

La vida secreta de les plantes

«Sembla evident que els éssers orgànics, perquè es produeixi alguna variació important, han d'estar exposats durant diverses generacions a condicions noves i que, una vegada que l'organisme ha començat a variar, continua generalment variant durant moltes generacions... Les plantes cultivades més antigues, tals com el blat, produeixen encara varietats noves...»

Charles Darwin,
L'origen de les espècies.



Cèl·lules d'una tija de blat

Escrit per

Juan Carlos García Galindo

Departament de Química Orgànica de la Universitat de Cadis

Traduït de l'espanyol per OMNIS CELLULA

Introducció

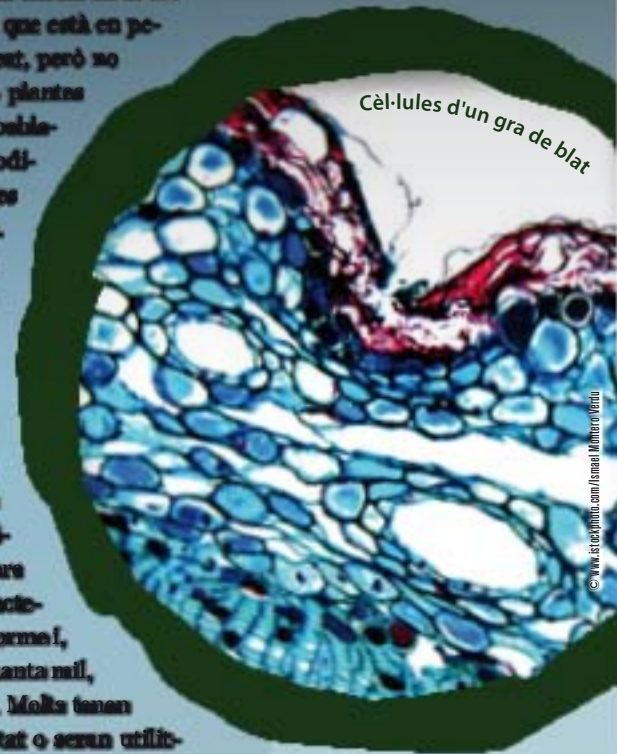
Quan em van proposar escriure aquest article vaig estar pensant bastant de temps sobre quin podia ser l'enfocament adequat i la temàtica que hauria d'aberdar perquè fos atractiu. Parafrasejant Stephen Hawking a *Història del temps*, per cada fórmula matemàtica que s'inclou en el text, el nombre potencial de lectors es divideix per 2, així que ell va incloure la famosa $E = mc^2$ confiant que això només faria disminuir fins a la meitat el nombre de possibles lectors. Si traslladem aquesta situació al món de la química orgànica, ara que el criteri continua sent vàlid, no sé si a causa d'una no gaire bona experiència amb el món de les fórmules... Per tant, intentaré perdre el mínim nombre de lectors.

Com podem explicar de manera atractiva allò que ha ocupat la meua vida professional durant els últims vint anys sense posar fórmules? Amb aquesta pregunta em va venir a la ment un documental que vaig veure quan era petit. Es titulava *La vida secreta de les plantes*. Recordo que em va impactar perquè em va mostrar un món fascinant, en fins en aquell moment només havia vist quecom immòbil i no gaire interessant. Crec que aquesta idea de les plantes com a tapis de fons, bonic però inert, sobre el qual transcorre la vida a la natura, està massa arrelat en l'imaginari comú de moltes persones. Quan velem un reportatge sobre la natura, gairebé sempre velem el cecodril atropant un nyu durant la migració anual a través del Serengeti, el vol en pirat del falco o de l'àliga per atrapar una presa, com les orques atrapan als eadels de foc a les platges de la Patagònia o, si ens movem al regne més petit, com el camaleó, l'avanya o el progadriu perseguen, atropen i devoren les preses... o com aquestes escapen del predador i en fugen. En definitiva, veiem moviment. Mentrestant, sembla que les plantes només tinguin el paper de l'utrezzo en un escenari. Un punt de color per fer més interessant la imatge que trobem a primer pla. És més lluny de la realitat. Precisament aquesta falta de moviment, aquesta incapacitat per anar a buscar els recursos allà on siguin o escapar de possibles amenaces és el que ha fet de les plantes una sofisticada màquina química. Fa ben poc que som conscients de les complexitats d'aquest engranatge, tot i que l'hem estat utilitzant sense conèixer-ne el fonament des que l'home humà és ésser humà. Però anem a pams.

Metabòlits secundaris i biodiversitat

La paraula biodiversitat està de moda. Avui tot el món parla de biodiversitat, i que està en perill. En coneixem bé el significat, però no tots som conscients de quines plantes i insectes constitueixen probablement el nucli dur d'aquesta biodiversitat. Això, sense comptar les espècies de microorganismes. Es calcula que existeixen unes quatre-cents mil espècies de plantes superiors, unes dues-cents cinquanta mil de les quals, aproximadament, són angiospermes. D'altra banda, s'estima que només s'ha estudiat el 10 % d'aquestes plantes per determinar-ne la composició química. Amb tot, el nombre de metabòlits secundaris caracteritzats i descrits fins avui és enorme i, probablement, supera els cinquanta mil, com a estimació més modesta. Molts tenen activitats biològiques i han estat o seran utilitzats per l'ésser humà per a diversos propòsits. Això ens dona una idea de l'immens potencial que ens queda per estudiar. D'altra banda, els insectes constitueixen una altra de les grans àrees de biodiversitat, amb un nombre estimat d'espècies d'entre dos i cinc milions, dels quals només els lepidòpters són més de quinze mil espècies (Harborne, 1999). Aquests tres grups (plantes, metabòlits secundaris i insectes) constitueixen tres grans grups de biodiversitat de la natura.

Els estudis sobre la composició química de les plantes (els denominats posteriorment *metabòlits secundaris*, en un sentit ampli del terme) són ja antics des del punt de vista científic. Així la quinina, fonamental en el tractament de la febre groga, es va aïllar de l'escorça de l'arbre de la cinxona (*Cinchona pubescens*) l'any 1820, tot i que l'estructura no es va establir fins molt més tard, el 1908. Avint va ser establert, a mesura que s'anaven descobrint i dilucidant més i més estructures, l'enorme nombre i varietat de compostos existents. La dificultat per classificar-los, fins que no va arribar una manera de sistematitzar-los basat en el descobriment de les unitats biosintètiques, va portar a la pregunta: per què i per a què es fabricaven? Molts autors, fins i tot van considerar aquests compostos restes del metabolisme primari. Posteriorment es van utilitzar



Cèl·lules d'un gra de blat

© www.istockphoto.com / Image / Romero / Getty



en taxonomia com a marcadors i han estat molt útils a l'hora de classificar o recllassificar moltes espècies de plantes fins a l'arribada dels estudis genètics. El seu veritable paper, malgrat tot, no es va començar a intuir fins a mitjan segle passat.

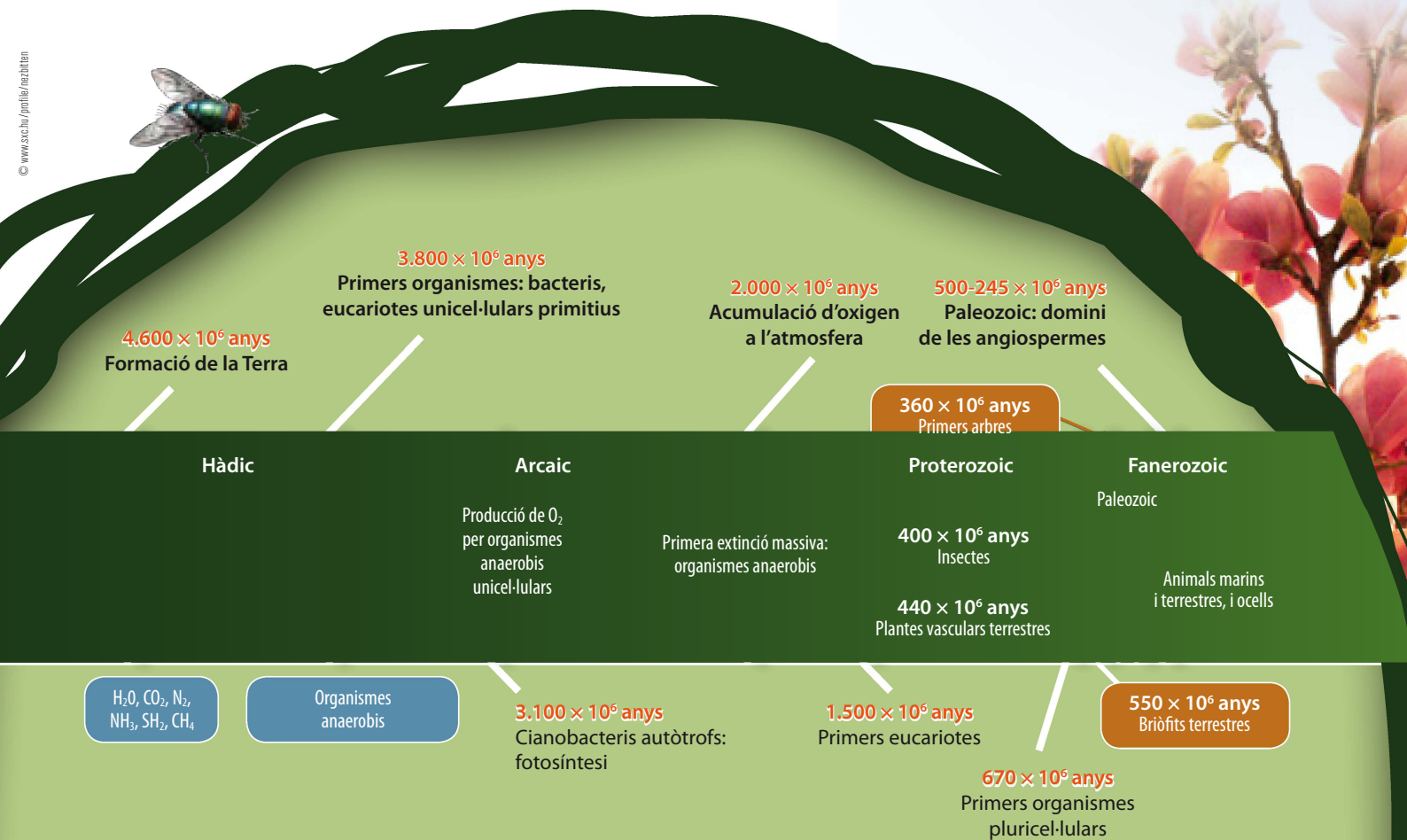
Un elevat nombre d'aquests compostos han mostrat diverses activitats biològiques. Aquest fet no és sorprenent. Ben al contrari, l'ús medicinal de les plantes és tan antic com la mateixa humanitat. Fins i tot entre els animals és freqüent observar comportaments en els quals utilitzen determinades plantes quan es veuen afectats per diversos tipus de malalties (estomacals, respiratòries, etc.). D'altra banda, l'ésser humà ha utilitzat les plantes no solament en la vessant curativa; l'ús d'al·lucinògens d'origen vegetal (o de bolets) és característic en moltes cultures. L'altra vessant la constitueix l'ús de compostos com a verins. Els alcaloides conïina i coniceïna, presents en la cicuta (*Conium maculatum*), l'àcid prússic (nom amb què es coneixia l'àcid cianhídric, present en la nou vòmica o ametlla amarga) o l'estrícina, no són més que baules d'una llarga llista de verins associats a personatges històrics que mostra com l'ésser humà ha utilitzat les propietats de les plantes contra els seus semblants. Tot i així, i mirant el quadre de manera desapassionada, aquests fets posen en relleu l'enorme potencial de bioactivitat que té la gran biodiver-

sitat de compostos presents a les plantes. De nou sorgeix la pregunta: quina utilitat troba la planta a fabricar-los? Quin és el seu propòsit?

Una mica d'història

La vida fa molt temps que furta el nostre planeta. Aproximadament, es calcula que si la Terra té uns 4.600 milions d'anys, els primers organismes vius (els bacteris i les cèl·lules procariotes) van aparèixer fa uns 3.800 milions d'anys, durant la denominada *era arcaica*. Fins fa uns 3.100 milions d'anys que no van aparèixer els primers organismes fotosintètics productors d'oxigen, durant el període Arqueà, que se suposa que van acabar produint la primera extinció massiva per enverinament dels organismes anaerobis fa uns 2.000 milions d'anys. La primera vegetació es creu que va consistir en falgueres i fongs gegants fa uns 550 milions d'anys (Stein *et al.*, 2007), seguits de l'aparició de les plantes vasculars terrestres (440 milions d'anys), durant el Devonian, i dels arbres fa uns 360 milions d'anys. Altres espècies com ara els líquens van haver d'aparèixer no gaire més tard que les falgueres, i així van formar els primers boscos primitius. És important destacar que els insectes van aparèixer només 40 milions d'anys després, fa uns 400 milions d'anys, i des de llavors els tres regnes (els insectes, les plantes i els fongs/microorganismes) han estat convivint.

Figura 1. Breu història evolutiva de la Terra. Les plantes es troben entre els primers éssers complexos terrestres i conviuen amb microorganismes i insectes gairebé des dels inicis de la seva història. ▼



© www.sxci.hu/profile/7ou_7ouale

© www.sxci.hu/profile/7ou_7ouale

© www.sxci.hu/profile/7ou_7ouale

L'objectiu d'aquest repàs accelerat i poc exhaustiu sobre la història del nostre planeta no és altre que posar de manifest que les plantes es troben entre els éssers vius més antics de la Terra, i que conviuen amb els bacteris, els insectes i els fongs gairebé des de l'inici del camí evolutiu. Com a conseqüència, les plantes han tingut la necessitat de defensar-se de l'atac d'insectes fitòfags i de les malalties causades per microorganismes des de l'inici de la història. De la mateixa manera, aquests organismes han intentat, durant el seu procés evolutiu, vèncer les barres defensives desenvolupades per les plantes. Una de les hipòtesis vigents és que aquest procés d'acció-reacció és el que ha causat la coevolució de les plantes i dels seus enemics naturals, i ha produït l'enorme biodiversitat, tant d'espècies com de nombre de metabòlits secundaris que avui hi ha a la natura.

Coevolució: Darwin i els metabòlits secundaris

Què poden tenir en comú Darwin i els metabòlits secundaris? No és el moment d'afegir més llenya al foc en uns temps en què en alguns llocs la polèmica entre creacionistes i evolucionistes sembla «retrotransportar-nos» a fa gairebé dos segles. Tot i així, també és cert que la mateixa teoria de l'evolució ha «evolucionat» des dels inicis, quan plantejava l'herència dels caràcters adquirits, fins al moment actual, quan el neodarwinisme conjuga les lleis de Mendel com a mecanisme que regeix l'herència de les variacions sobre les quals actua la selecció natural. Tornant al paràgraf anterior, l'enorme diversitat (o, més bé, biodiversitat) de metabòlits secundaris que presenten les plantes i, no tant, la resta dels éssers vius, s'interpreta en termes evolucionistes.

Anem a poc a poc. En primer lloc, cal ser conscients de la complicada maquinària que implica la síntesi d'un sol metabòlit, tant si és primari com secundari. Tot i que la distinció entre ambdós adjectius és cada vegada més tènue, una manera una mica simplista i no gaire exacta de distingir-los és aquella que defineix els *metabòlits primaris* com els compostos que són totalment essencials per a la vida, i engloba compostos com ara els sucres i altres glicídics, lípids, proteïnes o bases púriques i pirimidíniques. La resta de compostos van ser denominats, en el seu moment, *metabòlits secundaris* en un sentit menyspreador. No se'n coneixia la funció i fins i tot hom els va considerar productes de rebuig del metabolisme primari. No és així, com s'ha com-

provat durant l'última meitat del segle passat. Tot i així, tant per als uns com per als altres, el procés necessari perquè les plantes els sintetitzin és bàsicament el mateix: àtoms, fonamentalment C, N, O i H, tot i que també poden incloure de manera més esporàdica S i, no tant, P; energia per acoblar-los (normalment, en forma d'ATP i NADPH); una maquinària sintètica que faci aquesta tasca i que, com sempre en la natura, va a càrrec de diferents enzims o complexos enzimàtics, i una sèrie d'instruccions en el codi genètic que codifiquin la síntesi d'aquests enzims, així com les mateixes instruccions d'autoregulació de la síntesi que en modulen la producció segons les necessitats de la planta.

Ens trobem davant un panorama complex en el qual no es tracta només que el carboni, el nitrogen, l'oxigen i l'hidrogen que els componen hagin de ser desviats des de les cadenes de producció de metabòlits primaris i, per tant, dels mecanismes de funcionament bàsics que sustenten la vida de la planta o de l'organisme (respiració cel·lular, fotosíntesi, mitosi, elongació cel·lular, síntesi de proteïnes, etc.), sinó que la síntesi dels metabòlits secundaris implica un esforç d'inversió de recursos i energia comparable als que fa la planta per mantenir els processos bàsics de la vida, i implica la síntesi de tot un nombre de productes intermedis que no tenen cap altre sentit que el de ser baules necessàries en l'obtenció del producte final. Tal inversió ha de ser rendible per a l'organisme que la du a terme; si no fos així, les pressions evolutives fa temps que els haurien substituït per organismes amb una eficàcia més elevada de gestió dels recursos i, per tant, amb més capacitat de creixement i multiplicació. És, precisament, en aquest marc on s'ha buscat una explicació a la presència dels metabòlits secundaris.

Hem de ser conscients que, atès que la informació necessària per sintetitzar aquests compostos està registrada en el codi genètic de cada organisme, aquesta informació està subjecta a les lleis de variació genètica i de transmissió de l'herència, punt en el qual es connecta amb les teories neodarwinistes que defineixen la influència de les pressions mediambientals en la selecció de les variacions que es produeixen sobre l'herència. Així doncs, simplificant molt la qüestió, només la informació que codifiqui les rutes biosintètiques de metabòlits secundaris que representin un avantatge

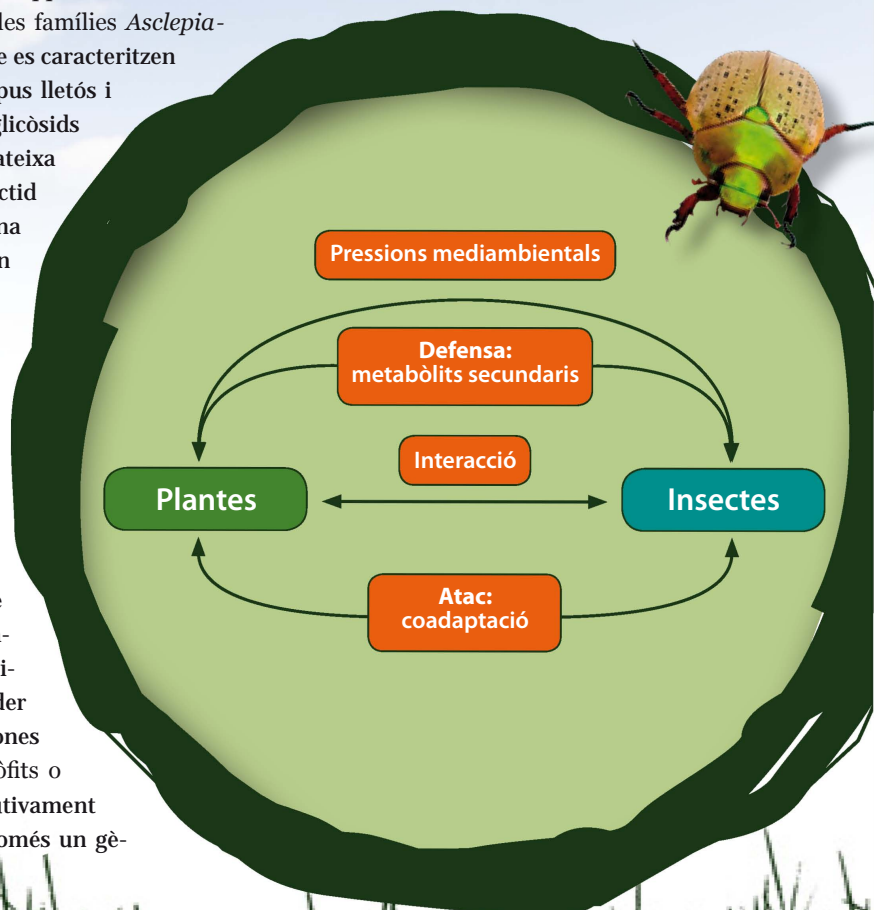
—o que, com a mínim, no vagin en detriment d'aquests— per a l'organisme que els produeix, es veurà perpetuada (o millorada) en el transcurs de les generacions.

Però, quines serien les pressions mediambientals que forçarien l'aparició o la desaparició d'informació genètica que codifiqui les rutes biosintètiques dels metabòlits secundaris? Els metabòlits secundaris poden acomplir tant funcions de regulació interna de tipus hormonal, com funcions de defensa davant de possibles depredadors o enemics (altres plantes, malalties, insectes i altres organismes herbívors) o davant d'amenaques o estrès abiòtic (protectors d'UV, crioprotectors, etc.). Tant en un cas com en l'altre, les plantes que responguin millor a aquests factors adversos o que siguin capaces d'optimitzar millor els seus recursos mitjançant una adequada regulació interna tindran més probabilitat de sobreviure i de transmetre'n els caràcters.

Centrem-nos en les funcions de defensa. En un treball ja clàssic en química ecològica, Ehrlich i Raven (1964) van estudiar la relació existent entre determinades famílies de plantes i les larves de lepidòpters que s'alimentaven d'aquestes, i en van observar un grau d'especificitat elevat. Així, per exemple, les larves de la família dels danains (com, per exemple, la papallona monarca, *Danaus plexippus*) s'alimenten únicament de plantes de les famílies *Asclepiadaceae* i *Apocynaceae*, que es caracteritzen pel fet de tenir saba de tipus lletós i ser riques en alcaloides i glicòsids de gust amarg. De la mateixa manera, les larves de l'àrctid *Arctia caja* o de la papallona *Tyria jacobea* s'alimenten de manera gairebé exclusiva de plantes del gènere *Senecio*, com per exemple *Senecio vulgaris* o *Senecio jacobea*, riques en alcaloides de tipus pirrolizidínic. Ehrlich i Raven també van observar que la majoria de les larves s'alimentaven de plantes dicotiledònies i rarament de monocotiledònies. Encara més, no van poder citar cap família de papallones que s'alimentessin de briòfits o de falgueres (plantes evolutivament encara més antigues), i només un gènere d'arnes (*Papaipema*) que ho fes d'aquests últims. D'altra banda, van destacar el fet que, en molts casos, les espècies vegetals que eren objecte de predació selectiva per part d'una o diverses famílies de papallones o insectes acostumaven a tenir composicions químiques de metabòlits secundaris (fins on es podia determinar en aquell moment) bastant similars quant al tipus de compostos (alcaloides, glicòsids, cardenòlids, etc.). Basant-se tant en aquesta preferència alimentària per les *Dicotyledonea*, com per l'aparent manca d'interès en espècies més antigues com *Monocotyledoneae*, les falgueres o els briòfits, van concloure que l'aparició de *Dicotyledonea* (segons les dades existents en aquella època, situada en algun moment del període precretàtic) va haver de precedir, sens dubte, la irradiació evolutiva que ha produït la diversificació d'espècies de lepidòpters. També, i després d'observar que normalment les papallones o les arnes s'alimentaven de plantes que tenien un cert perfil o tipus de metabòlits secundaris, van arribar a la conclusió clau que hi ha hagut i hi ha una influència mútua entre els metabòlits de defensa produïts per les plantes i els canvis produïts en les espècies de papallones que els ha permès acostumar-se a aquests (i, per tant, establir una relació més específica amb les plantes productores), de manera que «l'evolució dels metabòlits secundaris en les plantes i els canvis evolutius

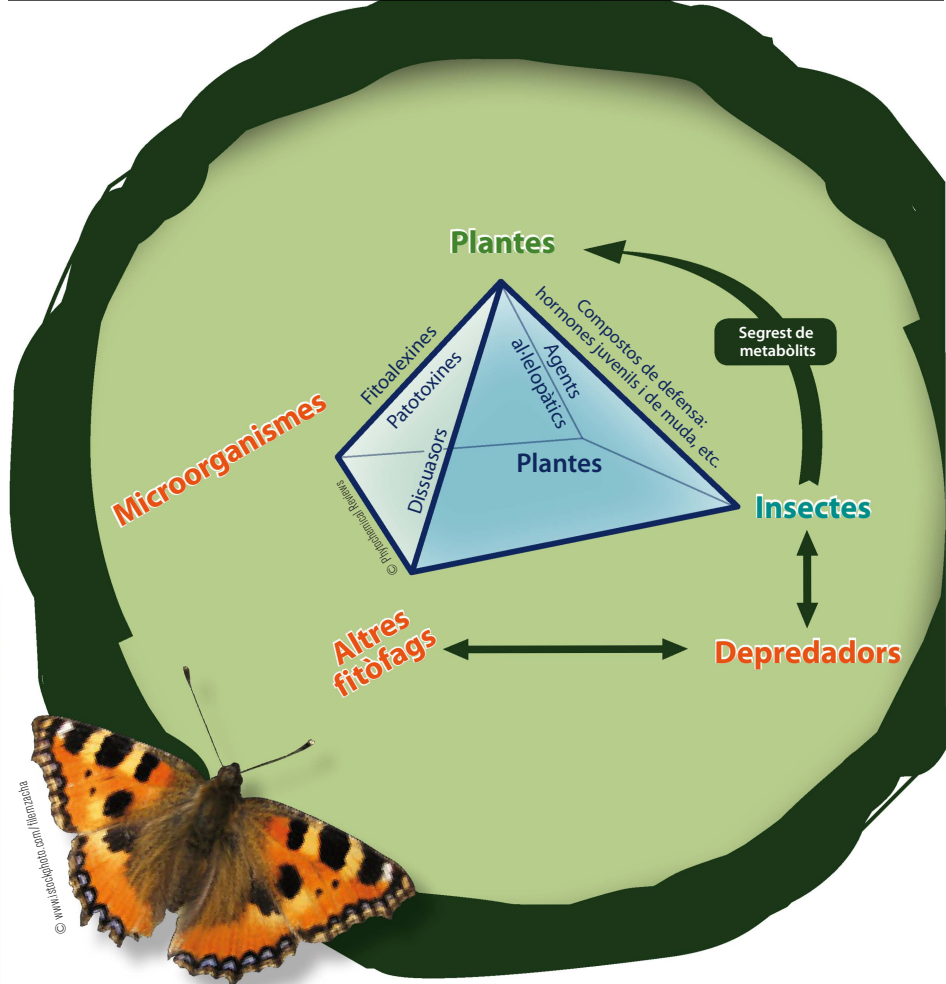
neres d'arnes (*Papaipema*) que ho fes d'aquests últims. D'altra banda, van destacar el fet que, en molts casos, les espècies vegetals que eren objecte de predació selectiva per part d'una o diverses famílies de papallones o insectes acostumaven a tenir composicions químiques de metabòlits secundaris (fins on es podia determinar en aquell moment) bastant similars quant al tipus de compostos (alcaloides, glicòsids, cardenòlids, etc.). Basant-se tant en aquesta preferència alimentària per les *Dicotyledonea*, com per l'aparent manca d'interès en espècies més antigues com *Monocotyledoneae*, les falgueres o els briòfits, van concloure que l'aparició de *Dicotyledonea* (segons les dades existents en aquella època, situada en algun moment del període precretàtic) va haver de precedir, sens dubte, la irradiació evolutiva que ha produït la diversificació d'espècies de lepidòpters. També, i després d'observar que normalment les papallones o les arnes s'alimentaven de plantes que tenien un cert perfil o tipus de metabòlits secundaris, van arribar a la conclusió clau que hi ha hagut i hi ha una influència mútua entre els metabòlits de defensa produïts per les plantes i els canvis produïts en les espècies de papallones que els ha permès acostumar-se a aquests (i, per tant, establir una relació més específica amb les plantes productores), de manera que «l'evolució dels metabòlits secundaris en les plantes i els canvis evolutius

Figura 2. La interacció continuada entre insectes i plantes ha comportat una coadaptació dels insectes i un esquema coevolutiu entre aquests i les plantes, de manera que a cada nova adaptació d'una de les dues parts, l'altra respondrà intentant sobrepassar la nova barrera. ►



produïts com a resposta a aquests en els organismes fitòfags han estat clarament el factor dominant en l'evolució de les papallones i d'altres grups de fitòfags» (Ehrlich *et al.*, 1964).

Es pot considerar que un dels principals motors de canvi evolutiu en la producció de metabòlits secundaris té a veure amb la defensa de les plantes davant d'organismes fitòfags. Efectivament, les plantes conviuen amb els seus enemics des de l'inici de la història evolutiva. Per aquesta raó, la necessitat de les plantes de defensar-se davant d'atacs d'altres organismes o de la competència d'altres plantes i la manca de mobilitat, són dos factors crucials que n'han condicionat l'adaptació al medi, al costat d'altres factors mediambientals del mateix pes. En suma, a les adaptacions de tipus morfològic, una de les solucions aportades per les plantes al problema de la defensa és produir, emmagatzemar i, eventualment, expulsar al medi compostos potencialment tòxics per als depredadors més provables. Tot i així, aquesta solució té una contrapartida evident: l'organisme atacant (ja sigui fitòfag o microorganisme) també pot evolucionar, i de fet ho fa, per sobrepassar aquesta barrera. D'aquesta manera, els insectes, per exemple, que siguin capaços d'adaptar-se a una determinada toxina troben un nínxol ecològic on no hi ha competència per l'aliment amb altres insectes. Es crea així una relació més específica en la qual un compost que inicialment tenia una funció dissuasiva es converteix per aquesta espècie en un inductor alimentari específic: un compost capaç d'atraure una determinada espècie d'insectes, o bé per alimentar-se o bé per dipositar els ous en un entorn que li serà favorable. Aquest procés pot seguir *ad infinitum*, de manera que cada nova adaptació bioquímica generada per la planta (en forma de nous compostos de defensa) tingui resposta en una adaptació similar dels insectes o dels microorganismes. Com a resultat d'aquest procés de coevolució entre les espècies, es va generant una enorme diversitat de resposta en funció dels factors mediambientals específics,



un dels motius pels quals hi ha la gran biodiversitat d'espècies i de metabòlits que trobem avui.

D'aquesta manera, en l'intent per defensar-se dels depredadors i d'afrontar la competència pels recursos (aigua, sòl, nutrients, llum), les plantes han trobat una solució particular en forma de compostos químics de defensa que, en funció del tipus d'organisme davant del qual siguin actius, s'han denominat: *fitoalexines*, compostos de defensa davant de microorganismes i altres malalties (Harborne, 1993; Müller *et al.*, 1940); *fitohormones*, hormones juvenils i de muda, dissuasius alimentaris i estimulants de l'ovoposició (si es tracta d'insectes o altres fitòfags; Harborne, 1993), i *agents al·lelopàtics* (tant en ecosistemes terrestres —Stein *et al.*, 2007— com aquàtics —Ehrlich *et al.*, 1964—) si es tracta de competir amb altres plantes. Però aquesta serà una altra història. |

Figura 3. Interaccions mediades mitjançant metabòlits secundaris entre les plantes i el seu entorn (Macías *et al.*, 2007).

Referències bibliogràfiques

DARWIN, CH. (1859; edició utilitzada, 2008). *El origen de las especies*. 4a ed. Traducció d'A. de Zulueta. Madrid: Espasa-Calpe, p. 62.

EHRlich, P. R.; RAVEN, P. H. (1964) «Butterflies and plants: a study in coevolution». *Evolution*, núm. 18, p. 586-608.

HARBORNE, J. B. (1993). *Introduction to ecological Biochemistry*. 4a ed. Nova York: Academic Press.

MACIAS, F. A. [et al.] (2007). «Allelopathic Agents from aquatic ecosystems: potential biopesticide models». *Phytochemical Reviews*, núm. 7, p. 155-178.

MACIAS, F. A.; GALINDO, J. L. G.; GALINDO, J. C. G. (2007). «Evolution and current status of Phytochemical Ecology». *Phytochemistry*, núm. 68, p. 2917-2936.

MUELLER, K. O.; BÖRGER, H. (1940). *Arb. Biol. Reichsanstalt. Land- u. Forstwirtschaft*, núm.23, p. 189.

RICE, E. (1984). *Allelopathy*. 2a ed. Nova York: Academic Press, 422 pp.

STEIN, W. E. [et al.] (2007) «Giant cladoxylipsoid trees resolve the enigma of the Earth's earliest forest stumps at Gilboa». *Nature*, núm. 446, p. 904-907.

Juan Carlos García Galindo (Ibarra, Ecuador, 1965)



Ha fet tota la carrera al Departament de Química Orgànica de la Universitat de Cadis, on és professor titular. El 1988 va obtenir el grau de doctor amb una tesi sobre l'al·lelopatia, que va ser la primera en aquest gènere defensada a Espanya. Va fer una estada postdoctoral als laboratoris del Ministeri d'Agricultura dels Estats Units, al Centre per al Desenvolupament de Productes Naturals (NPURU) situat a la Universitat de Mississipí, per estudiar el mode d'acció de diferents agents al·lelopàtics. El seu interès s'ha centrat sempre en l'al·lelopatia, tant en l'aïllament i la caracterització d'agents al·lelopàtics, com en la síntesi, l'estudi del mode d'acció a escala cel·lular i molecular i en estudis de relació estructura-activitat QSAR. Actualment ha publicat uns quaranta treballs en diverses revistes científiques internacionals.