més atenuada. A mida que ens desplaçem des de latituds de 45 ° N cap a latituds més baixes, el gradient de continentalitat s'atenua progressivament fins a desaparèixer per complet cap als 34 ° N. Per reflectir aquest efecte de la presència del Mediterrani, es pot introduir una correcció basada en observacions fenològiques que incorporem a les equacions de Rotzer i Chmielewski. D'aquesta manera, el començament del període vegetatiu a Europa es pot estimar com

$$I_{pv} = 0,5 \cdot LON' + 2,3 \cdot LAT' + 3,1 \cdot ALT - 32,6 - 0,045 \cdot LON' \cdot (54 - LAT')$$

i el dia que correspon al final del període vegetatiu, com

$$F_{pv} = -0,2 \cdot LON' - 0,1 \cdot LAT' - 1 \cdot ALT + 310,6 + 0,018 \cdot LON' \cdot (54 - LAT')$$

Aquestes correccions, que només s'apliquen a latituds inferiors als 45 ° N, introdueixen l'efecte d'assuaviment del clima per la presència del Mediterrani, i resulten particularment importants entre els 34 ° N i els 45 ° N que correspon a distàncies aproximades a l'Equador de 4.000 i 5.400 km. L'efecte de la longitud sobre el període vegetatiu és de 0,7 dies/100 de latitud N.

A una latitud de 34 ° N l'efecte d'assuaviment del clima per la presència del Mediterrani representa un allargament del període vegetatiu de 0,88 dies per cada 100 km de desplaçament cap a l'est. Aquest allargament del període vegetatiu per assuaviment del clima afecta particularment Itàlia, la regió dels Balcans, Grècia i Turquia. La figura 14 representa la distribució a Europa de les dates d'inici i final del període vegetatiu basada en les observacions fenològiques dels anys

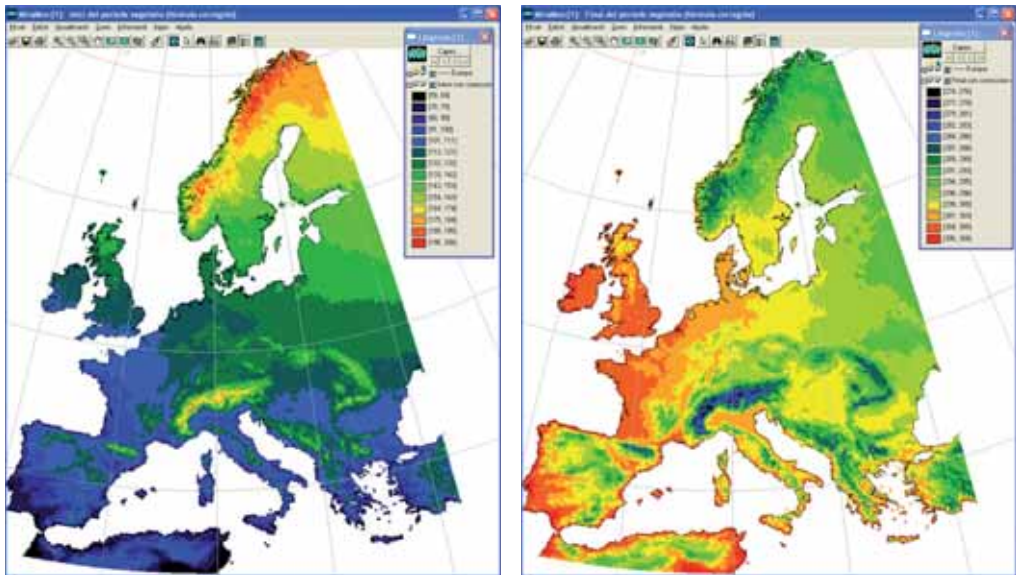


Figura 14. Distribució geogràfica de les dates de començament (esquerra), i final (dreta) del període d'activitat de la vegetació a Europa en el període de 1961 a 1998. Cartografia basada en les observacions de la Xarxa Internacional de Jardins Botànics Fenològics. Relacionant aquestes observacions amb la latitud, longitud i altitud de cada punt d'observació, resulta possible estimar les dates d'inici i final del període vegetatiu per a cada píxel. El model d'interpolació es va modificar i corregir per tal d'incloure-hi l'efecte de la presència del Mediterrani per a latituds inferiors als 45 ° N.

1961 a 1998 i interpolades d'acord amb les equacions 7 i 8 per a latituds superiors als 45 ° N i les equacions 9 i 10 per a latituds inferiors. En base a aquests resultats és possible relacionar el valor d'aquestes variables fenològiques en cada punt del continent amb els patrons de temperatura i precipitació del punt i elaborar un model simple que permeti explorar com variaran les dates d'inici i final del període vegetatiu en diferents escenaris futurs.

Amb la finalitat d'explorar els canvis potencials del període vegetatiu dels boscos d'Europa, i el seu efecte sobre el potencial d'embornal, hem utilitzat la base de dades elaborada en el marc del projecte ATEAM (*Advanced Terrestrial Ecosystems Analysis and Modelling*, EVK2-

2000-00075). El continent europeu queda cobert per un conjunt de píxels de 10' x 10' (figura 15) que porten associada informació sobre la vegetació forestal present (tipus funcional de bosc i fracció de la superfície de ocupada pel bosc) així com els valors de les variables climàtiques corresponents a diferents escenaris climàtics.

Partint de la sèrie de temperatures diàries del període 1961-1998, s'ha simulat el creixement del bosc en cada píxel amb ajut del model de simulació del creixement forestal GOTILWA+ (*Growth of trees is limited by water*, Gracia et al. 1999, 200), variant, en cada píxel, el valor de la temperatura llindar màxima t_1 fins a aconseguir un resultat de la simulació de les dates d'inici i

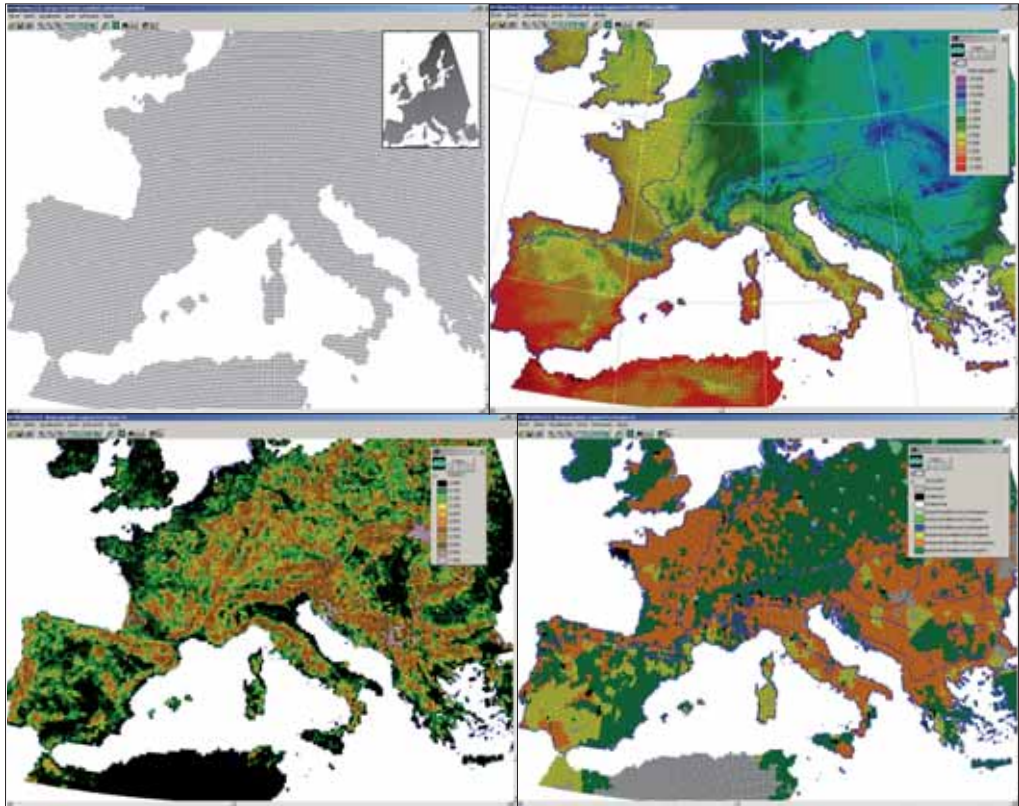


Figura 15. (A) Conjunt de píxels de 10' x 10' que constitueixen la base de dades del projecte ATEAM (*Advanced Terrestrial Ecosystems Analysis and Modelling*) que hem utilitzat per explorar els canvis que pot experimentar el període vegetatiu de les espècies forestals presents a Europa. La figura B il·lustra, a títol d'exemple, la distribució de la temperatura mitjana del mes de gener. Per al càlcul s'han utilitzat les temperatures de cada dia de l'any, corresponents a cada píxel. A més a més de les coordenades de cada píxel, en el càlcul s'ha considerat la fracció de la superfície de cada píxel ocupada pel bosc (C) així com els tipus funcionals de bosc presents a cada píxel (D).

final del període vegetatiu comparables a les obtingudes aplicant les equacions 6 a 9. Per economia de càlcul, i atès que la temperatura lliandar mínima (t_0) i la inèrcia tèrmica resulten poc variables, en el procediment d'estimació del lliandar màxim hem fixat els valors de $t_0 = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ i $\tau=3$.

Obtinguda per aquest procediment la temperatura lliandar màxima, que ajusta la resposta fenològica de la vegetació als valors observats en el període 1961-1998, resulta possible simular el creixement del bosc amb el model GOTILWA+ en les condicions projectades per als escenaris climàtics futurs per tal de determinar com podrà variar la durada del període vegetatiu en el futur i explorar les possibles respostes dels boscos pel que fa referència als fluxos de carboni, al conflicte augment de temperatura *versus* disminució de la disponibilitat hídrica i, en definitiva, a la seva capacitat per actuar com a embornals de CO_2 .

Les dates d'inici i final del període vegetatiu entre els anys 1990 i 2000 a Catalunya es representen a la figura 16. Resulta evident que a mida que ens desplaçem de Sud a Nord el començament del període vegetatiu dels arbres es va retardant. Si al sud de Catalunya l'activitat pot

començar la darrera setmana de març o a principis del mes d'abril, al Pirineu no comença, de mitjana, fins ben iniciat el mes de maig. La figura 17 reflecteix que hi ha un cert retard en direcció est-oest de les dates d'inici de l'activitat vegetativa del boscos propers a la costa respecte dels situats més a l'interior.

Si a la franja costanera les dates d'inici corresponen majoritàriament a finals de març, a les comarques interiors aquest inici es retarda fins a la primera quinzena d'abril. Aquest patró es repeteix, poc o molt, al final del període vegetatiu, que comença abans al Pirineu segueix per les comarques de l'interior i finalment es manifesta en els boscos propers a la costa en un procés gradual que es manifesta al llarg de dues o tres setmanes.

Pel que fa a les projeccions futures, si es compara la durada del períodes vegetatiu de l'any 1990 amb les estimades per als anys 2020, 2050 i 2080 es veu clarament com el període vegetatiu comença a allargar-se pel sud i la zona costanera (2020), i aquest augment del període vegetatiu creix progressivament. Els resultats de les simulacions projecten una situació per a l'any 2080 amb augments d'entre un i dos mesos respecte de la situació de 1990. Si comparem la

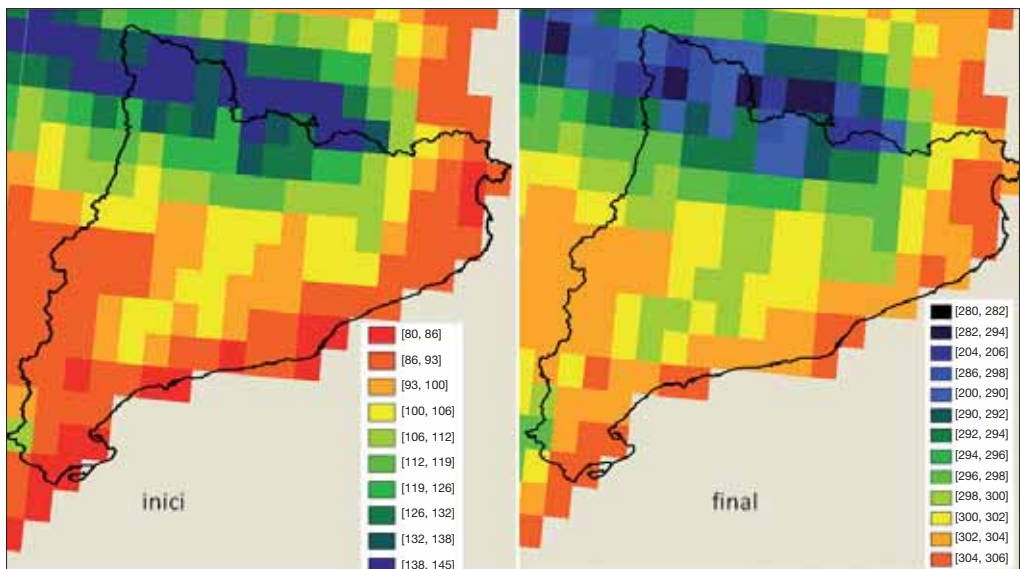


Figura 16. Inici i final del període vegetatiu a Catalunya calculat mitjançant la tècnica que es descriu al text.

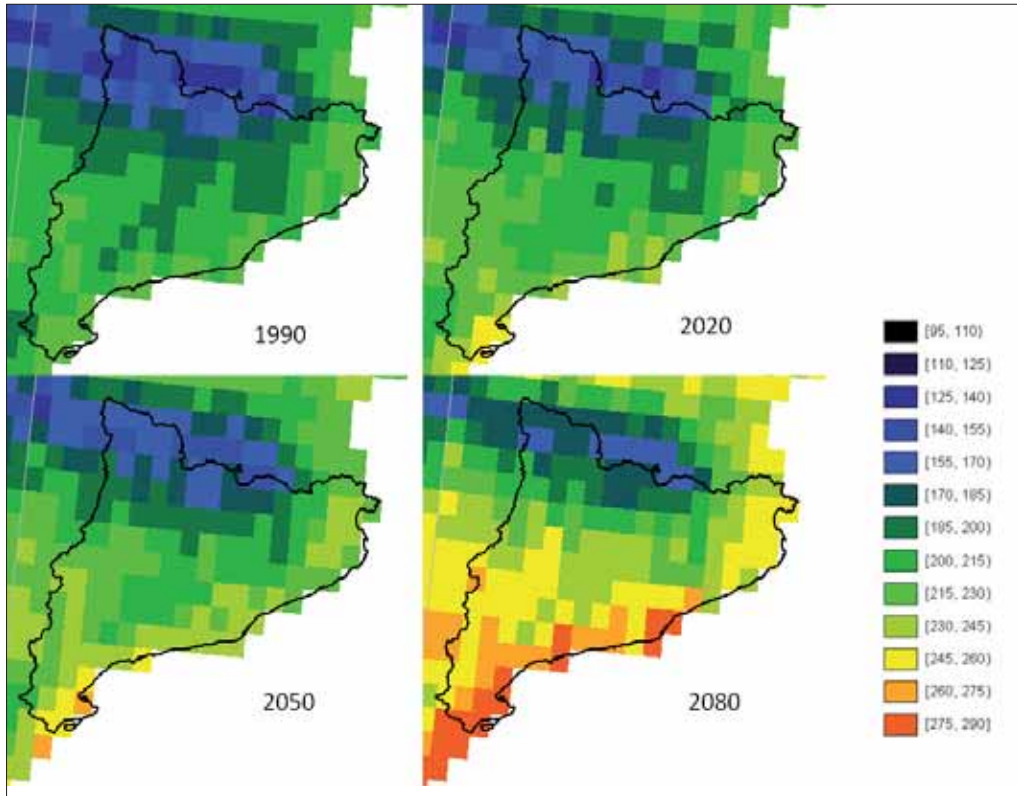


Figura 17. Durada del període vegetatiu a Catalunya. Les dades de 1990 s'han calculat a partir de dades climàtiques observades. La durada als anys 2020, 2050 i 2080 són projeccions calculades a partir del clima projectat als escenaris de canvi climàtic descrits al text. Observi's l'augment gradual del període vegetatiu a tot el territori però especialment marcat als Pirineus i al sud de Catalunya. Segons les projeccions dels models de creixement forestal aquesta elongació del període d'activitat de la vegetació tindrà efectes pronunciats tant sobre la demanda hídrica dels boscos, com sobre la seva producció.

Tipus de clima	1960-1990	2020	2050	2080
Àrtic	111,6	105,9	120,1	149,5
Alpí	133,6	133,3	141,3	162,6
Boreal	140,4	146,6	154,1	173,3
Continental	175,3	182,0	188,6	207,4
Atlàntic	186,1	195,4	205,3	228,3
Mediterrani	206,6	223,1	230,3	256,5
Europa	168,5	176,2	183,9	205,4

Taula 5. Valors mitjans de la durada del període vegetatiu (dies) en les diferents regions bioclimàtiques d'Europa. Els valors de la columna 1960-1990 estan basats en l'equació de Chmielewski i Rotzer (2002) elaborada a partir de les observacions de la Xarxa Internacional de Jardins Fenològics. Els valors dels anys 2020, 2050 i 2080 són el resultat obtingut amb el model de creixement forestal GOTILWA+ (Gràcia et al., 2000) per a l'escenari climàtic projectat pel model de circulació atmosfèrica HadCM3 en un escenari socioeconòmic A2 de l'IPCC (2001). L'algorisme utilitzat per a la simulació del període vegetatiu es descriu al text. Cada valor és la mitjana dels valors obtinguts als píxels de 10' x 10' que cobreixen cada regió bioclimàtica.

Profunditat del sòl (cm)	Reserva hídrica al sòl (kg/m ²)			Respiració (kg C/ha/dia)		
	2004-2008	2096-2100	Canvi (%)	2004-2008	2096-2100	Canvi (%)
25	6,5	4,1	-37	27,9	34,3	23
100	23,2	15,0	-35	36,3	43,2	19

Taula 6. Reserva hídrica en dos sòls amb profunditats de 25 i 100 cm. Els valors projectats pel model GOTILWA+ a l'actualitat (2004-2008) es comparen amb els valors projectats a finals del present segle en un escenari socioeconòmic A2 amb les projeccions climàtiques per a aquest escenari del model climàtic HadCM3. El model projecta una reducció del 37 i el 35 %, respectivament. Conseqüentment, es produeix una limitació del CO₂ per la reducció de la fotosíntesi induïda per la menor disponibilitat hídrica i un augment de les taxes de respiració com a conseqüència de l'augment de la temperatura. En conjunt, aquestes respostes fisiològiques comporten un augment de la respiració del sistema del 23 i el 19 % respectivament comparades amb les actuals. Això significa una significativa reducció de la capacitat d'embornal dels nostres boscos, ja de per sí molt limitada.

situació a Catalunya amb la d'altres regions europees, el període vegetatiu s'allarga de manera desigual. L'any 2080 al Mediterrani passa, de mitjana, de 207 a 257 dies, mentre que la regió boreal s'allarga de 140 a 173 dies. Si fem la comparació per països, als països escandinaus tindrà una durada 30 dies superior a l'actual mentre que en als països del Mediterrani s'allargarà entre 44 y 60 dies (els casos d'Espanya i Portugal, respectivament). La taula 5 resumeix els valors estimats a partir de la comparació de les observacions realitzades entre 1960 i 1990 i els valors estimats per a cadascuna de les àrees climàtiques del continent els anys 2020, 2050 i 2080.

Aquest allargament de l'activitat de la vegetació es tradueix, com ja hem comentat, en un període més llarg de potencial consum d'aigua, i això en un escenari en el que els models projecten una reducció de les precipitacions. Simulacions dutes a terme amb el model GOTILWA+ projecten una reducció de la reserva d'aigua al sòl de fins a un 35% a finals del present segle respecte de les actuals (taula 6). Aquesta disminució es tradueix en una disminució de la producció que, al mateix temps, i atès el previsible augment de la temperatura, vindrà acompanyat d'un augment de fins a un 23% de la respiració de l'ecosistema, situació que en conjunt fa preveure una dràstica reducció de la ja escassa capacitat d'embornal dels nostres boscos. Això no obstant, val a dir que aquestes dades representen els resultats d'una exploració preliminar. Tenint presents les profundes implicacions d'aquests canvis en el futur dels nostres boscos, és de tot punt aconsellable efectuar una exploració més pro-

funda i acurada de les possibles respostes fisiològiques del bosc a aquests nous escenaris.

5.2. El carboni als prats i les pastures de Catalunya

A Catalunya, les pastures permanents ocupaven 339.800 hectàrees al darrer cens agrari de Catalunya, de 1999 (Idescat, 2009), repartides entre 4.607 explotacions. Aquesta superfície està lleugerament per sota de la meitat de la superfície forestal en aquell mateix cens (838.660 hectàrees). El cens, realitzat recomptant explotacions agràries, representa un 14,75% de la superfície d'aquestes. D'altra banda, segons l'inventari Ecològic i Forestal de Catalunya (IEFC, Gràcia *et al.* 2004, 2005), els prats i herbassars ocupen 128.437 ha, un 4,01% del territori global de Catalunya. Els matollars, sovint utilitzats com a pastures, n'ocupen un 16,43%. Una part dels boscos també és pasturada. Aquestes dades permeten reconèixer la importància que els prats i pastures tenen en les explotacions agràries a Catalunya, i identificar els principals destinataris de possibles mesures d'actuació. Una altra part important de les superfícies de pastures estaria ocupada per pastures comunals, és a dir, de propietat comuna dels pobles, que les utilitzen mancomunadament, o les lloguen i se'n reparteixen els beneficis. Tot i que la superfície d'aquestes sigui més petita en relació amb les de les explotacions, el seu paper és fonamental, tant des del punt de vista econòmic dins del món agrari i en particular del ramader, com de l'ambiental com a mantenedores de biodiversitat i bens i serveis ecosistèmics (Sebastià *et al.*, 2008a).

5.2.1. Capacitat d'embornal dels prats i les pastures a Catalunya

Estudis recents demostren la capacitat d'embornal de carboni dels sòls de prats i pastures a Europa, tot i que la importància de les pastures per a la mitigació del canvi climàtic es veu disminuïda quan es té en compte el paper d'altres gasos amb efecte d'hivernacle (Soussana *et al.*, 2007). A diferència dels boscos, que tenen una quantitat de carboni acumulada a la biomassa aèria (fusta) molt elevada, els prats i pastures presenten la proporció més gran de carboni (C) acumulada als sòls (fins a un 97%, Watson *et al.*, 2000). Als Pirineus catalans, la biomassa aèria dels prats de muntanya al pic de la vegetació és d'uns 400 g m^{-2} , mentre que la biomassa acumulada als 10 cm superiors del sòl és de 2 kg, i als 20 primers cm d'uns 3 kg de biomassa subterrània per m^{-2} (Sebastià *et al.*, inèdit, base de dades PASTUS).

Pel que fa al sòl, un estudi als prats pirinencs per sobre dels 1.850 m d'altitud trobà entre 60 i

300 tones de carboni orgànic per hectàrea (SOCS, Garcia-Pausas *et al.*, 2007). En un estudi menys exhaustiu dut a terme a pastures de les muntanyes litorals meridionals del sud de Catalunya i nord de València s'han trobat valors d'entre 6 i 15 kg m^{-2} (Sebastià *et al.*, inèdit, projecte CARBOCLUS).

5.2.2. Interacció dels embornals de carboni de prats i pastures de Catalunya amb factors del medi abiòtics

La quantitat de carboni que s'emmagatzema al sòl depèn del balanç entre els processos de retenció i els d'alliberament. La major part d'aquests processos (p.e., fixació de CO_2 a la fotosíntesi, alliberament a la respiració...) depenen de l'activitat fisiològica dels organismes, la taxa de la qual depèn alhora de la quantitat d'energia proporcionada, i per tant de la temperatura i el clima. D'altra banda, la disponibilitat d'aigua necessària per a aquests mateixos processos depèn

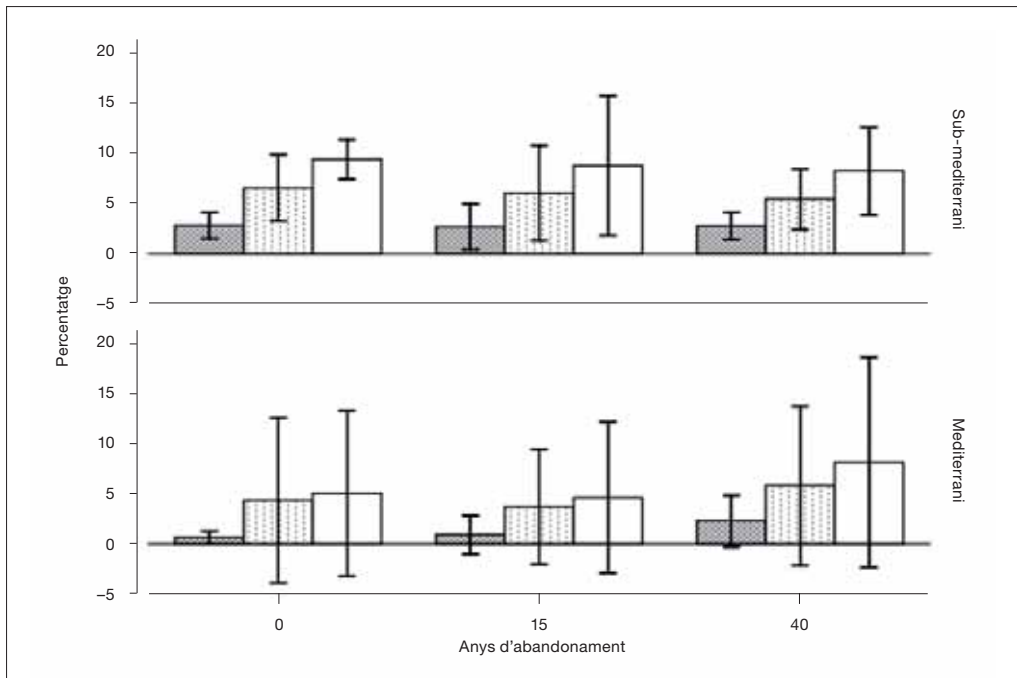


Figura 18. Mitjana i interval de confiança del 95% per a tres variables: carboni inorgànic (barres densament puntejades), carboni orgànic (barres puntejades) i carboni total (barres blanques). Resultats per a tres tipus diferents d'us del sòl: terrenys pasturats actualment, terrenys abandonats fa més de 15 anys, i terrenys abandonats fa més de 40 anys en àrees mediterrànies de baixa altitud (part inferior) i en ambient submediterrani de muntanya (part superior).

Font: projecte CARBOCLUS, Sebastià *et al.*, dades no publicades.

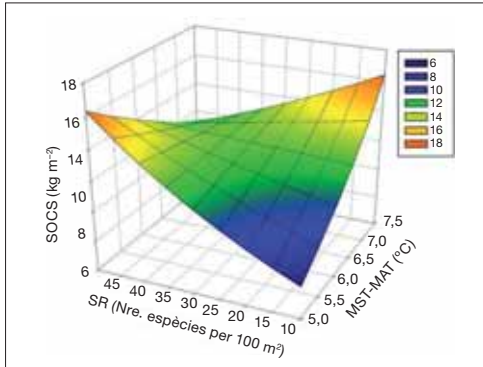


Figura 19. Relacions entre el carboni present als 20 cm superiors del sòl (SOCS) y la riquesa específica al llarg d'un gradient de temperatura estacional (MST-MAT) als prats pirinencs. MAT és la temperatura mitjana anual, i MST és la temperatura mitjana dels mesos d'estiu. La riquesa específica s'ha mesurat com el nombre d'espècies de plantes en 100 metres quadrats. Valors de la variable SOCS predits pel model M1 per a valors de MAP (precipitació anual mitjana) = 1.100 mm, MSP (precipitació mitjana dels mesos d'estiu) = 350 mm; pendent = 10°, i substrat litològic bàsic. La gestió consisteix en pastura per a diferents espècies de bestiar amb densitat moderada. Els valors mitjans de SOCS es van estimar invertint els valors logarítmics transformats.

Font: Sebastià et al., base de dades PASTUS).

també del clima. Efectivament, en un mostreig molt ampli de prats de muntanya pirinencs amb un gran rang de condicions ambientals (base de dades PASTUS) es va trobar una dependència important dels SOCS amb els factors climàtics, sovint en interacció amb factors topogràfics i de paisatge (figures 18 i 19).

En particular, la diferència de temperatures mitjanes estival i anual (MST-MAT) explica una part significativa del carboni orgànic emmagatzemat als 20 cm superiors del fondària del sòl. Es produeix un augment dels SOCS amb temperatures més extremes, és a dir, més fredes a l'hivern i més calentes a l'estiu (figura 19). Sota condicions de canvi climàtic, en què s'espera un augment de les temperatures mínimes (capítol 6, 'Projeccions' d'aquesta obra), la possible disminució de la diferència de temperatures extremes podria reduir l'acumulació de carboni en algunes zones de clima més contrastat. D'altra banda, la precipitació anual també explica una part de la variació dels SOCS. En particular, hi ha un descens dels SOCS amb l'augment de la precipitació

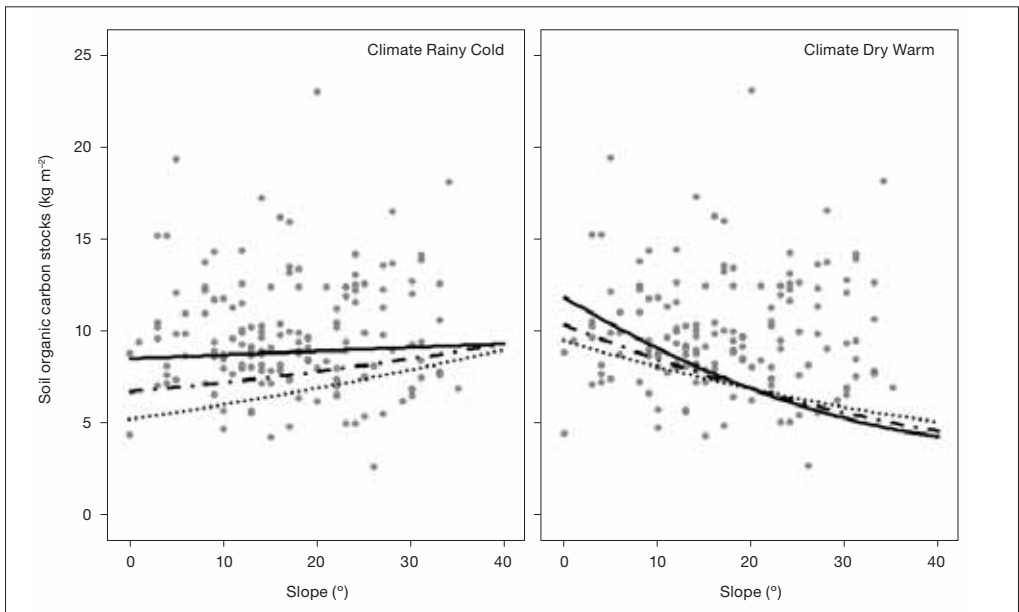


Figura 20. Canvis en el contingut de carboni orgànic als 20 cm superiors del sòl (SOCS) en terrenys amb pendent a dues àrees amb diferent clima i sota tres diferents règims de gestió pasturades per bovins a tres densitats diferents: pressió de pastura baixa (< 0,02 caps ha⁻¹, línia de punts); pressió de pastura moderada (0,2-0,4 caps ha⁻¹, línia de traços), elevada pressió de pastura (> 0,4 caps ha⁻¹, línia contínua). Clima plujós i fred: MAP 1.300, MSP 450, MST-MST 5; Clima sec i suau: MAP 900, MSP 200, MST-MST 6. MAP és la precipitació mitjana anual; MSP es la precipitació mitjana dels mesos d'estiu i MST-MST = Map-MSP.

Font: Sebastià et al. 2008b.

anual, i un augment dels SOCS amb l'augment de l'estival.

En els models desenvolupats a partir de la base de dades PASTUS sobre SOCS als 20 primers cm de fondària es revela que el contingut de carboni al sòl té una forta dependència de factors fisiogràfics de paisatge, sovint amb interaccions amb les variables climàtiques (figures 19 i 20). En regions geogràfiques amb un relleu tan complex com és el de Catalunya, les variacions de contingut de carboni al sòl amb els factors de paisatge són importants i s'han de tenir en compte. En l'estudi de Garcia-Pausas *et al.* (2007), la variació de SOCS als perfils dels sòls de prats d'altitud es relacionava de manera complexa amb alguns tipus de litologia, la fondària del sòl i la precipitació, però en aquests dos darrers casos la relació depenia de l'orientació (figura 20). El rang més gran de condicions climàtiques recollides a la base de dades PASTUS fa que l'altitud desaparegui dels models generats amb aquesta (Sebastià *et al.*, 2008a), a diferència del treball de Garcia-Pausas *et al.* (2007), on només es consideren prats d'altitud elevada. En aquest cas, en augmentar l'altitud disminueixen els continguts de carboni orgànic al sòl (Garcia-Pausas *et al.*, 2007).

5.2.3. Interacció dels embornals de carboni de prats i pastures de Catalunya amb els canvis de gestió i d'ús del sòl

Els prats i altres ecosistemes pastorals acumulen una bona quantitat de carboni al sòl, però la capacitat d'embornal de carboni sembla dependent del tipus de gestió (Guo i Gifford, 2002). Conant *et al.* (2003) troben un augment en el carboni orgànic emmagatzemat al sòl amb l'augment de la pressió ramadera. A Catalunya, també se n'ha descrit un increment a mesura que augmenten les càrregues ramaderes, però només en pendents moderats i valors de diferència tèrmica estacional baixos (figura 20, Sebastià *et al.* 2008b).

D'altra banda, amb els canvis d'ús del sòl associats al canvi global, existeix una dinàmica d'abandó o disminució d'utilització pastoral de prats que passen a matollars i a boscos i viceversa, dinàmica sovint relacionada amb les polítiques agràries de la Unió Europea (Bayfield *et al.*

2008). Igualment, a Catalunya es produeixen canvis en la pressió ramadera dels prats i pastures (de Bello *et al.* 2005), i en el tipus de bestiar que utilitza les pastures, la qual cosa pot tenir repercussions sobre la vegetació (Sebastià *et al.*, 2008a). Els canvis de la vegetació (variació en la proporció de gremis) en prats de muntanya pirinencs alhora s'ha vist que afectaven els cicles bioquímics (Sebastià, 2007).

Per tant, tots aquests canvis d'ús i de gestió dels prats i pastures poden modificar la quantitat de carboni al sòl. El canvi climàtic i d'ús del sòl han estat implicats com a principals factors de la pèrdua de carboni a nivell regional (Bellamy *et al.*, 2005, Smith *et al.*, 2007). En pastures on les càrregues ramaderes disminueixen i van sent envaïdes per matollars, Montané *et al.*, (2007) no trobaren diferències significatives en la quantitat de carboni sota els arbustos en comparació amb el prat herbat, excepte una lleugera tendència d'aquest a augmentar a les capes més superficials (15 cm de fondària). En pastures abandonades des de fa més de 40 anys, i que constitueixen ja pinedes més o menys denses, s'ha trobat una concentració mitjana de carboni de 13,5 g m⁻² a les muntanyes litorals meridionals, amb una elevada variabilitat (figura 18). A la muntanya mitjana del Pirineu Oriental els valors trobats a pinedes desenvolupades sobre pastures abandonades des de fa més de 40 anys són d'11 g C m⁻² (figura 18). Finalment, a freixenedes joves del Pirineu Central establertes sobre prats de dall abandonats, els valors mitjans als 20 primers centímetres del sòl són ja d'11,8 ± 0,111 g C m⁻² (Llurba *et al.*, 2008).

En un estudi sobre embornals de carboni a pastures europees i gestió, Wohlfahrt *et al.* (2008) troben que la freqüència i sincronització de les pràctiques agrícoles és crucial per a la determinació de la sensibilitat de les pastures de muntanyes investigades als factors climàtics. Tanmateix, els resultats dels models desenvolupats a partir de la base de dades PASTUS mostren que l'efecte dels factors de gestió sobre el carboni orgànic emmagatzemat al sòl és més sensible a les variables topogràfiques, i per tant, microclimàtiques, que no pas a les macroclimàtiques (figura 20).

5.2.4. Interacció dels embornals de carboni de prats i pastures de Catalunya amb la biodiversitat

Amb el canvi climàtic està previst que es produeixin grans canvis en el funcionament dels ecosistemes, incloent-hi els cicles biogeoquímics i per tant del carboni (Smith *et al.*, 2007), i també que hi hagi pèrdues de biodiversitat (Sala *et al.*, 2000). Als prats de muntanya catalans, s'ha trobat que l'efecte afavoridor de l'acumulació de carboni de les temperatures estacionals contrastades es veu compensat en zones amb temperatures estacionals menys contrastades per valors alts de biodiversitat, en particular, riquesa florística (figura 19).

El carboni als ecosistemes té una rellevància de cara a la mitigació del canvi climàtic. Tanmateix, el carboni al sòl també té un paper fonamental en altres béns i serveis que els ecosistemes proporcionen. En particular, la matèria orgànica edàfica, que és una de les formes prioritàries de carboni al ecosistema dels prats, és una font de fertilitat (Marks *et al.*, 2009). La reducció d'aquest recurs amb el canvi climàtic comportaria la disminució de la fertilitat del sòl. La diversitat ha estat relacionada precisament amb el manteniment dels béns i serveis que proporcionen els ecosistemes (Hooper *et al.*, 2005, Diaz *et al.*, 2007). La relació positiva trobada entre carboni orgànic al sòl i la biodiversitat de les pastures pirinenques sota un ventall ampli de condicions climàtiques, juntament amb el paper modulador del contrast tèrmic estacional, demostren la rellevància de la conservació de la biodiversitat conjuntament amb el carboni al sòl per tal d'afavorir la mitigació del canvi climàtic. Per això, les pràctiques de conservació s'han de dissenyar tenint en compte les interaccions complexes dels efectes biòtics i abiòtics locals sobre els processos ecosistèmics lligats al segrest de carboni. Les pràctiques de gestió dels prats han de ser una eina per permetre millorar la capacitat del sòl d'absorbir carboni, que permetin al mateix temps el manteniment de la biodiversitat sota condicions de canvi climàtic.

Els prats i pastures a Catalunya constitueixen un reservori tant de biodiversitat com de carboni al sòl. Mesures de conservació d'una semblen afavorir-ne l'altre, però la complexitat d'interac-

cions amb el clima i d'altres factors de paisatge suggereixen la importància de les mesures de gestió locals, emmarcades dins del model global desenvolupat. Les relacions trobades amb la gestió de moment suggereixen que s'ha d'afavorir el pasturatge relativament moderat però mantingut, i que s'han d'implementar mesures que afavoreixin el pasturatge mixt, amb combinacions de diversos tipus de bestiar, principalment gros (vaques, cavalls) amb petit (ovelles, cabres). La nova PAC (Política Agrària Comunitària) conté elements que afavoreixen aquesta mesura.

5.3. Sistemes agrícoles

L'agricultura en el Mediterrani està constituïda per diferents conreus amb una productivitat limitada per les condicions ambientals, encara que millorada amb mètodes i sistemes agronòmics generats en base al coneixement genètic i ecofisiològic de les espècies conreades (vegeu la figura 21). Tanmateix, no es caracteritzen per les grans aportacions de matèria orgànica als sòls on es desenvolupen. És per això que s'ha d'intentar mantenir els continguts de matèria orgànica en els sòls a uns nivells adequats mitjançant l'aportació de matèria orgànica que, en la majoria d'àrees agrícoles, deriven de material vegetal (residus de la poda, de collita...), dels fems animals i de fangs de depuradora. Aquestes aportacions tracten de compensar les pèrdues per l'oxidació de la matèria orgànica, extraccions dels conreus i l'erosió del sòl (Brady *et al.*, 2002).

Segons els resultats mostrats per alguns autors el sòl pot ser un important embornal de

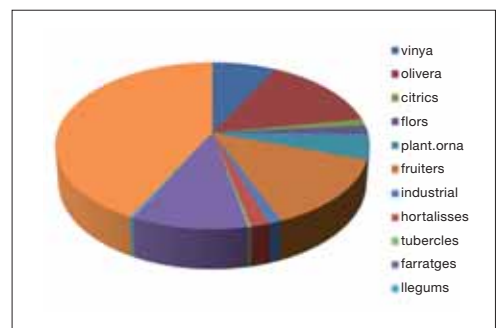


Figura 21. Percentatge de distribució de grans conreus a Catalunya.

Font: Anglès, 2009; DAAR, 2007

carboni (Alcañiz *et al.*, 2005; Grañana i Boixadera, 2009). El carboni orgànic del sòl representa la major reserva en interacció amb l'atmosfera als ecosistemes terrestres i s'estima en prop de 1.200 Gt de C a 1 metre de profunditat (FAO, 2002), junt amb un reservori de carboni inorgànic d'unes 750 Gt més. (21). Aquest darrera forma de carboni no ha estat tant presa en consideració per la seva importància relativa en els llocs on s'han realitzat els estudis de carboni, i per la baixa incidència de l'activitat antropogènica en el seu emmagatzemament i mobilitat.

La matèria orgànica sovint no supera el 10% dels components del sòl, però és clau en algunes de les propietats que en determinen la qualitat: augmenta la resistència davant l'erosió, la capacitat de reserva d'aigua, la capacitat d'intercanvi catiònic, i constitueix una reserva de nutrients en mineralitzar-se, de manera que el contingut de matèria orgànica es considera, sovint, com un indicador de la qualitat del sòl. No només actua com a reservori de carboni, sinó que també afavoreix el segrest de carboni per la biosfera en la mesura que augmenta el potencial productiu del sòl. (Alcañiz *et al.*, 2005).

L'agricultura és la principal empresa de l'ús de la terra arreu del món, i genera un important desenvolupament econòmic, social i cultural, alhora que ofereix una àmplia gamma de serveis. És important destacar que l'agricultura, tot i la seva tecnificació, continua sent molt sensible a les variacions del clima, que és la principal font global de variabilitat interanual en la producció agrícola, tot i que cada cop més fenòmens especulatiu generen fenòmens additius a aquesta resposta (Aggarwal, 2003 i 2008; Tubiello i Amt-hor, 2007).

Històricament la producció agrícola, s'ha confós amb la productivitat, és dir la quantitat de producte potencialment comercialitzable per unitat de superfície i de temps, cosa que fa que s'estigui molt lluny del coneixement de la producció primària real i, en conseqüència, els potencials balanços de carboni siguin difícils de precisar, i resultin aproximats i moltes vegades massa allunyats de la realitat. Així, no es tenen en compte els creixements de parts de la biomassa que no són directament productius, bé perquè s'eliminen en alguna fase del conreu,

generalment anualment, en successives podes de formació, conducció, adaptació (branques i fulles), bé perquè no es tenen en compte (arrels).

Actualment els conreus ocupen el 33% de la superfície de Catalunya; el 68% son de secà, i la resta de regadiu amb protecció o sense (Anglès, 2009; DAAR, 2007).

Per tal d'estimar el possible paper d'embornals dels conreus agrícoles de Catalunya, podríem utilitzar aproximacions (Goudriaan, Rob Groot i Uithol, 2001) a partir de la radiació incident per unitat de superfície (aprox. $14 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) i multiplicant-la per la màxima eficiència de la radiació ($1,7 \text{ g de DW MJ}^{-1}$) en condicions totalment òptimes, donaria un valor de $3,9 \text{ kg deC m}^{-2} \text{ any}^{-1}$. Si aquesta xifra es multipliqués per la superfície total conreada es tindria la potencial producció primària màxima total del país.

En el cas de Catalunya estariem parlant d'aproximadament 835.104 ha de les quals, en xifres aproximades, 527.309 i 237.365 ha serien les corresponents al secà i el regadiu, respectivament. Caldria tenir en compte les temperatures extremes que podrien reduir la producció en un 30%, la sequera que pot fer-ho en un 60%, i els nutrients i les interaccions entre estressos poden reduir-la un 60% més. Si es considera que els conreus de secà que es veuran afectats per totes situacions d'estrés i els de regadiu només per les temperatures extremes i les interaccions, el nou càlcul situarà uns valors de 4,37 i 10,92 t C $\text{ha}^{-1} \cdot \text{any}^{-1}$ per al secà i el regadiu, respectivament, el que dona unes xifres de 2,30 i 2,59 Mt C $\cdot \text{any}^{-1}$ per a tota la superfície de secà i de regadiu, respectivament. Les tones totals de carboni potencialment capturat per l'agricultura de Catalunya serien 4,9 Mt.

La figura 22 (Savé *et al.*, 2009) mostra la relació establerta entre la part aèria i la subterrània de diferents conreus llenyosos i herbacis desenvolupats per l'IRTA. Així, la relació és doble/senzill de biomassa, i en conseqüència, el carboni que trobem en les capçades i troncs respecte del que hi ha en les arrels. Tanmateix, aquesta és una visió puntual, és a dir, que mostra una situació en un moment del temps, que de ben segur ens dona idea del lloc on està l'embornal de car-

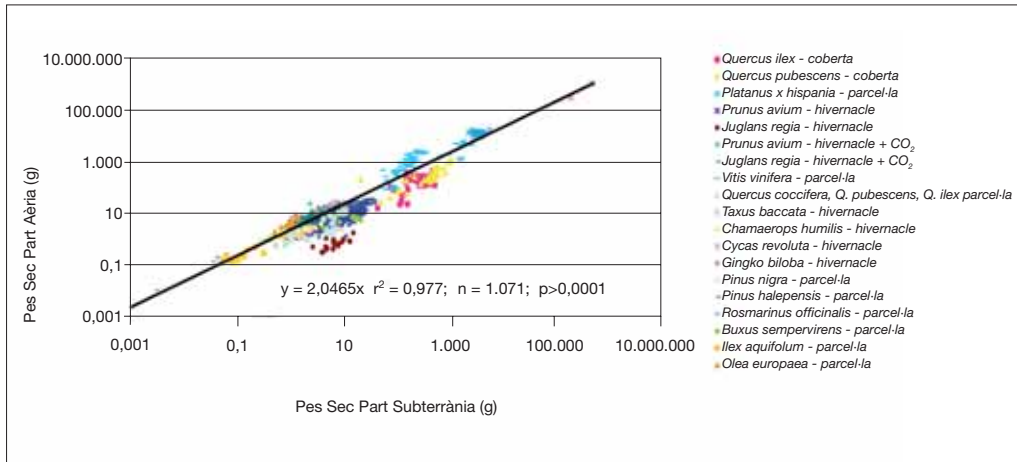


Figura 22. Relació entre la biomassa aèria i subterrània de diferents conreus a Catalunya.
Font: Savé et al., 2009.

boni, però que en cap moment ens explica com gradua la vegetació el seu flux en els conreus i en el sòl. Basant-nos en ella i d'acord amb els càlculs anteriors es pot dir que, de la potencial producció primària anual, 2,89 i 1,48 t C·ha⁻¹ de secà·any⁻¹ i 7,21 i 3,71 t C·ha⁻¹ de regadiu·any⁻¹ es localitzen en la part aèria i subterrània respectivament, és a dir, el 67 i el 33% respectivament.

D'acord amb l'informe del DAAR 2007, la producció total dels diferents conreus de Catalunya (figura 21) es pot xifrar en 6,9 Mt·any⁻¹, que dona, sense poder fer distincions entre conreus de secà i de regadiu, una producció de 6,62 t de matèria fresca·ha⁻¹·any⁻¹. Considerant el seu percentatge d'aigua donaria un valor aproximat de 3,31 t de matèria seca·ha⁻¹·any⁻¹ i, en conseqüència, unes 1,39 t de C·ha⁻¹·any⁻¹. Aquestes grans xifres indicarien que la productivitat, la producció agrícola efectiva, estaria al voltant del 20% de la producció agrícola total. Fent una simple aproximació es pot veure com aquest 20% es mobilitzarà més o menys ràpidament vers el metabolisme somàtic (aliments) i/o exosomàtic (fons d'energia, manufacturats...) de la població. La resta de producció agrícola aèria serà mobilitzada de maneres ben diverses segons el conreu i sistema agronòmic emprat. Tanmateix, una part molt important (fulles, branques, flors,...) serà tornada anualment al cicle, restant tant sols acu-

mulant carboni als troncs, que poden representar una quantitat important, però un altre cop molt variable atenent a l'espècie (arbre o arbust) i a l'agronomia, tipus de poda, entutorat, conducció, i a la fi serà retornat al cicle d'acord amb les expectatives variables del binomi mercat-producció, que dona uns cicles de tall d'entre 2 i 70 anys (arbusts PAMS i vinyes).

Cal tenir en compte, però, les limitacions d'informació que dificulten la modelització d'aquests processos. Així, fins ara, les avaluacions s'han basat principalment en estudis de casos locals que han analitzat com reacciona el sòl d'acord amb el canvi climàtic i a la combinació amb l'evolució de les practiques agrícoles i forestals, és a dir, disposar d'informació objectiva respecte dels efectes del canvi global (condicions ambientals i antropogèniques) en els sòls. (EEA report 4/2008). Baixos nivells de carboni orgànic en el sòl limiten la seva fertilitat i la capacitat de retenció d'aigua a la vegada que tendeixen a augmentar la compactació del sòl i, per tant, a augmentar en les aigües superficials d'escorrentia i a l'erosió. També donen lloc a reduccions de la diversitat biològica i una major susceptibilitat als àcids o àlcals, cosa que pot promoure majors alliberaments de CO₂ a l'atmosfera (Janssens, 2004; Bellamy, 2005).

Un impacte previsible del canvi climàtic sobre els sòls mediterranis és la pèrdua de matèria or-

gànica per increment de mineralització i disminució de les aportacions de la vegetació. Atès que molts dels sòls de Catalunya ja en són pobres, aquesta pèrdua pot tenir efectes en cadena sobre propietats físiques com l'estabilitat de l'estructura, el risc d'erosió o la disminució de les taxes d'infiltració, entre altres (Alcañiz *et al.*, 2005).

Una ràpida estimació de l'estat de l'estructura del sòl i de la fertilitat actual al sud d'Europa indica que existeixen clares tendències negatives. Si es parla de la qualitat del sòl en general, i del contingut de matèria orgànica en particular, s'ha de dir que és necessària i prioritària una planificació sostenible de l'ús dels recursos del sòl. (Zdruli *et al.*, 2004). Les principals mesures per reduir els efectes negatius del potencial canvi climàtic, dins del canvi global, són els canvis en la coberta terrestre i l'adaptació de les pràctiques de gestió de la terra (Liski *et al.*, 2002; Janssens *et al.*, 2004, Smith *et al.*, 2005, 2007).

Actualment s'estima que els sòls europeus acumulen al voltant de 28 Gt de carboni (les torberes aporten al voltant de 42 Gt de carboni) (Byrne *et al.*, 2004). La quantitat de carboni orgànic en el sòl ve determinada principalment pel balanç net entre les aportacions de la vegetació i la descomposició de la matèria orgànica present. Sense les aportacions de les plantes al sòl, la quantitat de carboni en les terres de conreu pot disminuir anualment entre 9 i 12 t C·ha⁻¹. Aquestes pèrdues podrien tornar-se en augments d'1 a 7 t C·ha⁻¹ (Smith *et al.*, 2005) fent ús dels avenços tecnològics encara que el consum d'energia necessari per a l'aplicació d'aquestes tècniques agrícoles comporta unes emissions importants de CO₂ a l'atmosfera que podrien neutralitzar aquest modest paper d'embornal dels sistemes agrícoles que estem discutint. A Catalunya es disposa d'escassa i molt fragmentària informació del paper de l'agricultura com a embornal de carboni en les condicions actuals i en les que previsiblement prevaldran en el futur en el marc del canvi climàtic. Cal augmentar el coneixements de base i la seva potencial aplicabilitat en el sector agrícola per tractar de mitigar les vulnerabilitats i per optimitzar la gestió dels cicles de l'aigua i del carboni en el sector agrícola des d'una perspectiva ecològica.

5.4. Els sistemes aquàtics continentals com a embornals de CO₂

El carboni entra als sistemes aquàtics mitjançant la dissolució del CO₂ atmosfèric i com a component tant de la matèria orgànica com inorgànica, ja sigui en partícules o dissolta, que procedeix de les conques. La quantitat de CO₂ atmosfèric que es dissol depen de la pressió parcial d'aquest gas a l'atmosfera i de la seva concentració a l'aigua (com a CO₂ i com a bicarbonat bàsicament, que han d'acabar en equilibri), així com també de la temperatura i el pH. En funció del pH de l'aigua, i a mesura que aquest augmenta, el CO₂ que es dissol pot estar, en diferents proporcions, com a gas, com a àcid carbònic, com a bicarbonat o bé com a carbonat. Si hi ha calci, té tendència a formar-se CaCO₃, que és molt poc soluble i precipita químicament, el que representa un embornal de carboni.

Mitjançant la fotosíntesis, el CO₂ i el HCO₃⁻ passen a formar part de la vegetació aquàtica en forma de fitoplàncton, de macròfits o de fitobentos. A partir d'aquí, el cicle pot ser més o menys complex. Una part del carboni assimilat s'allibera ràpidament en forma de CO₂ per respiració de la pròpia vegetació mentre que la resta passa a circular per la xarxa tròfica: zooplàncton, zoobentos, peixos, aus, bacteris... i també va retornant a l'aigua a través de la respiració de cadascun d'aquests compartiments, on pot ser reutilitzat pels productors primaris; si supera la pressió parcial del CO₂ atmosfèric, abandona la massa d'aigua. Una part del carboni assimilat pot també quedar dipositat en forma mineral o químicament reduït als sediments anaeròbics, i passar alguna fracció a metà mitjançant la reducció del diòxid de carboni sempre que es produeixin les condicions adients. El metà pot ser de nou oxidat a anhídrid carbònic dintre de l'aigua i seguir la ruta d'aquest, o ser directament alliberat a l'atmosfera.

El cicle biogeoquímic del carboni varia en funció de les rutes metabòliques dominants. Els sistemes dominats per l'autotròfia són aquells en què la principal font de carboni és inorgànica (CO₂ o matèria inorgànica, ja sigui particulada o dissolta). En general, la ruta dominant que segueix el carboni als ecosistemes aquàtics és l'autotròfia, en la qual els organismes fotosintetitzadors

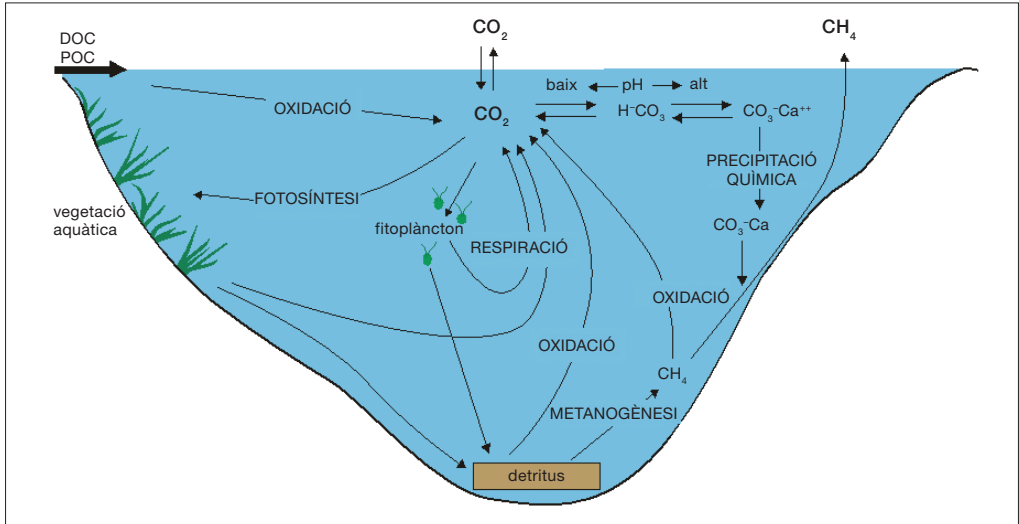


Figura 23. Cicle del carboni als ecosistemes aquàtics. El carboni entra als sistemes aquàtics mitjançant la dissolució del CO_2 atmosfèric i com a component tant de la matèria orgànica com inorgànica que procedeix de les seves conques.

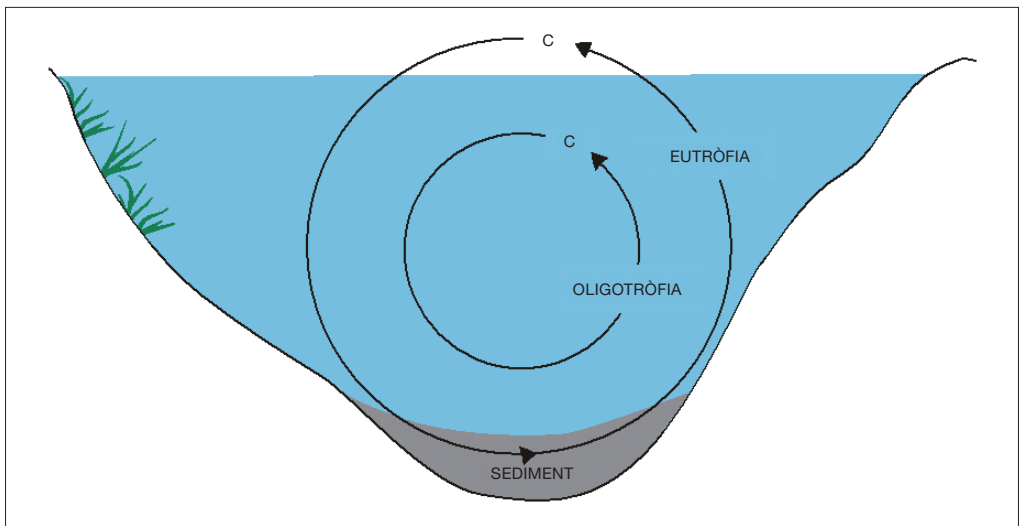


Figura 24. Diferència entre el cicle del carboni a llacs i embassaments eutròfics (cicle obert a l'atmosfera i al sediment) i oligotròfics (cicle tancat). DOC: Carbó orgànic dissolt; POC: Carbó orgànic particulat.

fixen el CO_2 atmosfèric que passa a l'aigua. Si el sistema és oligotròfic, el cicle del carboni en la massa d'aigua és gairebé tancat i amb molt escàs intercanvi amb l'atmosfera i els sediments (figura 24). Ara bé, si el sistema és eutròfic, augmenta el seu paper com a segrestador de CO_2 atmosfèric ja que el cicle del carboni s'obre al sediment.

Per la seva banda, els sistemes heterotròfics serien aquells en què domina l'entrada de carboni en forma orgànica. En aquests domina la respiració, ja sigui d'animals o de bacteris i, per tant, desprenen CO_2 que prové de la matèria orgànica importada a la massa d'aigua. No obstant això, aquests sistemes aquàtics també poden anar

emmagatzemant una fracció del carboni orgànic que reben.

5.4.1. Influència de llacs i embassaments

A Catalunya hi ha 30 embassaments que cobreixen una superfície total de 98 km², un 0,3% de la superfície total del territori. La superfície ocupada pels llacs és probablement menor, i la gran majoria es troben als Pirineus. Els llacs pirinencs són oligotròfics, per la qual cosa la fixació de CO₂ es pot considerar insignificant en el context dels balanços generals al país. Per aquest motiu en aquest apartat només ens referirem a la capacitat d'embornal dels embassaments.

Els rius incorporen carboni orgànic dissolt i en partícules a partir dels sistemes terrestres que drenen, i el van processant durant el seu recorregut. De fet, els embassaments són rius modifi-

cats en els quals s'augmenten de manera artificial la secció hidràulica i el temps de residència de l'aigua. Aquests canvis en comporten de substancials en el funcionament com a ecosistemes al passar d'una organització horitzontal a una de predominantment vertical. Pel que respecta al metabolisme del carboni, el seu comportament varia i, en molts casos, s'assembla més al dels sistemes fluvials que al dels sistemes lacustres. Com sistemes en què la component heterotròfica té molt de pes, els rius tendeixen més a desprendre gasos amb efecte d'hivernacle que a segrestar-los; en canvi, els embassaments, depenent de si el seu comportament és més fluvial o lacustre, poden presentar una resposta més variable. Una altra característica exclusiva dels embassaments és que aboquen aigües hipolimnètiques, més fredes i sotmeses a major pressió hidrostàtica, i per tant

Tipus de massa d'aigua	Taxa d'emissió mitjana de CO ₂	
	(mg CO ₂ m ⁻² dia ⁻¹)	(g C m ⁻² any ⁻¹)
<i>Embassaments hidroelèctrics (Duchemin et al., 1995)</i>		
Canadà	500-1.000	49,8-99,5
<i>Embassaments i llacs (Canadà, Duchemin et al. 1999)</i>		
Embassament Manic	1.170 (±470)	116,5
Llac de referència Manic	1.010 (±405)	100,5
Embassament Gouin	1.165 (±685)	116,0
Llac de referència Gouin	1.700 (±950)	169,2
<i>Embassaments hidroelèctrics Amazones (Brasil, Rosa et al., 1997)</i>		
Curú-Una	134,3	13,4
<i>Embassaments del Brasil (Rosa et al. 1999)</i>		
Tucuruí	8.475	843,6
Samuel	6.719	668,8
Xingó	6.048	602,1
Miranda	4.388	436,8
Barra Bonita	3.891	387,3
Segredo	2.695	268,3
Serra da Mesa	2.654	264,2
Três Marias	1.138	113,3
Itaipú	170	16,9
<i>Embassaments i llacs (sud-est d' Estats Units, Therrien et al., 2005)</i>		
Embassaments (n=259)	664 (±1,091)	66,13 (±108,7)
Llacs (n=31)	874 (±2,214)	87 (±220,5)
<i>Embassaments i llacs (Canadà, Tremblay et al., 2005)</i>		
Embassaments (n=56)	1.508 (±1,471)	150,2 (±108,7)
Llacs (n=43)	1.013 (±1,095)	100,9 (±220,5)
<i>Embassaments de Susqueda (Catalunya, Endesa 2008)</i>		
	398	39,6

Taula 7. Emissions netes de CO₂ en llacs i embassaments de diversos països.

amb major capacitat per mantenir gasos en dissolució (N_2O , CO_2 i CH_4), que quan surten són ràpidament desgasificats.

Tanmateix, els embassaments inunden ecosistemes terrestres, el que significa que al menys en les etapes inicials de la seva història disposen d'una gran quantitat de matèria orgànica que van metabolitzant per via detritica. En general, aquesta primera fase que podria anomenar-se heterotròfica té una durada propera a una dècada, i es distingeix perquè les emissions de CO_2 i de CH_4 són més elevades.

Passat aquest període l'embassament aconseguix una situació d'equilibri i redueix l'emissió de gasos amb efecte d'hivernacle a les taxes pròpies d'altres sistemes aquàtics naturals equivalents. Com a referència de les emissions de CO_2 procedents de llacs i embassaments la taula 7 inclou algunes dades provinents d'autors diversos.

Aquestes dades, malgrat que mostren una gran variabilitat entre diferents masses d'aigua, delimiten les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle en un ordre de magnitud entre 100 i $10.000 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, que serien equivalents a 10 i $1.000 \text{ g C m}^{-2} \text{ any}^{-1}$. Tremblay *et al.* (2005) donen valors d'emissions de CH_4 molt més modestos: $0,6 \pm 13 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ per a llacs i $8,8 \pm 12 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ per a embassaments, ambdós situats en clima boreal. Per a aquestes mateixes masses d'aigua, aquests autors van mesurar emissions de $-1,3$ a $3,1 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, que són consistents amb les trobades als llacs de regions temperades, de $0,1$ a $0,7 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Downes, 1999; Mengis *et al.*, 1997), i les trobades als Grans Llacs dels Estats Units, de $3,5 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Tot sembla indicar que l'emissió de CO_2 als embassaments és menor o igual que als llacs, mentre que l'emissió de CH_4 és major als embassaments que als llacs.

Tot i que els embassaments emetin CO_2 , aquest prové de la conca drenant, o sigui que pertany al cicle actual del carboni, i de no haver estat transportat cap a l'embassament, hauria estat probablement emès en altres parts de la conca. El que poden fer els embassaments és immobilitzar, als sediments anòxics, part d'aquest carboni provinent de la conca i fixat pel propi ecosistema aquàtic. D'això hi ha poques dades, però s'ha comprovat que l'embassament de Sus-

queda reté als sediments $665 \text{ g C m}^{-2} \text{ any}$ (Palau i Alonso, 2008). Aquesta capacitat d'embornal és molt superior al rang normal de sedimentació en llacs (entre 60 i $200 \text{ g C m}^{-2} \text{ any}$, Margalef, 1983) i probablement també superior a la de determinats ecosistemes terrestres substituïts pels embassaments. Tot i aquests valors associats als processos de sedimentació, veiem que el paper de les aigües continentals, estretament connectades als ecosistemes terrestres, resulta insignificant en un context global.

5.5. Embornals marins

Des dels inicis del període industrial, entre els anys 1800 i 1994, un 30% aproximadament de les emissions antropogèniques de CO_2 han anat a parar a l'oceà (Sabine *et al.*, 2004). És per això que l'oceà és considerat un embornal de carboni de primera magnitud, comparable al que globalment formen els ecosistemes terrestres. La capacitat de l'oceà d'absorbir CO_2 és funció de la solubilitat d'aquest gas i de la capacitat de tamponament químic de les aigües marines, associada a la reacció entre el CO_2 i els carbonats dissolts. El CO_2 flueix contínuament entre l'atmosfera i les capes superficials de l'oceà (els primers centenars de metres), de manera que es pot equilibrar molt ràpidament. La incorporació de CO_2 a les capes intermèdies i fondes és, no obstant, molt més lenta, de centenars i milers d'anys respectivament, de manera que aquestes aigües no proporcionen un magatzem immediat. Tanmateix, aquesta incorporació està molt supeditada al transport de masses d'aigua i a les variacions de la circulació oceànica. Tot això ens indica que la capacitat de l'oceà com a embornal pot variar en resposta a canvis en la física i la química de les aigües. L'embornal oceànic ha captat un 25% de les emissions durant el període 2000-2008 (Le Quéré *et al.*, 2009) i es preveu que aquesta tendència decreixent es pugui mantenir en el futur.

Els processos biològics també contribueixen a l'absorció de CO_2 atmosfèric a l'oceà. La producció primària disminueix la pressió parcial de CO_2 a les capes superficials i, per tant, promou la absorció de CO_2 atmosfèric. Una part de la producció s'exporta en fondària, en forma de restes orgàniques i de material orgànic dissolt.

Així és com la producció neta de l'ecosistema s'incorpora al magatzem de carboni que formen les aigües intermèdies i fondes, procés que dona lloc al que s'anomena 'producció exportada' i configura la *bomba biològica de carboni*. En condicions estacionàries, aquesta exportació de carboni està pràcticament compensada pel transport de CO₂ associat als moviments verticals de les masses d'aigua, i únicament una petita part (un 2%, aproximadament) s'incorpora a la reserva sedimentària. No obstant, eventualment es poden donar canvis que desequilibrin els intercanvis de carboni entre les capes superficials i el magatzem profund i que provoquin variacions de la concentració de CO₂ atmosfèric. Aquest canvis tant poden venir de variacions de la producció primària i la conseqüent exportació de carboni, com de variacions en les característiques físiques de les aigües i la circulació que facin variar els fluxos de retorn de CO₂ a les capes superficials. Un exemple d'això s'observa a les transicions de fase del cicles glacials. El fet de que el mecanisme de la *bomba biològica de carboni* pugui mantenir concentracions de CO₂ a l'atmosfera 150-200 ppmv inferiors a les que es donarien en un oceà sense vida (Falkowski *et al.*, 2000), dona una idea de la seva importància. Estudis recents apunten a una reducció de la producció primària marina a partir de l'any 1999 (Behrenfeld *et al.*, 2006). Aquest canvis poden alterar inevitablement tant la magnitud com la distribució dels intercanvis de CO₂ entre l'atmosfera i l'oceà.

El 96% de l'enterrament sedimentari de carboni té lloc a les zones costaneres, encara que aquestes ocupen únicament un 7% de la superfície total de l'oceà. En conseqüència, sembla convenient estudiar separatament la capacitat d'embornal dels dos medis: costaner, dominat per l'enterrament sedimentari, i oceànic, dominat pels intercanvis entre les aigües superficials i les fondes, així com també tractar els mecanismes que poden transportar l'excedent de matèria orgànica del sistema costaner directament cap a les aigües fondes.

5.5.1. El medi costaner

La diversitat de processos i hàbitats dins del sistema costaner dificulta donar una estima global

del flux atmosfera-oceà de CO₂. Els sistemes costaners reben grans quantitats de materials d'origen continental: nutrients inorgànics, matèria orgànica, carboni inorgànic dissolt, etc. En conseqüència, el flux net de CO₂ depèn del balanç entre l'augment de producció primària, de respiració i de precipitació de carbonats que es pot donar associat a les entrades al·lòctones i, per tant, és un element molt sensible a les perturbacions antropogèniques. Es pot tenir una primera aproximació a partir de la consideració del balanç metabòlic, expressat com a producció neta de l'ecosistema (NEP, *net ecosystem production*), dels ecosistemes més representatius del litoral mediterrani (taula 8). Encara que les comunitats vegetals costaneres solen tenir alts excedents de producció, una part substancial s'exporta a mar obert i dins del medi oceànic; únicament l'enterrament de carboni que es dona a les comunitats de fanerògames marines contribueix a la formació d'una reserva de carboni. No obstant, també hi ha enterrament de carboni als estuaris i, en general, als sediments costaners, encara que de menor importància (vegeu la taula 8). Malgrat això, la influència dels altres factors abans esmentats (augment de la respiració, de la precipitació de carbonats, etc.) fa que la major part de les zones costaneres, excloses les comunitats de fanerògames marines, siguin fonts de CO₂ cap a l'atmosfera. Les praderies de fanerògames marines constitueixen un cas especial. En particular, els prats de *Posidonia oceanica* (endèmica al Mediterrani) acumulen grans quantitats de restes orgàniques al sediment que formen unes construccions característiques, anomenades *matte*, on el carboni pot quedar segregat durant milers d'anys. Les taxes d'acumulació de carboni als prats de fanerògames marines poden ser molt variades, entre els 10 i els 190 g C m⁻² any⁻¹ (Romero *et al.*, 1994; Mateo *et al.*, 1997); per tant, el valor de 83 g C m⁻² any⁻¹ (Duarte *et al.*, 2005; taula 8) es considera representatiu de molts casos. Aquests valors són comparables a l'exportació de carboni cap a les aigües fondes de mar obert que s'assoleix a les regions més productives de l'oceà, de manera que, si ho considerem per unitat de superfície, la *Posidonia oceanica* pot tenir una contribució notable a l'emmagatzematge de car-

boni. No obstant, el fet que la superfície ocupada per *P. oceanica* sigui molt petita, fa que, des d'un punt de vista global, la seva contribució com a embornal marí de carboni sigui d'escassa importància. A més a més, per tenir una visió més integradora del paper d'aquest ecosistemes quant als fluxos de CO₂ s'haurien d'incloure la totalitat de processos que es donen a l'interior de les praderies: activitat heterotròfica extra degut a la presència d'una gran quantitat de fauna; també per l'elevada activitat microbiana associada a l'augment de deposició orgànica, etc. Un altre aspecte no menys rellevant es relaciona amb la precipitació/dissolució de carbonats, que pot modificar de forma substancial el balanç net de CO₂. En aquest sentit, la producció de CO₂ associada a la precipitació de carbonats pot compensar el consum de CO₂ que s'esdevé com a conseqüència de la producció primària, disminuint, en conseqüència, la captació de CO₂ a les praderies de *P. oceanica*. La dissolució de carbonats tindria l'efecte contrari, ja que consumeix CO₂.

5.5.2. El medi oceànic

El principal procés d'incorporació de CO₂ a les aigües fondes de la Mediterrània occidental té lloc a la zona del golf de Lleó, raó per la qual no es poden donar dades específiques per a la mar catalana. La Mediterrània occidental conté una de les poques regions del món on es dona el fenomen de la convecció profunda de mar obert; les altres es troben a l'Atlàntic nord i a l'oceà Austral. Aquest fenomen es localitza en una zona molt concreta del golf de Lleó, una franja situada entre els 41,5 ° i els 42,5 ° de latitud N i els 4 ° i els 6 ° de longitud est. A l'hivern es forma una zona convectiva que cobreix una extensió d'uns $2,5 \times 10^{10}$ m². La circulació ciclònica dominant ocasiona l'ascensió de les aigües de fondària en una banda al voltant dels 42 ° N, fet que porta l'aigua llevantina intermèdia (LIW, *Levantine Intermediate Water*), relativament salada i càlida, molt a prop de la superfície. El refredament de les aigües superficials durant els mesos d'hivern, afavorit pels vents freds i secs de tramuntana, fa que les aigües es tornin molt denses i s'enfonsin. La barreja de les aigües superficials i les de la LIW, produeix una aigua en-

cara més densa. A meitat de febrer, l'estabilitat d'aquesta aigua és tan reduïda que s'esdevé la convecció, amb l'enfonsament de grans volums d'aigua en forma de xemeneies i la formació de l'aigua fonda de la Mediterrània occidental (WMDW, *Western Mediterranean Deep Water*). Aquest fenomen dona pas a l'estació productiva i és crític, ja que condiciona la fertilitat de les aigües i els intercanvis atmosfera-ocèa de CO₂. S'han estimat taxes d'exportació de carboni cap a l'aigua fonda equivalents a 24 g C m⁻² després d'un esdeveniment d'aquest tipus (Vidal *et al.*, 2007). De totes maneres, la regió ha estat molt poc estudiada i hi ha molta variabilitat interanual. Aquesta variabilitat es relaciona amb la intensitat de la convecció, en funció de les condicions climàtiques i de l'acoblament de l'estructura tròfica, que influeix en el destí de la producció primària: si és descomposta, lliura el CO₂ a l'aigua superficial, o s'exporta a les aigües fondes. Encara hi ha menys dades dels fluxos de CO₂ atmosfera-ocèa. Dades preliminars d'un projecte en curs indiquen una captació mitjana de CO₂ per l'ocèa de 32 i 24 mg C m⁻² dia⁻¹ a finals d'hivern i començament de primavera, respectivament (Vidal, dades no publicades). Estudis en una estació del mar Lìgur donen valors anuals entre 3,5 i 8 g C m⁻², depenent dels anys (Bégovic i Copin-Montégut, 2002). El fet que els processos convectius del golf de Lleó siguin més intensos, indicaria uns fluxos de CO₂ també més alts i més propers als valors de 24-36 g C m⁻² any⁻¹, mesurats a l'Atlàntic nord (Takahashi *et al.*, 2009), una de les regions més importants pel que fa a la captació oceànica de CO₂.

5.5.3. La connexió costa-ocèa

Per últim, queda per tractar un fenomen relativament poc conegut però no menys interessant i del qual també trobem representació a la mar catalana. Es tracta del fenomen de les cascades d'aigua densa costanera (DSWC, *Dense Shelf Water Cascading*). La formació d'aquestes aigües es dona a partir del refredament de les aigües costaneres. Les aigües denses llisquen pel fons marí fins al límit de la plataforma continental i van a caure pel pendent fins que troben la fondària d'equilibri d'acord amb la seva densitat.

La peculiar orografia i circulació de la Mediterrània occidental fa que aquestes llengües d'aigua densa de la plataforma es canalitzin pels canyons submarins, molt abundants a la zona del golf de Lleó, com ara els canyons del cap de Creus i de Palamós a la costa catalana. Aquest fenomen s'ha trobat reiteradament al canyó de Lacaze-Duthiers, on cada hivern s'ha constatat la presència d'aquestes aigües a fondàries d'entre 170 i 800 m (Durrieu de Madron *et al.*, 2005). Ocasionalment, en hiverns freds i secs, es formen aigües especialment denses que es poden enfonsar per sota dels 1.000 m de fondària, que fins i tot se situen per sota de l'aigua fonda mediterrània. Això va passar durant els hiverns de 1998-99 i 2004-05. Durant el seu descens aquestes aigües transporten grans quantitats de sediments i matèria orgànica que, atesa l'extensió del golf de Lleó ($1,2 \times 10^{10} \text{ m}^2$), representen un transport d'uns $50 \text{ g C m}^{-2} \text{ any}^{-1}$ (Canals *et al.*, 2006), que resulta de la convecció hivernal de mar obert. En conseqüència, es pot considerar el fenomen de les cascades d'aigua densa costanera com un mecanisme que transporta l'excedent de matèria orgànica de l'ecosistema costaner cap a les aigües fondes, que contribueix d'aquesta manera a la formació d'aquest reservori.

5.5.4. Avaluació de la capacitat d'embornal de la mar catalana

Tal com s'ha comentat als apartats anteriors, les aigües fondes oceàniques i els sediments costaners formen els principals embornals marins de carboni. El transport/enterrament de carboni dins d'aquest reservori té lloc a partir de tres mecanismes singulars: la convecció hivernal de mar obert, les cascades d'aigua densa costanera, i l'enterrament de restes orgàniques a les praderies de *Posidonia oceanica*. El golf de Lleó és una regió paradigmàtica en aquest sentit, ja que hi estan representats tots tres mecanismes a bastament. Malgrat això, tot el que fa referència al reservori d'aigües fondes ha estat molt poc estudiat. A més a més, hi ha molta variabilitat, tant pel que fa als volums de les diferents masses d'aigua que s'enfonsen any rere any, com pel que fa a l'extensió de la regió de convecció i a les taxes d'exportació de carboni resultants. Tot això dificulta la tasca de donar una estima global d'emmagatzematge de carboni a les aigües fondes, a banda que es tracta de processos d'abast transnacional. Si considerem tota l'àrea del golf de Lleó, el transport anual de carboni cap a l'embornal de les aigües fondes arriba a valors de $120 \times 10^{10} \text{ g C}$ (taula 8, Canals *et al.*, 2006; Vidal *et al.*, 2007). Quant als sediments costaners, si

Component	NEP g C m^{-2} any^{-1}	$\text{g C m}^{-2} \text{ any}^{-1}$	Enterrament $\text{g C m}^{-2} \text{ any}^{-1}$	Capacitat d'embornal $\times 10^{10} \text{ g C any}^{-1}$	Notes
<i>Medi Nerític</i>					
Prat fanerògames	1.211		83	1	1
Prat macroalgues	1.587				1
Sediment	-15		17		1
Estuari	-68		45		1
<i>Medi oceànic</i>					
Aigües fondes	-	24 ⁽²⁾		60	2
Sediment	-				1
<i>Transport costa-oceà</i>					
Cascades (DSWC)		50		60	3
Notes					
(1) Dades extretes d'una recopilació de Duarte <i>et al.</i> (2005); les de fanerògames corresponen a praderies mediterrànies, les de macroalgues, sediments i estuaris són d'una revisió extensa del mateix autor.					
(2) Dades de Vidal <i>et al.</i> (2007) estimades per a la zona de la convecció de mar obert del golf de Lleó.					
(3) Dades de Canals <i>et al.</i> (2006) estimades per a la zona del golf de Lleó.					
Font: Duarte <i>et al.</i> (2005), ⁽²⁾ Vidal <i>et al.</i> (2007), ⁽³⁾ Canals <i>et al.</i> (2006).					

Taula 8. Estimacions de producció neta de l'ecosistema (NEP), transport, enterrament i emmagatzematge de carboni en diferents medis. DSWC = cascades d'aigua densa costanera. ⁽¹⁾

considerem que un 10% d'aquests estan recoberts per praderies de *P. oceanica* (Romero *et al.*, 1994), en resulta un enterrament d'aproximadament 1×10^{10} g C per any, com a conseqüència de l'activitat d'aquests vegetals.

Referències

- AGENCIA EUROPEA DEL MEDIO AMBIENTE (2006). *Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2006*. 27 Oct 2006.
- ALCAÑIZ, J. M.; BOIXADERA, J.; FELIPÓ, M.T. [et al.] (2005). «El paper dels sòls de Catalunya en el canvi climàtic». A: LLEBOT, J.E. (ed.). (2005). *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*; Barcelona: Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible, Institut d'Estudis Catalans i Servei Meteorològic de Catalunya, p. 555-608.
- ALMARZA, C. (2000). «Respuesta al Calentamiento Global de la serie de temperatura media anual de Madrid». *Actas de la II Asamblea Hispano-Lusa de Geodesia y Geofísica*.
- ANGLÈS, J. (2009). «Demanda de agua virtual para la producción de alimentos en Catalunya, Déficit actual y perspectivas de futuro». *Proc. 3^{er} Congreso Agricultura, Alimentación y Medio ambiente: Gestión del H₂O, usos y eficiencia*. UPC (Castelldefels, Barcelona).
- ARANJUELO, I.; PARDO, A.; BIEL, C. [et al.] (2009). «Effects of long term exposure to elevated CO₂ conditions in slow growing». *Global Change Biology*, 15, p. 97-109.
- BARRÓN, C.; DUARTE, C.M.; FRANKIGNOULLE, M.; BORGES, A. V. (2006). «Organic carbon metabolism and carbonate dynamics in a Mediterranean seagrass (*Posidonia oceanica*) meadow». *Estuaries and coasts* 29 (3), p. 417-426.
- BAYFIELD, N.; BARANCOK, P.; FURGER, M. [et al.] (2008). «Stakeholder perceptions of the impacts of rural funding scenarios on mountain landscapes across Europe». *Ecosystems* 11, p. 1368-1382.
- BÉGOVIC, M.; COPIN-MONTÉGUT, C. (2002). «Processes controlling annual variations in the partial pressure of CO₂ in surface waters of the central northwestern Mediterranean Sea (Dyfamed site)». *Deep-Sea Research II* 49, p. 2031-2047.
- BEHRENFELD, M.J.; O'MALLEY, R.T.; SIEGEL, D.A. [et al.] (2006). «Climate-driven trends in contemporary ocean productivity». *Nature* 2006, p. 752-755.
- BELLAMY, P.H.; LOVELAND, P.J.; BRADLEY, R.I. [et al.] (2005). «Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003». *Nature* 437, p. 245-248.
- BELLOT, J. (1989) *Análisis de los flujos de la deposición global, trascolación, escorrentía cortical y deposición seca en el encinar mediterráneo de l'Avic*. Universidad de Alicante. (Tesi doctoral).
- DE BELLO, F.; LEPS, 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.
- BIEL, C.; DE HERRALDE, F.; EVANS, R.Y. [et al.] (2002). «Caracterización hídrica e hidráulica de *Cistus albidus* y *Quercus coccifera* micorrizados en vivero». *Proc. VI Symp. Hispano Luso de Relaciones Hidricas*. SEFV. Pamplona.
- BIEL, C.; SAVÉ, R.; GRAU, B. [et al.] (2007). «Scheduling irrigation based on soil and plant sensors in *Platanus hispanica* submitted to root restriction». *European Congress of Arboriculture*. Torino.
- BIEL, C.; SAVÉ, R.; CASADESUS, J. [et al.] (2007). «Utilización de sensores para la gestión del riego en zonas verdes». *Riegos y drenajes XXI* 23, p. 44-49.
- CANALS, M.; PUIG, P.; DURRIEU DE MADRON, X. [et al.] (2006). «Flushing submarine canyons». *Nature* 444, p. 354-357
- CHMIELEWSKY, F.M.; RÖTZER, T. (2002). «Annual and spatial variability of the beginning of the growing season in Europe in relation to air temperature». *Climate Research* 19, p. 257-264.
- CONANT, R.T.; SIX J.; PAUSTIAN, K. (2003) «Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. I. Management-intensive versus extensive grazing». *Biology and Fertility of Soils* 38, p. 386-392.
- COWAN, I.R. (1978). «Water use in higher plants». A: MCINTYRE, A.K. (ed.). *Water: planets, plants and people*. Cambridge: Aust. Acad. Sci., p. 71-107.
- DAAR, DIR. GRAL. DE PLANIFICACIÓ I RELACIONS AGRÀRIES. (2007). *Superfícies, rendiments i produccions dels conreus agrícoles. Any 2007*; Barcelona: Generalitat de Catalunya, Inf. Tècnic GENCAT.
- DIAZ, S.; LAVOREL, S.; DE BELLO, F. [et al.] (2007). «Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, p. 20684-20689.
- DIRECCIÓN GENERAL DE CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA (1997-2006). *Tercer Inventario Forestal Nacional*; Madrid: Ministerio de Medio Ambiente. (Obra completa).

- DUARTE, C. M.; MIDELBURG, J.J.; CARACO, N. (2005). «Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle». *Biogeosciences* 2, p. 1-8.
- DUCHEMIN, E.; LUCOTTE, M.; CANUEL, R. (1995). «Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ by hydroelectric reservoirs of the Boreal region». *Global Biogeochemical Cycles*, 9(4), p. 529-540.
- DUCHEMIN, E.; CANUEL, R.; FERLAND, P.; LUCOTTE, M. (1999). *Étude sur la production et l'émission de gaz à effet de serre par les réservoirs hydroélectriques de l'entreprise et de lacs naturels* (Volet 2), Université du Québec à Montreal, p. 47.
- DURRIEU DE MADRON, X.; ZERKAKIS, V.; THEOCHARIS, A.; GEORGOPOULOS, D. (2005). «Comments to 'Cascades of dense water around the world ocean'. *Progress Oceanography* 64, p. 83-90.
- EASTERLING, W.; AGGARWAL, P. [et al.] (2007). A: PARRY, M.L.; CANZIANI, O.F.; PALUTIKOF, J.P. [et al.] (eds.). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*; Cambridge: Cambridge Univ Press, p. 273-313.
- ESWARAN, H.; REICH, P.F.; KIMBLE, J.M. [et al.] (1999). «Global carbon stocks». A: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; ESWARAN, H. [et al.] (eds.), *Global climate change and pedogenic carbonates*, Boca Raton, USA, p. 15-26.
- EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (2008). *Impacts of Europe's changing climate—2008 indicator-based assessment*. Caps. 5 i 7.
- FALKOWSKI, P.; SCHOLLES, R.; BOYLE, J. [et al.] (2000). «The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system». *Science*, 290, p. 291-296.
- FAUST, M. (1986). «Research priorities for horticultural science». *HortScience* 21(6), p. 1475-1480.
- GARCIA-PAUSAS J.; CASALS P.; CAMARERO L. [et al.] (2003). «Contenido de carbono edáfico en sistemas pratenses de montaña de los Pirineos». *VII Congreso Nacional de la Asociación Española de Ecología Terrestre. España ante los compromisos del protocolo de Kyoto: sistemas naturales y cambio climático*. Barcelona.
- (2007). «Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: effects of climate and topography». *Biogeochemistry*, 82, p. 279-289.
- GLIESSMAN, S.R. (1990). «Agroecology: Researching the ecological basis for sustainable agriculture». A: GLIESSMAN, S.R. (ed.) *Ecological Studies* 78. Springer Verlag, cap. 1, p. 10.
- GOUDRIAAN, J.; ROB GROOT, J.J.; UITHOL, P.W.J. (2001). «Productivity of agroecosystems». A: ROY, J.; SAUGIER, B.; MOONEY, B. (eds.) *Terrestrial Global Productivity*; H.A. Academic Press, cap. 13, p. 301-313.
- GRÀCIA, C.A. 2006. «El Bosc de Poblet i el rept del Canvi Climàtic». *2es Jornades sobre el Bosc de Poblet i les Muntanyes de Prades*, p. 221-243.
- GRÀCIA, C.; BURRIEL, J.A.; MATA, T.; VAYREDA, J. (2004). *Inventari ecològic i forestal de Catalunya*. CREA (10 volums).
- GRÀCIA, C.; PLA, E.; SÁNCHEZ, A.; SABATÉ, S. (2004). «Gotilwa+: Un modelo de crecimiento forestal basado en procesos ecofisiológicos». *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 18, p. 21-28.
- GRÀCIA, C.A.; SABATÉ, S.; LÓPEZ, B.; SÁNCHEZ, A. (2001). «Presente y futuro del bosque mediterráneo: balance de carbono, gestión y cambio global». *Symposium de la SEET (Sociedad Española de Ecología Terrestre)*, Granada, febrer del 2000.
- GRÀCIA, C.A.; SABATÉ, S.; MARTÍNEZ, J.M.; ALBEZA, E. (1999). «Functional responses to thinning». A: RODÀ, F.; RETANA, J.; GRÀCIA, C.; BELLOT, J. (eds.) *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. Ecological Studies* 137; Heidelberg: Springer-Verlag, p. 329-338.
- GRÀCIA, C.A.; SABATÉ, S.; SÁNCHEZ, A. (2002). «El cambio climático y la reducción de la reserva de agua en el bosque mediterráneo». *Ecosistemas* 2. <<http://www.aet.org/ecosistemas/022/investigacion4.htm>>
- GRÀCIA, C.; SABATÉ S.; TELLO, E. (1997). «Modelling the response to climate change of Mediterranean forest managed at different thinning intensities: effects on growth and water fluxes». A: MOHREN, G.M.J.; KRAMER, K.; SABATÉ, S. (eds.). *Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p 243-252.
- GRÀCIA, C.A.; TELLO, E.; SABATÉ S. [et al.] (1999b). «GOTILWA: An integrated model of water dynamics and forest growth». A: RODÀ, F.; RETANA, J.; GRÀCIA, C., BELLOT, J. (eds.). *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. Ecological Studies* 137; Heidelberg: Springer-Verlag, p. 163-179.
- GUO, L.B.; GIFFORD, R.M. (2002). «Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis». *Global Change Biology* 8, p. 345-360.
- HARKER, D.; LIBBY, G.; HARKER, K.; EVANS, S. (1999). *Landscape restoration*. USGA edit.
- HOOPER, D.U.; CHAPIN, F.S.; EWEL, J.J. [et al.] (2005). «Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge». *Ecological Monographs* 75, p. 3-35.

- HOUGHTON, A.J.T.; YIHUI, D. [et al.] (eds.) (2001). *IPCC. The Scientific Basis. Third Assessment Report of Working Group I*; Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- IDESCAT (INSTITUT D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA). <<http://www.idescat.cat/dequavi/?TC=444&V0=11&V1=9>> (accés de 2009).
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA (2002). *Valores normales y estadísticos de observatorios meteorológicos principales (1971-2000)*. Vols. 1-5.
- INSTITUTO NACIONAL PARA LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA (1986-1995). *Segundo Inventario Forestal Nacional*. Obra Completa. Madrid
- JANSSENS, MAK; GABA, V.; GREENBERG, B. «Higher plants and UV-B radiation: Balancing damage, repair and acclimation». *Trends in Plant Science* 4: 131-135.
- KEENAN, T.; GARCÍA, R.; SABATÉ S.; GRÀCIA, C. (2007). «Process based forest modeling: a thorough validation and future prospects for mediterranean forests in a changing world». *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 23: 81-92 pp.
- KEENAN, T.; SABATÉ, S.; GRÀCIA, C. (2007). *Forest Ecophysiological models and Carbon sequestration*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- KRAMER, K.; LEINONEN, I.; BARTELINK, H.H. [et al.] (2002). «Evaluation of 6 process-based forest growth models based on eddy-covariance measurements of CO₂ and H₂O fluxes at 6 forest sites in Europe». *Global Change Biology*, 8, p. 213-230
- LE QUÉRÉ, C.; RAUPACH, R.; CANADELL, J. [et al.] (2009). «Trends in the sources and sinks of carbon dioxide». *Nature Geoscience* 2, p. 831-836.
- LLURBA, R.; DE LAMO, X.; CUADROS, M. [et al.] 2008. «Biodiversity and ecosystem services in mountain grasslands: a case study in the Planes de Son (Central Pyrenees)». *Grassland Science in Europe* 13, p. 132-134.
- LÓPEZ, B.; SABATÉ, S.; RUIZ, I.; GRÀCIA, C. (1997). «Effects of elevated CO₂ and decreased water availability on holm oak seedlings in controlled environment chambers». A: MOHREN, G.M.J.; KRAMER, K.; SABATÉ, S. *Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems*; Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 125-133.
- LÓPEZ, B.; SABATÉ, S.; GRÀCIA, C. (1998). «Fine roots dynamics in a Mediterranean forest: effects of drought and stem density». *Tree Physiology* 18, p. 601-606.
- (2001a) «Annual and seasonal changes of fine roots biomass of a *Quercus ilex* L. forest». *Plant and Soil*, 230, p. 125-134.
- (2001b) «Fine root longevity of *Quercus ilex*». *New Phytologist* 151(3), p. 437-441.
- MARKS, E.; AFLAKPUI, G.K.S.; NKEM, J. [et al.] (2009). «Conservation of soil organic carbon, biodiversity and the provision of other ecosystem services along climatic gradients in West Africa». *Biogeosciences* 6, p. 1825-1838.
- 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. 103-110.
- MENZEL, A.; FABIAN, P. (1999). «Growing season extended in Europe». *Nature* 397, p. 659.
- MONTERO G., RUIZ-PEINADO, R.; MUÑOZ, M. (2005). *Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles*; Madrid: Monografías INIA (serie Forestal, 13).
- MORALES, P.; SYKES, M.T.; PRENTICE, I. [et al.] (2005). «Comparing and evaluating process-based ecosystem model predictions of carbon and water fluxes in major European forest Biomes». *Global Change Biology* 11, p. 2211-2233, DOI 10.1111/j.1365-2486.2005.01036.x
- OGAYA, R.; PEÑUELAS, J.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; MANGIRÓN, M. (2002). «Effect of drought on diameter increment of *Quercus ilex*, *Phillyrea latifolia*, and *Arbutus unedo* in a holm oak forest of NE Spain». *Forest Ecol. Manag.*
- PALAU, A.; ALONSO, M. (2008). *Embalses y Cambio Climático*. ENDESA. Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. 46 p.
- PARRY, M.; PARRY, C.; LIVERMORE, M. (eds.) (2000). *Valoración de los efectos potenciales del cambio climático en Europa* (Informe ACACIA de la Comisión Europea, Resumen y conclusiones). Toledo: Universidad de Castilla-La Mancha-Iberdrola, 29 p.
- PASSIOURA, J.B. (1982). «Water in the soil-plant-atmosphere continuum». A: LANGE, O.L.; NOBEL, P.S.; OSMOND, C.B.; ZIEGLER, H. (eds.). «Physiological Plant Ecology II, Water relations and carbon assimilation». *Encyclopedia of Plant Physiology, New series*, vol. 12B; Berlin: Springer-Verlag, p. 5-33.
- PEÑUELAS, J.; BOADA, M. (2002). «Biome shift in the Montseny mountains in response to climate change». *Global Change Biology*, (en revisió).
- PIÑOL, J.; TERRADAS, J.; LLORET, F. 1998. Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climatic Change* 38: 345-357.

- ROMERO, J.; PÉREZ, M.; MATEO, M.A.; SALA, E. (1994). «The belowground organs of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* as a biogeochemical sink». *Aquatic Botany* 47, p. 13-19.
- ROSA, L.P.; SIKAR, B.M.; SIKAR, E.M.; SANTOS, M.A. (1997). «A model for CH₄ and CO₂ emission mean life in reservoir based on data from an Amazonian hydroplan». A: ROSA, L.P.; SANTOS, M.A. (eds.) *Hydropower plants and greenhouse gas emissions*. COPPE.
- ROSA, L.P.; MATVIENKO, B.; SANTOS, M.A.; SIKAR, E. (1999). *Relatório Eletrobrás/Fundação Coppetec. Inventário das emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas*. COPPE report to Eletrobras.
- ROSENZWIEG, C.; TUBIELLO, F.N. (1997). «Impacts of global climate change on Mediterranean agriculture: current methodologies and future directions. An introductory essay». *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1 (3), p. 219-232.
- SABATÉ S.; GRÀCIA, C.A.; SÁNCHEZ A. (2002). «Likely effects of Climate Change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean Region». *Forest Ecology and Management*, 162, p. 23-37.
- SABATÉ, S.; GRÀCIA, C.; PLA, E. [et al.] (2004). «Aplicación del modelo GOTILWA+ al análisis de los efectos del Cambio Climático y la Gestión Forestal en el Balance de Carbono y Agua en los Bosques». *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 18, p. 13-20.
- SABINE, C.L. [et al.] (2004). «The oceanic sink for anthropogenic CO₂». *Science* 305, p. 367-371.
- SALA, O.E.; CHAPIN, F.S.; ARMESTO, J.J. [et al.] (2000). «Biodiversity-Global biodiversity scenarios for the year 2100». *Science* 287, p. 1770-1774.
- SALADIÉ, O.; BRUNET, M.; AGUILAR, E. [et al.] (2006). «Análisis de la tendencia de la precipitación de primavera en la cuenca del Pirineo Oriental durante el periodo 1896-2003». *V Congreso de la Asociación Española de Climatología*, 5, Zaragoza, p. 475-485.
- (2007). *Creación de la base de datos de precipitación mensual ajustada del Sector Nororiental de la Península Ibérica (1850-2000)*; Tarragona: Universitat Rovira i Virgili.
- SAVÉ, R. (2009). «What is stress and how to deal with ornamental plants?» *Acta Horticulturae* 813, p. 241-254.
- SAVÉ, R.; SABATÉ S.; DE HERRALDE, F. [et al.] (2009). «Could be the root system of cultured plants an important carbon sink under global change conditions?» *Proc. 8th International carbon dioxide conference*; Jena.
- SAVÉ, R.; COMAS, J.; GARCIA, P. [et al.] (2008). «Inter-relationship between insects and leaves of some ruderal plants». *Proc. Biotic Plant Interaction Conference. 27-29 March 2008 in Brisbane*; Brisbane.
- SCHULTZ, H.R. (2007). «¿Cómo puede afectar el clima a la viticultura en Europa?» *Revista de enología*.
- SEBASTIÀ M.T. (2007). «Plant guilds drive biomass response to global warming and water availability in subalpine grassland». *Journal of Applied Ecology* 44, p. 158-167.
- SEBASTIÀ, M.T.; DE BELLO, F.; PUIG, L.; TAULL, M. (2008a). «Grazing as a factor structuring grasslands in the Pyrenees. *Applied Vegetation Science*, 11, 215-123.
- SEBASTIÀ, M.T.; CANALS, R.M.; MARKS, E.; LLURBA, R. (2008b) «Low-intensity livestock systems in Europe: an opportunity for quality products, recreation revenues and environmental conservation». *Grassland Science in Europe* 13, p. 892-901.
- SHEFFIELD, J.; WOOD, E.F. (2008). «Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multiscenario, IPCC AR4 simulations». *Clim. Dyn.* 31, p. 79-105.
- SMITH, J.; SMITH, P.; WATTENBACH, M. [et al.] (2005). «Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990 – 2080». *Global Change Biology* 11 (12), p. 2141.
- SMITH, P.; CHAPMAN, S.J.; SCOTT, W.A. [et al.] (2007). «Climate change cannot be entirely responsible for soil carbon loss observed in England and Wales, 1978-2003». *Global Change Biology* 13, p. 2605-2609.
- SOLOMON S.; QIN, D.; MANNING, M. [et al.] (eds.) (2007). *IPCC. The Physical Science Basis. Fourth Assessment Report of Working Group I*; Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- SOUSSANA, J.F.; FUHRER, J.; JONES, M.; VAN AMSTEL A. (2007). «The greenhouse gas balance of grasslands in Europe». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 121, p. 1-4
- TAKAHASHI, T. [et al.] (2009). «Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans». *Deep Sea Research* 56, p. 554-577.
- TERRADAS, J.; SAVÉ, R. (1992). «Summer-winter double stress and water relationships as clue factors in the distribution of *Quercus ilex* L». *Vegetatio* 99-100, p. 137-145.
- TERRIEN, J. [et al.] (2005). *CO₂ Emissions from Semi-Arid Reservoirs and Natural Aquatic Ecosystems*. A: TREMBLAY [et al.] (2005).

- TUBIELLO, FN; AMTHOR, J.A. [et al.] (2007). «Crop response to elevated CO₂ and world food supply». *European Journal of Agronomy*, 26(3), p. 215–223
- TREMBLAY [et al.] (2005). *GHG Emissions from Boreal Reservoirs and Natural Aquatic ecosystems*.
- VALENTINI, R., MATTEUCCI, G.; DOLMAN, A.J. (2000). «Respiration as the main determinant of carbon balance in European forest». *Nature* 404, p. 861-865.
- VIDAL, M.; VILA, G.; EMELIANOV, M. [et al.] (2007). Nutrient distribution during the spring bloom following the unusual winter 2005 deep mixing event in NW Mediterranean. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 15-20 April 2007.
- WATSON, ROBERT; ZINYOWERA, T.; MARUFU C. [et al.] *The Regional Impacts of Climate Change. An Assessment of Vulnerability*. New York: Cambridge University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change, 1998.
- WOHLFAHRT G.; ANDERSON-DUNN, M.; BAHNN M. [et al.] 2008. «Biotic, abiotic, and management controls on the net ecosystem CO₂ exchange of european mountain grassland ecosystems». *Ecosystems* 11, p. 1338–1351.