

LA DIVERSITAT DE LES PLANTES CULTIVADES. UNA VISIÓ MOLECULAR

PERE PUIGDOMÈNECH

Centre de Recerca en Agrigenòmica, CSIC-IRTA-UAB-UB

Adreça per a la correspondència: Pere Puigdomènec. Centre de Recerca en Agrigenòmica, edifici CRAG, Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra. Tel.: 935 636 300. Adreça electrònica: pere.puigdomenech@cragenomica.es.

RESUM

La nostra alimentació està basada en un nombre reduït d'espècies vegetals. Aquestes espècies van ser identificades en els inicis de l'agricultura i han estat l'objecte d'un procés intens de millora genètica. Aquest procés requereix la base més gran possible de variabilitat genètica i per això la conservació de diversitat biològica i el seu increment, si és possible, és essencial per mantenir un nivell adequat d'adaptació d'aquestes espècies a les condicions futures. L'estudi de les plantes cultivades actuals, la comparació amb les plantes ancestrals i la comprensió del procés de millora genètica han estat accelerats per les tècniques moleculars. En aquests moments disposem ja d'un nombre de seqüències genòmiques de plantes que està creixent de manera continuada. L'ús d'aquesta informació pot ser de gran importància per afrontar els reptes de producció d'aliments en el futur.

Paraules clau: planta, agricultura, millora genètica, genòmica.

THE DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS. A MOLECULAR VISION

SUMMARY

Our food is based on a limited number of plant species. These species were identified at the beginning of agriculture and have been the subject of an intense process of breeding. This process requires the widest possible base of genetic variability and therefore the conservation of biological diversity and its increase, if possible, is essential to maintain an adequate level of adaptation of these species to future conditions. The study of modern cultivated plants, the comparison with ancient plants and our understanding of the process of genetic improvement have been accelerated by molecular techniques. At the

present time we have already a number of genomic sequences of plants that is growing continuously. The use of this information can be of great importance to meet the challenges of food production in the future.

Key words: plant, agriculture, plant breeding, genomics.

LES PLANTES QUE CULTIVEM

Ens alimentem d'un nombre molt reduït d'espècies animals i vegetals, que són les que ens permeten produir el que necessitem per viure i, en la mesura del possible, per viure bé. La manera com aquestes espècies han estat escollides i si seguiran sent les mateixes en el futur són qüestions que són objecte d'una viva discussió en aquest moment. Això es discuteix en l'entorn d'aquells que es preocupen per la complexa pregunta sobre què és el que menjarem en el futur. Som ben conscients que en el cas dels animals el procés de definir quines seran les espècies ramaderes del futur encara no està completat, especialment en el cas dels peixos. En el cas de les plantes la discussió està també oberta perquè si ens mirem les dades del nombre d'espècies que cultivem la situació sembla sorprenent. En un informe de l'any 2001 l'Organització per a l'Alimentació i l'Agricultura (FAO, 2001) estimava que en el nostre planeta pot haver-hi entre 300.000 i 500.000 espècies de plantes amb flors, de les quals com a mínim la meitat han estat descrites. Estima també que unes 30.000 d'aquestes espècies podrien ser considerades almenys parcialment comestibles. El fet és que, segons la FAO, unes 7.000 espècies poden haver estat utilitzades per a l'alimentació humana en algun moment de la història o en algun lloc del planeta. Tots sabem que aquest tipus de dades les hem de prendre amb prudència. El nombre d'espècies de plantes podria pujar fins a un milió i el nombre de plantes que han estat cultivades podria estar al voltant de 4.000 (Sánchez-Monge,

1992). Malgrat això podem seguir el recompte de la FAO que assegura que actualment unes 120 espècies vegetals tenen importància alimentària a escala global o local però unes 30 proporcionen el 90 % de les calories que consumim. Finalment, de tres espècies de cereals —blat, arròs i blat de moro— traiem un 50 % de l'energia que necessitem obtenir dels aliments per dur a terme les nostres activitats.

Aquesta enorme especialització en el nombre de les espècies cultivades és deguda a un conjunt de raons. D'una banda, perquè una planta tingui interès per a l'alimentació ha de tenir algun teixit que contingui components que siguin digeribles i que aportin algun dels nutrients essencials per a la vida dels individus de la nostra espècie. Cal també que no contingui alguna substància tòxica i, per tant, que la puguem considerar comestible. Els materials que mengem són sovint els teixits que la planta mateixa fa servir per emmagatzemar productes de reserva, dels quals es nodreix en períodes essencials del seu cicle vital, com en el de la germinació de les llavors. Per això molts dels nostres aliments són grans o fruits. D'altra banda, perquè una espècie sigui útil en agricultura l'hem de poder cultivar de manera que ens produeixi aliments nutritius, en quantitats suficients i amb un esforç proporcional per a l'agricultor. Identificar espècies de plantes que compleixin totes aquestes exigències no és evident i en aquesta dificultat hi podem trobar alguna de les raons del petit nombre d'espècies cultivades.

Hem de tenir en compte que dins de les espècies cultivades ha calgut identificar un

petit nombre de varietats que són les que compleixen els requisits necessaris per al conreu. Aquests són molt variats i van del fet que les plantes siguin resistents a malalties al fet que acumulin una quantitat adequada de nutrients o que madurin de manera homogènia. Perquè es donin aquestes condicions cal que dins de la variabilitat existent en l'espècie hi hagi aquells caràcters que fan que l'espècie sigui cultivable. Aquests requisits estrenyen encara més les possibilitats per al conreu i expliquen el desenvolupament històric de la domesticació de plantes. Els darrers anys s'han dedicat molts esforços a analitzar com es va fer la domesticació d'animals i plantes en els inicis de l'agricultura. El coneixement de la qüestió ha experimentat un creixement espectacular i hi ha hagut reflexions generals sobre el tema (Diamond, 2002). La biologia molecular aplicada a les plantes cultivades ha permès d'estudiar quins són els canvis genètics que es van aprofitar per aconseguir la transformació de les espècies vegetals de silvestres a cultivades. Aquest coneixement ens dona la guia del que caldria fer si volguéssim tractar que noves espècies o varietats de plantes ens permetessin de respondre als reptes que l'agricultura tindrà en els anys que vénen.

LA DOMESTICACIÓ

El pas d'una espècie vegetal o animal d'un estat silvestre a un estat que n'afavoreix el conreu implica la selecció d'aquelles varietats que contenen un conjunt particular de caràcters genètics. Aquests han estat l'objecte d'una intensa recerca en diferents espècies. Podem mencionar exemples com el blat, el blat de moro, l'arròs o el tomàquet. En el cas del blat un dels aspectes més estudiats n'ha estat l'origen mateix. El blat actual és tetraploide en el cas de blat

dur (*Triticum durum*) o hexaploide en el cas del blat de forner (*Triticum vulgare*). S'ha pogut demostrar que els diferents conjunts de cromosomes provenen d'espècies diferents i això vol dir que el blat com a tal té un origen com a espècie en l'inici de l'agricultura, i que si volíem trobar l'origen del blat caldria trobar un lloc on les tres espècies creixessin. La recerca d'aquell lloc fent servir les tècniques moleculars ha portat a la regió fronterera de les actuals Síria i Turquia, on les espècies del gènere *Triticum* es donen de manera simultània, i es tracta d'espècies que es poden pol·linitzar entre elles (Salamini, 2002). Cal suposar que en algun moment els recol·lectors (o recol·lectores) de la regió es van adonar que de manera esporàdica a les regions on vivien aquests conjunts de plantes n'apareixen unes d'especials amb propietats més interessants, i en van conservar i reproduir les llavors.

En el cas de la recerca sobre l'origen del blat de moro, tenia com a objectiu resoldre la polèmica sobre el seu origen. Ja se sabia que l'actual espècie cultivada provenia de l'Amèrica Central però era difícil trobar una espècie prou semblant per atribuir-ne l'origen. Finalment l'ús de les tècniques moleculars va permetre identificar una espècie que viu en estat salvatge en certes regions de Mèxic, el teosinte (vegeu la figura 1), que és essencialment idèntic al blat de moro en termes moleculars i es pot suposar que n'és l'espècie ancestral. El treball a partir d'aquesta dada ha consistit a estudiar les diferències genètiques que es donen entre totes dues plantes. Un treball d'anàlisi de les diferències genètiques entre les poblacions obtingudes d'aquest encreuament ha permès detectar un petit nombre de mutacions en el teosinte que expliquen la formació del blat de moro que coneixem (Doebley, 2004). Es tracta principalment de mutacions en gens que codifi-

quen factors de transcripció que controlen caràcters de l'arquitectura de la planta com el nombre de branques o la disposició de la panotxa.

En l'arròs ha estat fet un treball semblant, i ha permès detectar entre altres el gen que permet que el gra quedi unit a la planta un cop madura (Li, 2006). Aquest és un caràcter d'una gran importància per a l'agricultura perquè és essencial per al pagès que el gra pugui recollir-se de cop quan hagi madurat en el procés del sega. L'anàlisi genètica ha permès demostrar que aquest caràcter està lligat a un gen que codifica un factor de transcripció que controla l'aparició d'una zona de mort cel·lular en la regió d'unió entre el gra i la planta. Si aquest procés no es dona el gra segueix

unit a la planta, de manera que el pagès pot anar a recollir-lo quan vol. Aquest exemple ens demostra de manera clara que el procés de selecció d'espècies cultivades i de les varietats apropiades per al conreu és un procés que pot ser contrari al de la selecció natural. La dispersió de les llavors és un procés essencial per a l'espècie, que en aquestes variants cultivades passa a ser controlada per l'espècie humana. Treballs semblants han permès de trobar gens que controlen el volum del fruit en el tomàquet (Frary *et al.*, 2000) o la mutació que dona lloc a la coliflor (Kempin *et al.*, 1995) en les cols. Tot aquest treball ens ha permès de concloure que un dels factors essencials perquè una espècie sigui cultivable és que en les seves poblacions hi hagi hagut una variabilitat genètica justament en aquells gens que donen lloc a caràcters que en permeten el cultiu. Altres espècies podrien tenir aspectes interessants però si la genètica en caràcters importants és complicada, la domesticació pot haver estat impossible perquè es feia difícil seleccionar les varietats adequades.

Els gens importants per a la domesticació han estat estudiats en diverses espècies com el blat de moro, en el quals hi ha hagut projectes a gran escala per identificar els al·lels que han estat acumulats en el blat de moro ancestral, el teosinte, per donar lloc a l'actual espècie cultivada. També ha estat identificat el gen *cauliflower* (Kempin *et al.*, 1995), que és responsable d'una de les etapes inicials de la floració en el gènere *Brassica*, i la seva mutació dona lloc a la coliflor que avui dia coneixem. Un excel·lent exemple dels gens que han estat importants per a la domesticació el trobem en una altra espècie important com l'arròs. Un caràcter important per al conreu de moltes espècies és la reducció de la dispersió de les llavors. En moltes plantes la maduració del gra implica una caiguda d'aquest que



FIGURA 1. Comparació entre el teosinte (esquerra) i una varietat primitiva de blat de moro, obtinguda encruant blat de moro i teosinte i seleccionant els exemplars més petits. Fotografia de John Doebley, Departament de Genètica, Universitat de Wisconsin-Madison, reproduïda amb permís.

n'afavoreix la dispersió. L'arròs cultivat té una dispersió reduïda perquè el gra es manté unit a la planta un cop madur. Un grup xinès (Li *et al.*, 2006) va demostrar que aquest caràcter apareix per la mutació del gen que codifica un factor de transcripció que posa en marxa un procés de mort celular en la zona d'unió entre el gra i la tija. D'aquesta manera el procés de dispersió s'atura i el pagès se n'aprofita per recollir el gra un cop madur sobre la planta. Aquest cas ens dóna un bon exemple de com la selecció de les espècies cultivades pot haver actuat de manera oposada a la selecció natural.

LA MILLORA GENÈTICA

L'agricultura es va desenvolupar durant segles acumulant caràcters d'interès agronòmic en les espècies domesticades i cultivant aquestes en qualsevol lloc del planeta. Ha estat demostrada a bastament la importància de l'agricultura i la ramaderia per a les migracions neolítiques i per a la construcció de les societats organitzades. Aquest procés va continuar fins al Renaixement, en particular a partir del descobriment d'Amèrica, que va permetre completar l'adopció de les espècies que havien estat domesticades arreu del planeta. Aquest procés ha estat el que ha permès desenvolupar el panorama de l'agricultura que tenim actualment. La consciència de la necessitat de disposar de les millors llavors possibles per tenir una agricultura productiva i la importància d'aquesta per a la riquesa de les nacions es va estendre en el segle XVIII. En el període de la Il·lustració trobem la formació de jardins botànics de col·leccions de llavors i fins i tot les primeres empreses de llavors. Això es va donar en la majoria de les nacions europees i a França i Anglaterra en un lloc destacat.

Fins i tot es formula la teoria dels fisiòcrates, segons la qual la riquesa de les nacions es mesura per la riquesa de les seves terres cultivades.

En el segle XIX s'obre un nou capítol en la ciència amb la formulació de les lleis de la genètica. Cal recordar que el treball de Gregor Mendel es va fer en una espècie vegetal, el pèsol, i que molts dels estudis que van dur al naixement de la genètica es van fer en plantes. No té res d'estrany, per tant, que quan la genètica es va convertir en una disciplina científica al principi del segle XX, entre els primers objectes d'estudi i aplicació de la nova ciència figuressin plantes cultivades. Els seus efectes es van començar a notar aviat. Per exemple, apareixen les varietats híbrides de blat de moro que donen lloc a importants increments en els rendiments d'aquest conreu i també al naixement de les grans empreses de llavors. La millora genètica de plantes (i també d'animals de granja) apareix com una disciplina essencial per a l'agricultura. A Catalunya la Mancomunitat crea l'Escola d'Agricultura l'any 1912, en què la millora de plantes i animals és una disciplina important. Cal que recordem que les primeres classes de genètica a casa nostra abans de la Guerra Civil es donen en l'Escola d'Agricultura, que celebrarà el seu centenari l'any 2012.

La millora genètica es va estendre aviat a moltes espècies cultivades diferents i va esdevenir un factor essencial en l'agricultura mundial. L'exemple més conegut és el de la Revolució Verda. A partir de la Segona Guerra Mundial es van fer esforços en institucions finançades per fundacions privades i fons públics que van aconseguir desenvolupar varietats de cereals altament productives. Aquestes varietats van ser adaptades a les condicions de les agricultures de països altament poblats com Mèxic, Pakistan o l'Índia. En pocs anys es van sen-

tir els seus efectes i el panorama de l'agricultura en països de l'Amèrica Llatina i d'Àsia va canviar radicalment. La introducció d'aquestes varietats no ha tingut encara efecte en l'agricultura dels països africans, en els quals hi ha encara problemes importants de producció d'aliments. Les raons d'això són probablement diverses i tenen a veure amb el retard en el desenvolupament econòmic, cultural i polític d'aquests països, que han impedit que es faci el treball d'adaptació de varietats a les condicions necessàries a les seves agricultures. En els darrers anys diverses fundacions internacionals han treballat juntament amb milloradors i grups de pagesos locals en diferents països africans per tractar de trobar vies per resoldre aquesta situació.

CONSERVACIÓ I GENOTIPATGE

Una de les conseqüències emblemàtiques de l'extensió de la millora genètica és la consciència del valor que té la conservació de varietats de les espècies importants per a l'agricultura. La variabilitat genètica és la base mateixa de la millora i, per tant, ben aviat va aparèixer la consciència que era necessari conservar-la. Les mateixes institucions que van finançar la millora de les espècies cultivades essencials van dur a terme un treball de recollecció de llavors d'aquestes espècies. D'aquesta manera es van crear bancs de llavors, també anomenats bancs de germoplasma en molts països. En particular, es va fundar també una xarxa de centres a escala mundial com el Centro Internacional del Maíz y Trigo (CIMMYT) a Mèxic, l'International Rice Research Institute (IRRI) a les Filipines o el Centro Internacional de la Papa (CIP) al Perú, que s'encarregaven de conservar les llavors d'aquestes espècies, multiplicar-les i distribuir-les a aquells que feien millora

de plantes arreu del món. Un cas extrem d'aquestes iniciatives ha estat l'anomenada «Cúpula de la Fi del Món», una cova excavada en una de les illes Svalbard, on s'han emmagatzemat les col·leccions que es consideren essencials per a la millora de les plantes cultivades, que en aquell lloc es conservarien fins i tot en el cas d'una catàstrofe nuclear.

Una de les qüestions que plantegen els esforços de conservació de les varietats vegetals és la de quines d'aquestes varietats val la pena conservar. Mantenir bancs de llavors és una feina costosa i sovint el nombre de llavors es multiplica indefinidament. Els bancs es plantegen aleshores la necessitat d'assegurar-se que allò que es conserva té algun valor. La biologia molecular ha desenvolupat metodologies que ajuden a resoldre aquesta qüestió. Quan es va estendre l'ús de les tècniques moleculars basades en el DNA es va veure l'impacte que tindrien per a la millora genètica. Una de les eines clau en la millora és l'ús de mapes genètics en els quals es col·loca de manera lineal la informació de les relacions entre els gens al llarg dels cromosomes. La relació de proximitat en els cromosomes entre diferents tipus de gens és un ajut important per als milloradors en alguns casos. Acudint al DNA es poden buscar variacions en la seqüència que estiguin lligades als gens d'interès; són els anomenats *marcadors moleculars*. L'ús per a la comparació de varietats permet d'una banda identificar-les i de l'altra classificar-les, cosa que dóna una relació de parentiu entre elles. Actualment les tècniques de seqüenciament massiva ens permeten tenir milers de variacions moleculars en els gens i desenvolupar tècniques anomenades de genotipatge que permeten la classificació ràpida de les varietats i són un ajut important en la conservació de la variabilitat genètica valuosa.

VARIABILITAT DELS GENOMES

La seqüenciació massiva dels genomes ha revolucionat sens dubte la nostra comprensió dels genomes i de la seva variabilitat. La seqüència del primer genoma de plantes es va publicar aviat (European Union *Arabidopsis* Sequence Consortium, 1999). Es tracta del genoma d'*Arabidopsis thaliana*. Aquesta és una planta que va esdevenir un model per a l'estudi de la genètica molecular de les plantes, de la mateixa manera com *Drosophila melanogaster* ho ha estat per als animals. *Arabidopsis* és una planta petita i de cicle vital ràpid i això la fa adaptada per a l'estudi en el laboratori. Però té també un genoma molt petit, d'unes 140 megabases (Mb), i aquest fet en va facilitar la seqüenciació, que va ser duta a terme per part d'un consorci internacional. La publicació va permetre de conèixer el nombre de gens que té, uns 26.000, i la seva estructura, que és en general molt senzilla si la comparem amb la dels gens d'animals superiors. Va permetre també de descobrir un fet que ha estat trobat en altres espècies vegetals, i és que una part important del seu genoma està duplicat. De fet, podem trobar més del 80 % del genoma d'*Arabidopsis* duplicat en una altra regió del genoma. La comparació de les seqüències ha permès de calcular que hi va haver dues rondes de duplicació en el genoma d'*Arabidopsis* fa uns seixanta milions d'anys després de l'aparició i expansió de les angiospermes.

Després d'*Arabidopsis* s'han anat seqüenciant els genomes d'un nombre creixent d'espècies vegetals. Va seguir l'arròs, per la seva importància en alimentació però també per ser una espècie monocotiledònia, que té un genoma d'unes 480 Mb. Actualment la llista de genomes publicats inclou genomes d'espècies model com *Brachypodium distachyon* o *Physcomitrella patens* i es-

pècies cultivades com el sorgo, el blat de moro, el cacau, el tomàquet i una llista que s'amplia constantment i que es pot consultar en un lloc web especialitzat (<http://www.phytozome.net>). Però les tècniques de seqüenciació massiva permeten no tan sols seqüenciar els genomes sinó conèixer-ne la variabilitat reseqüenciant els genomes de varietats d'interès. Això està demostrant la fluïdesa enorme que tenen els genomes. Ja sabem que els genomes tenen elements mòbils que es desplacen i multipliquen en el genoma (Casacuberta i Puigdomènech, 2002). De fet, la primera evidència de l'existència d'aquests elements la vam tenir en plantes, i concretament en blat de moro, gràcies al treball pioner de Barbara McClintock. D'aquesta manera es van descobrir els transposons, elements que s'escindeixen del genoma i es tornen a inserir en algun altre lloc del genoma, i els retrotransposons, elements que passen per un intermediari de RNA de manera molt semblant a la dels retrovirus, i que poden multiplicar-se en el genoma. La reseqüenciació de varietats de blat de moro ha permès d'observar la gran rapidesa amb la qual se succeeixen els canvis en el seu genoma, que en part estan produïts per l'activitat del gran nombre d'elements mòbils actius en aquesta espècie. Ha estat calculat que al voltant del 25 % del genoma d'aquesta espècie varia d'una varietat a una altra, cosa que dona lloc a una gran quantitat de gens que poden desaparèixer o duplicar-se.

NOVA VARIABILITAT

La variabilitat existent en l'interior d'una espècie pot ser, per tant, molt gran, i és la base que fem servir per a la millora de plantes. Però pot passar que algun caràcter d'interès per als pagesos no sigui a dins de les poblacions existents o que tingui una

herència complexa. Durant els darrers anys han estat desenvolupades diferents aproximacions per tractar de resoldre aquest problema. D'una banda, s'han dut a terme programes de mutagènesi per aconseguir variants noves que poden no existir en el genoma de les poblacions actuals de l'espècie. Per això han estat fets servir mecanismes de creació de nous mutants, com són el tractament amb mutàgens químics o amb radiacions ionitzants. Amb aquest procediment el que s'està fent és accelerar i acumular les mutacions que es donen de manera sistemàtica i espontània en tots els organismes. Aquests procediments han donat lloc a nous caràcters que han estat útils per a la millora d'alguna espècie cultivada.

L'altra via de creació de variabilitat és la modificació genètica de plantes. Des dels anys setanta sabem aïllar i modificar si volem seqüències de DNA de qualsevol procedència. D'aquesta manera s'han estudiat a escala molecular un nombre creixent de gens i dels elements que els regulen. Des dels anys vuitanta sabem reintroduir en plantes gens que hagin estat aïllats i preparats adequadament en el laboratori de manera que una planta els pugui reconèixer i fer funcionar com a gens propis. Això ha donat lloc a les plantes transgèniques, que s'han introduït en l'agricultura no sense polèmica.

L'any 2010 hi havia en el món uns cent quaranta milions d'hectàrees de plantes modificades genèticament. Es tractava essencialment de blat de moro, colza, soja i cotó, en les quals s'havia introduït un nou gen que els confereix tolerància a un herbicida o una resistència a un insecte. Aquestes plantes es van començar a utilitzar en agricultura l'any 1994 i s'han imposat en països com els Estats Units o l'Argentina, però també a l'Àfrica del Sud o l'Índia. A Espanya un 20 % del blat de moro cultivat és modificat genèticament. La polèmica

que ha aparegut al voltant d'aquestes varietats ha fet que la introducció es faci en el marc d'unes regulacions estrictes, particularment a Europa, que han estat discutides a escala internacional (Organització Mundial de la Salut, 2000). La conseqüència ha estat que el cost de la introducció d'una varietat transgènica a Europa es mesura en milions d'euros i s'ha convertit en el factor limitant essencial per a qui vulgui posar aquestes varietats en conreu. No està clar què passarà en el futur i si la necessitat de varietats amb caràcters específics farà que les regulacions tinguin en compte no tan sols els riscos, com és el cas actualment, sinó també els beneficis, o bé si la pressió en contra d'aquestes varietats farà que aquesta tecnologia desaparegui, cosa que sembla difícil en aquest moment. Aquesta discussió ha donat lloc a diferents informes, incloent-hi reflexions de tipus ètic (Nuffield Council of Bioethics 1999; European Group of Ethics of Science and New Technologies, 2009).

Noves espècies o espècies conegudes

En tot aquest context una de les preguntes que es fan sovint és la de la possibilitat d'introduir noves espècies a més d'aquelles que fem servir de manera usual en agricultura. Efectivament, d'una banda ja hem estat discutint el fet que tenint en compte el nombre d'espècies vegetals potencialment interessants, pot semblar sorprenent que en fem servir un nombre tan reduït en l'agricultura actual. D'altra banda, les tecnologies que tenim actualment ens permeten d'analitzar de manera més ràpida i dirigida caràcters complexos i, per tant, podríem proposar-nos dur a terme l'adaptació al conreu de noves espècies en què no ha estat fet fins ara. Per plantejar-nos aquesta qüestió un dels aspectes que ens podem

preguntar és per què unes espècies de plantes han estat domesticades i no unes altres.

Si volem pensar a fer servir un nombre més gran d'espècies que les que estem fent servir en l'agricultura hem de tractar d'entendre les raons per les quals les espècies actuals han estat domesticades. Aquesta qüestió ha estat discutida des de diferents punts de vista (Diamond, 2002; Salamini, 2002). Es poden argüir raons que tenen a veure amb la coincidència d'algunes espècies amb les societats humanes de les zones temperades que, a causa de variacions climàtiques, van sofrir en un moment determinat una gran pressió per aconseguir noves maneres d'aconseguir alimentació. Però també té a veure probablement amb les característiques genètiques de les espècies. Per ser cultivada la planta ha de produir i emmagatzemar algun producte interessant per a l'alimentació o per a algun altre ús però ha de tenir també un conjunt senzill de gens i de variants d'aquests dintre de la seva població que en faciliti l'adaptació a l'agricultura. Si no és possible una acumulació d'aquests caràcters essencials per al conreu, una espècie no es podrà domesticar. De fet, després de la domesticació d'espècies en el neolític se n'han introduït molt poques en la nostra agricultura. Entre les darreres es poden mencionar la maduixa, que entra en la nostra dieta en el segle XIX o el kiwi, una varietat de fruïter d'origen xinès que va ser millorada a Nova Zelanda. És cert que actualment, gràcies a les noves aproximacions de la genètica molecular, moltes de les dificultats per domesticar noves espècies es poden segurament resoldre en alguns casos. Per tant, hi ha propostes sobre la taula per examinar aquelles espècies que han estat una font per a l'alimentació però que han estat poc esteses, per refer-hi el tipus de millora que les pot convertir en espècies cultivades, i

per tant, aprofitar no tan sols la variabilitat que hi ha en l'interior d'una espècie, sinó la variabilitat de les espècies vegetals, que sembla poc aprofitada.

La discussió sobre aquesta qüestió oposa dos punts de vista. Un és el que acaba de ser descrit: hem d'aprofitar les noves tecnologies per ampliar el ventall d'espècies que fem servir en agricultura per obtenir nous productes o per trobar espècies que poden estar més ben adaptades a regions del món on hi ha problemes d'alimentació. De fet, al món hi ha en marxa projectes de millora en espècies com la mandioca, el sorgo o el mill que, en part, responen a aquesta filosofia, malgrat que han estat cultivades en alguns llocs concrets. Però l'altre punt de vista té en compte que emprendre des del bell començament la domesticació i millora de les plantes necessita molt de temps. És cert que les tecnologies actuals permeten accelerar tot el procés, però les plantes són organismes que creixen lentament i calen anys per aconseguir noves varietats, sobre tot si parlem d'arbres. Per tant, hi ha qui argumenta que si hem de resoldre els problemes que se'ns plantegen en el temps en què calen solucions, només podem basarnos en aquelles espècies en les quals molta de la feina ja està feta. En qualsevol cas necessitem tenir variabilitat interespecífica o intraespecífica si volem tenir la possibilitat de plantejar-nos solucions a la problemàtica que sembla que es presentarà en els temps que vénen.

ELS NOSTRES REPTES

La societat en la qual vivim és hereva, en molts aspectes, de la que es va formar fa uns deu mil anys quan, en diferents parts del món, grups d'humans van establir una manera de vida sedentària. Aquest canvi radical en l'estil de vida ha acabat im-

sant-se en la nostra espècie i ha estat durant els segles un èxit en termes del nombre d'individus de l'espècie. La societat ha anat evolucionant i ha arribat en el segle passat i l'actual a proporcionar als humans uns nivells de benestar extraordinaris. En aquest inici del segle XXI ens trobem que l'espècie humana, pel seu nombre i per l'activitat que desenvolupa amb l'objectiu de mantenir el seu estil de vida, té un impacte decisiu sobre molts aspectes de l'evolució del planeta. Una de les activitats que més impacte té i que més pot ser afectada pels canvis que es donen en la globalitat de la superfície terrestre és l'agricultura.

L'impacte de l'agricultura sobre el planeta es dona des del mateix moment del seu establiment. Quan un terreny determinat passa d'un estat silvestre a ser cultivat, se suprimeixen les espècies de plantes existents i es tracta d'evitar que els animals entrin i s'alimentin del que es conrea, i per tant, disminueix la diversitat d'espècies. Ha estat també ben demostrat que en termes d'emissions de gasos d'efecte d'hivernacle, pel fet de posar un terreny en cultiu la fixació de diòxid de carboni disminueix de manera significativa. Si parlem de diversitat biològica està clar que un camp cultivat dona suport essencialment a una espècie, mentre que en estat silvestre un conjunt d'espècies poden viure-hi i teixir un conjunt complex d'interaccions. L'agricultura, d'altra banda, fa servir recursos, com l'aigua, que són escassos, i es recolza sobre adobs que contenen productes que procedeixen de fonts limitades com el petroli o els fosfats. També pot tenir efectes contaminants si es fa un ús excessiu d'adobs i fitosanitaris. Ja hem vist també que el procés de domesticació implica escollir un nombre limitat d'espècies i de varietats a dintre d'una espècie, i això pot disminuir la variabilitat biològica si no ens ocupem de conservar-la. Per tant, l'agricultura, per

la seva natura mateixa i sigui del tipus que sigui, té impacte negatiu per a la diversitat de les espècies o de les varietats i races, que cal compensar, per exemple, amb la creació de bancs de llavors, com ja hem discutit.

Malgrat tot el que acabem de dir la nostra societat depèn dels productes de l'agricultura en primer lloc per produir aliments. La població humana produeix una gran quantitat d'aliments però en l'inici del segle XXI, i malgrat les proclames d'acció internacional, encara hi ha bosses importants de malnutrició i de fam sobre tot en països d'Àfrica i Àsia però fins i tot en l'interior de les societats desenvolupades. I les perspectives són de creixement dels habitants del planeta fins a arribar potser a uns nou mil milions d'habitants cap a l'any 2050. Al mateix temps la societat humana esdevé més exigent en la seguretat i la qualitat dels aliments i es fa més urbana, cosa que obliga a produir els aliments a distància del lloc on viuen els humans. D'altra banda, de l'agricultura produïm també aliment per a animals, fibres, productes per a la química, i ara cada cop més combustibles. Per tant, la pressió sobre l'agricultura creixerà en els propers anys. Les previsions d'organitzacions com la FAO són que pot caldre un creixement de fins al 70 % en la producció d'aliments en els propers quaranta anys. La necessitat de tenir una agricultura productiva pot ser encara més forta si volem que produeixi noves substàncies com combustibles o productes per a la indústria, que poden mancar si disminueix la producció de petroli.

En aquesta situació sembla clar que una de les prioritats per a l'actuació en política general i en recerca en particular ha de ser tot allò que es dirigeix a tenir una producció agrícola i ramadera més gran i millor, i que aquesta producció es faci amb el mínim impacte possible sobre recursos de

tota mena que siguin limitats. En aquest sentit la biologia de les espècies d'interès agroalimentari té importants reptes en els propers anys (European Plant Science Organization, 2005). Des de sempre les espècies que cultivem han estat estudiades i millorades intensament. Actualment tenim unes eines molt poderoses que han canviat profundament el que sabem de la seva biologia. No hi ha dubte que les aplicacions que en fem en els propers anys marcaran l'evolució de la nostra societat. Estudiar solucions a aquests reptes es podrà basar en l'enorme coneixement que estem acumulant actualment, del qual hauríem de treure els beneficis, com ha estat recordat recentment (The Royal Society, 2009). L'anàlisi de genomes complets de plantes i animals d'interès agrícola i ramader està augmentant quotidianament i fins i tot la reseqüenciació de varietats. Igualment s'estan desenvolupant aproximacions d'anàlisi massiva de genotips i de fenotipatge. Aquesta riquesa en dades científiques ens permet preveure que tindrem eines per encarar alguns dels grans problemes que es poden presentar en el futur de l'agricultura. Es tracta de plantejar les necessitats en la producció d'aliments, de respondre al canvi climàtic, a l'aparició de noves malalties o a la necessitat d'una alimentació més personalitzada de la qual ens està donant ja les bases la genètica humana. La biologia vegetal ha estat una de les pàgines centrals de la biologia durant segles. És possible que els darrers trenta o quaranta anys, per l'interès indiscutible de les aplicacions biomèdiques, i per les polèmiques que hi ha hagut entorn de la millora de les plantes, el seu interès hagi quedat enfosquit. Els anys que vénen és ben possible que la recerca sobre les espècies en què basem la nostra agricultura retrobi la seva posició. La recerca sobre l'estructura i expressió dels genomes de plantes, les bases de la seva vari-

abilitat, la comprensió del significat dels caràcters genètics complexos i la seva relació amb la fisiologia, el desenvolupament dels sistemes vegetals, estan avançant de manera ràpida. Aquestes noves aproximacions estan permetent també estudiar les relacions de les plantes cultivades amb les altres espècies, en particular amb els seus patògens i els components dels sòls, qüestions en què es treballa amb una gran intensitat. Aquest coneixement ja està donant lloc a noves aplicacions en la millora de plantes que poden contribuir a donar respostes als reptes que es plantegen en els temps que vénen.

BIBLIOGRAFIA

- CASACUBERTA, J.; PUIGDOMÈNECH, P. (2002). «Genome fluidity. The case of plants». *Contributions to Science*, 1: 313-322.
- DIAMOND, J. (2002). «Evolution, consequences and future of plant and animal domestication». *Nature*, 418: 700-707.
- DOEBLEY, J. (2004). «The genetics of maize evolution». *Annu. Rev. Genet.*, 38: 37-59.
- EUROPEAN GROUP OF ETHICS IN SCIENCE AND MODERN TECHNOLOGIES. (2009). «Ethics of modern developments in agriculture». <http://ec.europa.eu/european_group_ethics/docs/opinion24_en.pdf>
- EUROPEAN PLANT SCIENCE ORGANISATION (2005). «European plant sciences: a field of opportunities». *Journal of Experimental Botany*, 56: 1699-1709.
- EUROPEAN UNION *Arabidopsis* GENOME SEQUENCING CONSORTIUM; COLD SPRING HARBOR, WASHINGTON UNIVERSITY IN ST LOUIS; PE BIOSYSTEMS *Arabidopsis* SEQUENCING CONSORTIUM. (1999). «Sequence and analysis of chromosome 4 of the plant *Arabidopsis thaliana*». *Nature*, 402: 769-777.
- FRARY, A.; NESBITT, T. C.; GRANDILLO, S.; KNAAP, E.; CONG, B.; LIU, J.; MELLER, J.; ELBER, R.; ALPERT, K. B.; TANKSLEY, S. D. (2000). «fw2.2: A quantitative trait locus key to the evolution of tomato fruit size». *Science*, 289: 85-88.
- GMO PANEL, EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY (2006). «Guidance document for the risk assessment of genetically modified plants and derived food and feed by the Scientific Panel on Genetically Modified Organisms (GMO)» [en línia].

- <http://www.efsa.europa.eu/cs/BlobServer/Scientific_document/gmo_guidance_gm_plants_en,0.pdf?ssbinary=true>.
- KEMPIN, S. A.; SAVIDGE, B.; YANOFSKI, M. F. (1995). «Molecular basis of *cauliflower* phenotype in *Arabidopsis*». *Science*, 267: 522-525.
- KLEIN, T. M.; WOLF, E. D.; WU, R.; SANFORD, J. C. (1987). «High velocity microprojectiles for delivering nucleic acids into living cells». *Nature*, 327: 70-73.
- LI, C.; ZHOU, A.; SANG, T. (2006). «Rice domestication by reducing shattering». *Science*, 311: 1936-1939.
- NUFFIELD COUNCIL OF BIOETHICS (1999). *Genetically modified crops: the ethical and social issues*. Nuffield Council of Bioethics. Londres: National Council of Bioethics.
- ORGANITZACIÓ MUNDIAL DE LA SALUT (2000). *Aspectos relativos a la inocuidad de los alimentos de origen vegetal genéticamente modificados. Informe de una Consulta Mixta FAO/OMS*. Ginebra: Organització Mundial de la Salut.
- ORGANITZACIÓ PER A L'AGRICULTURA I L'ALIMENTACIÓ (2008). «Declaration of the high-level conference on world food security: the challenges of climate change and bioenergy» [en línia]. <http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/foodclimate/HLCdocs/declaration-E.pdf>.
- SALAMINI, F.; ÖZKAN, H.; BRANDOLINI, A.; SCÄFER-PREGL, R.; MARTIN, W. (2002). «Genetics and geography of wild cereal domestication in the Near East». *Nature Reviews. Genetics*, 3: 429-441.
- SÁNCHEZ-MONGE, E. (1992). *Flora agrícola*. Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca.
- THE ROYAL SOCIETY (2009). *Reaping the benefits*. Londres: The Royal Society.

SOBRE L'AUTOR

Pere Puigdomènech i Rosell (Barcelona, 1948). Llicenciat en ciències físiques per la Universitat de Barcelona, doctor (menció en química física) per la Universitat de Montpeller, i en ciències biològiques per la Universitat Autònoma de Barcelona. Autor d'uns cent noranta treballs de recerca, s'ha especialitzat en aspectes biofísics de l'estructura de les proteïnes, en regulació gènica i en biologia molecular de plantes. És autor també d'uns dos-cents articles de divulgació científica en diaris (*El Periódico de Catalunya*, *El País*, etc.) i revistes nacionals i internacionals (com la revista *Nature*). Membre de l'Institut d'Estudis Catalans, de l'Organització Europea de Biologia Molecular, de la Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona i de l'Acadèmia Europaea, membre estranger de l'Académie d'Agriculture de France, ha estat president de la Societat Catalana de Biologia (2000-2003). Ha estat membre de comitès científics consultius europeus, com ara el Panel d'Organismes Modificats Genèticament d'EFSA. És membre també del Grup Europeu d'Ètica de les Ciències i les Noves Tecnologies, membre de la Comisión Nacional de Bioseguridad i president del Comitè d'Ètica del CSIC. Rebé la Medalla Narcís Monturiol de la Generalitat de Catalunya (1992) i el Premi de la Fundació Catalana per la Recerca (2000).