

El balanç de carboni i el canvi climàtic

Josep Enric Llebot

Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona.

Correspondència: Josep Enric Llebot. Secció de Ciències i Tecnologia, Institut d'Estudis Catalans, C. del Carme 46, 08001 Barcelona, Catalunya. Adreça electrònica: enric.llebot@uab.cat

DOI: 10.2436/20.1501.02.182

ISSN (ed. impresa): 0212-3037

ISSN (ed. digital): 2013-9802

<http://revistes.iec.cat/index.php/TSCB>

Rebut: 14/12/2017

Acceptat: 19/04/2018

Resum

En aquest escrit es descriuen els balanços de carboni i la seva relació amb la composició de gasos amb efecte d'hivernacle a l'atmosfera, així com els impactes en el balanç de carboni dels processos que tenen lloc als oceans, als sòls i als ecosistemes terrestres.

Paraules clau: balanços de carboni, efecte d'hivernacle, composició atmosfèrica, canvi climàtic.

Climate change and carbon budgets

Abstract

In this paper we deal with planetary carbon budgets and its relationship with the atmospheric content of greenhouse gases. Also, there are mentioned some of the impacts upon the carbon budget of several processes that occur in oceans and, in general, in the biosphere.

Keywords: carbon budgets, greenhouse effect, atmospheric composition, climate change.

Introducció

L'escalfament de l'atmosfera com a conseqüència dels canvis de la composició atmosfèrica d'alguns gasos amb efecte d'hivernacle ha portat, durant els darrers 25 anys, primer a un debat científic sobre l'origen i les conseqüències del fenomen i, després, a un intens debat polític i social sobre com fer-hi front i quines mesures es poden prendre. En qualsevol cas, ha estat i és un debat en el qual intervien moltes disciplines, entre les quals tenen un paper protagonista la física i la biologia. La causa immediata del problema són les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle i, en aquest context, conèixer com es reparteix entre els diferents subsistemes que formen el sistema climàtic el diòxid de carboni en ser emès, el gas que suposa el percentatge major de tots amb efecte d'hivernacle que s'emeten a l'atmosfera, és de gran importància. En aquest escrit pretenem fer un breu resum d'aquest aspecte, així com d'alguns canvis en els ritmes vitals a la biosfera que, segons la visió de l'autor, serveixen per comprendre millor l'evolució del contin-

gut de carboni a l'atmosfera. Les fonts sobre les quals es basa aquest treball són bàsicament tres: els treballs del Global Carbon Project¹ i les referències bibliogràfiques que s'hi inclouen, el Fifth Assessment Report de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014) i el Tercer Informe sobre el Canvi Climàtic a Catalunya².

Les emissions de CO₂

Des de la revolució industrial, els fluxos d'origen antropogènic de diòxid de carboni, que provenen de cremar combustibles fòssils com el carbó, el petroli i el gas natural, injecten anualment una quantitat de carboni que equival a un 0,8% del contingut de carboni de l'atmosfera. L'increment anual de les emissions ha estat d'un 4,3% des de l'any 1860, excepte en períodes molt breus, com en la Gran Depressió, a finals dels anys 1920, durant les guerres mundials o en la crisi del petroli de l'any 1973. La mitjana de les emissions de carboni a l'atmosfera, que són conseqüència de la utilització de combustibles fòssils dels anys

1990, fou de 6,3 GtC i queden encara reserves de combustibles fòssils que produirien conjuntament l'emissió de 4.000 GtC.

Les emissions de CO₂ degudes al consum de combustibles fòssils i de la indústria no han canviat des de l'any 2014 fins al 2016. Aquesta estabilització de les emissions va sorprendre, tenint en compte que en el mateix període la temperatura de l'atmosfera a la superfície terrestre no va aturar el seu creixement. Sembla, però, que el 2017 les emissions tornaran a créixer modulades per l'augment de les emissions xineses al voltant d'un 3,5%, la lleugera disminució de les emissions dels Estats Units, -0,4%, i l'augment d'un 2% de les emissions de l'Índia i de la resta del món. Tanmateix, la concentració de carboni a l'atmosfera també va seguir creixent durant el període 2014-2016. Aquesta aparent inconsistència s'explica per la resposta del cicle natural del carboni en l'episodi del Niño, 2015-2016, (Betts *et al.*, 2016), que va provocar en moltes zones de latituds baixes ambients més secs i temperatures més altes, amb la consegüent menor fixació de carboni

¹ <http://www.globalcarbonproject.org>

² <http://cads.genocat.cat/ca/detalls/detallarticle/Tercer-informe-sobre-el-canvi-climatic-a-Catalunya-00003>

per a la coberta vegetal i, en múltiples ocasions, majors emissions pels incendis forestals. Durant aquest període el creixement anual del CO₂ a l'atmosfera s'ha situat al voltant dels 3 ppm³ anual, cosa que ha portat a la concentració mitjana atmosfèrica del CO₂ durant el 2016 de 403 ppm. El diòxid de carboni que entra a l'atmosfera a partir de la combustió dels combustibles fòssils, dels processos industrials i dels canvis en els usos del sòl s'absorbeix en embornals com els oceans i els sòls i els ecosistemes terrestres, que, junts, suposen l'absorció del 55% de les emissions. La resta, el 45%, roman a l'atmosfera (Ciais *et al.*, 2013). Certament, les mesures de la concentració atmosfèrica de gasos amb efecte d'hivernacle han assolit un grau de precisió força elevat, però, en canvi, l'atribució de les emissions i dels embornals en termes concrets conté encara moltes incerteses.

Atès que els oceans i els sòls són responsables de retenir en el seu si el 55% de les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle a l'atmosfera i, també a la vegada, poden alterar en determinades condicions el balanç de carboni a la superfície terrestre és important saber quin ha estat el seu paper en el passat climàtic de la Terra.

La distribució del carboni

La concentració del carboni a l'atmosfera ha canviat durant la història de la Terra. Hi ha evidències de concentracions grans (més grans de 3.000 ppm) fa uns 200 milions d'anys, així

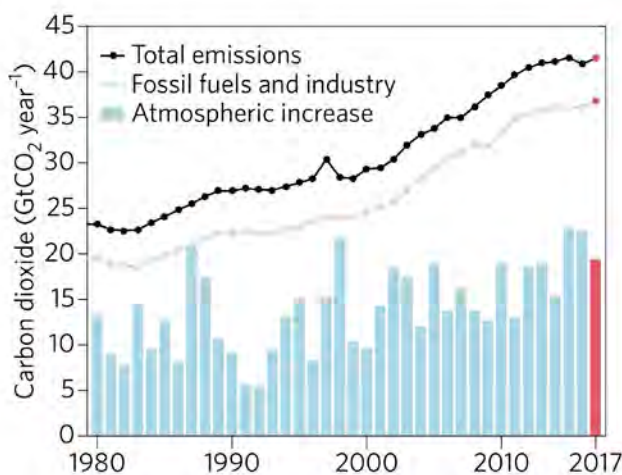
com altres períodes en què les concentracions han estat semblants a les actuals. Els planetes del sistema solar també tenen concentracions de diòxid de carboni a la seva atmosfera molt diferents: mentre Venus té una atmosfera amb una concentració de CO₂ molt gran, Mart té una atmosfera molt tènue, però també amb una proporció força alta de CO₂. L'any 1958, quan es va disposar per primera vegada d'un instrument que mesurava de forma contínua a l'observatori de Mauna Loa, a Hawaii, la concentració mitjana a l'atmosfera de CO₂ era de 315 ppm de CO₂. Aquesta concentració resulta ser aproximadament d'un 0,03% de la concentració d'altres elements que formen l'atmosfera, que resulta ser d'un total de 671 x 10¹² kg de carboni presents a l'atmosfera. Des d'aleshores, la quantitat de carboni a l'atmosfera ha crescut notablement. Trenta anys després, la concentració de diòxid de carboni havia augmentat un 11,4%, és a dir, era de 351 ppm, i quan faci seixanta anys de les primeres mesures la concentració de CO₂ no serà inferior als 405 ppm, que suposa un augment del 28,6% respecte de la concentració de l'any 1958. L'anàlisi de les bombolles d'aire atrapat en el gel polar indica que típicament, durant un període glacial, hi havia uns 200 ppm CO₂ i durant els períodes interglacials hi havia concentracions d'uns 260 a 300 ppm de CO₂, mesures que, juntament amb les de l'estació de Mauna Loa, permeten suposar que abans de l'inici de l'època industrial la concentració de diòxid de carboni era d'uns 280 ppm.

La concentració del carboni a l'atmosfera depèn de les emissions, però també dels fluxos de carboni entre l'atmosfera i els altres subsistemes del sistema climàtic, els oceans, el sòl i la biosfera. L'oceà emmagatzema una quantitat de carboni que és unes 50 vegades major que la del carboni atmosfèric, de tres formes diferents: com a carboni inorgànic dissolt (ions carbonat i bicarbonat i diòxid de carboni dissolt), carboni orgànic dissolt (molècules orgàniques petites i grans), i carboni orgànic en forma de petites partícules (consistent en organismes vius i fragments de plantes mortes i animals). Les dades que es fan servir sobre la quantitat de carboni total emmagatzemada que hi ha a l'oceà són d'unes 38.000 GtC (38 x 10¹⁵kg).

Pel que fa a la litosfera i la biosfera hi ha una major incertesa sobre el seu contingut de carboni. Les estimacions que s'han elaborat sobre el contingut de carboni a les plantes es mouen al voltant de les 600 GtC, depenent dels mètodes usats per classificar els ecosistemes en diferents tipus, i depenent dels mètodes per determinar l'àrea i la quantitat de carboni de cada tipus. El mateix problema sorgeix quan es tracta d'avaluar la quantitat de carboni emmagatzemat per litre de Terra corresponent a sòl orgànic, que globalment s'avalua en 1.500 GtC. La quantitat total de carboni present als ecosistemes terrestres oscil·la al voltant de 2.000 GtC. Aquesta quantitat varia amb una certa rapidesa fruit dels canvis en l'ús del sòl, especialment pel que fa als usos agrícoles, de l'estructura d'edat dels boscos, del clima i de la química de l'atmosfera i de la precipitació.

Tanmateix, també hem de tenir en compte altres contribucions a les emissions de carboni. Per exemple, les procedents del sòl. Anualment l'atmosfera intercanvia més de 100 GtC amb els ecosistemes terrestres i una quantitat semblant amb els oceans. Per tant, els fluxos de carboni globals a l'atmosfera representen més del 25% de la quantitat total de carboni emmagatzemat, i les transformacions que es produeixen en els oceans i en els usos del sòl que poden influenciar, de forma notable, aquests fluxos afecten, de retruc i de forma substancial, el comportament de l'atmosfera.

Iniciem ara el recorregut del carboni a la litosfera. El carboni està present sobretot a les roques sedimentàries, les quals contenen dos tipus de components: el querogen i els carbonats. El querogen, que es troba a les pissarres,



↑ Figura 1. Emissions totals, emissions de la indústria i de l'ús dels combustibles fòssils i augment del CO₂ a l'atmosfera en gigatonnes (GtCO₂) (Peters *et al.*, 2017). Reproduït amb el permís de l'editor.

³ 1 ppm (abreviatura de part per milió) equival a 1 ml de CO₂ per litre d'aire.

és matèria orgànica sedimentària i representa les restes toves d'animals i plantes. Els carbonats, que estan presents en roques calcàries i en les dolomites, procedeixen, en la seva major part, de l'acumulació de fragments d'esquelets d'organismes, generalment marins. El carbó i el petroli procedeixen també dels teixits d'animals i plantes, però no són tan abundants com el querogen.

Durant el procés de meteorització geoquímica, mitjançant el qual les roques del sòl es descomponen, el querogen, una mescla de compostos orgànics que conformen una fracció de la matèria d'origen orgànic de les roques sedimentàries, reacciona amb l'oxigen i produeix CO_2 , que acaba passant a l'atmosfera. Tanmateix, la meteorització dels carbonats és molt més complexa. Els carbonats de magnesi i de calci, constituents de dolomites i calcites, són atacats pels àcids presents a les aigües subterrànies, en concret per l'àcid carbònic, que es forma a partir del diòxid de carboni resultant de la descomposició de la matèria orgànica. L'acció de l'àcid carbònic sobre les roques carbonatades proporciona ions dissolts de calci i de magnesi i dos ions bicarbonat. Els ions bicarbonat tenen, però, encara una altra font: els minerals del grup dels silicats, per exemple: els abundants feldespatos dels granits i dels basalts produeixen també ions bicarbonat degut a l'acció meteoritzant de l'àcid carbònic. Aquesta acció meteoritzant sobre els silicats és molt important, ja que exerceix un control a llarg termini sobre el diòxid de carboni atmosfèric.

Un cop els ions calci i bicarbonat són alliberats gràcies al procés de meteorització, són arrossegats per l'aigua subterrània pels petits rierols, després pels rius i finalment arriben a l'oceà. Allí, organismes com el plàncton i els corals prenen els ions calci i bicarbonat per construir les closques i els esquelets de carbonat de calci dels éssers vius que, en morir, es dipositaran al fons marí i començaran a formar els sediments. Aquest enterrament de carbonats és el responsable del 80% aproximadament del carboni dipositat en el sòl oceànic. El 20% restant resulta de l'enterrament de matèria orgànica morta produïda a partir de la fotosíntesi terrestre i marina, juntament amb els materials procedents del continent que els rius porten al mar.

En les reaccions en què intervenen els carbonats, únicament la meitat dels bicarbonats acaben transformant-se en carbonat càlcic i, per tant, dipositant-se en el fons de l'oceà. L'altra meitat es converteix en diòxid de carboni i acaba a l'atmosfera probablement després de

passar per la fotosíntesi i per la respiració del cycle biològic del carboni. Per tant, resumint, per cada molècula de diòxid de carboni atmosfèric es produeix una molècula d'àcid carbònic al sòl. La molècula d'àcid carbònic dissol minerals del grup dels carbonats produint dos ions bicarbonat. Un d'aquests ions es transforma en carbonat càlcic, que acaba al fons de l'oceà, i l'altre s'acaba transformant en diòxid de carboni atmosfèric i, per tant, es pot dir que la quantitat de CO_2 atmosfèric es conserva.

No passa el mateix amb la meteorització dels silicats. Durant aquest procés, es produeixen dos ions bicarbonat i ions calci, ja que els silicats contenen calci, en la seva estructura. Quan els ions bicarbonat i calci arriben a l'oceà, es combinen gràcies a la intervenció dels organismes marins i es produeix carbonat càlcic. El conjunt de reaccions té com a resultat que únicament la meitat del diòxid de carboni de l'atmosfera retorna a l'atmosfera degut al procés de meteorització dels silicats. Així doncs, aquest procés comporta una fixació neta de diòxid de carboni atmosfèric en els sediments.

Havent vist tot això, podem preguntar-nos com és que encara queda diòxid de carboni a l'atmosfera. Efectivament, en un període de 10.000 a 300.000 anys, el procés de meteorització dels silicats explicaria l'eliminació total del CO_2 atmosfèric. Hi ha però un altre procés que nodreix l'atmosfera de diòxid de carboni: les erupcions volcàniques i altres fenòmens relacionats amb el vulcanisme.

Finalment, cal esmentar el cycle biològic del carboni, en el qual el diòxid de carboni atmosfèric és fixat per les plantes, transformat mitjançant la fotosíntesi en matèria orgànica i, posteriorment, és alliberat per la respiració vegetal i la descomposició bacteriana una altra vegada a l'atmosfera.

La capacitat dels ecosistemes i dels sòls d'absorbir i de fixar carboni és, com ja s'ha dit, un tema que ha gaudit de molt interès científic i polític, sobretot inicialment, relacionat amb els mecanismes de flexibilitat que s'establien en el protocol de Kyoto i en els desenvolupaments normatius posteriors. Especialment, s'ha dedicat molta atenció als boscos. La desaparició, en àmplies zones del planeta, de superfícies de bosc degut a les activitats humanes i, en altres indrets, el creixement de les superfícies boscoses, com a resultat de l'abandonament rural i de terrenys dedicats en altres temps a pràctiques agrícoles, ha fet que l'avaluació dels balanços de carboni i l'elaboració de metodologies per quantificar-los global-

ment, hagi estat una activitat a la qual s'han dedicat nombrosos esforços.

Com tots els processos que es donen a la natura, l'establiment dels balanços de carboni comporta conèixer i descriure processos complexos i sotmesos a múltiples interaccions (Peñuelas *et al.*, 2016). El balanç de carboni d'un bosc o d'un ecosistema comporta tenir en compte dos processos bàsics: la fotosíntesi i la respiració.

Els ecosistemes terrestres i principalment els boscos acumulen en la seva biomassa uns 550 GtC de carboni. Cada any aquests ecosistemes absorbeixen 110 GtC, és a dir, de mitjana, una quantitat equivalent al 20% del carboni emmagatzemat en la seva biomassa. No obstant això, 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, unes 49 GtC, i una altra (60 GtC) per la descomposició de les fulles i altres restes de matèria orgànica que cauen a terra i que són descompostos per bacteris i fongs per acabar retornant a l'atmosfera. Sembla que hi ha un consens (Ciais *et al.*, 2013) sobre el fet que, a escala global, els boscos acumulen carboni i, a mitjà termini, el poden seguir acumulant, atès que els boscos són relativament joves i el mateix augment de la concentració de CO_2 atmosfèric ho potencia. L'augment de la temperatura afavoreix el període vegetatiu i, per tant, allarga la fixació de carboni. Tanmateix, en moltes regions justament l'augment de la temperatura i un règim hídric més àrid produeixen un menor creixement i més incendis forestals, que incideixen substancialment en el balanç de carboni (Banqué *et al.*, 2014). En resum, i en concret per mesurar quina importància quantitativa tenen aquests processos, si es fa una avaluació global de la capacitat d'embornal dels boscos a Catalunya, per exemple, respecte del total d'emissions (Vayreda *et al.*, 2016), els boscos a Catalunya compensen al voltant del 10% de les emissions produïdes.

Com hem vist, la major quantitat de carboni es troba a l'oceà, la qual cosa indica que l'oceà té un paper fonamental en el cycle del carboni i, per tant, en la concentració de CO_2 a l'atmosfera. A través de la superfície de l'oceà es produeix un continu intercanvi de diòxid de carboni entre l'atmosfera i l'oceà de tal forma que hi ha establert un equilibri entre la pressió parcial de CO_2 en els dos sistemes. Per tant, un eventual canvi del ritme d'absorció de diòxid de carboni per part de l'oceà o de l'atmosfera ha de venir acompanyat per mecanismes que,

a la vegada, canviïn el transport d'aquest gas en cadascun dels dos sistemes. El coneixement de l'efectivitat amb què es transporta carboni des de la superfície cap al fons és relativament recent i es basa en l'ús de traçadors com el ^{14}C i el ^3H . Les dades experimentals semblen suggerir que un bon model de l'oceà consisteix a considerar-lo dividit en dues zones, la superficial, que són els 200 primers metres des de la superfície, on l'acció del vent produeix una aigua relativament homogènia i ben barrejada, i la zona profunda, en la qual es donen els moviments de circulació general. Excepte en les zones polars, on hi ha un contacte directe entre les aigües superficials i les profundes, en la resta de regions de l'oceà l'intercanvi entre la zona superficial i la zona profunda es produeix per difusió i, per tant, molt lentament.

A les zones polars l'aigua freda i salina, que a la resta dels oceans és característica de les zones profundes, va per la superfície i és tan densa que s'acaba enfonsant. Aquesta aigua ve de l'equador i, durant el seu camí, ha estat molt de temps en contacte amb l'atmosfera. Hi ha encara una certa incertesa sobre el diòxid de carboni que conté i, en conseqüència, en la quantitat d'aquest gas que entra a les aigües profundes pels pols i que acaba fixant-se al fons del mar. El carboni a l'oceà ve determinat en primera instància pels processos biològics, que es desenvolupen sobretot a la zona superficial d'aigües menys denses. A través de la fotosíntesi, els organismes prenen el carboni inorgànic dissolt a l'aigua i manufacturen tant components inorgànics (com els carbonats de les closques de les cocolitoforals) com matèria orgànica, que proporciona energia a la cadena alimentària marina i, així, la densa aigua profunda és més rica en carboni inorgànic dissolt que l'aigua superficial. Moltes de les substàncies creades mitjançant aquest mecanisme passen a les zones profundes en forma de restes fecals i organismes morts. Els materials experimentalment aleshores remineralització i descomposició bacteriana i una petita fracció es diposita al fons. Aquest mecanisme que transporta carboni des de la zona superficial a la zona profunda i que està directament relacionat amb la vida es coneix com a bombeig biològic. S'acostuma a avaluar que la transferència de

material orgànic des de la superfície fins a l'oceà profund representa d'un 15 a un 20% de la producció primària, és a dir, de la quantitat de carboni assimilat mitjançant la fotosíntesi menys el que és alliberat per la respiració dels organismes.

Globalment la quantitat de carboni que es transporta a les capes profundes de l'oceà tant en forma de partícules orgàniques com de carboni dissolt, segons les darreres dades, és d'unes 0,2 GtC per any (Ciais *et al.*, 2013). Una part de la incertesa d'aquesta xifra rau en la magnitud del bombeig biològic, ja que en les zones polars és on segurament es produeixen un seguit de fenòmens que poden influenciar de forma substancial la xifra suara esmentada. En efecte, als afloraments⁴ que es donen a les zones polars, l'aportació de nutrients no és el factor limitant de la producció primària com a la resta del planeta, sinó que el factor important és la radiació solar disponible a l'aigua que depèn, naturalment, de l'extensió del mar de gel. Per tant, una reducció substancial de la capa de gel deguda a l'escalfament a les latituds altes podria augmentar la producció biològica i incrementar el flux de carboni a les aigües profundes, malgrat que una major temperatura de l'aigua reduiria, a la vegada, la tendència de l'aigua freda a enfonsar-se. Una altra part de la incertesa prové d'estimacions recents de la quantitat de carboni orgànic dissolt als oceans que indiquen que les quantitats utilitzades fins fa poc temps la subestimaven en un factor 2, és a dir, que hi hauria el doble de carboni del que es pensava.

El cicle del carboni terrestre també té com a element essencial la producció primària per les plantes que prenen carboni inorgànic del CO_2 i produeixen matèria orgànica, proporcionant energia química a la cadena alimentària. Els ecosistemes terrestres, en canvi, retornen el carboni a l'atmosfera per la respiració, els focs i la descomposició. S'han realitzat considerables esforços per determinar en tot el planeta la productivitat biològica i, a partir d'aquesta determinació, avaluar els balanços individuals dels ecosistemes més rellevants i llur hipotètiques reaccions als canvis ambientals.

La producció primària neta de la vegetació terrestre, és a dir, la quantitat de carboni que

s'absorbeix com a conseqüència del desenvolupament de la vegetació, es calcula que és d'unes 60 GtC per any (Ciais *et al.*, 2013). En un termini de pocs anys aquest carboni pràcticament torna a l'atmosfera per descomposició de les restes orgàniques, ja sigui dels detritus o bé del carboni actiu del sòl, és a dir, la petita fracció del carboni del sòl que juntament amb els organismes associats tenen un intercanvi relativament actiu amb l'atmosfera. Per estudiar les implicacions que els eventuais canvis ambientals produeixen sobre el balanç de carboni global convé estudiar individualment alguns dels ecosistemes més importants. Per exemple, el bosc humit tropical tarda menys d'un any a tornar a l'atmosfera el carboni absorbit, mentre que els boscos en altes latituds triguen diverses dècades. Els sòls contenen tant carboni actiu com dipòsits de carboni que no estableixen intercanvis amb l'atmosfera. L'activitat de la matèria orgànica dels sòls varia amb la fondària, la textura, el clima i la química de la matèria orgànica. Per exemple, com més pròxima es troba a la superfície, més fàcilment es descompon i, per tant, major és l'impacte sobre el cicle del diòxid de carboni. D'altra banda, hi ha sòls que contenen grans quantitats de carboni i que tenen uns ritmes d'intercanvi amb l'atmosfera molt petits, però que, en canvi, contínuament estan canviant. Globalment les turbes i els aigüamolls acumulen de 0,1 a 0,3 GtC de carboni cada any; els deserts acumulen quantitats molt inferiors: 0,01 GtC per any en la forma de carbonats.

El balanç entre aquests processos, assimilació per la fotosíntesi i alliberament de diòxid de carboni pels organismes i pels materials del sòl, determina la magnitud de l'intercanvi de carboni entre l'atmosfera i els sistemes terrestres de la Terra. En general es pensava que en períodes inferiors a deu anys, regionalment els fluxos de carboni no es compensaven, però que en períodes llargs els ecosistemes absorbi- en la mateixa quantitat de carboni que emetien a l'atmosfera. A més, s'havien de tenir en compte els processos associats als focs i l'erosió. Les anàlisis recents semblen indicar que globalment la biosfera absorbeix 2,6 GtC per any (Ciais *et al.*, 2013). Tanmateix, tampoc el balanç positiu no és regular a tots els indrets

⁴ Un aflorament és la circulació d'aigua a l'oceà, de baix cap a dalt. S'acostuma a relacionar amb una gran activitat biològica.

del globus. Així, als tròpics és negatiu, és a dir, s'emet més carboni que no pas s'absorbeix, mentre que a les latituds mitjanes i altes hi ha una absorció neta. Les causes són: augment i creixement dels boscos de les latituds mitjanes i altes (0,5-0,9 GtC/any), major creixement de la vegetació a causa d'una concentració de CO₂ més gran a l'atmosfera (0,5-2,0 GtC/any) o de la deposició del nitrogen (0,5-1,0 GtC/any) i, finalment, degut a les anomalies del clima (0-2,0 GtC/any).

És difícil de predir el futur paper de la biosfera terrestre en el control de les concentracions de CO₂ atmosfèric, ja que no es coneix amb certesa quin dels processos és dominant. En principi, l'augment cert del CO₂ atmosfèric produirà un efecte de fertilització que sembla que induirà l'augment de l'emmagatzematge de carboni. També es pot pensar, però, que aquest procés pot arribar a una saturació i que, per tant, increments addicionals de diòxid de carboni no comportaran graus de creixement més grans dels vegetals en la biosfera (Peñuelas *et al.*, 2017).

El diòxid de carboni no té elements propis a l'atmosfera que el produeixin ni que l'eliminin amb facilitat. Per això té un temps de residència mitjà difícil de mesurar però que, en qualsevol cas, és relativament llarg —d'uns deu anys. La circulació de l'aire a la troposfera n'homogeneïtza la distribució de tal forma que podríem dir que, malgrat que en unes zones s'emet més i en d'altres s'absorbeix amb més eficiència, la composició global de l'atmosfera de diòxid de carboni és homogènia.

Hi ha moltes dades que justifiquen per què el continu augment de CO₂ de l'atmosfera es deu a les activitats humanes i, en concret, a l'ús de combustibles fòssils. La primera és que l'O₂ atmosfèric està disminuint amb la mateixa taxa que les emissions de CO₂. La segona és que la major part de CO₂ té la signatura del carbó fòssil: manca de ¹⁴C i una quantitat molt reduïda de ¹³C. La tercera justificació és que l'augment de CO₂ es dona, sobretot, a l'hemisferi nord, que és on hi ha la major part d'ús dels combustibles fòssils.

Canvis en alguns ritmes vitals a la biosfera

Els cicles de vida de la major part d'organismes estan fortament influenciats per la temperatura i la precipitació. Per això els éssers vius són indicadors dels canvis ambientals en general i del canvi del clima en particular. Hi ha evidències a tot el món (IPCC, 2001) que mostren que diversos éssers vius exhibeixen canvis per-

ceptibles que, de forma genèrica, es poden mostrar com a desplaçaments vers el nord i moviments cercant hàbitats a major altura, a les zones muntanyoses, o bé canvis en els períodes d'aparellament. Naturalment, no hi ha una única causa atribuïble a aquests desplaçaments, ja que la intervenció antròpica a l'ambient no es limita únicament a la pertorbació del clima, sinó que hi ha canvis importants en la intervenció en els ecosistemes (freqüentació, aïllament, pol·lució, canvis dels usos dels sòls, introducció d'espècies exòtiques, caça, etc.) que influeixen els comportaments de les espècies. Els nombrosos canvis identificats no es poden confondre, en la majoria de casos, amb migracions associades a canvis ràpids de les condicions ambientals, que són molt més variats.

En el regne animal els canvis més comuns són en el nombre dels animals que ocupen una determinada zona i en l'extensió d'aquesta àrea de distribució; pel que fa als invertebrats hi ha una dispersió identificada d'insectes cap a àrees favorables com a resultat del canvi del clima. En particular hi ha estudis molt interessants respecte de l'abast i els canvis fenològics en papallones. Alguns d'aquests estudis s'han realitzat a Europa (Mills *et al.*, 2017) i a Catalunya (Donoso *et al.*, 2016), on es varen analitzar 12 espècies de papallones i 17 espècies de plantes durant el període del 1996 al 2012. Es varen mesurar canvis fenològics en 10 de les 17 espècies vegetals i canvis de diferent magnitud, depenent de l'espècie, en la data de vol de les papallones en funció de canvis ambientals lligats al canvi climàtic. En condicions d'aridesa primaveral l'afectació fenològica a les plantes és més intensa en les plantes que en les papallones, i els autors no poden establir una única tendència a l'hora de descriure les asincronies entre les papallones i les plantes. Aquestes variacions s'han relacionat amb els canvis climàtics mitjans a la regió estudiada en la temperatura dels mesos de febrer, març i juny, si bé no s'ha mesurat una tendència genèrica anual del registre de temperatura ni del de precipitació. Catalunya, a més, compta amb l'aixopluc del Servei Meteorològic de Catalunya de la Xarxa Fenològica de Catalunya, que pretén reunir i aplegar observacions fenològiques molt diverses a tot el territori, assegurant-ne la qualitat i la difusió.

Els amfibis i els rèptils poden ser especialment sensibles als canvis del clima associats específicament als canvis en la humitat. La tendència general, tot i que encara no és gaire clara a què es deu, és el declivi de moltes espè-

es. Pel que fa a les aus s'han mesurat canvis en els hàbitats i en els hàbits migratoris, de manera que arriben als seus llocs de cria abans a la primavera, i marxen més tard a la tardor, així com, en alguns casos, en la grandària i el nombre d'ous.

En tots els casos un aspecte important que s'ha de tenir en compte és la sincronització de diferents processos que es donen en els ecosistemes. Aquesta sincronització té a veure amb la interrelació entre els processos i les espècies que es donen en els ecosistemes. Si tradicionalment el principal aliment d'una determinada espècie d'ocell migratori quan arriba a un lloc és una larva i aquesta, com a resultat dels canvis ambientals, avança el seu desenvolupament, pot passar que quan l'ocell arribi al lloc on sempre trobava el seu aliment, aquest sigui molt escàs o simplement inexistent. Els impactes que aquests tipus de transformacions puguin produir sobre una determinada espècie sempre depenen de la capacitat i la rapidesa d'adaptació dels ecosistemes i les espècies a les condicions canviants.

Naturalment, els bioindicadors no es limiten al regne animal, sinó que s'estenen també als vegetals. En un estudi dut a terme a Catalunya (Peñuelas *et al.*, 2002), a Cardedeu (Barcelona), en una zona on la temperatura anual ha crescut 1,4 °C durant el període d'estudi (1952-2000), es mostra com a nombroses espècies de plantes els surten les fulles 16 dies abans, els cauen 13 dies més tard, floreixen 6 dies abans i els fruits els surten 9 dies abans. Això vol dir, en definitiva, que s'allarga el temps de creixement de les plantes.

Per tant, malgrat que els éssers vius estan afectats per múltiples factors ambientals, les correlacions que es donen respecte dels seus canvis de comportament dels processos vitals i els canvis climàtics, sobretot lligats a la temperatura i a la humitat, permeten donar suport al fet que són indicadors de canvi climàtic.

Els sòls

Els sòls alliberen gasos amb efecte d'hivernacle com a resultat de la seva variada activitat metabòlica i, a la vegada, tenen capacitat per retenir-los i transformar-los (Alcañiz *et al.*, 2016). D'altra banda, el canvi d'usos del sòl, a causa de les activitats humanes, però també com a conseqüència de canvis ambientals, és la causa de l'alliberament de gasos amb efecte d'hivernacle i, per tant, d'incidència en la magnitud i intensitat de l'escalfament de l'atmosfera.

Les característiques del sòl estan determinades per la interacció de moltes variables,

com el material base de què està format, el clima, els organismes, el relleu i el temps. La força i la interacció d'aquestes variables són diferents arreu, i es donen molts tipus diferents de sòls, els quals constitueixen la base d'hàbitats diferents caracteritzats cadascun d'ells per diferents productivitats de matèria vegetal.

Els canvis climàtics poden afectar processos crucials que caracteritzen la capacitat d'un determinat sòl de sustentar una determinada espècie o cultiu agrícola. L'extensió de les modificacions dels sòls pot tenir conseqüències en la futura distribució de fauna i flora, encara que el temps característic dels canvis és més lent que el dels canvis atmosfèrics i de la biosfera. La temperatura pot representar un paper clau en la velocitat de reacció de moltes reaccions importants pel sòl, mentre que la humitat és una variable important per caracteritzar els ritmes de difusió i, per tant, de transport dels nutrients minerals a les plantes, i de la majoria de processos químics que poden experimentar els materials primaris.

En el sòl el carboni es troba en formes molt diverses i amb graus d'estabilitat molt variats i que configuren temps de residència que van des de dies fins a mil·lennis. La importància del sòl rau també en la seva faceta com a reservori de carboni, ja que conté més carboni que l'atmosfera i la biosfera junts. La quantitat de carboni al sòl procedent de la matèria orgànica és de l'ordre de 1.550×10^{12} kg. El contingut de carboni dels sòls està determinat pel balanç entre les entrades i les emissions degudes a la descomposició de la matèria orgànica de carboni. L'entrada anual de carboni ve donada per la producció primària neta (PPN) menys les fraccions de carboni que s'extremen del sistema, com la pèrdua deguda als focs, la respirada pels herbívors o l'emmagatzemada en incrementar-se els volums de fusta. En general, el contingut de carboni orgànic al sòl augmenta amb la precipitació i és major en climes humits i freds. El carboni inorgànic, en canvi, té més importància en sòls corresponents a zones àrides o semiàrides. Es calcula que els sòls contenen 750×10^{12} kg de carboni inorgànic.

Els canvis de les condicions climàtiques i dels usos del sòl afecten generalment tant la PPN com la descomposició de la matèria orgànica. Així, probablement, tant la descomposi-

ció de matèria orgànica com la PPN augmenten amb la temperatura, de la mateixa forma que tots els processos d'origen microbiològic són afectats per la humitat i la temperatura. La respiració del sòl, en balanços anuals, i, com a conseqüència, l'increment de la descomposició de matèria orgànica, augmenta a causa de l'allargament de les estacions càlides, i el seu augment és superior al de la PPN. Per tant, tot i que la producció primària neta global creix amb l'escalfament global, l'emmagatzematge de carboni per part del sòl disminueix com a conseqüència de l'escalfament global.

El nitrogen entra als sòls com a conseqüència de la fertilització mitjançant nitrogen inorgànic, a causa de la deposició seca i humida des de l'atmosfera o mitjançant la fixació biològica. El nitrogen també s'introdueix al sòl a partir de la descomposició microbiana de la matèria orgànica. El nitrogen mineral és absorbit per les plantes o reabsorbit pels microorganismes del sòl, es cola a les aigües superficials i subterrànies o s'emet a l'atmosfera en forma gasosa. Tots aquests processos estan influenciats fortament per la temperatura, la humitat, les característiques de les plantes i, indirectament, per les concentracions de CO_2 atmosfèric.

Els sòls naturals emeten per any 6×10^9 kg d'òxid nítric i els sòls conreats $3,5 \times 10^9$ kg. Conjuntament, emeten més de la meitat d'emissions de N_2O , gas amb efecte d'hivernacle, a l'atmosfera. La major part de la concentració de N_2O s'atribueix al major conreu de lleguminoses i a l'ús de fertilitzants de nitrogen. Els sòls també emeten cada any 12×10^9 kg d'altres òxids de nitrogen. Nombroses variables ambientals, com la temperatura del sòl o el contingut d'aigua, i les pràctiques agrícoles, com el règim de fertilització, els mètodes de cultiu, i els sistemes de sembrat, influeixen els processos biològics responsables de les emissions de nitrogen.

Tanmateix, a l'hora de fer una valoració global de l'impacte de concentracions atmosfèriques de CO_2 més elevades, cal tenir present que encara que les condicions climàtiques i atmosfèriques siguin més favorables per al desenvolupament de les plantes, la disponibilitat dels nutrients és certament el factor que finalment imposa el desenvolupament vegetal.

En condicions climàtiques adverses és justament el contrari. Conseqüentment, la producció primària neta i el carboni total emmagatzemat pels sistemes amb limitacions de nutrients estan menys afectats pel canvi climàtic que aquells sistemes amb excés de nutrients.

La deposició de nitrogen i sofre⁵ en moltes regions industrials i agrícoles ha augmentat. Això ha comportat millores en la producció primària neta de molts ecosistemes que són deficitaris de nitrogen, especialment a les altes latituds.

A l'engròs, pot dir-se que les probables modificacions que el canvi climàtic pugui produir sobre els sòls són conseqüència de la reducció o el manteniment de les precipitacions. Allí on es produís aquesta circumstància, en augmentar la temperatura augmentaria també l'aridesa i la salinització dels sòls. Això disminuiria la coberta vegetal i, com a conseqüència, l'aportació de matèria orgànica, la qual cosa conduiria a la desertificació. A les zones mediterrànies és previsible que es donin circumstàncies similars amb una creixent mineralització i pèrdua de vegetació, cosa que afavorirà els riscos d'erosió i la disminució de la infiltració de l'aigua.

D'altra banda, els sòls mediterranis, especialment els que són pobres en carboni, tenen una moderada capacitat d'absorbir carboni atmosfèric i, per tant, de fixar-lo, convertint-se en embornals de carboni. A les zones mediterrànies el factor clau que determina la viabilitat d'aquest procediment és el rec. Si els sòls tenen suficient abastament d'aigua poden convertir-se en embornals nets de CO_2 i, per tant, compensar, parcialment, el contingut creixent de CO_2 a l'atmosfera.

La biodiversitat i el canvi climàtic

Hi ha la idea generalitzada que, en termes generals, el canvi climàtic afectarà de forma negativa la biodiversitat. Sovint, en parlar de biodiversitat s'ajunten conceptes que no necessàriament són els mateixos, com la biodiversitat genètica (la varietat genètica d'una població), la biodiversitat d'espècies (la varietat d'espècies que hi ha en una zona) o la biodiversitat del paisatge (els diferents ecosistemes que hi ha en una zona).

La biodiversitat disminueix, en termes ge-

⁵ Les de sofre darrerament han disminuït com a conseqüència de polítiques sobre el contingut de sofre dels combustibles.

nerals, com a conseqüència de moltes pressions, com són els canvis d'usos del sòl, la destrucció i la fragmentació d'hàbitats naturals, la presència d'espècies exòtiques, els tractaments químics i mecànics que es duen a terme als entorns agrícoles, etc. Hi ha registrats casos on hi ha hagut un augment local de la biodiversitat, però sovint ha estat a causa de la introducció intervinguda d'espècies, el resultat de la qual encara és obscur. Tots aquests processos són independents del canvi del clima, però convé tenir en compte com el canvi climàtic poc frenar o accelerar la pèrdua de la biodiversitat que s'està donant actualment.

L'augment de la deposició de nitrogen i del CO₂ atmosfèric afavoreix grups d'espècies que comparteixen característiques fisiològiques amb algunes espècies invasores, cosa que provoca la impressió que el canvi global les afavoreix. En altres casos se n'ha estudiat les conseqüències en determinades espècies vegetals, tradicionalment adaptades a l'ús eficient

d'ambients pobres en nitrogen i dels animals que se n'alimenten, que es troben en un context en el qual, com a resultat de les activitats humanes, s'ha doblat l'entrada de nitrogen al cycle vital. En aquests casos es preveu una disminució de la biodiversitat. Altres estudis (Sala *et al.*, 2000) mostren que els ecosistemes mediterranis probablement experimentin els majors canvis de la seva biodiversitat, ja que en aquesta àrea geogràfica actua la major part de motors del canvi, mentre que en altres ecosistemes situats en altres àrees geogràfiques, com als països del nord i del centre d'Europa, la biodiversitat canviarà molt menys, ja que totes les transformacions importants al seu voltant ja fa temps que s'han produït.

També s'estudia com els canvis en la fenologia d'alguns ecosistemes afecten la biodiversitat. Les migracions d'aus poden perdre la sincronia amb la floració de determinades espècies de plantes i amb la presència majoritària de determinats insectes. Les conseqüències

de la manca de sincronia naturalment incidiran en la biodiversitat de l'ecosistema, però la magnitud i el ritme d'aquesta incidència, ara per ara, encara són poc clars.

Conclusions

L'escalfament de l'atmosfera com a conseqüència de la concentració creixent de gasos amb efecte d'hivernacle altera significativament les condicions ambientals arreu. Aquesta alteració incideix notablement en tot allò que es dona a la superfície terrestre i, per tant, en la seva biologia. Tanmateix, les característiques de la biosfera també incideixen notablement en els balanços de carboni i, per tant, en la magnitud dels canvis. En aquest breu resum hem intentat aportar una visió directa i concisa d'alguns d'aquests acoblaments, sobre alguns dels quals s'estan desenvolupant intensos esforços de recerca.

Bibliografia

- ALCAÑIZ, J. M. [et al.] (2016). «Sòls». A: *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*, IEC, Generalitat de Catalunya, Barcelona, 2016.
- BANQUÉ, M. [et al.] (2014). «C-Bosc: Projeccions dels estocs i de la capacitat d'emmagatzemament de carboni a Catalunya fins al 2050». CREA.
- BETTS, R. A. [et al.] (2016). «El Niño and a record CO₂ rise». *Nat. Clim. Change* 6:806–810.
- CIAIS, P. [et al.] (2013). «Carbon and Other Biogeochemical Cycles». A: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P.M. (ed.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Regne Unit i Nova York, Estats Units.
- DONOSO, I. [et al.] (2016). «Phenological asynchrony in plant-butterfly interactions associated with climate: a community-wide perspective». *Oikos* 125: 1434–1444.
- IPCC (2001). «Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change». Edited by MCCARTHY, J. J.; CANZIANI, O. F.; LEARY, N. A.; DOKKEN, D. J.; WHITE, K. S. Cambridge University Press, Cambridge, Regne Unit i Nova York, Estats Units. 1.032 p.
- IPCC (2014). «Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change» [Core Writing Team, PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (ed.)]. IPCC, Ginebra, Suïssa, 151 p.
- MILLS, S. C. [et al.] (2017). «European butterfly population vary in sensitivity to weather across their geographical ranges». *Glob. Ecol. Biogeogr.* 26: 1374–1385.
- PEÑUELAS, J. [et al.] (2002). «Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region». *Glob. Chang. Biol.* 8: 531–544.
- PEÑUELAS, J. [et al.] (2016). «Impactes del canvi climàtic sobre els ecosistemes terrestres catalans». A: MARTÍN VIDE, J. (Coord.). *Tercer Informe sobre el canvi climàtic de Catalunya*, IEC, Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- PEÑUELAS, J. [et al.] (2017). «Shifting from a fertilization-dominated to a warming-dominated period». *Nat. Ecol. Evol.* 1(10): 1438–1445.
- PETERS, G. P. [et al.] (2017). «Towards real-time verification of CO₂ emissions». *Nat. Clim. Change* 7: 848–850.
- SALA, O. E. [et al.] (2000). «Biodiversity: global biodiversity scenarios for the year 2100». *Science* 287: 1770–1774.
- VAYREDA, J. [et al.] (2016). «Balanç de carboni: els embornals a Catalunya». A: MARTÍN VIDE, J. (Coord.). *Tercer Informe sobre el canvi climàtic de Catalunya*, IEC, Generalitat de Catalunya, Barcelona.