

Biomassa forestal i embornals de CO₂

Carles Gracia

Departament d'Ecologia, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona
Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF)

cgracia@ub.edu

Introducció

El CO₂ es localitza al nostre planeta en tres compartiments principals: el primer, per la importància de la seva magnitud, són 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 gigatones (1 gigatona = 10⁹ tones).

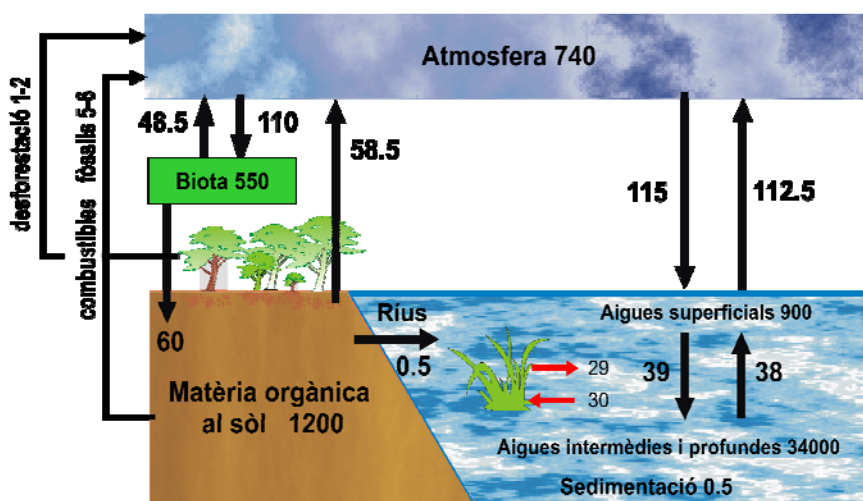


Figura 1. El Cicle del Carboni al Planeta. Es pot apreciar que els tres compartiments més importants són, per aquest ordre, els oceans, el sòl i l'atmosfera. La crema de combustibles fòssils suposa unes emissions de C a l'atmosfera de 6 gigatones anuals als que hem d'afegir 1.5 gigatones més com a conseqüència de la desforestació. Tots els valors en gigatones (10⁹ tm) de C ó milers de milions de tones de C).

Els oceans absorbeixen 115 gigatones de carboni, una quantitat equivalent a l'absorció dels ecosistemes terrestres, encara que retornen a l'atmosfera 113 gigatones. La diferència incrementa la biomassa dels productors marins i els sediments i una petita fracció s'acumula possiblement a les aigües profundes. Un 30 % aproximadament de les emissions antropogèniques de CO₂ entre els anys 1800 i 1994 han 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 fonses 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 al 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, en promig, una quantitat equivalent al 20 per cent 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 respiració 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 descomposts 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 que l'acumulació neta de carboni ja sigui a la biomassa o als sòls és molt escassa.

Els processos que determinen el potencial embornal dels ecosistemes.

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

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. En promig, les plantes aprofiten només l'1 per cent 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 CO₂. Per comprendre el paper d'embornals dels ecosistemes mediterranis resulta fonamental entendre el paper de l'aigua en l'absorció de CO₂ 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 CO₂, d'aquí que existeixi una estreta relació entre fotosíntesi i transpiració, ambdues depenents de la conductància estomàtica. La planta ha de regular els estomes de tal manera que minimitzi la pèrdua d'aigua al temps que maximitza l'entrada de carboni. La quantitat de carboni que una planta es capaç de fixar per unitat d'aigua consumida és lo que es denomina eficiència en l'ús de l'aigua i es un valor extraordinàriament baix a totes les espècies. Per terme mig, per fixar entre 2 i 3 grams de carboni, la planta ha de transpirar de l'ordre de 1000 g d'aigua, o sigui, entre 300 i 500 vegades el seu pes.

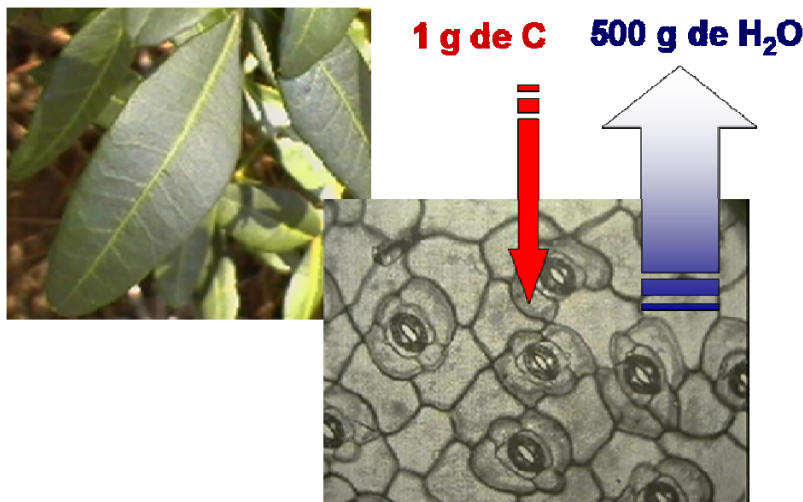


Figura 2. La fixació de carboni pels vegetals en el procés de la fotosíntesi és enormement costosa en termes d'aigua. A l'obrir els estomes per permetre l'entrada de CO_2 , es produeix una pèrdua d'aigua. Per terme mig, per cada gram de carboni fixat es perden 500 grams d'aigua. L'eficiència en l'ús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

El carboni constitueix el 50 per cent de la biomassa seca de les plantes de manera que amb 1 gram de carboni la planta produirà 2 grams de matèria orgànica. En d'altres paraules resulta alligador veure que la producció d'un gram de matèria orgànica requereix transpirar entre 150 i 250 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 es molt sec, les plantes tanquen els estomes. Tancar estomes degut a la manca d'aigua significa tancar el pas a l'entrada de CO_2 i limitar la fotosíntesi junt amb altres processos que encara limitaran més la captació de carboni.

Absorbir CO_2 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 embornal. Un bosc típicament mediterrani, amb una eficiència en l'ús del aigua que li permet fixar 1 gram de carboni per cada 300 grams d' aigua transpirada, que rebí una precipitació anual de 600 mm i que es capaç de captar amb les seves arrels fins el 85 per cent d'aquesta precipitació pot arribar a assolir una producció bruta de 17 tm de carboni per hectàrea anualment, 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 $\text{tm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{any}^{-1}$ de carboni equivalen a quasi be 62 $\text{tm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{any}^{-1}$ de CO_2 que son absorbits anualment por una hectàrea de bosc vivint en les condicions que hem descrit.

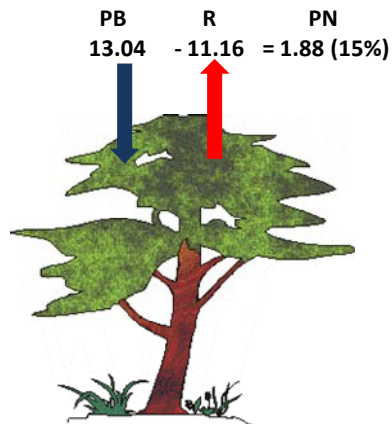


Figura 3. Absorbir carboni no equival a fixar-lo. Per terme mig, els boscos de Catalunya retornen a l'atmosfera entre el 60 i el 90 per cent del carboni absorbit. El carboni fixat, el potencial embornal, resulta ser doncs només una fracció del carboni que el bosc absorbeix en funció de l'aigua disponible ja que per fixar 1 gram de carboni la planta ha de transpirar entre 300 i 500 grams d'aigua, que no sempre esta disponible a la natura.

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 ha de bosc?.

La respiració es 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 produint-se CO₂ i aigua, i es recupera l'energia química del carboni reduït durant la fotosíntesi. D'aquesta manera el CO₂ 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 a la seva respiració se la 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 donat 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 son 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.

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 lo que s'anomena respiració de formació o respiració de creixement i aquesta respiració no suposa una fracció sense importància. Per cada gram de matèria orgànica que la planta sintetitza es retornen a l'atmosfera 0.23 g de C ó 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 ó 843 g de CO₂. A més a més els teixits formats s'han de mantenir permanentment lo 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 que es podran reparar les proteïnes, àcids nuclèics i, en general, totes les molècules i teixits que requereixen reparacions o substitucions. És la denominada respiració de manteniment. Si el cost de formació es 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 suposa retornar a l'atmosfera entre 20 i 400 g de CO₂ diaris.

Emborsals a Catalunya

Com a resultat d'aquests processos que acabem de descriure breument, als boscos de Catalunya s'hi acumulen gairebé 95 milions de metres cúbics de fusta (volum de tronc amb escorça) que traduït a biomassa, incorporant la biomassa de les branques i la biomassa de les arrels, s'apropa a 97.5 milions de tones de les quals un 70 per cent és la part aèria (tronc, branques i fulles) i un 30 per cent és subterrani (arrels gruixudes). Traduït a carboni significa que els boscos de Catalunya acumulen 49.2 milions de tones. El 21 per cent del carboni acumulat correspon als alzinars, el 19 per cent als boscos de pi roig i el 13 per cent als boscos de pi blanc. Entre les tres espècies sumen més del 50 per cent del carboni total dels boscos de Catalunya. Al sotabosc (només la part aèria) s'hi acumulen 11.5 milions de tones de biomassa que suposen 5.6 milions de tones de carboni.

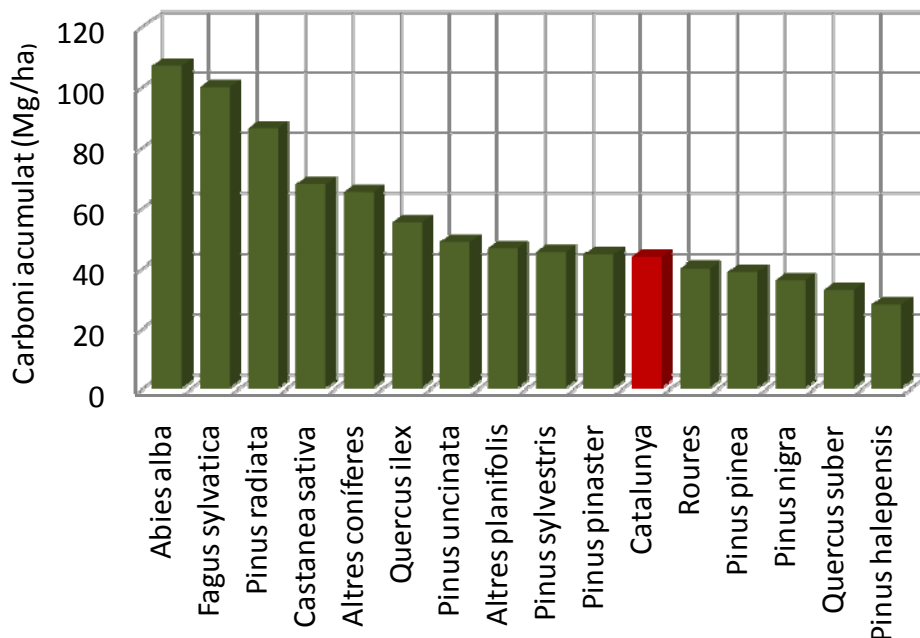


Figura 4. Carboni acumulat als boscos de Catalunya. *Abies alba* amb 106.6 Mg de C/ha, és l'espècie que acumula més quantitat de carboni a la biomassa. Considerant totes les espècies, els boscos de Catalunya acumulen 43.35 Mg de C/ha. Si es considera la superfície forestal total de Catalunya (1134972 has.) el carboni acumulat als boscos es de 49.20 milions de tones.

Ponderant la concentració de carboni de cada espècie per la superfície que ocupa obtenim la concentració mitjana de carboni als boscos de Catalunya que és de 43.35 tones de C/ha. Tenint en conte que la superfície forestal de Catalunya és de 1134972 hectàrees, els boscos de Catalunya acumulen, en conjunt 49.2 milions de tones de carboni. La distribució per comarques del carboni total (Mg) acumulat als boscos de Catalunya), tal i com queda reflectida a la figura 5 posa de manifest 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 be, resulta fàcil de comprendre que 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 destruïm un bosc sigui per un foc forestal o per qualsevol altra causa, 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 de 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 aèria com subterrània i el seu equivalent en termes de carboni.

Augment anual de la biomassa aèria i subterrània i del carboni fixat.

Des del període 1989-90 al 2000-01 el volum de fusta al bosc (volum amb escorça) ha augmentat un 35 per cent, fet que representa un augment mitjà (creixement net) de 2.12 milions de m³/any. En total per al període l'augment ha estat de 3,17 milions de m³/any

La biomassa dels boscos de Catalunya (figura 4) representa 49.2 milions de tones de carboni

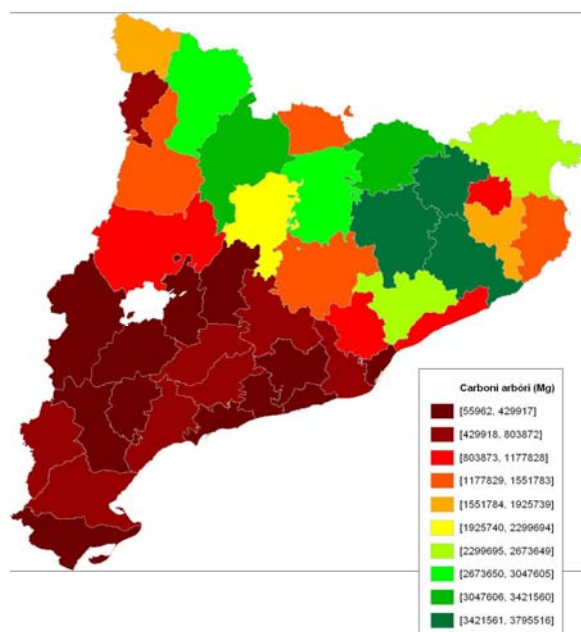


Figura 5. Distribució per comarques del carboni total (Mg) acumulat als arbres (totes les espècies) (esquerra) i quantitat de carboni per hectàrea (dreta) present als boscos. En ambdós casos hi ha una marcada diferència entre el carboni acumulat a les comarques de la meitat nord de Catalunya i l'acumulat 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.

La contribució del sotabosc

En conjunt, el sotabosc a Catalunya contribueix amb 11.45 milions de tones de biomassa que, en termes de carboni representa 5.65 milions de tones. En conjunt, el carboni retingut a la biomassa dels arbres representa el 89.7 per cent del total (68.8 per cent aèria i 31.2 per cent subterrània) i la biomassa del sotabosc afegeix un 10.3 per cent al carboni total retingut als boscos (figura 6).

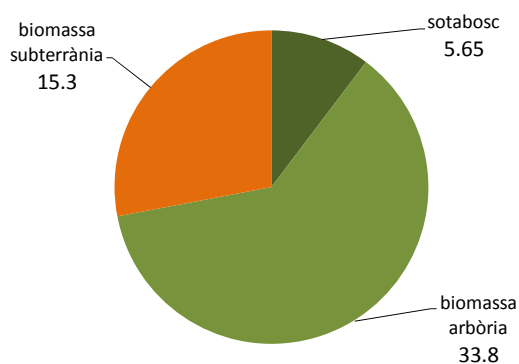


Figura 6. Els boscos de Catalunya acumulen, en conjunt, 54.8 milions de tones de carboni. Els arbres retenen 49.2 milions de tones (el 89.7 del total) i el sotabosc el 10.3 restant. Del carboni retingut als arbres, 33.8 milions de tones (el 68.8) per cent es concentra a la biomassa aèria i 15.3 milions de tones (el 31.2) ho fa a la biomassa subterrània.

Carboni fixat anualment als boscos de Catalunya

Els boscos de Catalunya fixen anualment, en promig, 1,34 tones de carboni/ha/any (figura 7). L'espècie que més carboni fixa és *Pinus radiata* (5.42 tones de C/ha/any) i la que menys *Quercus suber* (0.78 tones de C/ha/any). En conjunt, els boscos de Catalunya fixen anualment 1.5 milions de tones de carboni.

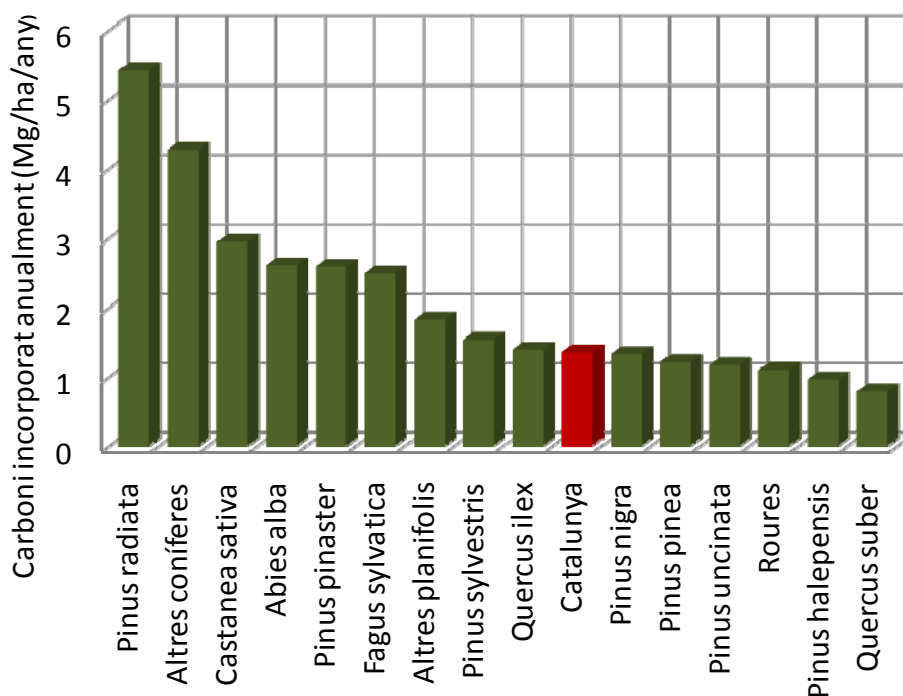


Figura 7. Anualment els boscos de Catalunya fixen 1.34 tones/ha de carboni. L'espècie que més carboni fixa és *Pinus radiata* (5.42 tones de C/ha/any) i la que menys *Quercus suber* (0.78 tones de C/ha/any). En conjunt, els boscos de Catalunya fixen anualment 1.5 milions de tones de carboni.

Què representa el carboni fixat als 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 l'importància relativa dels boscos com a embornals de carboni.

Taula 1. Consum d'energia per càpita i total a Catalunya i emissions de CO₂ que representa aquest consum energètic. Els nostres boscos tenen una capacitat de fixar CO₂, que ve a ser d'unes 5 tones /ha cada any. Per compensar les nostres emissions de CO₂ es requereixen uns 15 milions d'hectàrees de bosc. Tanmateix el bosc a Catalunya ocupa 1.1 milions d'hectàrees i per tant només pot fixar el 8 per cent de les emissions de la població de Catalunya.

Consum per càpita	24 barrils e. de petroli/persona/any 3845 litres e. de petroli/persona/any
Consum a Catalunya	176 milions de barrils e. p./any
Emissions de CO ₂ per càpita	≅ 10 Tm de CO ₂ /any
Emissions totals	70 milions de Tm de CO ₂ /any
1 Ha de bosc fixa (balanç net)	5 Tm de CO ₂ /any ≅ 1.34 Tm de C
Per compensar les emissions en total	2 ha de bosc/habitant 15 milions d'hectàrees de bosc
Superfície de bosc a Catalunya	1,1 milions d'hectàrees

Donada la població de Catalunya d'uns 7.5 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 7.5 milions d'habitants requereixen una superfície forestal d'uns 15 milions d'hectàrees de bosc, valor 14 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 per cent de les emissions anuals de CO₂ de Catalunya.

La biomassa forestal com a font d'energia renovable.

Ja hem vist que els boscos de Catalunya fixen anualment 1.5 milions de tones de carboni. Amb aquesta quantitat de carboni es produeixen prop de 3 milions de tones de biomassa (la meitat aproximadament de la biomassa vegetal esta formada pel carboni) Obviament, no tots els boscos de Catalunya son susceptibles de ser explotats. Atenent a les limitacions silvícoles i topogràfiques, una part important de la superfície del bosc actual no és explotable (72% del bosc). La superfície explotable és de 316 mil ha. Tant en valor absolut com en percentatge, la superfície explotable és molt baixa a la majoria de comarques de Tarragona i de l'interior de Catalunya. A algunes comarques de la demarcació de Girona la superfície explotable no supera el 20%, és el cas del Gironès o el Baix Empordà. La majoria de comarques dels Pirineus tenen un percentatge de bosc explotable que oscil·la entre el 30 i el 40%. Per comarques, l'Alt Urgell és la que té una

superfície explotable més elevada amb 28.700 ha, seguida d'Osona amb 23.800 ha, o el Ripollès i el Berguedà amb unes 21.000 ha cadascuna.

Considerant les restes de tallades (capçades, arbres de petita mida, alguns dels quals convé que siguin extrems del bosc, puntes de tronc i brancam) de la superfície forestal susceptible de ser aprofitada es pot arribar a disposar d'una producció anual de 300 mil tones de biomassa que es podria destinar a la producció d'energia. Aquesta biomassa pot generar 0.13 Mt equivalent de petroli que representa el 0.5 per cent del consum anual d'energia a Catalunya (taula 2). Com es pot veure una fracció quasi insignificant de la que encara hauriem de restar la quantitat d'energia necessària per extreure aquesta biomassa del bosc (consum de combustible de les motoserres, transport, fabricació de pellets, ..etc.). Només a títol comparatiu, direm que l'energia equivalent de tota la biomassa forestal acumulada als boscos de Catalunya equival al 93 per cent de la quantitat d'energia consumida a Catalunya en un any.

Taula 2. Els boscos de Catalunya fixen anualment 1.5 milions de tones de carboni que suposa uns 3 milions de tones de biomassa. Considerant les restes de tallades (capçades, arbres de petita mida que poden extreure's del bos i brancam) de la superfície forestal susceptible de ser aprofitada es pot arribar a disposar d'una producció anual de 300 mil tones de biomassa que es podria destinar a la producció de biomassa. Aquesta biomassa pot generar 0.13 Mt equivalent de petroli que representa el 0.5 per cent del consum anual d'energia a Catalunya. Com es pot veure una fracció quasi insignificant de la que encara hem de restar la quantitat d'energia necessària per extreure aquesta biomassa del bosc (consum de combustible de les motoserres, transport, fabricació de pellets, ..etc.). A títol comparatiu, l'energia equivalent de tota la biomassa forestal acumulada als boscos de Catalunya equival al 93 per cent de la quantitat d'energia consumida a Catalunya en un any.

Població de Catalunya (any 2005)	6 995 205
Població de Catalunya (any 2008)	7 364 078
Consum d'energia a Catalunya (any 2005)	26.9 Mt e.p.
Consum d'energia per habitant i any	3845 kg e.p. 24 barrils
Aquest consum genera	10 tm de CO ₂
Energia de la biomassa	
Aprofitant tota la biomassa produïda anualment (300 000 t p.s. Capçades, puntes, sotabosc...)	0.13 Mt e.p.
Aquesta energia representa el	0.50%
Si aprofitéssim tota la biomassa acumulada als boscos de Catalunya (aèria, subterrània i sotabosc, 110 milions de t p.s.)	93%

Encara que es tracti d'una contribució molt modesta, quantitativament parlant, al conjunt de fonts d'energia de Catalunya, no ha de ser menyspreable. Ara bé, l'aprofitament d'aquesta biomassa com a font d'energia té algun impacte sobre els ecosistemes forestals?

L'aprofitament energètic de la biomassa forestal pot, en principi, afavorir una gestió adequada dels boscos en fer més viables els tractaments orientats a millorar l'estructura del bosc, a obtenir productes fustaners, o a controlar el sotabosc. En conjunt, aquests tractaments, correctament aplicats, promouen estructures forestals desitjables (arbres més grans i menor densitat), acceleren el creixement dels arbres que queden al bosc, i redueixen el risc de propagació d'incendis, sobretot si s'eliminen preferentment arbres

petits amb criteris de conservació de les estructures demogràfiques de la població d'arbres.

Per altra banda, els aprofitaments forestals destinats a l'obtenció d'energia comporten, en general, una major intensitat d'explotació que els aprofitaments convencionals. Així, mentre en aquests darrers típicament només s'extrauen del bosc els troncs (el canó, o fusta en roll), en els destinats a usos energètics s'extreuen també les capçades dels arbres i/o el sotabosc. Aquesta major intensitat d'extracció pot afavorir l'erosió del sòl, en deixar-lo menys protegit per les restes de tala o pel sotabosc, i incrementa les quantitats de matèria orgànica i nutrients minerals que retirem del bosc amb els productes que ens enduem, evitant així la seva reincorporació al sòl.

La concentració de nutrients en les parts aèries dels arbres (fusta, escorça, fulles) reflecteix en part la disponibilitat de nutrients en el sòl. En particular, les concentracions de nutrients a les fulles han estat amplament utilitzades com a indicadors de l'estat nutricional de les plantes. Bona part dels boscos de Catalunya mostren un dèficit de fòsfor (veure la figura 8).

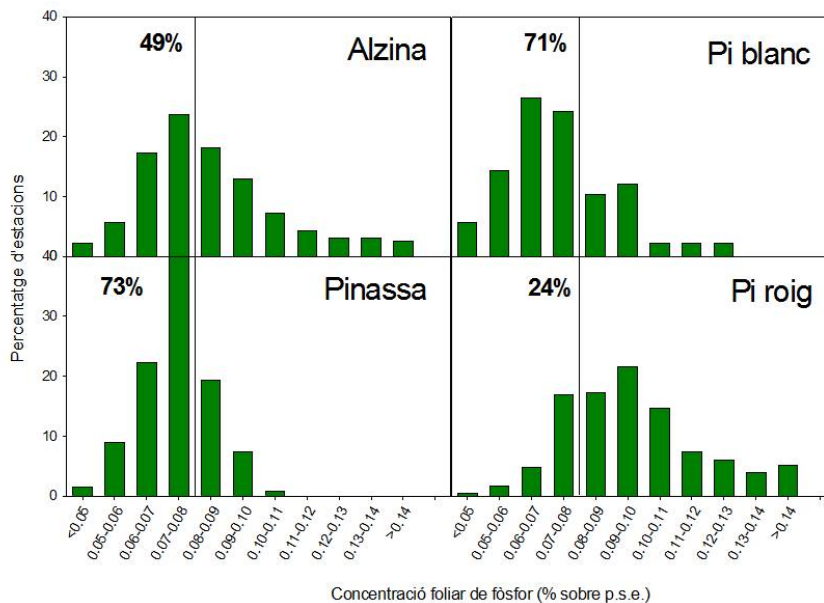


Figura 8. Bona part dels boscos de Catalunya mostren un dèficit de fòsfor. A cadascuna de les gràfiques s'ha marcat, mitjançant una línia vertical, el valor considerat com a nivell crític de concentració foliar. El percentatge d'estacions que estan per sota d'aquest llindar s'indica per a cadascuna de les espècies. (Font: Pla de Biomassa. (CREAF, 2001) amb dades de l'Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya.

La quantitat de nutrients que es poden extreure del bosc en els aprofitaments temporals convencionals és una proporció modesta respecte dels nutrients continguts en la biomassa del bosc. En aquest cas, quedarien al bosc els nutrients corresponents a les branques de menys de 5 cm i les fulles, que representen el 50% dels nutrients de la biomassa tallada (taula 3). En un aprofitament per energia, és on l'extracció addicional representa una proporció més elevada d'extracció de nutrients ja que l'aprofitament addicional representa duplicar les quantitats de nitrogen, fòsfor i potassi extrets del bosc.

A més a més les exportacions incrementades de matèria orgànica degudes als aprofitaments energètics poden tenir efectes negatius sobre la qualitat dels sòls, especialment en sòls que ja siguin pobres en matèria orgànica, una situació que és freqüent als boscos mediterranis. No hem d'oblidar que la reducció de la matèria orgànica al sòl no només afecta a la fertilitat directament. Té un efecte directe sobre les propietats físiques del sòl, reduint la capacitat d'emmagatzemar aigua, i ja hem vist l'importància de l'aigua com a factor limitant del creixement dels boscos.

Taula 3. La taula recull la quantitat estimada de nutrients que s'extreuen del bosc en els aprofitaments temporals convencionals. És una proporció modesta respecte als nutrients continguts en la biomassa. En aquest cas, quedarien al bosc els nutrients corresponents a les branques de menys de 5 cm i les fulles, que representen l'altre 50% dels nutrients de la biomassa tallada. En un aprofitament per energia, és on l'extracció addicional representa una proporció més elevada d'extracció de nutrients ja que l'aprofitament addicional representa duplicar les quantitats de nitrogen, fòsfor i potassi extrets del bosc.

Extracció	Aprofitament convencional			Aprofitament addicional per a energia		
	N	P	K	N	P	K
kg/any	830782	68859	461223	810499	63189	401600

El futur dels boscos de Catalunya com a embornals de CO₂

L'augment de la temperatura, associat al canvi climàtic, es reflecteix clarament en la resposta fenològica de les plantes, donat que la fenologia es particularment sensible a les variacions de temperatura. El problema pot resultar crític en el cas del mediterrani a 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, degut a una elongació del període 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, representa unes condicions cada cop més desfavorables per 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 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.

Es pot anticipar que un augment de la temperatura anticiparà el començament i enrederirà el final provocant 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 en Europa, en promig 6.3 dies en el període de 1959 a 1996, o sigui, un promig de 0.21 dies/any. Paral·lelament les fases de tardor s'han allargat 4.5 dies durant el mateix període de temps o, el que es el mateix 0.15 dies/any d'on es dedueix que el període vegetatiu s'ha allargat 10.8 dies des de els anys 60 (figura 9). Ni totes les espècies responen de la mateixa manera ni els canvis observats es produeixen a totes les latituds amb la mateixa intensitat.

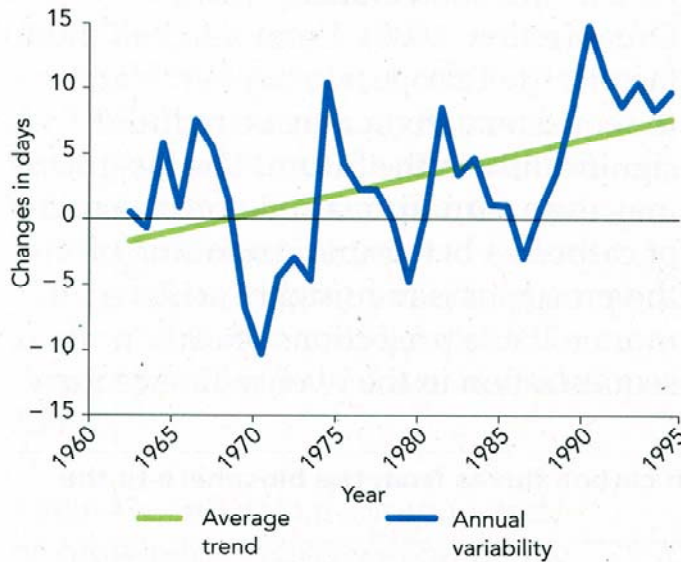


Figura 9. Observacions de la Xarxa Internacional de Jardins Botànics Fenològics en Europa excepte França, la Península Ibèrica, Sud d'Itàlia i Grècia. D'acord amb les observacions, la durada del període vegetatiu a Europa mostra una clara tendència a augmentar. La brotada de la fulla s'ha avançat en Europa, en promig 6.3 dies en el període de 1959 a 1996. Paral·lelament les fases de tardor s'han allargat 4.5 dies durant el mateix període de temps d'on es dedueix que el període vegetatiu s'ha allargat 10.8 dies des de els anys 60. Segons Menzel (2002) i Menzel i Fabian (1999).

Aquesta elongació del període vegetatiu suposa una major capacitat de transpirar una quantitat suplementària d'aigua. En les condicions mediterrànies en les que l'aigua resulta avui per avui el factor més limitant per la vegetació i a 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 suposar condicions localment difícils o impossibles de superar per algunes espècies. La exploració d'aquestes condicions futures resulta complexa donat que, per una banda, les respostes no son lineals i, per altra banda, les interaccions entre diferents processos fisiològics compliquen enormement l'anàlisi.

Partint de la sèrie de temperatures diàries del període 1961-1998, hem simulat el creixement del bosc en cada punt del territori (píxel) fins ajustar la resposta fenològica de la vegetació als valors observats en el període 1961-1998. Posteriorment resulta possible simular el creixement del bosc amb el model GOTILWA+ (Growth of trees is limited by water, Gracia et al. 1999, 200), 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 vs. disminució de la disponibilitat hídrica i, en definitiva, a la seva capacitat per a actuar com a embornals de CO₂.

Les dates d'inici i final del període vegetatiu entre 1990-2000 a Catalunya es representen a la figura 10. Resulta evident que a mida que ens desplaçem de Sud a Nord, el començament del període vegetatiu es va retardant. Si al Sud de Catalunya l'activitat de les plantes pot començar la darrera setmana de març o principis del mes d'abril, al Pirineu no comença, en promig, fins ben iniciat el mes de maig. La figura 10 reflecteix que hi ha una 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,

Figura 10. Inici i final del període vegetatiu a Catalunya. Basat en les dades observades a la Xarxa Europea durant el període 1966-1998.

Figura 11. 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 son projeccions calculades a partir del clima projectat amb el model HadCM3 per un escenari socioeconòmic A2 de l'IPCC. Observis l'augment gradual del període vegetatiu a tot el territori però especialment significatiu 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.

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 manifestar-se al llarg de dos 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 pels 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 va augmentant progressivament. Els resultats de les simulacions projecten una situació per l'any 2080 amb augments d'entre un i dos mesos respecte de la situació de 1990. Si comparem la situació a Catalunya amb la d'altres regions europees (no mostrades a la figura) el període vegetatiu s'allarga de manera desigual. L'any 2080 al mediterrani passa, en promig, de 207 a 257 dies en tant 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 la actual en tant que en als països del Mediterrani s'allargarà entre 44 i 60 dies (els casos d' Espanya i Portugal respectivament).

Com a conseqüència immediata d'aquests canvis fenològics, els models projecten una disminució de la productivitat d'una bona part dels boscos que, en alguns casos, poden deixar d'actuar com a embornals i passar a ser fonts de CO₂ a l'augmentar les quantitats de CO₂ retornat a l'atmosfera com a conseqüència de l'augment de les taxes de respiració.