



2. Constatacions biològiques del canvi climàtic a Catalunya

Josep Peñuelas, Iolanda Filella, Marc Estiarte, Romà Ogaya, Joan Llusà, Jordi Sardans, Alistair Jump, Martín Garbulsky, Marta Coll, Maria Díaz de Quijano, Roger Seco, Josep Salvador Blanch, Sue Owen, Jorge Curiel, Jofre Carnicer, Martí Boada, Constantí Stefanescu, Francisco Lloret, Jaume Terradas.
Universitat Autònoma de Barcelona

Canvis en els cicles vitals i conseqüències en les comunitats i els ecosistemes catalans

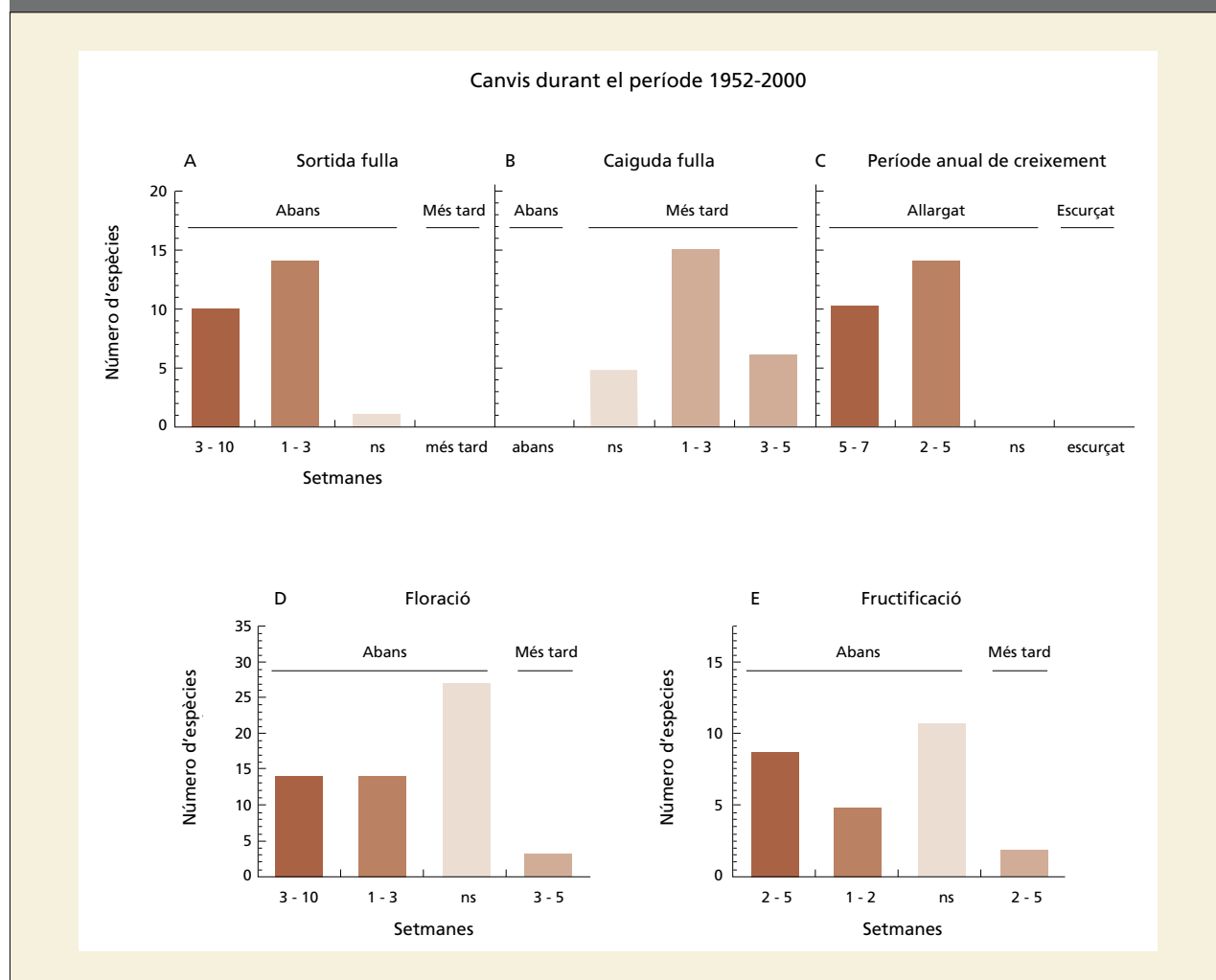
La nostra activitat i l'activitat de tots els organismes vius està fortament influïda per la temperatura. No podem esperar altra cosa que alteracions d'aquesta activitat en escalfar-se el país per sobre d'1 °C. No ens ha d'estranyar, així doncs, que l'escalfament s'hagi traduït ja en canvis significatius en els cicles vitals de plantes i animals. Recordem que el pas per les diferents fases d'aquests cicles depèn, entre d'altres factors, de la temperatura acumulada, del que els biòlegs anomenem graus dia, és a dir, del total d'energia requerida per un organisme per a desenvolupar-se i passar d'un estadi a l'altre del seu cicle vital. Les evidències d'aquestes alteracions en els cicles vitals són fàcilment observables per tots els que segueixin la natura i tinguin uns quants anys, i de fet ja s'han descrit a diverses regions de tot el món, des dels ecosistemes freds i humits fins als càlids i secs, tot observant els registres fenològics disponibles. Aquests canvis fenològics (fenologia és la ciència que estudia la temporalitat de les diferents fases dels cicles vitals dels organismes) s'han convertit en el símptoma més clar que el canvi climàtic ja afecta la vida.

El nostre país és un dels llocs on els canvis fenològics observats són més importants. Però d'observacions com les que s'han trobat aquí també n'hi ha, amb resultats comparables, arreu del món, tot i que predominin als països rics, amb un nombre més gran d'investigadors i més tradició científica. Aquí, a Catalunya, les fulles dels arbres surten ara de mitjana uns 20 dies abans que no pas fa una cinquantena d'anys. Per exemple, la pomera, l'om o la figuera sembla que treuen les fulles amb un mes d'antelació, i l'ametller i el pollancre, uns 15 dies abans, encara que n'hi ha d'altres, com el castanyer, que semblen immutables al canvi de temperatura (segurament són més dependents d'altres factors com ara el fotoperíode o la disponibilitat hídrica). D'altra banda, les plantes també floreixen i fructifiquen de mitjana 10 dies abans que fa 30 anys (figura 1). I els cicles vitals dels animals també són alterats. Per exemple, l'aparició d'insectes com les papallones, que passen pels diferents estadis larvaris més ràpidament en resposta a l'escalfament, s'ha avançat per terme mitjà 11 dies. Els amants de les papallones ho hauran notat. Apareixen abans, són més actives i allarguen el seu període de vol. Tota aquesta activitat prematura de plantes i animals pot posar-los en perill per les gelades tardanes. Però la freqüència d'aquestes gelades també ha canviat; ha disminuït en aquest ambient cada cop més calent. A molts indrets el nombre de gelades anuals ha disminuït a un terç des de fa 50 anys fins ara, i per tant també ha disminuït el risc de malmetre fulles i flors joves. Respostes similars en l'avançament de les fenofases de plantes i animals (invertebrats, amfibis, ocells...), d'uns 3-4 dies per dècada a la primavera, han estat descrites darrerament a molts altres indrets del planeta, de manera que aquest sembla que és un fenomen general, amb la variabilitat regional, local i específica pròpia de tot fenomen biològic.

Tots aquests canvis fenològics no són simples indicadors del canvi climàtic. Tenen una importància ecològica crítica, ja que afecten l'habilitat competitiva de les diferents espècies, la seva conservació i, per tant, l'estructura i el funcionament dels ecosistemes. Com que la natura no és homogènia, les respostes a l'escalfament són diferents depenent de l'espècie (i àdhuc dels individus). Aquestes respostes diferents al canvi climàtic poden

produir importants dessincronitzacions en les interaccions entre les espècies, per exemple entre les plantes i els seus pol·linitzadors, o entre les plantes i els seus herbívors, i alterar així l'estructura de les comunitats. Un exemple paradigmàtic de les dessincronitzacions entre nivells tròfics el tenim en el que passa en els ocells migratoris. El canvi climàtic sembla que també ha alterat els seus hàbits. Atès l'avançament en la floració i la fructificació de les plantes i en l'aparició dels insectes, i, per tant, l'avançament en la disponibilitat de menjar per als ocells, es podria esperar una arribada més primerenca dels ocells migratoris. I, malgrat tot, l'arribada d'alguns ocells tan comuns i populars com el rossinyol, l'oreneta, el cucut o la guatlà sembla que s'està retardant, almenys en algunes localitats de Catalunya, de mitjana dues setmanes respecte a fa trenta anys. El retard segurament és determinat pel canvi climàtic al lloc des d'on parteixen, les regions subsaharianes, o a les regions que travessen en la seva ruta migratòria. Així, la sequera i la desforestació del Sahel, i la consegüent manca d'aliment, poden dificultar la preparació del seu viatge i afavorir aquesta arribada més tardana. Tots aquests canvis poden representar una amenaça per a alguns ocells migratoris que arriben en un moment inapropiat per explotar l'hàbitat, ja que han de competir amb les espècies que s'han quedat durant l'hivern i es troben en un estat competitiu millor. De fet, el declivi en el nombre d'aquests ocells migratoris que arriben a Europa en els darrers anys en pot ser una conseqüència. D'altra banda, hi ha espècies abans migratòries que aprofiten que el nostre hivern és cada vegada més suau i ja no se'n van de la península. Aquest és el cas de la puput o de les cigonyes.

Figura 1. Freqüència d'espècies vegetals amb fenologia alterada durant les darreres cinc dècades (des del 1952 fins al 2000) a Cardedeu (Vallès Oriental). (ns: no significant estadísticament) (Peñuelas et al., 2002).





Quan ens mirem els canvis fenològics a escala global ens trobem amb alteracions tan importants com ara l'augment del 20% de l'activitat biològica del nostre planeta en els últims 30 anys per causa en gran part d'aquest allargament fenològic del període productiu. Ho apreciem tant en les imatges dels satèl·lits d'observació de la Terra, com en les dades de concentració atmosfèrica de CO_2 . Per al seguiment de les masses vegetals des de l'espai s'empra un índex de vegetació normalitzat, l'NDVI. Aquest índex es basa en el quocient entre la radiació infraroja i la roja que la superfície terrestre reflecteix cap a l'espai. Com més gran és aquest quocient, més gran és la biomassa verda. Doncs bé, aquest NDVI corrobora les dades fenològiques dels observadors terrestres i mostra com en els darrers 20 anys l'estació de creixement dels vegetals s'ha allargat 18 dies a Euràsia i això s'ha traduït en un augment de la biomassa verda, com a mínim a latituds superiors a 40° . L'increment de la productivitat vegetal de les darreres dècades, que havíem atribuït a l'efecte fertilitzador del CO_2 i de les deposicions de nitrogen, pot ser degut també en part a aquest augment de temperatura i a aquest allargament de l'estació de creixement (activitat vegetativa).

Tot això també és corroborat per les dades de concentració atmosfèrica de CO_2 , que ens mostren un augment de l'amplitud i un avançament de l'oscil·lació estacional de CO_2 en les últimes dècades a causa de la disminució primaveral més forta de la concentració de CO_2 . Aquest allargament de l'estació de creixement té un paper molt important en la fixació global del carboni, la quantitat de CO_2 de l'atmosfera, i en els cicles de l'aigua i del nutrients i, per tant, té conseqüències molt importants en el funcionament dels ecosistemes i en el balanç de carboni, ara tan important a la llum dels protocols de Kyoto.

Altres canvis en els nostres ecosistemes en resposta al canvi climàtic

Els ecosistemes terrestres catalans presenten una gran variabilitat climàtica, una complexitat topogràfica important, uns gradients molt marcats en els usos del sòl i en la disponibilitat d'aigua, i una gran biodiversitat. Segurament per tot això són especialment sensibles als canvis atmosfèrics i climàtics, i als canvis en usos del sòl, demogràfics i econòmics.

El canvi climàtic augmenta l'estrès hídric de la nostra vegetació, la qual sovint ja viu al límit de les seves possibilitats, com en el cas d'alguns alzinars i pinedes que tenen taxes d'evapotranspiració quasi iguals que les de precipitació (90% al bosc de Poblet per exemple). A més a més d'accentuar la poca disponibilitat d'aigua, l'escalfament accentua altres trets característics dels nostres ecosistemes, com ara els incendis forestals o l'emissió de compostos orgànics volàtils.

Més sequeres severes

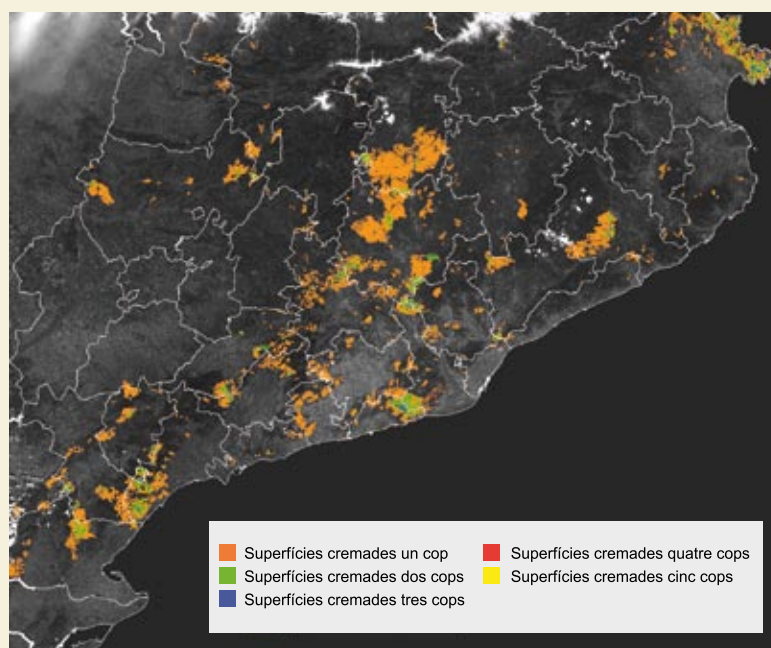
Els models GCM preveuen per al nostre país un augment de la freqüència i la intensitat dels períodes de sequera. Dels efectes de períodes càlids i/o secs en tenim exemples recents en els episodis calorosos i secs de 1986, 1994, 2003 i 2005. Cada un d'aquests episodis va afectar profundament la vegetació mediterrània. Per exemple, el que hem estudiat més a bastament, el del 1994, va danyar severament molts boscos i matollars de la península Ibèrica (en el 80% de les 190 localitats peninsulars estudiades hi havia espècies danyades). Les alzines, per exemple, es van assecar en moltes localitats de Catalunya. Estudis isotòpics amb C^{13} i N^{15} van mostrar que durant els anys posteriors aquests alzinars van romandre afectats, de manera que van fer un ús més restringit de l'aigua que tenien disponible, i es va afavorir la pèrdua dels nutrients del sòl, una conseqüència secundària greu, tenint en compte que aquests ecosistemes solen ser limitats pels nutrients (principalment fòsfor als sòls calcaris i nitrogen als silícics). La diferent severitat dels efectes sobre els diferents boscos del país va venir donada entre d'altres factors per: 1) l'orientació dels vessants (més afectació als solells); 2) la litologia del sòl (menys afectació als sòls profunds i penetrables per les arrels, com per exemple els esquists); 3) l'espècie dominant (més afectació d'alzines que de falsos aladerns, que creixen menys però són més resistents a l'embolisme, són més eficients en l'ús de l'aigua i dissipen millor l'excés d'energia), i 4) la gestió forestal (boscos aclarits menys afectats que els densos).

El grau d'afectació fou diferent també depenent del tipus funcional i de la història evolutiva de les distintes espècies. Els gèneres mediterranis, *Lavandula*, *Erica*, *Genista*, *Cistus* i *Rosmarinus*, en la seva majoria arbustius i evolucionats sota les condicions climàtiques mediterrànies, és a dir, posteriorment als 3,2 milions d'anys del Pliocè, foren aparentment més afectats per la sequera que els gèneres evolucionats amb anterioritat, *Pistacia*, *Olea*, *Juniperus*, *Pinus* i *Quercus*, majoritàriament arbres. Tot i així, els gèneres mediterranis es recuperaren molt millor després d'uns anys de més disponibilitat hídrica. Els gèneres mediterranis post-Pliocè semblen més adaptats per a respondre a un ambient no fàcilment predictable amb una gran variabilitat estacional i interanual i subjecte a pertorbacions freqüents. Entendre aquestes respostes és important per a preveure la futura composició de les comunitats i seguir el canvi climàtic.

Més incendis

Aquestes condicions més càlides i més àrides, juntament amb altres fenòmens relacionats amb el canvi global com per exemple l'increment de biomassa i d'inflamabilitat associat a l'augment de CO₂, els canvis en els usos del sòl, com ara l'abandonament de terres de cultiu seguit d'un procés de forestació i acumulació de combustible, i/o les pràctiques i activitats del creixent nombre d'«urbanites» no avesats al bosc, augmenten la freqüència i la intensitat dels incendis forestals. Els boscos i matollars mediterranis, caracteritzats per un fort eixut estival, són ecosistemes propensos als incendis. Ara bé, per tal que es produeixin els incendis, hi ha d'haver un punt d'ignició. Actualment a Catalunya només el 7% dels incendis tenen un origen natural i la immensa majoria de les ignicions són provocades per les activitats humanes, sigui per negligència, accident o intencionadament. Els incendis, que han augmentat al llarg del segle XX, ara ja constitueixen una de les pertorbacions més importants en els ecosistemes mediterranis.

Figura 2. Recurrència dels incendis forestals (>30 ha) a Catalunya entre el 1975 i el 1995 (Díaz-Delgado et al., 2002).





Més emissió de compostos orgànics volàtils

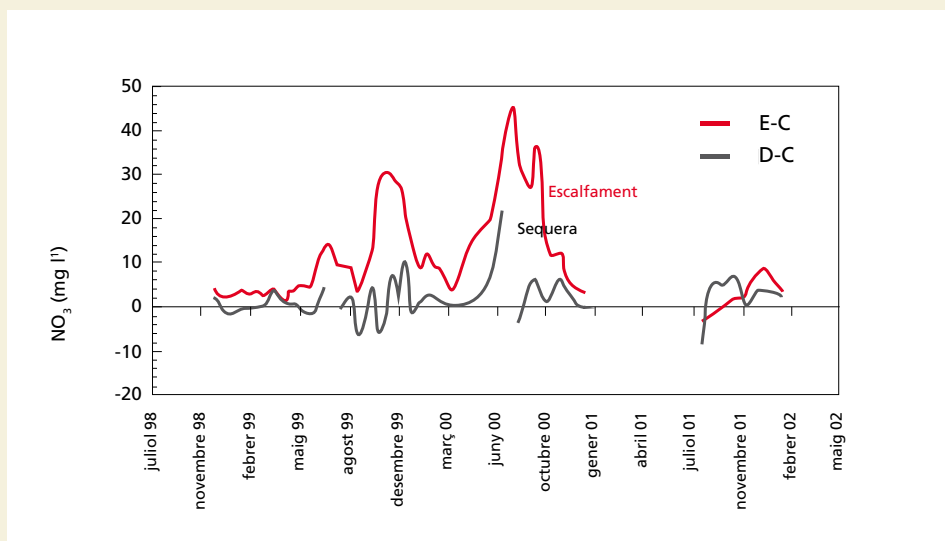
L'augment de temperatura té molts altres efectes directes sobre l'activitat dels organismes vius. Un d'important ambientalment és l'augment exponencial de l'emissió biogènica de compostos orgànics volàtils (COV). Aquestes emissions biogèniques de COV afecten la química atmosfèrica, no solament pel que fa al cicle del carboni (emissions d'unes 1.500 Tg C/any) o la formació d'aerosols, sinó pel seu paper en l'equilibri oxidatiu de l'aire (nivells de OH, NO_x, O₃...). Les emissions resulten de la difusió dels COV en un gradient de pressió de vapor des de les altes concentracions als teixits on es produeixen fins a l'aire circumdant, on les concentracions són baixes com a conseqüència de l'extrema reactivitat dels COV. Per tant, les emissions són controlades pels factors que alteren la concentració tissular, la pressió de vapor o la resistència a la difusió cap a l'atmosfera. La temperatura incrementa exponencialment l'emissió d'aquests COV en activar la seva síntesi enzimàtica i la seva pressió de vapor i en disminuir la resistència a l'emissió. D'altra banda, la sequera extrema redueix les emissions com a conseqüència de la manca de carbohidrats i ATP, i de la disminució de la permeabilitat de la cutícula en l'intercanvi gasós. Per tant, caldrà veure quin és el resultat final d'aquest antagonisme entre escalfament i sequera en quelcom tan important ambientalment com és l'emissió biogènica de COV. De moment, però, tot indica que les emissions han augmentat amb l'escalfament.

Lligada amb el canvi climàtic, una de les funcions més importants que sembla que tenen alguns d'aquests COV, com ara els terpens, en la fisiologia vegetal, és la d'actuar com a elements termoprotectors. *Quercus ilex* empraria aquests compostos com a estabilitzadors de les membranes cel·lulars i, més concretament, de les membranes íntimament relacionades amb els fotosistemes, i també com a desactivadors dels radicals oxidats per a protegir-se de les altes temperatures de l'estiu. Però a més a més de «refrigerar» la planta, aquestes emissions de COV podrien retroalimentar negativament l'escalfament del mateix clima atmosfèric, en actuar com aerosols que disminueixen la irradiància. Caldrà estudiar-ho, perquè també podrien retroalimentar positivament l'escalfament a través del seu efecte d'hivernacle directe, en absorbir la radiació infraroja, i indirecte, en allargar la vida mitjana del metà i altres gasos hivernacle. Estem davant d'un exemple més de l'important paper que tenen els ecosistemes sobre el mateix clima i el possible canvi climàtic, a part del més conegut i important efecte sobre el balanç del CO₂ a l'atmosfera.

Més nitrats a l'aigua

Recordem que els processos biogeoquímics depenen de la temperatura i que entre ells podem citar-ne un altre que ara preocupa com a component important del canvi global arreu del món i a moltes comarques catalanes en particular: la progressiva eutrofització, és a dir, l'enriquiment en nutrients, sobretot nitrats, que té lloc en el nostre país, en especial a les aigües subterrànies. Aquí va lligada en molts casos a l'excés de purins, però l'augment de temperatura, o les sequeres, no són del tot alienes a aquest fenomen. L'escalfament augmenta la mineralització, i la sequera impedeix l'ús de nutrients per part de les plantes i facilita les pèrdues del sistema quan arriben les pluges. De fet, els resultats d'estudis experimentals en matollars mostren com l'escalfament augmenta l'alliberament de nitrats en els lixiviats dels sòls rics en nitrats (figura 3). Un altre exemple d'alteració biogeoquímica el tenim en l'estimulació de la descomposició per l'escalfament. La manca d'aigua, en canvi, l'alenteix. Convindrà de nou estudiar el balanç de la interacció d'aquests dos factors sobre el cicle de la matèria i el funcionament dels nostres ecosistemes mediterranis.

Figura 3. Exemple de canvi funcional ecosistèmic produït pel canvi climàtic en un matollar de bruguerola ric en nitrats: Alliberament de nitrats a l'aigua del sòl (mg L⁻¹) en resposta a un escalfament de prop d'1 °C i a una disminució del 33% de la humitat del sòl. Es representa la diferència respecte a parcel·les control. (E-C: diferència entre escalfament i control, en roig; D-C: diferència entre sequera i control, en negre) (basat en Emmet et al., 2004).

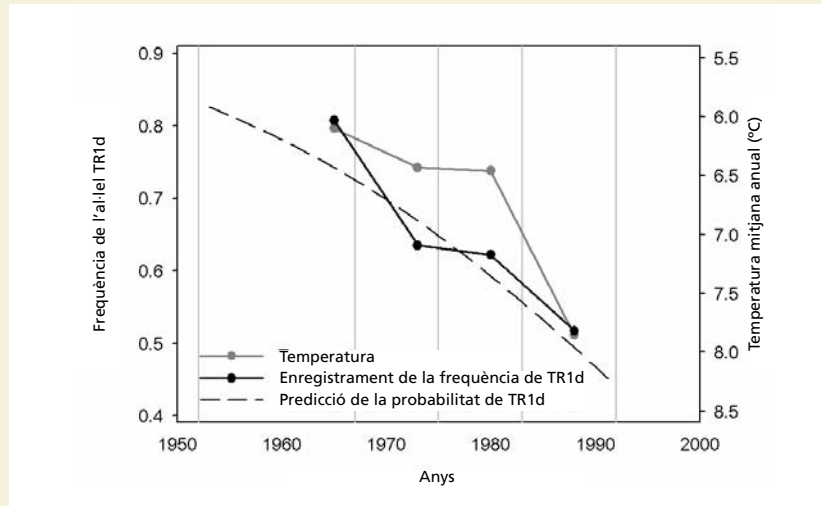


Adaptabilitat de les espècies i les poblacions als canvis

Fins a quin punt les plantes i els animals s'han adaptat a aquests canvis climàtics tan ràpids? Doncs sembla que ho han intentat amb canvis fenotípics, com ara els suara esmentats canvis fenològics, i també amb canvis genotípics en la seva descendència, és a dir, que sembla que la pressió selectiva ha fet efecte. Fins i tot plantes de vida llarga com el faig han mostrat una certa capacitat de canviar la freqüència gènica en resposta a l'escalfament de les darreres dècades (figura 4). Així ho hem comprovat al Montseny. I ho hem comprovat, també, amb més intensitat, en plantes de vida més curta com la *Fumana thymifolia* a les brolles del Garraf.



Figura 4. La freqüència de l'al·lel TR1d als faigs del Montseny ha disminuït amb el temps en paral·lel amb l'augment de temperatura (Jump *et al.*, 2006).



Però tot i així, els canvis genètics no sembla que vagin a prou velocitat per a poder adaptar les plantes al ràpid canvi climàtic de les darreres dècades. Per això, el mateix faig de les zones baixes del Montseny creix cada vegada menys. Segurament per això, els boscos catalans mostren una progressiva defoliació i decoloració en els darrers anys. Per això, l'exclusió parcial de l'aigua de pluja i de l'escoriment superficial, que generen una disminució del 15% de la humitat del sòl en un experiment dels 10 darrers anys als boscos de Prades, ha reduït el creixement diametral dels troncs el 37%, encara que no totes les espècies han resultat afectades de la mateixa manera. Algunes resulten força sensibles, com *Arbutus unedo* i *Quercus ilex*, que mostren, respectivament, un creixement diametral més baix en una proporció del 77% i del 55% en condicions de sequera, mentre que d'altres, com *Phillyrea latifolia*, no experimenten cap disminució apreciable en el creixement diametral (figura 5). La mortalitat dels individus mostra un patró semblant, ja que *Arbutus unedo* i *Quercus ilex* mostren una mortalitat més elevada que *Phillyrea latifolia*. L'experiment mostra, doncs, que lleugeres aridificacions com les que s'han viscut fins ara i com les s'han projectat per a un futur immediat, minven significativament les seves taxes de creixement i per tant la capacitat per a segrestar carboni atmosfèric d'algunes espècies. A més a més, com que no totes les espècies vegetals en resulten igualment afectades, a llarg termini hi pot haver un canvi en la composició específica del bosc. De fet, en un altre experiment també dut a terme durant els darrers 10 anys a les brolles del Garraf, s'ha vist que la sequera i l'escalfament fan disminuir el nombre de plàntules i la seva riquesa d'espècies, no tan sols de plantes (figura 6) i d'animals, sinó segurament també de bacteris i fongs (dades preliminars).

Des d'un punt de vista evolutiu, les espècies tendeixen a ser bastant conservadores i a respondre a les pertorbacions més amb la migració que amb l'evolució. A les muntanyes, les espècies poden respondre al canvi climàtic migrant verticalment distàncies curtes (per exemple, són necessaris 500 m per a contrarestar un augment de 3°C). A Catalunya, i en general a tot el planeta, ja s'han apreciat mitjançant estudis paleoecològics nombrosos desplaçaments de les àrees de distribució d'algunes espècies i formacions vegetals en resposta a canvis climàtics pretèrits. Però encara no hi ha pas gaires evidències de la resposta a l'escalfament actual. Cal recordar que aquests

processos requereixen un temps. De totes maneres, recentment, s'ha comparat la distribució de la vegetació actual del Montseny amb la de principis i de meitat del segle xx, i s'ha pogut apreciar que els ecosistemes mediterranis guanyen terreny als temperats. Les condicions progressivament més càlides i àrides, però també els canvis d'usos del sòl, principalment l'abandonament de la gestió tradicional, com ara la desaparició gairebé total dels incendis associats a la ramaderia (ara són prohibits al parc del Montseny), són a la base d'aquests canvis, en un exemple paradigmàtic de com interactuen els diferents components del canvi global.

Figura 5. Diferent resposta a la sequera (disminució del 15% de la humitat del sòl) en les tres espècies dominants de l'alzinar de Prades (basat en l'estudi d'Ogaya i Peñuelas, 2007).

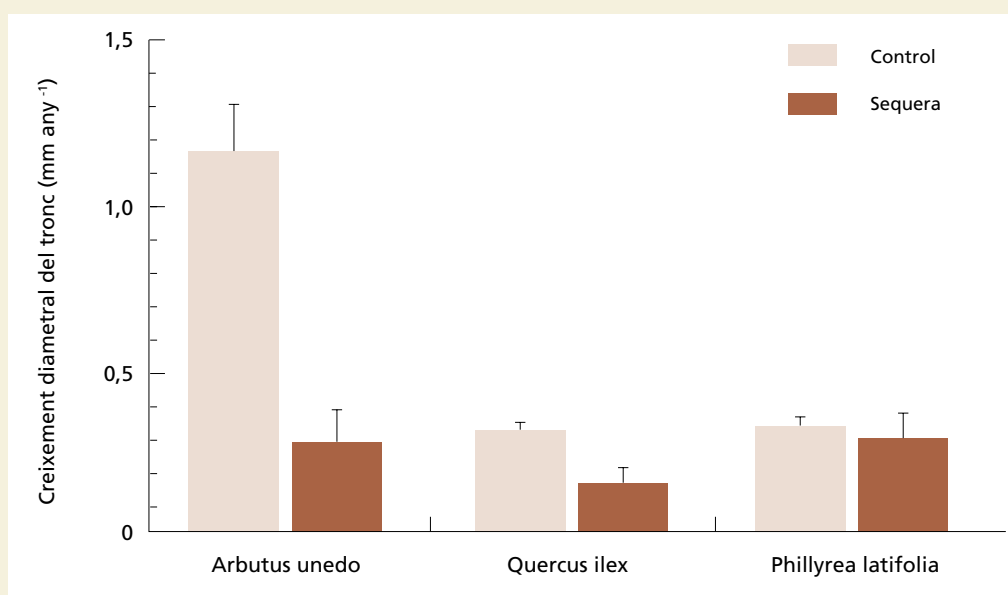
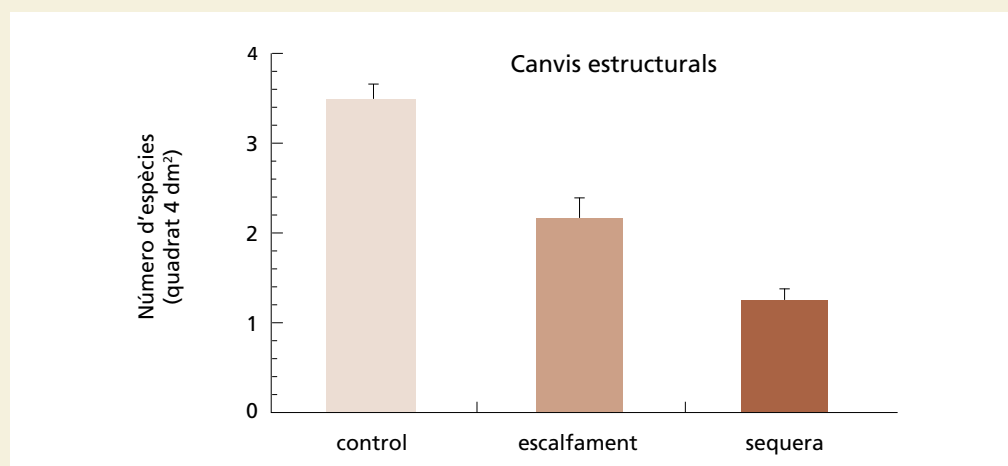


Figura 6. Exemple de canvis ecosistèmics estructurals produïts pel canvi climàtic. Disminució de la riquesa d'espècies reclutades en parcel·les de brolles mediterrànies del Garraf sotmeses a 1 °C d'escalfament o a una disminució de la humitat del sòl del 20% (basat en l'estudi de Lloret et al., 2004).





Els estudis paleoecològics suggereixen que moltes espècies vegetals poden migrar amb la rapidesa suficient per a adaptar-se al canvi climàtic, però solament si existeixen ecosistemes contigus no pertorbats, la qual cosa ens recorda la importància de la fragmentació dels ecosistemes naturals com un altre factor del canvi global. I la fragmentació és elevada a moltes contrades del nostre país. Només cal observar una fotografia aèria de les comarques de Barcelona. Pel que fa a les muntanyes, la migració cap a altituds superiors comporta una reducció concomitant en l'àrea total de cada hàbitat, per la qual cosa les espècies amb un requeriment d'àrea més elevat es poden extingir.

Figura 7. Desplaçament altitudinal de la fageda del Montseny a la carena Turó de l'Home-Les Agudes durant el darrer segle. La fageda ha esdevingut més densa a les parts altes i s'ha desplaçat per sobre la línia d'arbres amb l'establiment de nous i vigorosos individus (Peñuelas i Boada, 2003; Peñuelas et al., 2007).



Aquests efectes de l'escalfament no ens han d'estranyar, perquè és ben conegut que els règims climàtics determinen la distribució de les espècies i dels biomes a través dels llindars específics de cada espècie pel que fa a la temperatura i la disponibilitat d'aigua. I tot això no només fa referència a les plantes: els animals no hi són pas menys sensibles. Al contrari, responen més ràpidament, atesa la seva mobilitat. S'han documentat força desplaçaments d'espècies animals relacionats amb el clima, per exemple desplaçaments latitudinals cap al nord de papallones com l'*Heodes tityrus*.

Instal·lats en el canvi

El nostre país, com el nostre planeta, com l'univers, està instal·lat en el canvi. Un canvi que moltes vegades durant la història de la Terra ha estat espectacular, més que no pas el que ara coneixem com a «canvi global». De totes maneres, molts d'aquests grans canvis s'han produït a escala geològica, moltes vegades de milions d'anys, mentre que l'actual és dels especials perquè és un canvi accelerat que s'està produint en poques dècades. I és important recordar que tots els canvis biològics descrits en aquestes darreres dècades han tingut lloc amb un escalfament que només és un terç o menys del que s'ha projectat per al segle que ara hem encetat.

Referències bibliogràfiques

DÍAZ-DELGADO, R.; LLORET, F.; PONS, X.; TERRADAS, J. (2002). «Satellite evidence of decreasing resilience in Mediterranean plant communities after recurrent wildfires». *Ecology*, núm. 83, pàg. 2293-2303.

EMMET, B.; BEIER, C.; ESTIARTE, M.; TIETEMA, A.; KRISTENSE, H. L.; WILLIAMS, D.; PEÑUELAS, J.; SCHMIDT, I.; SOWERBY, I. (2004). «The responses of soil processes to climate change: results from manipulation studies across an environmental gradient». *Ecosystems*, núm. 7, pàg. 625-637.

JUMP, A.; HUNT, J.M.; MARTÍNEZ-IZQUIERDO, J.A.; PEÑUELAS, J. (2006). «Natural selection and climate change: temperature-linked spatial and temporal trends in gene frequency in *Fagus sylvatica*». *Molecular Ecology*, núm. 15, pàg. 3469-3480.

LLORET, F.; PEÑUELAS, J.; ESTIARTE, M. (2004). «Experimental evidence of seedling diversity reduction by climate change in a Mediterranean-type community». *Global Change Biology*, núm. 10, pàg. 248-258.

OGAYA, R.; PEÑUELAS, J. (2007). «Tree growth, mortality, and above-ground biomass accumulation in a holm oak forest under a five-year experimental field drought». *Plant Ecology*, núm. 189, pàg. 291-299.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; COMAS, P. (2002). «Changed plant and animal life cycles from 1952-2000». *Global Change Biology*, núm. 8, pàg. 531-544.

PEÑUELAS, J.; BOADA, M. (2003). «A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain)». *Global Change Biology*, núm. 9, pàg. 131-140.

PEÑUELAS, J.; OGAYA, R.; BOADA, M.; JUMP, A. (2007). «Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia». *Ecography*, núm. 30, pàg. 830-838.