

9 Ecosistemes terrestres

Autors

Josep Peñuelas	Oriol Grau	Laura Rico	Jennifer Albrand
Jordi Sardans	Guille Peguero	Adrià Barbeta	Chris Wheat
Iolanda Filella	Olga Margalef	Ander Achotegui-Castells	Daniel Nadal
Marc Estiarte	Sergi Pla	Albert Gargallo-Garriga	Santi Sabaté
Joan Llusà	Constantí Stefanescu	Dominik Sperlich	Carles Gracia
Romà Ogaya	Dolores Asensio	Gerard Farré-Armengol	Maria Vives
Jofre Carnicer	Catherine Preece	Marcos Fernández-	Melodia Tamayo
Mireia Bartrons	Lei Liu	Martínez	Jaume Terradas
Albert Rivas-Ubach	Aleixandre Verger	Megan Popkin	

L'equip de redactors d'aquest capítol està format per estudiants de doctorat i professors d'investigació, i la majoria d'ells estan vinculats a la Unitat d'Ecologia Global, CREAM-CSIC-UAB-UB. Aquesta unitat és un grup de recerca consolidat per la Generalitat de Catalunya que se centra a estudiar els efectes dels canvis ambientals globals i locals en els ecosistemes terrestres produïts per l'activitat humana.

Agraïments

Agraïm el finançament de gran part de la recerca aquí esmentada per la European Research Council Synergy Grant ERC-SyG-2013-610028, IMBALANCE-P, el projecte espanyol CGL2013-48074-P i el projecte català SGR 2014-274.

Sumari

Síntesi	213
9.1. Introducció	215
9.2. Respostes a escala molecular i en l'ús dels elements. Genètica, epigenètica, metabolòmica i estequiometria	215
9.3. Respostes dels organismes.....	216
9.3.1. Canvis morfològics, fisiològics, fenològics i de creixement en plantes .	216
9.3.2. Canvis morfològics, fisiològics, fenològics i de creixement en animals.	219
9.4. Canvis en poblacions i comunitats.....	219
9.4.1. Canvis en les emissions de fragàncies de fulles i flors de plantes amb efectes sobre les comunitats.....	220
9.4.2. Efectes sobre la rizodeposició, els microorganismes del sòl, la fil·losfera i l'herbivoria.....	221
9.4.3. Comunitats pertorbades i joves, les més sensibles	222
9.5. Ecosistemes, biogeoquímica i funcionament	223
9.5.1. Resposta dels alzinars a les sequeres a llarg termini	223
9.5.2. Alteracions en l'ús dels nutrients	224
9.5.3. La teledetecció de biomassa verda i com funciona	225
9.5.4. Els efectes del canvi climàtic sobre el balanç de carboni	226
9.5.5. Efectes ambientals diversos del canvi climàtic: l'exemple dels contaminants orgànics persistents	226
9.6. Què podem aprendre dels canvis climàtics del passat i dels efectes que han tingut en els boscos de Catalunya?	228
9.6.1. Desglaciació i arribada de l'Holocè	228
9.6.2. El darrer mil·lenni.....	229
9.6.3. El canvi climàtic actual	230
9.7. Impacte del canvi climàtic sobre els nostres ecosistemes terrestres previst per als pròxims decennis. Simulacions amb GOTILWA+	230
9.8. Retroalimentacions biològiques en el canvi climàtic	231
9.9. Conclusions	232
9.10. Recomanacions	232
Referències bibliogràfiques.....	234

Síntesi

El canvi climàtic produeix, i molt probablement seguirà produint, un augment de la temperatura i de la sequera al nostre país (IPCC, 2013). Si la combinació del canvi climàtic, de les perturbacions associades (per exemple, inundacions, sequeres, incendis forestals, etc.) i de les modificacions en els altres components que formen part del canvi global (sobretot les variacions de l'ús del sòl, la contaminació i la sobreexplotació dels recursos) continuen com fins ara, és probable que superin la resiliència de molts ecosistemes (IPCC, 2014) i n'alterin l'estructura i el funcionament (Peñuelas *et al.*, 2013), i això comprometrà els serveis que actualment proporcionen (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). En l'impacte del canvi climàtic, objecte d'aquest INFORME, influeixen les interaccions amb aquestes altres pressions i les mesures de gestió que s'adoptin.

A Catalunya, com arreu del planeta, s'han descrit nombroses evidències observacionals i experimentals del lligam que existeix entre el canvi climàtic i els processos biològics i fisicoquímics dels ecosistemes. L'augment de temperatures, les noves pautes de precipitacions i altres canvis climàtics ja afecten els nostres ecosistemes i, també, les nostres societats. Per exemple, és ben sabut que l'inici de la primavera s'ha avançat i l'arribada de l'hivern s'ha endarrerit, motiu pel qual el període vegetatiu s'ha perllongat uns tres o quatre dies de mitjana cada decenni en els darrers cinquanta anys.

S'ha comprovat, tant en estudis observacionals duts a terme durant els darrers decennis com en estudis experimentals d'escalfament i de sequera, que algunes espècies són més vulnerables a aquests canvis que d'altres, cosa que fa que se n'alteri l'habilitat competitiva i, en darrer terme, que canviï la composició de les comunitats i que hi hagi desplaçaments en la distribució de les espècies, com ara la migració d'espècies mediterrànies a cotes més elevades en les muntanyes del país o la disminució del nombre d'espècies en els nostres matollars. En els casos més extrems, les poblacions d'algunes espècies perllenen a causa de la sinèrgia entre l'estrès produït pel canvi climàtic, que converteix en inadequats els hàbitats on vivien, i

els canvis en els usos del sòl, com ara la fragmentació del territori, que en dificulta la migració cap a hàbitats amb condicions adients perquè puguin sobreviure.

Paral·lelament a aquests canvis estructurals, s'han descrit canvis funcionals dels ecosistemes a conseqüència de l'escalfament del planeta, com ara la disminució de l'absorció de CO₂ en períodes de sequera o un augment de la pèrdua de nutrients per la lixiviació després de les pluges. També s'han pogut observar altres alteracions a conseqüència del canvi climàtic, com ara assecades més freqüents dels boscos, un risc més alt d'incendi o l'increment de les emissions de compostos orgànics volàtils biogènics.

Aquests canvis afecten i afectaran els múltiples serveis ecosistèmics productius (el subministrament de béns naturals renovables com ara pastures, aliments o medicines, o de productes de consum com ara fusta, caça o bolets), ambientals (el manteniment de la biodiversitat, la regulació de la composició atmosfèrica i del clima, la conservació del sòl i de l'aigua, o l'emmagatzematge de carboni) i socials (usos recreatius, educatius i de lleure, valors tradicionals culturals, o el turisme i l'excursionisme). Un dels serveis que són prioritaris actualment pel que fa a les polítiques ambientals és el que es troba lligat al balanç del carboni, ja que el canvi climàtic i altres factors relatius al canvi global alteraran l'emmagatzematge de carboni als boscos, per bé que la magnitud i la direcció del canvi no són encara clars.

En els pròxims anys, i per a pal·liar tant els efectes del canvi climàtic com l'augment del CO₂ atmosfèric que l'origina, les polítiques de reforestació de les zones perturbades i de gestió de l'aforestació (colonització pel bosc) d'espais agrícoles abandonats haurien de tenir en compte les condicions climàtiques més àrides previstes per als pròxims anys i decennis. Hi destaca la minva de la disponibilitat hídrica a conseqüència tant de la disminució de les precipitacions i/o de l'augment de l'evapotranspiració potencial, com de l'increment de la demanda d'uns ecosistemes més fertilitzats per l'acció humana i d'una població en augment. La gestió dels espais forestals i dels naturals, en general, ha d'incorporar l'escala de paisatge

en la qual s'inclogui una planificació a gran escala que tingui en compte la combinació d'espais de tipus divers així com el seu ús múltiple i l'efecte de les perturbacions, com, per exemple, els incendis forestals.

Paraules clau

canvi climàtic, ecosistemes terrestres, Catalunya, serveis ecosistèmics, resiliència, gestió

9.1. Introducció

En aquest capítol repassem tot el que hem après en el darrer quinquenni amb relació a la recerca feta durant els darrers decennis pel que fa a la resposta dels ecosistemes terrestres del nostre país al canvi climàtic com a resultat de la interacció amb el canvi atmosfèric provocat per l'activitat humana, així com les previsions per al futur immediat. El capítol se centra en els efectes del canvi climàtic en la genètica, l'epigenètica, la morfologia, la fisiologia i la fenologia dels organismes vius, les interaccions entre les espècies i la distribució, l'estructura i el funcionament dels ecosistemes i els efectes de retroalimentació dels canvis biològics en el cicle del carboni i, per tant, en el clima. Per consultar detalls concrets dels estudis esmentats en aquest capítol, remetem els lectors als articles que s'hi corresponen.

9.2. Respostes a escala molecular i en l'ús dels elements. Genètica, epigenètica, metabolòmica i estequiometria

La variabilitat genètica de les poblacions naturals que interactuen amb el clima possibilita l'aparició de l'adaptació i la resposta evolutiva als canvis que s'hi associen. Això s'ha pogut comprovar amb l'aplicació en poblacions forestals naturals de diferents tècniques de biologia molecular que han permès identificar al·lels lligats a aquestes respostes al clima i quantificar-ne la freqüència en la població o determinar el paper de les modificacions epigenètiques en una resposta adaptativa ràpida.

Mitjançant estudis tant de sèries temporals de camp al Montseny com de manipulació climàtica d'escalfament i dèficit hídric experimentals al Garraf, s'ha demostrat una capacitat d'aclimatació i d'adaptació (evolució) ràpida de les espècies com a resposta al canvi climàtic que aprofita la variabilitat genètica que existeix en les poblacions naturals. Tot i això, aquesta capacitat és limitada i ja s'han detectat impactes greus del canvi climàtic en els organismes i ecosistemes catalans (Peñuelas *et al.*, 2013).

Durant el darrer quinquenni, però, no solament s'han detectat canvis genètics en la resposta de les plantes i d'altres éssers vius a l'escalfament del planeta i a la sequera progressiva, sinó que també s'han descrit alteracions en l'expressió gènica que no es poden atribuir a variacions en la seqüència

de nucleòtids de DNA. L'epigenètica abasta un conjunt complex i interrelacionat de processos moleculars, com ho són la metilació del DNA i la modificació d'histones i de processos reguladors mediats per RNA. Se sap que la metilació de DNA és estable en el temps a escala individual, té diferents graus d'heretabilitat i pot ésser influenciada per l'ambient. Així, i mitjançant la utilització de marcadors moleculars específics sensibles a la metilació, és possible determinar la capacitat dels arbres per a produir en condicions naturals una resposta adaptativa ràpida basada en modificacions epigenètiques. D'aquesta manera s'han analitzat els canvis en els perfils de metilació d'alzines (*Quercus ilex*) sotmeses a una sequera provocada de manera experimental (Rico *et al.*, 2014), els quals han permès descriure una diferenciació epigenètica clarament atribuïble a la sequera que han experimentat (figura 9.1).

Durant el darrer quinquenni també s'han començat a utilitzar tècniques metabolòmiques per tal d'estudiar les respostes dels metabòlits pel que fa als diferents escenaris de canvi climàtic previstos per al nostre país. Aquesta resposta dona una visió global de la resposta fenotípica de l'organisme en relació amb els canvis ambientals. Així, en algunes espècies dominants dels nostres sistemes mediterranis, com ara el bruc d'hivern (*Erica multiflora*) o l'alzina (*Q. ilex*), s'ha descrit un descens de l'activitat de les vies metabòliques lligades a l'acumulació d'energia i al creixement, i un augment de les rutes metabòliques secundàries lligades als mecanismes antiestrès com a resposta a l'increment del grau de sequera (Rivas-Ubach *et al.*, 2012). Aquests canvis ràpids de l'organisme també comporten canvis químics, tant moleculars com de composició elemental als diferents òrgans de les plantes (Rivas-Ubach *et al.*, 2012), els quals, alhora, afecten la palatabilitat de les plantes i, per tant, la freqüència d'atac dels herbívors, de manera que la resposta metabolòmica altera la xarxa tròfica. S'ha observat, a més, que la resposta metabòlica és diferent, en un sentit oposat, als òrgans aeris i a les arrels d'un mateix individu (Gargallo-Garriga *et al.*, 2014) (figura 9.2). A la part aèria hi ha un descens de l'activitat de les vies metabòliques lligades al metabolisme primari i relacionades amb el creixement i amb les concentracions de nitrogen, fòsfor i potassi. Contràriament, a les arrels s'incrementen les concentracions dels metabòlits

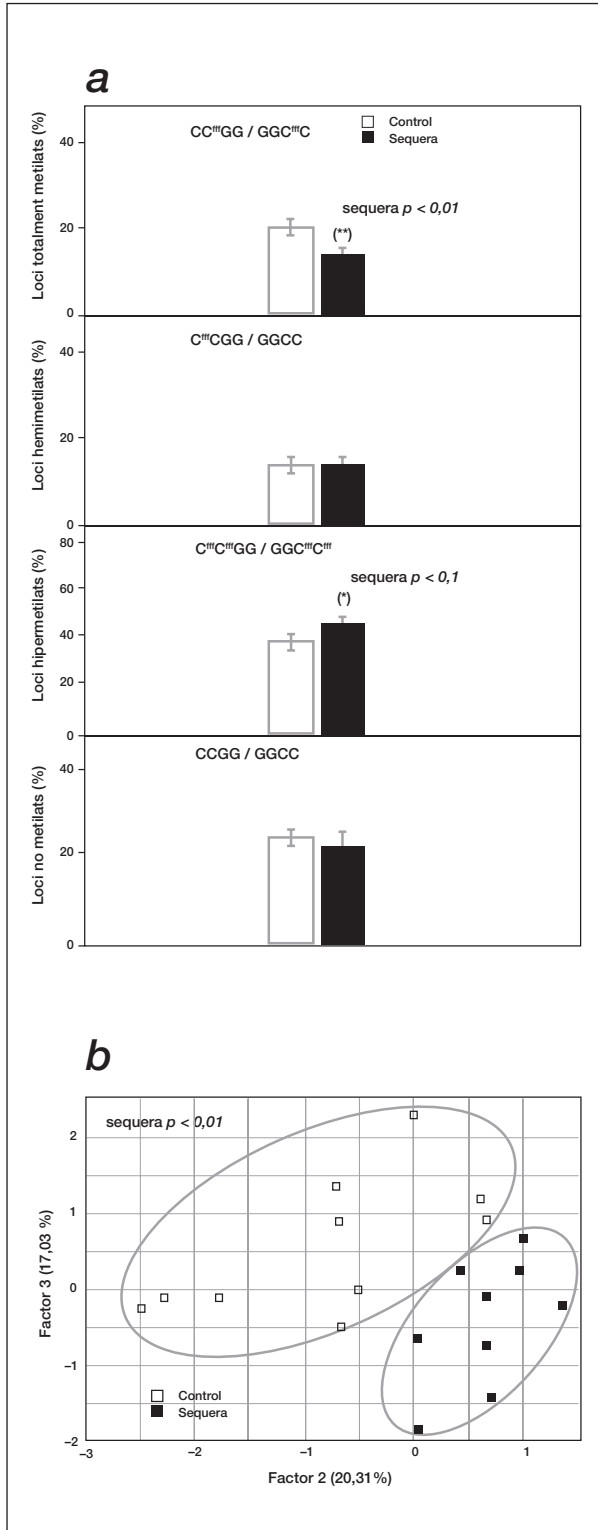


FIGURA 9.1. Estudi epigenètic de poblacions naturals de *Quercus ilex* sota condicions de control i sequera. a) Patrons de metilació de mostres foliaris. Es mostren els percentatges (mitjana \pm SE) de cada estat de metilació de la seqüència GGCC analitzada. Les diferències són analitzades amb ANOVA. Nivell de significació: * $p < 0,1$, ** $p < 0,01$. b) Anàlisi PCA de poblacions de *Quercus ilex* fent servir l'estat de metilació de cada locus. Els percentatges indiquen la proporció de variació explicada per cada factor. L'efecte de la sequera sobre els factors 2 i 3 generats per la PCA s'han calculat amb ANOVA (Rico *et al.*, 2014).

primaris relacionats amb la síntesi proteica i amb la producció energètica, com els aminoàcids i sucres, i augmenten les concentracions de nitrogen, fòsfor i potassi.

En respondre a la sequera, les plantes fan un ús proporcionalment diferent dels diversos elements emprats, de manera que les ràtios carboni/nitrogen/fòsfor/potassi varien, la qual cosa constitueix un primer pas cap a l'obtenció d'un flux distint d'elements per mitjà de la cadena tròfica i, per tant, una modificació en els cicles biogeoquímics del sistema planta-sòl. En estudis de camp duts a terme mitjançant gradients climàtics a Catalunya, Espanya i Europa, el nexa entre les concentracions, continguts i relacions estequiomètriques en les fulles de les principals espècies forestals es troba, en gran part, lligada amb les condicions climàtiques i, molt directament, amb la magnitud de les precipitacions. Per tant, l'agreujament en les condicions de manca de disponibilitat d'aigua va associat, no solament a canvis en els continguts i les concentracions dels nutrients en les plantes, sinó també a l'assignació en els diferents òrgans, a les relacions estequiomètriques entre els principals nutrients i, en darrer terme, al repartiment dels nutrients entre la planta i el sòl. Aquests canvis en la composició elemental del sistema sòl-planta estan lligats als processos de degradació que produeix la sequera i esdevenen un instrument per a detectar i seguir els efectes del procés de desertització així com una eina potencial per a poder-hi intervenir.

9.3. Respostes dels organismes

9.3.1. Canvis morfològics, fisiològics, fenològics i de creixement en plantes

Totes les respostes metabòliques que hem esmentat tenen un fort efecte en el creixement i desenvolupament dels organismes a mitjà i llarg termini. Per exemple, a l'alzinar de Prades s'ha observat que una petita reducció de la humitat del sòl ha implicat un descens molt important en l'increment de biomassa (Barbeta *et al.*, 2013). Aquesta forta disminució del creixement dels arbres ha estat produïda per una reducció de les taxes fotosintètiques netes i per un augment de la defoliació, encara que, malgrat tot, hi ha hagut una progressiva minva d'aquests efectes, sigui per adaptació epigenètica o per disminució de la biomassa foliar, per amb-

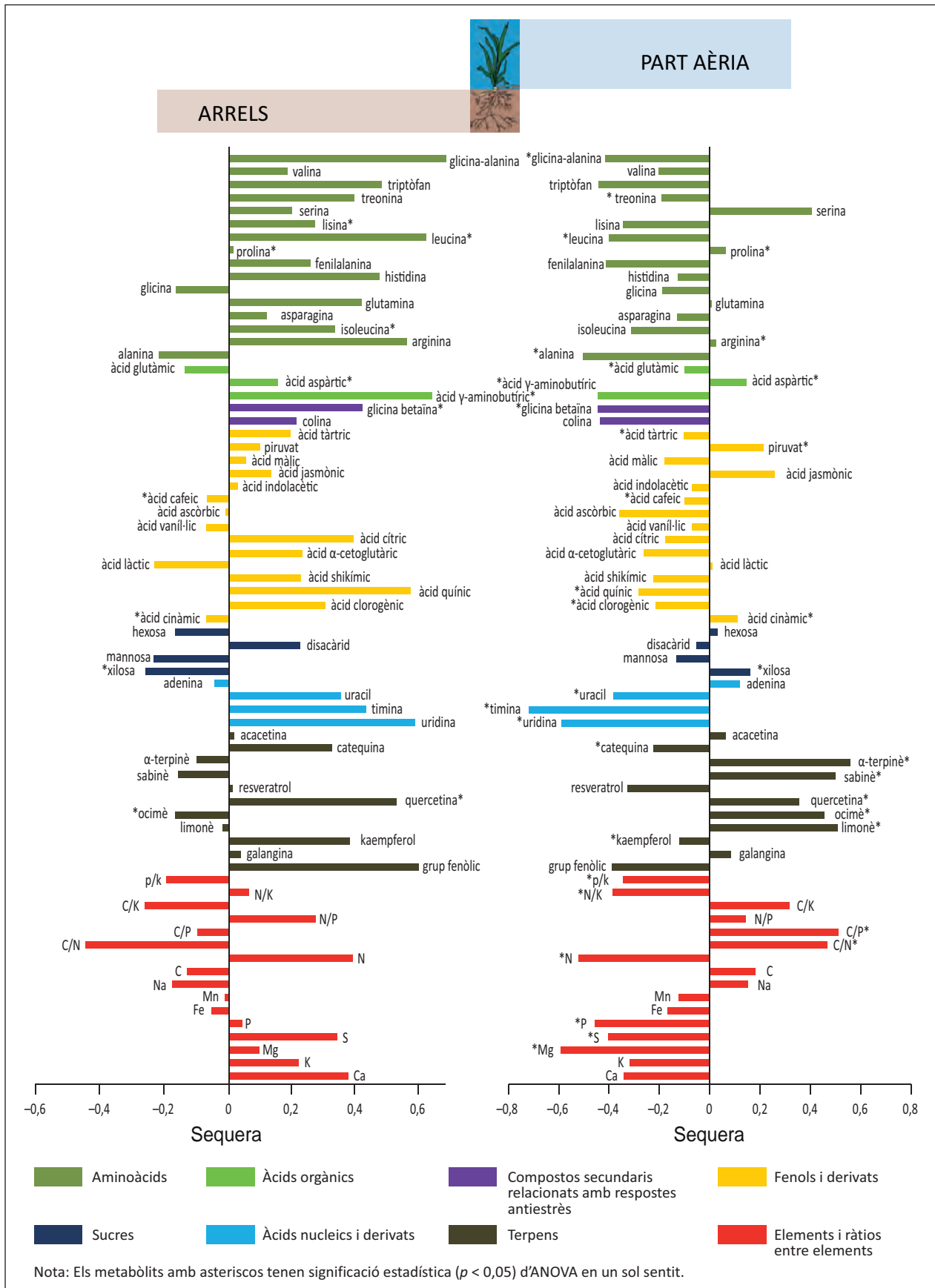


FIGURA 9.2. Resposta metabòlica i estequiomètrica antagònica d'arrels i part aèria de la planta a la sequera. Els valors de les variables metabòliques i estequiomètriques són els del seu pes en l'eix del PCA associat a la sequera (experiments duts a terme amb gramínies sotmeses a sequera experimental). Els diferents colors indiquen diversos grups de metabòlits (Gargallo-Garriga *et al.*, 2014).

dues raons i/o per d'altres no conegudes (Barbeta *et al.*, 2013). Amb el temps, però, l'efecte de la sequera es pot veure multiplicat per un exhauriment de l'aigua profunda del sòl.

En moltes espècies arbòries es produeix una forta aclimatació de la fotosíntesi i dels atributs morfològics a les variacions en les condicions estacionals del creixement. Els mecanismes fotosintètics són resilients a la sequera moderada, mentre que les sequeres perllongades provoquen l'aclimatació d'atributs morfològics, la disminució de la fotosíntesi i l'abscisió de les fulles. La recuperació insuficient de les reserves d'aigua del sòl durant la fase inicial de l'estació de creixement aguditza greument els efectes de la sequera estiuenca. També hi ha una notable aclimatació estacional de l'òptim tèrmic i de la corba de resposta de l'assimilació fotosintètica a la temperatura. L'aclimatació de cada espècie compensa parcialment aquestes tendències generals de resposta a la sequera i a l'estrès per temperatura.

Les espècies més mediterrànies mostren una forta capacitat d'aclimatació a condicions càlides i seques, però poden ser sensibles a la sequera persistent i a l'estrès per temperatura. L'èxit de les espècies de fulla perenne en les futures dinàmiques de competència i en les noves condicions ambientals no depèn únicament de la resistència a l'estrès abiòtic, sinó també de l'eficiència a l'hora de beneficiar-se ràpidament dels períodes en què les condicions ambientals són favorables. Els canvis fenològics són i seran una de les respostes més generalitzades al canvi climàtic que vivim, com els informes previs van destacar. Durant aquest quinquenni s'ha pogut observar que l'augment de les temperatures màximes és més determinant a l'hora de provocar que l'estació primaveral arribi abans que no pas el de les mitjanes. La fotosíntesi es produeix només de dia, de manera que la pujada de les temperatures diürnes, i més concretament de les màximes, és el factor que més afecta l'activitat fenològica (Piao *et al.*, 2015). Aquesta constatació ha permès desenvolupar un nou marc conceptual que millora la predicció dels canvis que patirà la fenologia de les plantes a causa del canvi climàtic.

El canvi climàtic, a més d'afectar la sortida de les fulles i l'època de floració, també altera la fenologia de la caiguda de la fulla en espècies caducifòlies d'hi-

vern, encara que l'escalfament i la sequera hi tenen efectes oposats. En general, l'escalfament endarrerix la senescència de la fulla, mentre que la sequera l'avança amb intensitats variables segons quina sigui l'espècie. L'impacte del canvi climàtic depèn, doncs, de la importància relativa de cada factor en regions o anys específics. L'aprofitament dels nutrients per reabsorció abans de la senescència de les fulles minva quan les fulles cauen prematurament a conseqüència de l'estrès hídric. Per tant, l'efecte del canvi climàtic en la reabsorció de nutrients resultarà del balanç entre els efectes contraposats de la sequera i de l'escalfament (Estiarte i Peñuelas, 2015). Aquest aspecte és important, ja que la construcció anual del fullatge nou es fonamenta, gairebé de manera exclusiva, en nutrients que es reabsorbeixen durant la tardor anterior. Així doncs, l'estrès hídric pot causar canvis en la fenologia de la senescència de la fulla que tenen la capacitat, alhora, d'afectar processos ecosistèmics tan importants com ara l'obtenció de carboni per l'ecosistema i el reciclatge dels nutrients.

L'emissió i acumulació de terpens per les plantes és un altre dels processos vegetals que són alterats per l'escalfament i l'eixut i tenen múltiples efectes sobre l'ecosistema. Poden ser de tipus abiòtic, com ara els efectes de retroalimentació en el clima, i biòtics, com les potencials variacions en la palatabilitat dels teixits vegetals o pels senyals als depredadors. En estudis sobre l'intercanvi de gasos i les taxes d'emissió de terpens de diverses espècies d'arbres i d'arbusts mediterranis sotmesos a una sequera experimental a les muntanyes de Prades, s'ha observat una tendència no significativa a la disminució del contingut de terpens, però un augment en les emissions totals, especialment a la primavera i la tardor. Aquests resultats han permès comprendre més bé el comportament interanual i estacional dels compostos volàtils de les plantes en condicions mediterrànies, una qüestió de gran interès pel que fa a la inflamabilitat dels boscos i a la química atmosfèrica. En aquests estudis també s'ha posat de manifest la necessitat que existeix de tenir en compte els efectes de la temperatura prèvia acumulada en els models d'emissió de monoterpens, especialment per a espècies capaces d'emmagatzemar terpens. Es va demostrar, a més, que l'ús dels models actuals d'emissions de terpens poden comportar tant la infraestimació com la sobreesti-

mació de les emissions en condicions de sequera estiuenca, ja que la major part d'algorismes actuals es basen només en la llum i la temperatura.

9.3.2. *Canvis morfològics, fisiològics, fenològics i de creixement en animals*

Els animals, com els altres éssers vius, afronten els reptes creats pel canvi climàtic per mitjà de tres estratègies fonamentals no excloents: 1) canviant-ne els períodes d'activitat (fenologia, comportament); 2) modificant-ne els atributs, com ara la mida del cos o la fisiologia; 3) alterant-ne els rangs de distribució. Els dos primers casos, fenologia i fisiologia, impliquen necessàriament bé l'evolució dels caràcters que permeten l'adaptació al clima o bé que aquests caràcters siguin prou plàstics per a adaptar-se a les variacions climàtiques en curs. El primer dels mecanismes requereix que una força selectiva, en aquest cas el canvi climàtic o qualsevol dels efectes que provoca, afavoreixi l'èxit reproductiu més gran possible de les variants amb més èxit ecològic, fet que comportaria, finalment, una modificació en l'estructura genètica i/o epigenètica de les poblacions. La plasticitat fenotípica, és a dir, l'habilitat d'un genotip de produir més d'una alternativa morfològica, fisiològica o comportamental, és, en canvi, un mecanisme que es manifesta en la resposta d'aclimatació a un determinat ambient de desenvolupament i que ha estat assenyalat des de fa diversos decennis com a posseïdor d'un alt valor adaptatiu. La plasticitat fenotípica com a possible mecanisme subjacent en diversos canvis observats com a resposta al canvi climàtic és, actualment, un tema de recerca que té un gran interès.

Pel que fa als canvis observats, els més ben documentats fins ara han estat els que impliquen canvis en la fenologia. Per exemple, s'han presentat dades fefaents relatives a l'avançament de les dates d'aparició de les abelles així com de la floració de determinades plantes que pol·linitzen.

Pel que fa als canvis en el rang de distribució, hi ha nombrosos exemples en què s'evidencia l'alteració de la distribució d'espècies, les quals s'estenen, en general, cap a latituds més properes als pols i/o en cotes més altes de les muntanyes. Cal tenir en compte, però, que la viabilitat d'aquesta estratègia dependrà en bona part dels mecanismes de dispersió de cada espècie i de la velocitat del canvi climàtic

experimentat per cadascuna de les poblacions. Per tant, esdevé fonamental conèixer si aquests canvis de distribució seran prou ràpids per a no ser superats pel ritme imposat pel canvi climàtic.

Encara que es coneixen a trets generals quines són les respostes de les espècies animals pel que fa al canvi climàtic, resta pendent esbrinar quins són els mecanismes ecoevolutius que les expliquen, per tal de preveure quines espècies tindran més èxit (per exemple, espècies invasores pròpies de climes més similars als que s'esperen a causa de l'acció del canvi climàtic, espècies de tipus oportunista o generalista, espècies amb grans marges de plasticitat fenotípica en caràcters clau o amb elevada variabilitat morfològica, fisiològica o etològica de base genètica o epigenètica). De manera similar, és clau preveure quines espècies podrien ser delmades a causa del canvi climàtic, com podria ser el cas de les que es troben en ambients pròxims als límits fisiològics i/o de distribució, o que tenen una baixa capacitat adaptativa, ja que és quelcom necessari per a gestionar d'una manera més eficient la biodiversitat.

Els estudis detallats de la variació fenotípica dels caràcters en poblacions naturals són claus per a determinar la importància relativa de la plasticitat i l'adaptació de les respostes al canvi climàtic. A Catalunya, estudis recents duts a terme amb una espècie model d'insecte (*Pieris napi*, una papallona diürna el genoma de la qual ha estat seqüenciat) han descrit cicles fenotípics anuals en caràcters associats amb la temperatura (figura 9.3). Concretament, s'han observat cicles anuals en caràcters com la melanització de les ales i la mida corporal, i s'han observat diferències significatives entre les poblacions alpines i les de terra baixa. Experiments de cria en condicions de laboratori han demostrat que la temperatura provoca canvis significatius en la melanització dels individus, fet que ha propiciat un augment de les observacions en poblacions naturals. Aquesta evidència suggereix que l'increment de la temperatura en escenaris futurs possiblement alterarà els cicles anuals fenotípics característics tant de les poblacions alpines com de les de terra baixa.

9.4. *Canvis en poblacions i comunitats*

Les diferents respostes de cada individu i cada espècie al canvi climàtic generen canvis no so-

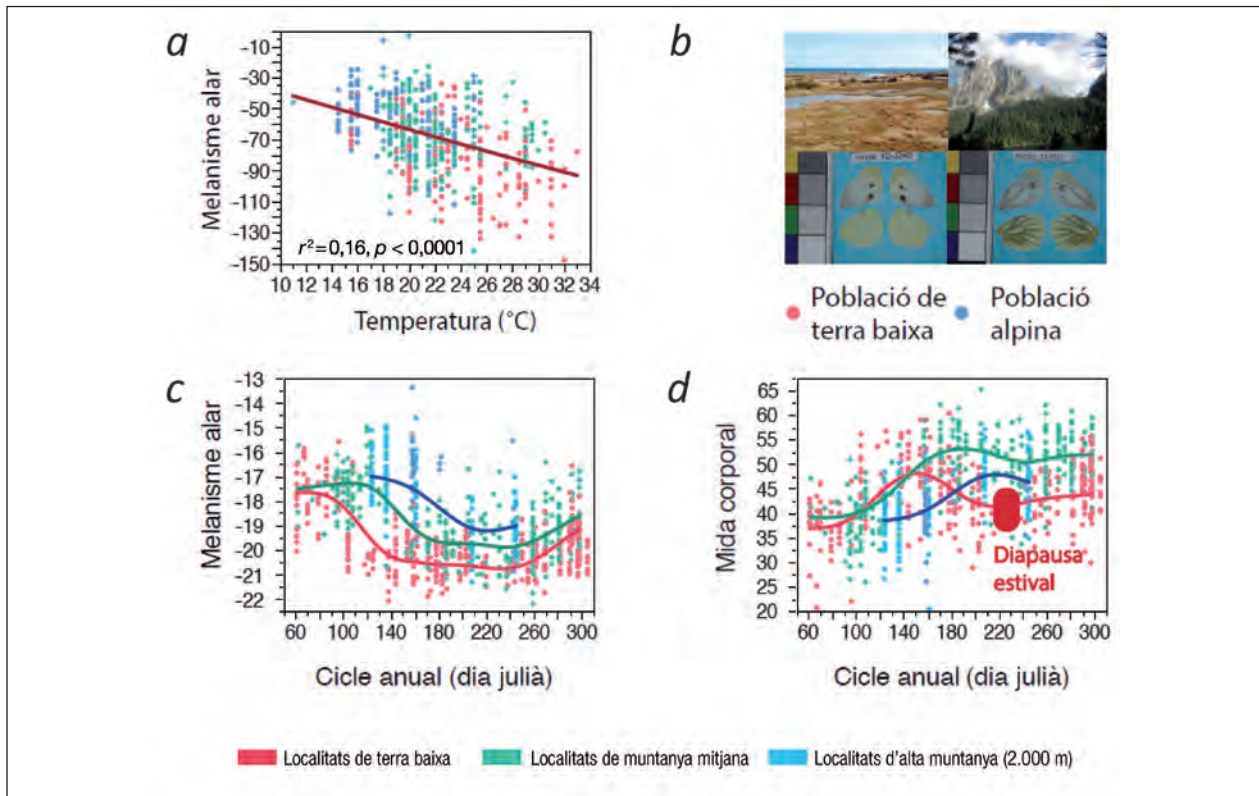


FIGURA 9.3. a) Relacions observades entre la melanització de les ales de *Pieris napi* i la temperatura de la localitat on es troba la planta hoste. b) Variació observada en el fenotip de les ales entre poblacions alpines i de les planures. c i d) Variació anual de tres atributs funcionals clau associats a respostes a la sequera (melanització de les ales, mida del cos i diapausa estival) de tres poblacions de l'espècie model *Pieris napi* seqüencialment distribuïdes al llarg d'un gradient altitudinal als Pirineus.

lament demogràfics, sinó en la composició i el funcionament de les comunitats. No totes les espècies arbòries es troben igualment afectades per les condicions de sequera. Per exemple, l'alzina, espècie actualment dominant als boscos mediterranis catalans, ha patit una important disminució de la productivitat i un increment de la mortalitat i de les taxes de defoliació, mentre que en altres espècies arbustives de port elevat i més adaptades a ambients àrids, l'efecte de la sequera ha estat mínim (Barbeta *et al.*, 2013). Si el clima mediterrani esdevé més àrid, tal com es preveu en els pròxims decennis, l'alzina podria ser parcialment reemplaçada per aquestes espècies arbustives de port alt més ben adaptades a l'eixut, de manera que el bosc tindria una capacitat més baixa per a segrestar CO₂ atmosfèric i contrarestar el canvi climàtic.

Durant els darrers anys s'ha constatat l'existència de respostes demogràfiques oposades en coníferes i angiospermes mediterrànies. Actualment, a la península Ibèrica s'està produint un avançament successional generalitzat dels boscos d'angiosper-

mes i també respostes de creixement negatiu pel que fa a la temperatura en les gimnospermes. Les diferències en els atributs bàsics de tots dos grups de plantes són la clau per a explicar-ne les diferents respostes a la temperatura i el paper diferenciat que tenen durant els processos successional.

9.4.1. Canvis en les emissions de fragàncies de fulles i flors de plantes amb efectes sobre les comunitats

Les plantes emeten una gran quantitat i diversitat de compostos orgànics volàtils (COV), com ara, per exemple, els terpens, els quals ja han estat esmentats i que tenen múltiples funcions fisiològiques i ecològiques que, a causa d'un efecte en cadena, es poden traduir en repercussions en les comunitats d'organismes, els ecosistemes, la qualitat de l'aire i fins i tot el clima. Les projeccions futures prediuen un increment substancial d'aquestes emissions com a resposta a la major part d'agents que formen part del canvi global. D'ells, la temperatura n'és un dels factors amb més pes i amb un efecte més clar sobre les emissions de COV, ja

que augmenta la volatilitat d'aquests compostos a més d'estimular-ne la síntesi. De fet, les emissions augmenten com a resposta a un increment de la temperatura, no solament en teixits vegetatius com ho són les fulles, que emeten la fracció més significant dels COV emesos per la vegetació, sinó també en altres estructures menys representatives però que tenen un paper biològic molt important, com ho són les flors (Farré-Armengol *et al.*, 2014).

Els estudis realitzats prediuen un increment generalitzat de les emissions de COV de les flors juntament amb l'ascens de les temperatures, tot i que la magnitud del canvi dependrà de l'espècie. L'augment de COV comportarà l'increment de l'efecte senyal d'aquests compostos per als pol·linitzadors, de manera que podrà repercutir en la variació de l'habilitat competitiva d'aquest grup funcional (Farré-Armengol *et al.*, 2014). També es preveu que un ascens de la temperatura provoqui canvis en la composició relativa de les olors florals que, per tal com és la senya d'identitat perquè pol·linitzadors especialistes les reconeguin, en podrien pertorbar els processos i l'efectivitat de la localització floral. Així mateix, un altre estudi recent ha demostrat que la fragància de les flors depèn dels fongs i bacteris presents a la superfície, els quals, alhora, són fortament influenciats per la temperatura i l'estat hídric.

Existeixen altres fenòmens associats al canvi global que també afecten les emissions de COV. Un exemple n'és l'augment de l'ozó troposfèric, el qual té un impacte molt variable a escala local i temporal. L'exposició a concentracions elevades d'ozó pot provocar situacions d'estrès en les plantes, les quals fan que augmentin les emissions de COV de manera important; però, alhora, redueix sensiblement el temps de vida dels COV emesos a causa de la ràpida oxidació i interfereix en algunes de les funcions ecològiques. En el cas de les emissions florals, l'ozó redueix la concentració de COV en relació amb la distància i en modifica la composició relativa, motiu pel qual la distància efectiva d'atracció de pol·linitzadors a les flors es veu reduïda.

9.4.2. Efectes sobre la rizodeposició, els microorganismes del sòl, la fil·losfera i l'herbivoria

En el procés de rizodeposició, un gran conjunt de components (entre els quals s'inclouen l'aigua,

l'oxigen lliure, els ions, els enzims, els mucíl·lacs i els compostos orgànics) són alliberats al sòl per les arrels de les plantes i usats per diferents seccions de la comunitat microbiana. La rizodeposició té un paper important en diversos tipus d'interaccions entre plantes i altres grups d'espècies —entre els quals hi ha l'al·lelopatia—, les interaccions entre plantes paràsites i els seus hostes, l'activitat antimicrobiana i com a font de carboni per als microorganismes. Aquesta estimulació dels microorganismes pot impulsar la descomposició de la matèria orgànica dels sòls (SOM), la producció de nitrogen i la disponibilitat d'altres nutrients per a les plantes. La rizodeposició pot causar, també, canvis en l'estructura del sòl mitjançant l'increment de l'estabilitat dels agregats per alliberament de polisacàrids i proteïnes amb propietats que les fan actuar com a ciments.

Hi ha evidències que l'escalfament pot incrementar la rizodeposició, com s'ha demostrat en *Oryza sativa*, *Abies fargesii* var. *faxoniana* i *Picea asperata*. En canvi, malgrat l'efecte negatiu que se sap que l'estrès hídric té en la biomassa vegetal, s'han observat resultats contradictoris pel que fa als efectes de la sequera sobre la rizodeposició. D'una banda, s'han descrit increments de la rizodeposició en els casos d'*Agropyron cristatum*, *Zea mays*, *Lolium perenne*, *Festuca arundinacea* i una barreja de pastures i herbes; però, de l'altra, l'inhibició en aquest procés en *Calluna vulgaris* i cap efecte significatiu en *Brassica napus*, *Triticum aestivum*, *Medicago sativa*, *Helianthus annuus* i *Glycine max*. Aquesta divergència de resultats apunta que és necessari dur a terme una recerca més intensiva en aquest àmbit.

Les comunitats microbianes del sòl regulen el cicle del carboni a escala global i els cicles dels nutrients, i, per tant, el coneixement de quins impactes causen és clau per a entendre de quina manera la biosfera podria retroalimentar el canvi climàtic. Els canvis en els règims de precipitació poden alterar la composició de la comunitat microbiana per l'extinció local de determinades unitats taxonòmiques operacionals (OTU) o, per exemple, canviant l'abundància relativa de bacteris i fongs, amb clares diferències funcionals en l'àmbit de la descomposició. Així, s'ha observat en dos ecosistemes mediterranis catalans amb

tractaments de sequera a llarg termini (deu anys) que la sensibilitat dels fongs als canvis estacionals en la humitat, la temperatura i l'activitat de la planta és menys acusada que la dels bacteris. D'altra banda, les comunitats de fongs presenten una gran habilitat per a adaptar-se als canvis associats a les estacions, fet del qual es dedueix el paper que tenen en la descomposició del SOM terrestre i, en especial, en les dures condicions ambientals dels ecosistemes mediterranis, fet important atès l'augment de l'aridesa que s'espera en el futur.

Les comunitats microbianes del sòl són més resilient; és a dir, es recuperen més ràpidament que les mateixes plantes després d'haver patit una pertorbació, ja que l'estructura de les comunitats de bacteris es troba principalment determinada per les fluctuacions ambientals a curt termini. Tanmateix, després d'un llarg període de sequera no s'observa un efecte crònic en la funcionalitat de les comunitats microbianes del sòl, fet que posa en evidència l'estabilitat funcional d'aquestes comunitats com a resposta a prolongats períodes de sequera moderada. S'han observat resultats semblants en cinc experiments anàlegs a llarg termini en un gradient geogràfic a Europa.

També s'ha pogut comprovar que en alzinars de *Q. ilex* la sequera provoca un fort efecte en la diversitat de la comunitat microbiana (tant fongs com bacteris) que colonitza la superfície de les fulles (fil·losfera). Mitjançant la detecció d'un gen implicat en la fixació de nitrogen atmosfèric (*nifH*), s'ha demostrat la presència de bacteris fixadors de nitrogen associats a les fulles d'alzines, presència fortament afectada tant per l'estacionalitat com per la sequera i, concretament, això es veu si augmentem considerablement la riquesa de fixadors en condicions de temperatura elevada i sequera. L'estrès hídric influeix de manera freqüent en els nivells de nutrients en les plantes i, tenint en compte estudis anteriors, en el canvi estequiomètric de carboni/nitrogen/fòsfor de l'alzina. Això, juntament amb el fet que la ràtio nitrogen/fòsfor del medi té una gran transcendència en els processos lligats a la fixació del nitrogen, podria explicar els canvis que s'observen en la comunitat de fixadors de nitrogen, especialment quan es donen condicions dures a l'estiu.

L'herbivoria, sobretot per part d'insectes, és un dels principals atacs als quals s'enfronten els arbres i, per extensió, els boscos. S'ha suggerit que la sequera associada al canvi climàtic pot predisposar els arbres a patir aquests atacs. Com a exemple, veiem que s'ha demostrat que la processonària del pi (*Thaumetopoea pityocampa*), el principal defoliador de coníferes a la Mediterrània, es veu afavorida per l'augment de les temperatures mínimes, el principal factor que li limita la supervivència. Els atacs per processonària, quan són molt intensos, poden convertir els boscos, que usualment són embornals de carboni, en emissors nets de carboni. Alhora, part del carboni fixat es podria acabar perdent a causa d'un augment de les emissions de compostos orgànics volàtils, compostos amb influència en la química atmosfèrica i la formació d'aerosols, un dels aspectes més desconeguts dels processos climàtics (IPCC, 2014). A més a més, experiments de manipulació climàtica al camp han permès observar que l'increment de la sequera té efectes indirectes pel que fa a les relacions insecte-planta, com un increment de la defoliació per herbívors associat a un augment del contingut foliar de sucres i fenols, en correlació amb uns efectes poc previsibles pel que fa a la comunitat.

9.4.3. Comunitats pertorbades i joves, les més sensibles

En un experiment a llarg termini (catorze anys) de simulació de condicions d'escalfament i de sequera en augment en set localitats de matollar distribuïdes geogràficament arreu d'Europa, es van monitorar els canvis en la vegetació en termes d'abundància i d'espècies dominants. L'estudi incloïa matollars no pertorbats des de feia molt de temps i d'altres que havien patit plagues o incendis recents, com va ser el cas del matollar del Garraf (Barcelona), que va patir un incendi l'any 1994. Els ecosistemes que han estat alterats, ja sigui per causes naturals o per l'activitat humana, són més vulnerables al canvi climàtic (Kröel-Dulay *et al.*, 2015). Un cop l'associació entre activitat humana i la freqüència i la severitat de les pertorbacions que desequilibren els ecosistemes hagi estat constataada, la resposta dels ecosistemes al canvi climàtic serà més ràpida en ecosistemes pertorbats, així com els canvis en el paisatge que s'hi associen. Aquests estudis revelen la necessitat de conèixer

la història i l'estat successional dels ecosistemes per a poder predir amb exactitud quina resposta tindrà al canvi climàtic, en que caldrà parar una especial atenció als ecosistemes recentment degradats o en estats successional primers.

9.5. Ecosistemes, biogeoquímica i funcionament

9.5.1. Resposta dels alzinars a les sequeres a llarg termini

Els experiments de sequera duts a terme en diversos boscos indiquen que un augment de la intensitat, la freqüència i la durada de les sequeres pot afectar negativament els ecosistemes mediterranis com ara els alzinars. Si disminueix la disponibilitat hídrica, els arbres transpiren menys, assimilen menys carboni i, en conseqüència, creixen menys. A més, un increment de la mortalitat en les espècies més vulnerables a la sequera podria afavorir espècies més resistents, fet que produiria canvis en l'estructura i la composició dels ecosistemes i en els serveis ambientals que ofereixen. Tot i això, gràcies a un estudi realitzat a Prades entre 1999 i 2011, en què s'analitzaven les taxes de creixement i de mortalitat, s'hi va poder constatar que les di-

ferències entre el creixement i la mortalitat en les parcel·les de sequera i les de control observades al principi de l'experiment es van reduir o van desaparèixer (en el cas del creixement, figura 9.4). Per tant, com a mínim en el cas de l'alzinar, l'efecte de l'augment de les sequeres podria ser menys intens del que havíem suposat.

Les causes de l'esmoreïment de l'efecte de la sequera experimental són diverses, però es podria explicar parcialment a causa de la disminució de la competència pels recursos hídrics entre individus com a resultat de la mortalitat més elevada que alguns presenten en les parcel·les de sequera en comparació amb la de les parcel·les de control, atesa la disminució de l'àrea basal en les primeres. Aquesta compensació de l'efecte del tractament de sequera també es va accelerar per l'aparició d'episodis de sequera extrems, com els que van succeir durant els anys 2005 i 2006, que van augmentar dràsticament la mortalitat de peus. És també possible que certs ajustos en la morfologia, l'al·lometria i la fisiologia dels arbres resultants de modificacions epigenètiques puguin contribuir a l'acimatació del bosc a condicions ambientals més seques.

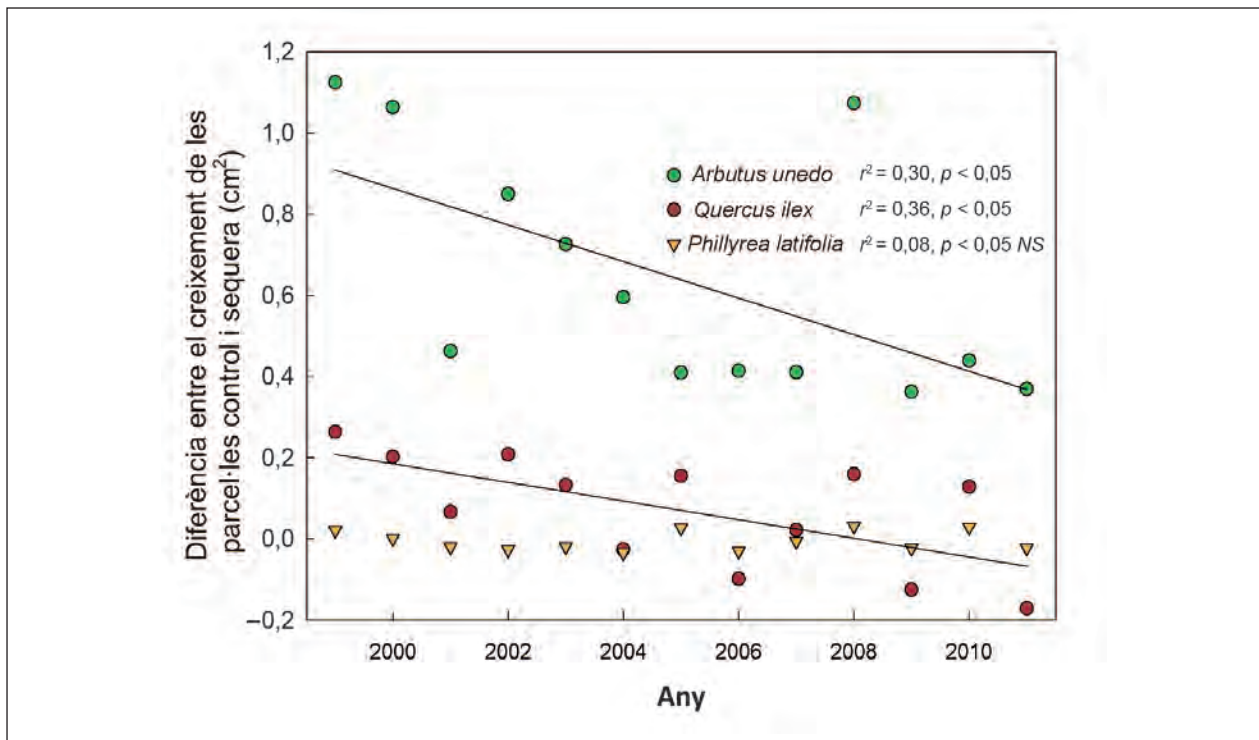


FIGURA 9.4. Diferència entre el creixement de l'àrea basal a les parcel·les de control i el de les de sequera a l'experiment de l'alzinar de Prades amb les tres espècies estudiades (*Arbutus unedo*, *Quercus ilex* i *Phillyrea latifolia*). Es mostra el coeficient de determinació i el nivell de significació de la tendència temporal de la variable dependent per a cada una de les espècies (Barbeta *et al.*, 2013).

En un estudi dut a terme en parcel·les de sequera i de control i mitjançant l'ús d'isòtops estables de l'aigua del sòl, es va estudiar la profunditat d'absorció radicular de l'aigua en diverses estacions de l'any i entre els estius d'anys amb diferents condicions de sequera contrastades. En les parcel·les de control, l'aigua profunda era la d'ús preferent durant els estius, mentre que en les estacions humides s'utilitzava de manera preferent l'aigua d'horitzons superficials. Amb els tractaments de sequera, aquest patró es va veure alterat, ja que en les estacions humides els arbres prenen relativament més aigua profunda. Aquesta diferència podria estar relacionada amb certes diferències en la distribució de les arrels fines, les quals en les parcel·les de sequera es podien trobar en un nivell més profund per a evitar la dessecació estival. En canvi, a l'estiu, la sequera provocada en l'experiment disminuïa l'ús d'aquesta aigua més profunda, probablement per l'esgotament de les reserves d'aigua atrapada dins la roca fracturada.

La principal conclusió d'aquests estudis és que la resiliència dels alzinars a l'augment de la sequera és més important del que es pensava inicialment i, per tant, aquests ecosistemes es podrien adaptar a un increment progressiu de les condicions àrides. De tota manera, els mecanismes de resistència i resiliència a la sequera, tant pel que fa als arbres com a l'ecosistema, podrien no ser suficients per a mitigar els efectes d'episodis de sequera de durades i intensitats extremes. En aquest sentit, és urgent dur a terme estudis que avaluïn directament les conseqüències d'aquests episodis en l'estructura i la funció dels ecosistemes, així com en la posterior recuperació i en l'efecte acumulat o llegat de més d'un episodi extrem.

9.5.2. Alteracions en l'ús dels nutrients

Estudis recents basats en les dades de l'Inventari Forestal Català han permès observar que el contingut i l'assignació de nutrients a diferents òrgans (fulles i fusta) en els boscos catalans es troben significativament correlacionats amb les condicions climàtiques i, especialment, amb la precipitació anual, amb un contingut més gran quan hi ha una precipitació més elevada, especialment a les fulles. Això ens mostra, un cop més, la importància de la disponibilitat hídrica en els nostres ecosistemes forestals i que petites disminucions en la disponi-

bilitat de l'aigua poden produir impactes desproporcionadament grans en la capacitat dels nostres boscos de retenir i acumular nutrients.

Estudis experimentals de simulació de canvi climàtic en condicions de camp han permès obtenir més evidències en aquest sentit i en relació amb les projeccions dels principals models climàtics de Catalunya. Concretament, s'ha suggerit que un increment moderat de l'eixut (15-20 % de disminució de la disponibilitat d'aigua al sòl) provoca de manera general una disminució de les concentracions i els continguts de nitrogen (N), de fòsfor (P) i de micronutrients als matollars i als boscos mediterranis catalans. Tanmateix, els continguts totals de nutrients a les biomasses aèries, sobretot a les capçades, disminueixen amb aquests nivells de sequera, si exceptuem el potassi, que pot augmentar en els òrgans aeris d'algunes espècies. L'eixut incrementa les ràtios C:N i C:P dels nostres matollars i boscos, fet que es troba associat a les estratègies de les mateixes plantes per a defensar-se davant el descens de la disponibilitat d'aigua, amb l'augment corresponent d'esclerofília.

De manera similar, la sequera també provoca canvis en les assignacions de nutrients entre diferents òrgans, de manera que s'incrementa l'assignació de nitrogen cap a les arrels, fet que probablement es relaciona amb la necessitat més elevada que existeix d'obtenir aigua. Tots aquests canvis funcionals pel que fa a l'eixut es veuen reflectits en una disminució del creixement de moltes espècies dominants, si bé aquest efecte, com ha estat esmentat anteriorment, depèn en bona part de l'espècie i, alhora, dels canvis ecofisiològics així com de l'activitat fotosintètica, l'eficiència en l'ús de l'aigua, l'intercanvi de gasos entre la fulla i l'atmosfera, i la capacitat de protegir-se contra l'estrès provocat per la disponibilitat més escassa d'aigua. Aquesta informació aporta les pistes necessàries per a poder escatir quines espècies poden sortir més malparades d'un increment de la sequera als nostres ecosistemes i predir l'estructura de les nostres comunitats vegetals a mitjà termini si les projeccions climàtiques s'acompleixen.

Els efectes d'un augment de la sequera en els sòls són també considerables, fet crític, puix que són un dels principals embornals de carboni del plane-

ta. Experiments de simulació de canvi climàtic en condicions de camp han permès comprovar que la mineralització de la matèria orgànica en els sòls mediterranis es troba fortament afectada pels canvis de disponibilitat hídrica (Sardans *et al.*, 2012). S'han observat disminucions en l'activitat dels enzims del sòl, en la respiració del sòl i en l'activitat enzimàtica a la rizosfera com a resposta a nivells moderats d'increment de la sequera, de manera que la disminució de l'activitat enzimàtica ha pogut ser observada directament en relació amb la reducció del contingut d'aigua al sòl (Sardans *et al.*, 2012). La disminució de la mineralització del sòl promouria l'acumulació de nutrients en formes fisicoquímiques no assimilables que, en un escenari de pluges torrencials, faria augmentar els fluxos de nutrients cap a les aigües continentals. En aquest sentit, s'ha comprovat que els tractaments de sequera en parcel·les experimentals dels boscos de Prades redueixen el contingut de nitrogen a l'ecosistema perquè es redueix el contingut total de nitrogen a la biomassa i n'augmenten les pèrdues per lixiviació (Peñuelas *et al.*, 2013).

9.5.3. La teledetecció de biomassa verda i com funciona

Les sèries temporals de dades de satèl·lit són especialment útils per a l'estudi de l'impacte del canvi climàtic en els ecosistemes terrestres. Paràmetres

clau a causa de la importància que tenen en els processos de superfície com ara la fotosíntesi, la respiració o la transpiració poden ser estimats a partir dels paràmetres obtinguts mitjançant teledetecció, com, per exemple, l'índex d'àrea foliar (LAI) o la fracció de radiació fotosintèticament activa absorbida (FAPAR). El LAI controla els intercanvis d'energia, d'aigua i de gasos amb efecte d'hivernacle entre la superfície i l'atmosfera, i la FAPAR és una de les principals variables d'entrada en els models d'eficiència per a calcular la producció primària. Així, per exemple, s'han generat i analitzat sèries temporals de LAI i FAPAR des del 1999 fins a l'època actual a partir de dades SPOT VEGETATION (Verger *et al.*, 2014). De la mateixa manera, el sensor AVHRR, que es troba a bord de les plataformes NOAA, permet obtenir sèries temporals globals des de 1981 i amb previsions de continuïtat en el futur mitjançant programes internacionals de les organitzacions meteorològiques (NOAA i Eumetsat). A Catalunya, els canvis observats en la dinàmica de la vegetació dels darrers trenta anys indiquen un increment de la quantitat de vegetació (tendències positives en el canvi de LAI) i un avançament en el desenvolupament (tendències negatives al començament de les estacions de creixement de la vegetació) (figura 9.5). Les tendències observades en el LAI es poden explicar per l'augment de la temperatura, si bé la

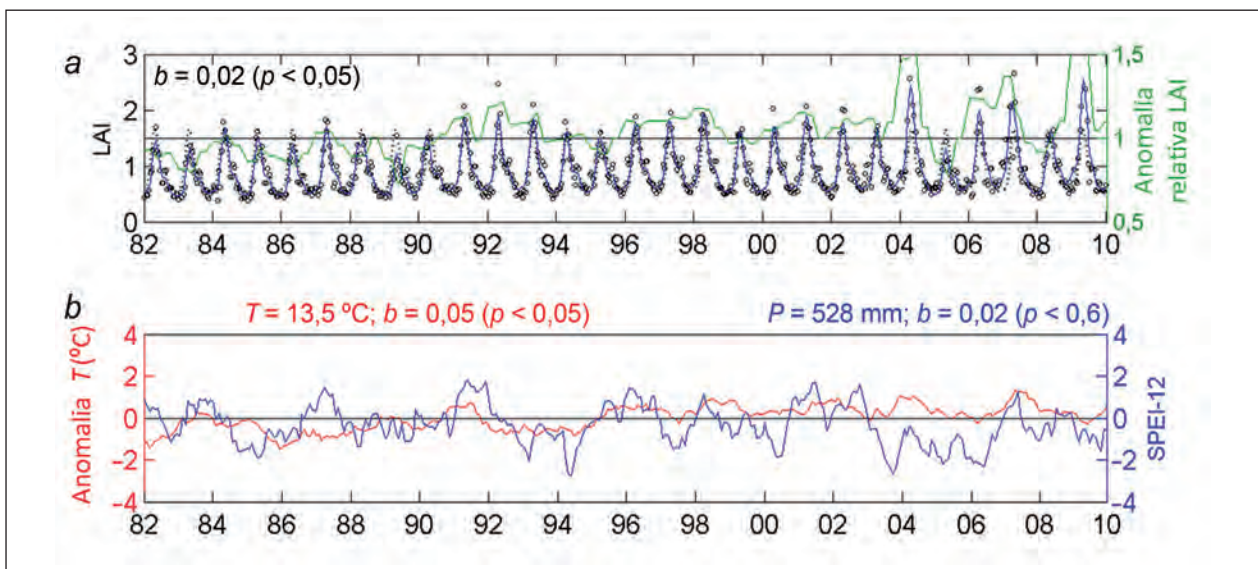


FIGURA 9.5. a) Perfils temporals d'una àrea de $0,5^{\circ}$ de resolució espacial centrada en les coordenades lat. $41,25^{\circ}$ N i long. $1,75^{\circ}$ E a la zona de Prades (Catalunya) per al període 1982-2010 i referents a l'índex d'àrea foliar (LAI) GIMMS3g i a les anomalies relatives de LAI respecte al valor interanual mitjà. S'observa una tendència significativa i positiva de 0,02 LAI. b) Anomalies en la temperatura anual i l'índex de sequera SPEI acumulat anual. S'indica el valor mitjà de la temperatura i la precipitació anual acumulada, així com la tendència significativa en el canvi de temperatura i la tendència no significativa en l'SPEI.

disponibilitat d'aigua també hi permet explicar la variabilitat interanual.

La diagnosi i comprensió de les variacions espacials i temporals de la capacitat fotosintètica i la quantificació de la fotosíntesi de les plantes com a resposta al canvi climàtic tenen una gran importància per a quantificar l'absorció de carboni per via de la fotosíntesi, i la teledetecció és una de les eines més adients. Aquest quinquenni s'ha continuat progressant en l'ús de l'índex de reflectància fotoquímica (PRI) per a estimar el rendiment fotosintètic al Parc Natural del Garraf, on s'han obtingut resultats que confirmen la idoneïtat d'aquest paràmetre com un indicador prometedor de les respostes de les taxes fotosintètiques al canvi climàtic a Catalunya i, per extensió, a la vegetació mediterrània a llarg termini.

9.5.4. Els efectes del canvi climàtic sobre el balanç de carboni

Els ecosistemes terrestres segresten, aproximadament, d'un 15 a un 30% de les emissions antropogèniques de CO₂. Malgrat això, el balanç de carboni d'un sistema pot variar substancialment segons quines siguin les condicions ambientals. La pujada de les temperatures podria fer que la producció primària bruta (PPB) i la respiració dels ecosistemes (Reco) augmenti, i això podria alterar el balanç de carboni dels ecosistemes i la producció neta (PNE = PPB – Reco). Investigacions recents apunten que la respiració podria ser lleugerament més sensible que la PPB a la pujada de les temperatures, fet que pot comportar una reducció en la capacitat de segrestar carboni dels ecosistemes durant l'escalfament previst per als pròxims decennis, la qual cosa faria que les concentracions de CO₂ atmosfèric i les temperatures globals augmentessin encara més.

Tot i això, l'efecte fertilitzant que l'increment de les concentracions de CO₂ pot tenir en la fotosíntesi i, de retruc, en la capacitat de segrestar carboni podria mitigar l'efecte negatiu de la pujada de les temperatures, si bé alguns estudis han indicat que aquest efecte tendeix a esmorteir-se al llarg del temps a causa de la intervenció d'altres factors, com ara la disponibilitat de nutrients com el nitrogen o el fòsfor, que limiten la PPB (Peñuelas *et al.*, 2013).

D'altra banda, la pujada de les temperatures que el planeta ha experimentat s'ha repartit de manera desigual al llarg de l'últim segle. Concretament, les temperatures mínimes —que es registren durant la nit— s'han incrementat 1,4 vegades més que les temperatures màximes —les quals s'experimenten durant el dia—, fet que ha provocat l'alteració dels fluxos de carboni i del creixement vegetal d'una manera inesperada. Per exemple, a l'hemisferi nord s'ha pogut comprovar que a les regions fredes d'alta muntanya i humides temperades l'augment generalitzat de les temperatures diürnes (màximes) que estimula la fixació de CO₂ durant les hores de sol va acompanyat d'un increment de la respiració durant la nit a causa de la pujada més significant de les temperatures a la nit (mínimes), de manera que es limita la captura total de CO₂. Per contra, en regions temperades i àrides s'ha comprovat el patró contrari, fet que posa de manifest la variació geogràfica d'aquest flux i indica la necessitat d'incloure aquestes variacions en els models i projeccions de capacitat d'absorció de CO₂ per al futur immediat.

9.5.5. Efectes ambientals diversos del canvi climàtic: l'exemple dels contaminants orgànics persistents

Els compostos orgànics persistents (COP) són substàncies sintètiques, tòxiques i associades a activitats agrícoles, urbanes i industrials. Els COP es troben distribuïts per tot el planeta, i la regió mediterrània no n'és cap excepció. En el cas concret de Catalunya, les dades disponibles assenyalen que existeixen concentracions d'aquests compostos en la població humana per sobre de les concentracions que hi ha als Estats Units i a Alemanya, els únics països que en fan un seguiment regular. Aquest fet pot tenir l'origen en la forta pressió agrícola i industrial de Catalunya, sobretot pel que fa al tèxtil i a les indústries plàstiques. Malgrat que la producció i l'ús de la major part dels COP ja ha estat prohibida, aquests contaminants encara són presents en el medi ambient en concentracions rellevants, especialment en zones temperades de l'hemisferi nord.

A causa de les propietats físiques i químiques dels COP, les quals en determinen la volatilitat i condensació, la temperatura es converteix en un factor clau a l'hora de determinar el transport d'aquests

contaminants en l'àmbit global, regional i local, així com la bioacumulació (figura 9.6) i els efectes en el medi ambient. Per tant, canvis en la temperatura, com els que ja han ocorregut i els que s'esperen a conseqüència del canvi climàtic, poden tenir una influència en la distribució i redistribució d'aquests compostos a la Terra. Malauradament, la literatura científica relativa a aquest tema és escassa i hi manca una quantificació precisa dels efectes del canvi climàtic en la dinàmica global dels COP, tot i que algunes dades primerenques han indicat la revolatilització dels COP a l'Àrtic provocada pels efectes del canvi climàtic.

A Catalunya i a la regió mediterrània, els augments de temperatura afecten directament la partició de fase d'equilibri d'aquestes substàncies semivolàtils, fet que n'afavoreix la revolatilització a l'atmosfera en un fenomen que també s'ha descrit als Pirineus catalans. L'increment en les concentracions dels COP a l'atmosfera en fa accelerar la mobilitat i dispersió, cosa que propicia la transferència i condensació d'aquests contaminants a zones més fredes. De fet, s'estima que fins a un 22 % dels PCB de les regions mediterrànies haurà emigrat al nord d'Europa i a l'Àrtic l'any 2100 i, a més, s'espera que la pujada de les temperatures accelerarà la biotransformació dels COP en nous congèneres, similars estructuralment, però sovint

molt més tòxics i persistents, com s'ha observat en tapets microbians d'estanys pirinencs (Bartrons *et al.*, 2011). Els canvis en la biodiversitat i en l'estructura tròfica dels ecosistemes són altres conseqüències del canvi climàtic que poden tenir efectes directes en la transferència, la distribució i la bioacumulació dels COP en les xarxes tròfiques, per exemple en els processos de biomagnificació de contaminants. Per això es fa palesa la necessitat de tenir en compte els efectes, possibles i greus, de l'increment de la temperatura en la toxicitat d'aquests contaminants en els humans i en tota la biosfera.

La disminució prevista de les precipitacions a Catalunya podria conduir a una reducció de la deposició humida dels COP, la qual és una via clau d'entrada dels contaminants orgànics persistents menys hidròfobs (per exemple, els HCH, els HCB i els PCB, els DDT i els DDE de mida més petita) als ecosistemes de muntanya catalans. Per contra, l'augment en la probabilitat que es produeixin inundacions i tempestes torrencials a les regions mediterrànies pot incrementar l'alliberament i la remobilització dels COP emmagatzemats en sòls i sediments, fet que ja s'observa a Bohèmia. Finalment, cal destacar també que els canvis en els patrons i les velocitats dels vents associats al canvi climàtic poden accelerar el transport at-

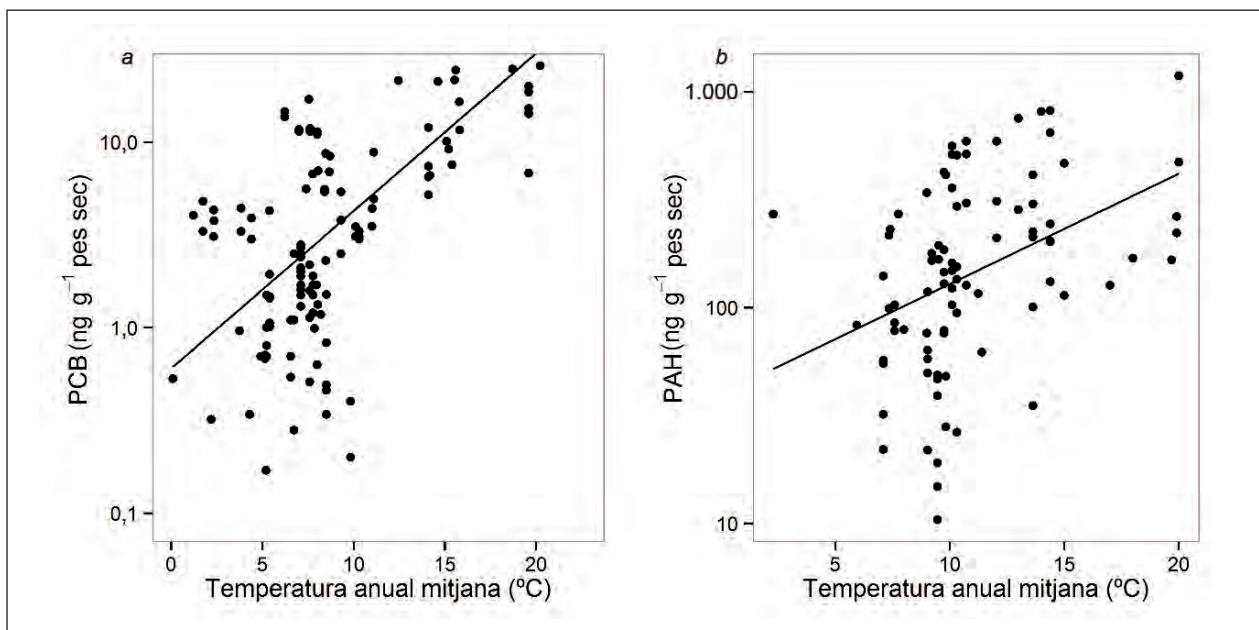


FIGURA 9.6. Relació entre la concentració de PCB i PAH (ng g^{-1}) amb la temperatura mitjana anual (TMA, $^{\circ}\text{C}$) en fulles de gimnospermes (generalment *Pinus sylvestris*), molt probablement influenciada per l'emissió i reemissió més elevades de contaminants en zones més càlides. a) $y = 0,08 \text{ TMA} - 0,22$, $r^2 = 0,45$, $p < 0,0001$; b) $y = 0,05 \text{ TMA} + 1,60$, $r^2 = 0,16$, $p < 0,0001$.

mosfèric a llargues distàncies dels contaminants orgànics persistents en fase gasosa o associats a partícules.

9.6. Què podem aprendre dels canvis climàtics del passat i dels efectes que han tingut en els boscos de Catalunya?

La paleoclimatologia, la ciència que permet reconstruir els canvis climàtics del passat, és una eina imprescindible per a predir les possibles respostes dels organismes i dels sistemes al canvi climàtic que actualment estem patint. Múltiples registres permeten fer-ne ús a Catalunya i el nord-est peninsular, gràcies especialment als lacustres, que són els que abasten un període més extens i mostren una resolució més bona. Els estanys són excel·lents «sentinelles» dels canvis ambientals, tant locals com globals, i els que es troben a la muntanya són especialment adients, ja que l'impacte antròpic hi té un efecte difús. D'altra banda, les zones d'alta muntanya són altament sensibles a la variabilitat climàtica, sobretot quan s'estudien zones que contenen ecotons importants com, per exemple, el límit altitudinal de creixement arbori (Cunill *et al.*, 2012)

o els nous hàbitats generats amb aquesta variabilitat i que han estat potencialment colonitzats.

Quan duem a terme un exercici retrospectiu com aquest cal tenir en compte que en un territori com el del Principat, el qual ha estat densament poblat durant els darrers mil·lennis, els canvis de vegetació han estat el resultat de l'acció combinada dels canvis climàtics i de l'impacte de les societats sobre el paisatge.

9.6.1. Desglaciació i arribada de l'Holocè

En el procés de desglaciació des de l'últim màxim glacial (LGM, 20.000-19.000 anys), les temperatures ascendents, tot i que baixes comparades amb les actuals, juntament amb unes condicions relativament àrides, van afavorir la dominància d'espècies estepàries combinades amb boscos de pins en zones de muntanya mitjana (estany Estanya, 670 m s. m.; Vegas *et al.*, 2013) (figura 9.7). El front de gel, que arribava a cotes mínimes al voltant dels 1.000 m s. m. durant el pleniglacial (Pallàs *et al.*, 2006) va retrocedir com a resultat d'un escalfament progressiu que va arribar al seu màxim durant l'òptim climàtic holocè (HCO), associat a un clima cada

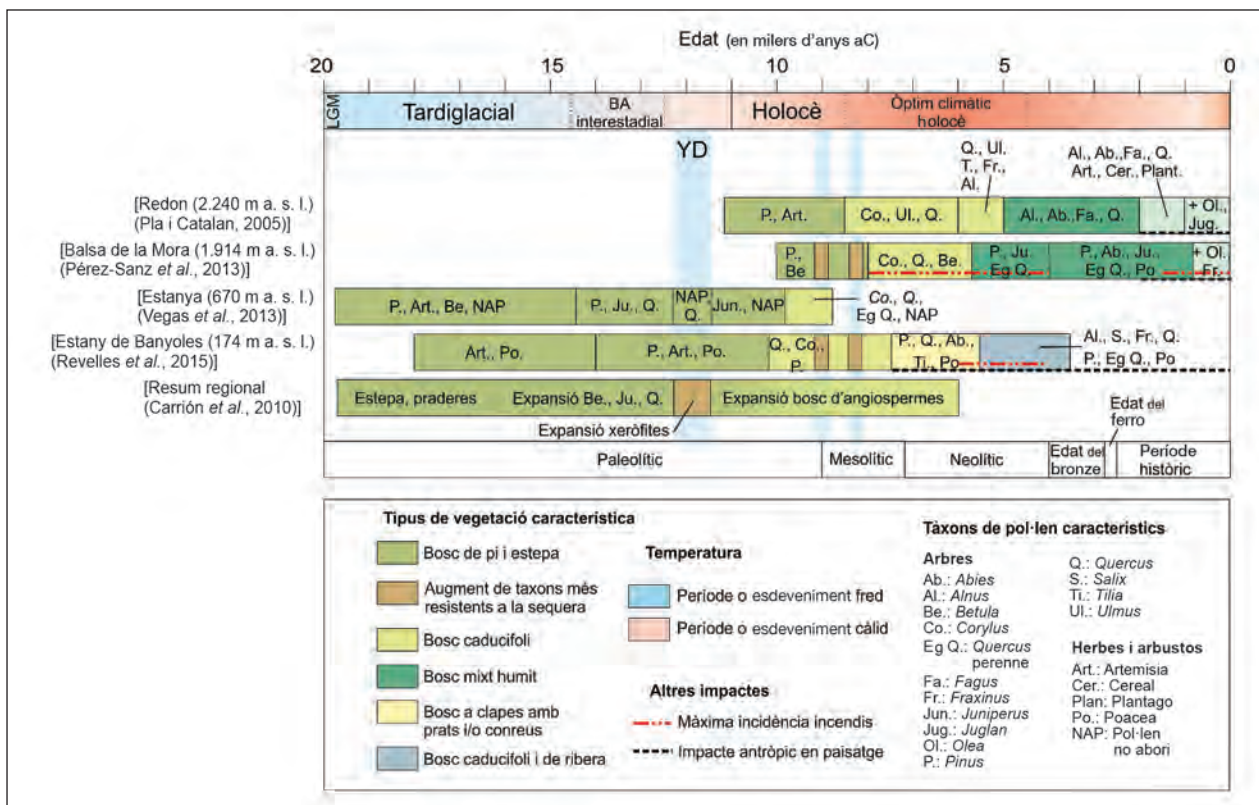


FIGURA 9.7. Principals canvis de vegetació durant els darrers 20.000 anys al nord-est peninsular deduïts a partir del registre pol·línic dels estanys Redon, Balsa de la Mora, Estanya i Banyoles.

cop més humit. Entre fa 9.000 i 5.000 anys, les temperatures estivals en alta muntanya podrien haver estat de 5 a 6°C superiors a les actuals, mentre que la temperatura marina superficial (SST) a la costa mediterrània era d'1 a 1,5°C més elevada.

Al llarg de la desglaciació, el límit altitudinal dels arbres va augmentar en alçada fins a arribar a cotes més elevades que les actuals en algunes zones del Pirineu durant l'HCO (Cunill *et al.*, 2012). Estudis pedoantracològics han demostrat que els arbres hi eren presents (*Pinus*, *Betula*) dels 2.400 als 2.600 m d'altitud (plans de Boldís-Montarenyo, 1.996-2.593 m s. m.; Cunill *et al.*, 2012). En la regió eurosiberiana i la ibèrica mediterrània, l'inici de l'Holocè (11.000 anys) es va caracteritzar per la presència de comunitats dominades pels *Quercus* i boscos d'angiospermes caducifolis en detriment de les zones de pinedes i estepes. De fet, durant el tardiglacial i l'inici de l'Holocè, tàxons com els *Pinus*, els *Juniperus* i les *Betula* i, a posteriori, els *Quercus*, es van estendre des del sud d'Europa cap a zones cada cop més boreals. Aquest procés regional fou interromput per alguns episodis freds i àrids, com, per exemple, el període de refredament conegut com a *Dryas* recent, fa 11.000-12.000 anys, en què les espècies xeròfites van repuntar a la zona mediterrània.

El registre de l'estany de Banyoles (174 m s. m.; Revelles *et al.*, 2015) és un bon exemple dels canvis que van patir els paisatges de l'Holocè (figura 9.7). Les condicions cada cop més càlides van comportar la dominància a cotes baixes de boscos d'arbres planifolis caducifolis (*Quercus*, *Corylus*) acompanyats de pinedes en zones més elevades. Els períodes puntuals de sequera i les temperatures més baixes registrats a la Península (fa 9.300-9.000 anys i 8.200 anys, respectivament) van tenir efectes moderats en la vegetació que circumdava l'estany, amb un lleuger increment de la presència de *Pinus*, *Betula* i d'escleròfil·les (*Olea-Phillyrea*).

En estanys d'alta muntanya (Redon, 2.240 m s. m.) aquest clima càlid i humit es manifesta amb un registre palinològic que indica la presència de *Corylus*, *Ulmus*, *Quercus* i *Pinus* (9.000-6.000 anys) que contrasta amb el predomini de les comunitats de *Pinus* (10.000-9.000 anys), prats d'*Artemisia* i d'herbàcies en períodes més freds.

Altres conseqüències de l'escalfament i l'augment de la biomassa boscosa van ser l'increment dels focs (8.000-4.000 anys), com ara els registrats a altres zones del Pirineu central (Balsa de la Mora, 1.914 m s. m.).

A partir dels 6.000 anys, la península Ibèrica va partir un període de refredament, però la presència de comunitats agrícoles a la zona de Banyoles (a partir dels 7.600-7.200 anys) dificulta la interpretació dels efectes del clima sobre la vegetació circumdant. En canvi, les zones d'alta muntanya, menys antropitzades, permeten un bon registre dels efectes de la variabilitat climàtica en èpoques més recents. Així, a l'estany Redon s'ha pogut constatar la davallada del bosc d'avellaner, el qual es va veure substituït per tàxons com *Alnus*, *Abies*, *Fraxinus* i *Tilia*, i, posteriorment, fa 5.000 anys, per *Fagus*, *Abies* i *Alnus*, juntament amb *Pinus*, els quals es corresponen a les espècies que actualment encara són dominants.

9.6.2. El darrer mil·lenni

Durant el darrer mil·lenni s'han produït canvis climàtics importants que han modulats profundament el paisatge. L'anomalia climàtica medieval (MCA, 900-1300 dC) va comportar condicions més càlides i seques a Catalunya, les quals haurien afavorit l'establiment de comunitats arbustives mediterrànies (*Rosmarinus* tipus, *Hedysarum* tipus, *Helianthemum*, *Ephedra*) a la regió de Montcortès (1.097 m s. m.), les quals actualment es troben per sota dels 800 m s. m. Diversos registres pol·línics del nord-est peninsular (Portlligat, Balsa de la Mora, Estanya) indiquen la presència de tàxons xeròfits i heliòfils (*Quercus suber*, *Juniperus* i cistàcies, entre d'altres), així com una reducció del bosc caducifoli mesòfit si ho comparem amb l'experimentada per espècies de fulla perenne durant el mateix període.

Amb l'arribada de la petita edat de gel (LIA, 1300-1850 dC), la comunitat arbustiva que envoltava Montcortès va desaparèixer i el bosc es va tornar a expandir a causa de les condicions més humides i fredes que s'hi experimentaven. En altres registres de muntanya mitjana i alta també es fa palesa l'ampliació del bosc caducifoli mesòfit, alhora que s'hi evidencia una intensificació de les pluges i de l'activitat al·luvial, juntament amb el màxim de glaçades enregistrades en arxius històrics. Des de finals del

LIA, les condicions han estat cada cop més càlides fins a l'època actual, amb l'excepció d'un lleuger refredament a finals del s. XIX i a principis del XX.

9.6.3. El canvi climàtic actual

Els nombrosos registres que permeten reconstruir la vegetació en el passat ajuden a comprendre els canvis futurs inevitables del paisatge a Catalunya. Amb la pujada de les temperatures prevista s'espera una elevació del límit altitudinal del bosc a les àrees d'alta muntanya i la substitució de zones de pineda i d'estepa per boscos caducifolis en les superfícies amb suficients recursos hídrics.

D'altra banda, a cotes més baixes l'accentuació de la sequera promourà l'expansió de la vegetació arbustiva, xeròfita i més ben adaptada a la nova situació, en detriment del bosc mesòfit. La magnitud de la transformació que pot patir el paisatge, però, és difícil de quantificar, ja que la velocitat a què s'està desenvolupant el canvi climàtic actual no és comparable amb la dels registres coneguts. A més a més, en la variabilitat climàtica que ens ha precedit durant els darrers mil·lennis, els períodes càlids mai han arribat a ser tan àrids com es preveu que seran en els pròxims decennis, de manera que tant la velocitat com la intensitat del canvi es convertiran en factors determinants per a les alteracions cap a noves comunitats, la incidència d'incendis o els fenòmens de migració d'espècies entre bioregions.

9.7. Impacte del canvi climàtic sobre els nostres ecosistemes terrestres previst per als pròxims decennis. Simulacions amb GOTILWA+

La modelització possibilita la visualització virtual de diferents escenaris de condicions climàtiques amb vista al futur. En el cas del model de processos de creixement dels boscos GOTILWA+ (<http://www.creaf.uab.cat/gotilwa>) és possible avaluar la resposta al canvi climàtic de diferents boscos de parcel·les de l'*Inventario Forestal Nacional* (IFN) prevista per al segle XXI. Les projeccions simulades de canvi climàtic que es descriuen en aquest apartat han estat obtingudes a partir del model de circulació general ECHAM4 i de l'escenari socioeconòmic A2, que projecta 850 ppm de CO₂ atmosfèric al 2100. En concret, a la figura 9.8.a es mostra la producció primària bruta (PPB) i la producció primària neta (PPN) per a un mateix es-

cenari durant quatre períodes diferents al llarg del segle XXI. S'hi observa un augment progressiu de la PPB al llarg del segle, el qual s'interpreta com l'efecte fertilitzant de l'increment progressiu del CO₂ atmosfèric i que es manifesta principalment als boscos del nord i nord-est de la Península. En canvi, la PPN mostra un patró contrari, amb una tendència generalitzada a la disminució. L'augment de la respiració autotròfica de manteniment juntament amb la pujada progressiva de les temperatures, pot conduir a l'exhauriment de carbohidrats de reserva i a una progressiva pèrdua de biomassa dels boscos. La pèrdua de biomassa aèria es veu reflectida a la figura 9.8.b, en què s'observa la correlació negativa entre l'increment dels estocs aeris de carboni i la temperatura, fet que fa previsible una forta afectació dels boscos de la Península.

La pujada de les temperatures i la disminució de les precipitacions previstes per als escenaris de canvi climàtic simulats també comporten una redistribució de l'aigua verda (evapotranspirada) i l'aigua blava (drenatge i escorrentia superficial) als diferents tipus de boscos que es mostren a la figura 9.8.c. D'una banda, es preveu un augment de l'evapotranspiració o de les aigües verdes, probablement a conseqüència de l'increment de la demanda evaporativa que acompanya la pujada de les temperatures. De l'altra, la disminució de la precipitació i l'augment de l'evapotranspiració disminueixen la magnitud d'aigües blaves que surten dels boscos.

Es preveu, per tant, una progressiva situació d'estrès hídric en augment per a la vegetació, però també per als sistemes aquàtics de les conques corresponents, els quals tendiran a rebre quantitats més petites d'aigua. La gestió forestal podria ajudar a mitigar el creixent estrès hídric dels boscos i la disminució de l'aigua blava. En aquest sentit, a la figura 9.8.d se simulen diferents itineraris de gestió forestal ORGEST (<http://ags.ctfc.cat/?p=649>) proposats per als *Pinus halepensis* pel Centre de la Propietat Forestal als boscos d'aquesta espècie del Montmell (Baix Penedès). S'han avaluat dues condicions, les quals es corresponen a dues profunditats de sòl i precipitació, i s'ha suggerit que, d'una banda, la gestió forestal pot disminuir la quantitat d'aigua verda, de manera que deixa més quantitat d'aigua blava sense gestionar que la del mateix bosc;

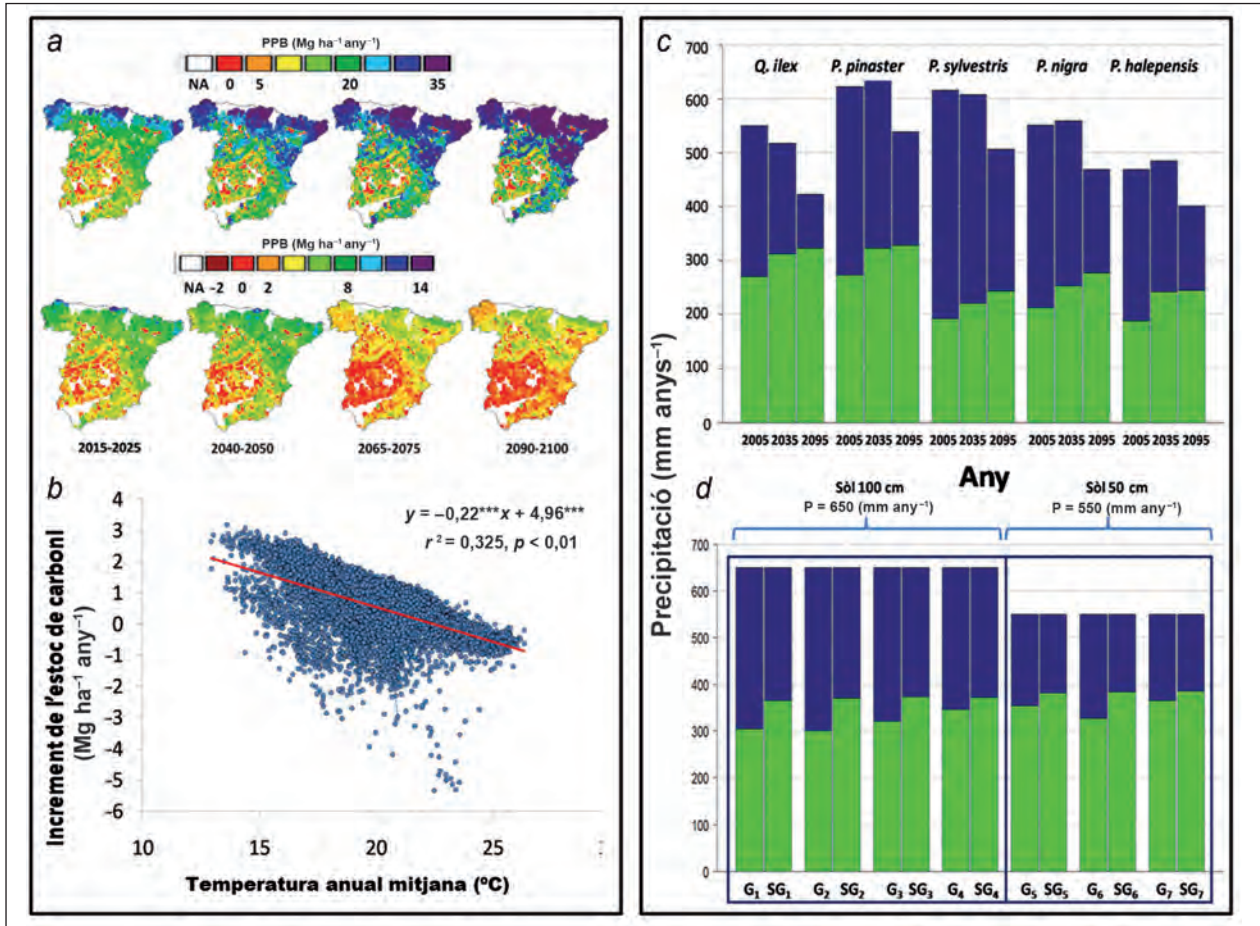


FIGURA 9.8. a) Resultats de producció dels boscos mono específics espanyols de la Península per a un escenari socioeconòmic A2 (850 ppm de CO₂ atmosfèric el 2100) i el model de circulació general l'ECHAM4. La profunditat de sòl simulada ha estat de 0,5 m i el nombre de parcel·les simulades de l'Inventari Forestal Nacional (IFN) és de 34.000. Es mostra la producció primària bruta (PPB) i la producció primària neta (PPN) del mateix escenari durant quatre períodes diferents al llarg del segle XXI. Els llocs on no es disposa de dades s'han deixat en blanc. b) Variació del carboni acumulat durant el període 2076-2100 en relació amb la temperatura anual mitjana del mateix període en una submostra de 10.328 parcel·les de l'IFN on no hi va haver mortalitat al bosc. c) Canvis en el repartiment de l'aigua precipitada en aigua blava (drenatge i escorrentia, en blau a la figura) i en aigua verda (evapotranspirada, en verd a la figura) durant el segle XXI. S'han simulat 500 parcel·les mono específiques de l'IFN escollides aleatòriament del territori peninsular espanyol on queden representades les cinc espècies de la figura. Es presenten valors per al 2005 i la projecció per al 2035 i 2095. L'escenari de canvi climàtic és l'escenari socioeconòmic A2 (850 ppm de CO₂ atmosfèric el 2100), i el model de circulació general l'ECHAM4. La profunditat de sòl simulada ha estat de 0,5 m. d) Simulacions amb GOTILWA+ dels efectes de la gestió forestal en els balanços hídrics d'un rodal de *Pinus halepensis* situat al Montmell. S'analitzen diferents itineraris de gestió dels models ORGEST proposats pel Centre de la Propietat Forestal per a aquesta espècie (G1, G2, G3, G4) per a una precipitació de 650 mm/any i una profunditat de sòl de 100 cm, i els models ORGEST (G5, G6, G7) per a una precipitació de 550 mm/any i una profunditat del sòl de 50 cm. Cadascun d'aquests itineraris es compara amb el cas corresponent SG (sense gestió). Com a c), també es mostren els canvis en el repartiment de l'aigua precipitada en aigua blava (drenatge i escorrentia, en blau a la figura) i aigua verda (evapotranspirada, en verd a la figura).

i de l'altra, que la disminució de la fondària del sòl i la precipitació es tradueixen en una quantitat més petita d'aigua blava, però no d'aigua verda, que en aquest cas és governada per la demanda evaporativa característica de la zona.

9.8. Retroalimentacions biològiques en el canvi climàtic

Els organismes vius i els ecosistemes no són passius dels canvis climàtics. Les mo-

dificacions que el canvi climàtic els ha generat en l'estructura i l'activitat tenen, alhora, efectes significatius, tant biogeoquímics com biofísics, que retroalimenten el canvi climàtic mateix.

Entre els processos biogeoquímics destaquen la fixació de carboni, i més concretament la funció dels ecosistemes com a embornals del CO₂ atmosfèric, i també el paper que tenen en les emissions de compostos orgànics volàtils. En el balanç

de carboni dels ecosistemes terrestres catalans intervenen molts processos complexos, els quals es troben sotmesos a moltes interaccions. Malgrat els progressos duts a terme durant els darrers anys, tancar aquest balanç en detall no és una tasca fàcil, i més encara quan en l'anàlisi intervenen escales de temps i d'espai contrastades, però també a causa de les incerteses causades per totes les condicions ambientals que interaccionen amb aquests processos i que no són totalment conegudes. Per exemple, no és clar que l'augment de CO_2 atmosfèric es tradueixi en una fixació més gran de carboni per les plantes, ja que altres factors com ara la sequera o el desequilibri nutricional determinen, en alguns casos, minves en la fixació. De manera similar, els COVB, compostos orgànics capaços de generar aerosols i núvols de condensació de núvols, que, per contra, causen l'efecte d'hivernacle, allarguen la vida mitjana del CH_4 perquè consumeixen radicals hidroxils durant l'oxidació, alteren la calor de condensació i, com a conseqüència, afecten el clima d'una manera i amb una intensitat que encara hem de dilucidar, però que potencialment són ben significatives (Peñuelas *et al.*, 2013).

Pel que fa als efectes biofísics dels canvis en l'activitat i l'estructura de la vegetació produïts pel canvi climàtic, són especialment importants els que estan lligats a la proporció entre calor latent i calor sensible i els que estan relacionats amb l'albedo. Per exemple, els mateixos canvis fenològics en la presència de fulles que hem esmentat en aquest capítol podrien tenir uns efectes que no es consideraven, fins ara, com un segrest de diòxid de carboni i un consum d'aigua al sòl més destacats. A les zones humides, els boscos poden transpirar intensament i acumular molt de vapor, de manera que poden fomentar la formació de núvols que refresquen l'ambient i incrementen les pluges. En canvi, a les regions mediterrànies, durant els períodes de sequera estivals, tot i que els arbres reben molta radiació, no disposen d'aigua suficient per a generar aquest efecte, raó per la qual el clima d'aquestes àrees és encara més càlid. Aquest fenomen sembla haver tingut un paper significatiu en onades de calor recents, com la del 2003 (Peñuelas *et al.*, 2009). A més, la disminució de l'aigua del sòl també afecta el funcionament de la vegetació i, per tant, de l'ecosistema. De la mateixa manera,

la prolongació del període d'activitat dels arbres de fulla caduca a causa del canvi climàtic pot tenir efectes contradictoris, ja que es pot esperar tant la mitigació com l'amplificació d'aquest fenomen, i cap a on es decantarà la balança dependrà de la disponibilitat d'aigua i de les especificitats regionals, cosa que posarà en relleu la necessitat d'aprofundir en aquesta línia d'investigació amb estudis més quantitativus.

9.9. Conclusions

A Catalunya hi ha una gran quantitat d'evidències observacionals i experimentals de l'efecte que el canvi climàtic ja té en els organismes i ecosistemes terrestres.

Les evidències van des de canvis genètics i epigenètics fins a canvis en el conjunt del país, els quals es poden observar des dels satèl·lits, tot passant per canvis en el metabolisme dels organismes, la demografia de les poblacions vegetals i animals, la composició de les comunitats, i l'estructura i el funcionament dels ecosistemes.

Aquestes alteracions poden esdevenir més fortes i significatives si la combinació del canvi climàtic, les perturbacions associades (per exemple, inundacions, sequeres, onades de calor i incendis forestals) i els canvis en els altres components que formen part del canvi global (sobretot, els canvis d'ús del sòl, la contaminació i la sobreexplotació dels recursos) continuen com fins ara o s'accentuen.

Aquestes alteracions comprometen els serveis ambientals, productius i socials que els ecosistemes terrestres ens proporcionen.

Les polítiques de gestió ambiental i forestal haurien de tenir en compte tant les característiques pròpies dels nostres ecosistemes com les condicions climàtiques, ambientals i socials que s'estan projectant per als anys i decennis vinents.

9.10. Recomanacions

Des del punt de vista antròpic, els ecosistemes terrestres són sistemes proveïdors de múltiples béns i serveis: productius, ambientals i socials. Pel que fa a la funció productiva, subministren béns naturals renovables, com ara aliments, medicines, productes de fusta i d'altres (pastures, suro, pinyes, caça,

bolets, etc.). Entre les funcions ambientals i ecològiques destaquen els serveis ecosistèmics, com ara el manteniment de la biodiversitat, la regulació de la composició atmosfèrica i del clima, la regulació dels cicles biogeoquímics, la protecció del sòl contra l'erosió, la regulació hidrològica o l'emmagatzematge de carboni. Entre les funcions socials, les més rellevants són els usos recreatius, educatius i de lleure, les oportunitats per a la recerca, els valors tradicionals culturals i emocionals, així com el paisatge agradable, els quals donen peu a activitats econòmiques importants com ara el turisme i l'excursionisme. Entre aquestes funcions i serveis ecosistèmics, interessa especialment la que fa referència a l'emmagatzematge de carboni, a causa de les implicacions que té en tots aquests serveis, ja que es tracta de la base de la producció vegetal que els sosté i per les implicacions que té en el balanç de CO₂ atmosfèric, el qual ha estat gairebé confirmat com un dels orígens més importants del fenomen que aquí ens ocupa: el canvi climàtic.

En aquest capítol s'ha descrit que els canvis atmosfèrics i climàtics afecten d'una manera important el funcionament i l'estructura dels nostres ecosistemes terrestres, tant pels efectes directes com per mitjà de les interaccions que duen a terme. És important recordar que els canvis biològics descrits en la literatura durant els darrers decennis s'han produït amb un escalfament del planeta que només es troba un terç o fins i tot menys per davall del que va ser projectat per al segle que ara encetem. És prou clar que tots aquests canvis tindran un impacte sobre molts d'aquests béns i serveis i, per tant, afectaran també els sistemes socioeconòmics (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), però també és ben clar que l'efecte del canvi climàtic és difícil de destriar dels que impliquen els altres components del canvi global, com ara els canvis atmosfèrics o els canvis en els usos del sòl.

Per tal de conèixer i, així, poder gestionar aquests canvis d'una manera més eficient, és necessari dur a terme nous estudis experimentals que reproduïxin les condicions naturals i que hi incloguin casos de canvis extrems o sobtats, així com l'aprofitament dels avenços tecnològics; per exemple, aplicant-los als estudis del passat remot i proper i a la teledetecció. No cal dir, a més, que s'han

de buscar les sinergies pròpies de la multidisciplinarietat; els exemples de treballs que aquí hem presentat resumits pretenen seguir aquesta línia.

Els ecosistemes catalans presenten una extraordinària varietat en l'espai i en el temps, a més d'una important resiliència. L'heterogeneïtat multidimensional i la resiliència són el resultat de la coevolució amb els humans i les activitats que duen a terme. Els ecosistemes evolucionen constantment modificats pels focs, pels humans, per les eines de què disposen i pel bestiar, i, més recentment, a causa del canvi climàtic i el canvi global. La dinàmica dels nostres ecosistemes, gairebé tots seminaturals, es pot entendre com una sèrie de degradacions antropogèniques i de regeneracions subsegüents. De fet, tant la sobreexplotació com la protecció completa poden dur a estadis inferiors de l'atractiu escènic i de la utilitat econòmica dels ecosistemes terrestres. Les estratègies multiús per a la gestió i rehabilitació dels ecosistemes terrestres mediterranis requereixen un gran esforç educatiu, econòmic, de recerca i de governança per a permetre'ns continuar gaudint dels seus serveis i per a donar esperança de futur a ecosistemes terrestres negligits, com ara els matollars mediterranis en el marc dels canvis actuals de clima i usos del sòl.

En tot cas, la gestió dels ecosistemes terrestres en relació amb el canvi climàtic hauria de tenir en compte els punts següents:

- La gestió forestal ha d'incorporar el canvi de condicions ambientals que estem experimentant a l'hora de definir les intensitats d'intervenció i la freqüència. Per exemple, reduir les densitats de rebrots en boscos d'alta densitat ha estat demostrat com una mesura efectiva per a disminuir l'impacte de sequeres extremes.
- En els anys vinents, les polítiques de reforestació de zones pertorbades i la gestió de l'aforestació d'espais agrícoles abandonats haurien de tenir en compte els canvis que s'estan produint i les condicions que s'estan projectant amb vista al futur immediat. Hi destaca la disminució de la disponibilitat hídrica a conseqüència tant de la disminució de les precipitacions i/o de l'augment de l'evapotranspiració potencial com de l'increment de la demanda d'uns ecosistemes més fertilitzats i d'una població en augment.

- La gestió dels espais forestals i, en general, dels naturals ha d'incorporar l'escala de paisatge i la regional, i ha d'incloure una planificació a gran escala que tingui en compte la combinació de mosaics d'espais de tipus divers, així com l'ús múltiple i l'efecte de les pertorbacions; com ara, per exemple, els incendis forestals.
- La política de recerca i inventariat de recursos hauria de fer un esforç pel que fa a la quantificació del carboni a la biomassa subterrània i als sòls, a més de la relativa a la biomassa aèria, ja que aquestes dades són escasses i necessàries.
- Per a pal·liar el canvi climàtic per mitjà d'una captació més gran i una pèrdua més petita de CO₂, s'hauria d'actuar sobre la reforestació i l'aforestació, a més de perllongar la immobilització del carboni en els productes forestals i de protegir els sòls, així com considerar les alteracions que tot això provoca en el cicle de l'aigua.

Referències bibliogràfiques

- BARBETA, A.; OGAYA, R.; PEÑUELAS, J. (2013). «Dampening effects of long-term experimental drought on growth and mortality rates of a Holm oak forest». *Global Change Biology*, 19, p. 3133-3144.
- BARTRONS, M.; GRIMALT, J.; CATALAN, J. (2011). «Altitudinal distributions of BDE-209 and other polybromodiphenyl ethers in high mountain lakes». *Environmental Pollution*, 159, p. 1816-1822.
- CUNILL, R.; SORIANO, J. M.; BAL, M. C. [et al.] (2012). «Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis». *Vegetation History and Archaeobotany*, 21(4-5), p. 373-384.
- FARRÉ-ARMENGOL, G.; FILELLA, I.; LLUSIÀ, J. [et al.] (2014). «Changes in floral bouquets from compound-specific responses to increasing temperatures». *Global Change Biology*, 20, p. 3660-3669.
- GARGALLO-GARRIGA, A.; SARDANS, J.; PÉREZ-TRUJILLO, M. [et al.] (2014). «Opposite metabolic responses of shoots and roots to drought». *Scientific Reports*, 4, p. 6829.
- IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4)*. Edició de S. Solomon, D. Qin, M. Manning [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <<http://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1>> [Consulta: 25 febrer 2016].
- (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Edició de C. B. Field, V. R. Ramos, D. J. Dokken [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2>> [Consulta: 25 febrer 2016].
- KRÖEL-DULAY, G.; RANSIJN, J.; SCHMIDT, I. K. [et al.] (2015). «Increased sensitivity to climate change in disturbed ecosystems». *Nature Communications*, 6.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Washington DC: Island Press.
- PALLAS, R.; RODÉS, À.; BRAUCHER, R. [et al.] (2006). «Late Pleistocene and Holocene glaciation in the Pyrenees: a critical review and new evidence from 10Be exposure ages, south-central Pyrenees». *Quaternary Science Reviews*, 25(21-22), p. 2937-2963.
- PEÑUELAS, J.; RUTISHAUSER, T.; FILELLA, I. (2009). «Phenology feedbacks on climate change». *Science*, 324, p. 887-888.
- PEÑUELAS, J.; SARDANS, J.; ESTIARTE, M. [et al.] (2013). «Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere». *Global Change Biology*, 19, p. 2303-2338.
- PIAO, S.; TAN, J.; CHEN, A. [et al.] (2015). «Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature». *Nature Communications*, 6, p. 6911.
- REVELLES, J.; CHO, S.; IRIARTE, E. [et al.] (2015). «Mid-Holocene vegetation history and Neolithic land-use in the Lake Banyoles area (Girona, Spain)». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 435, p. 70-85.

- RICO, L.; OGAYA, R.; BARBETA, A. [et al.] (2014). «Changes in DNA methylation fingerprint of *Quercus ilex* trees in response to experimental field drought simulating projected climate change». *Plant Biology*, 16, p. 419-427.
- RIVAS-UBACH, A.; SARDANS, J.; PÉREZ-TRUJILLO, M. [et al.] (2012). «Strong relationship between elemental stoichiometry and metabolome in plants». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, p. 4181-4186.
- SARDANS, J.; RIVAS-UBACH, A.; PEÑUELAS, J. (2012). «The C:N:P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: A review and perspectives». *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 14, p. 33-47.
- VEGAS-VILARRÚBIA, T.; GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P.; MORELLÓN, M. [et al.] (2013). «Diatom and vegetation responses to Late Glacial and Early Holocene climate changes at Lake Estanya (Southern Pyrenees, NE Spain)». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 392, p. 335-349.
- VERGER, A.; BARET, F.; WEISS, M. (2014). «Near real time vegetation monitoring at global scale». *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7, p. 3473-3481.