

ORGANISMES

TRANSGÈNICS. IMPACTE EN L'ECONOMIA, LA RECERCA I LA SOCIETAT

Gemma Marfany Nadal

PhD. Departament de Genètica, Microbiologia
i Estadística (Universitat de Barcelona). Institut de
Biomedicina de la Universitat de Barcelona (IBUB)

Marc Valls Matheu

PhD. Departament de Genètica, Microbiologia
i Estadística (Universitat de Barcelona).
Centre de Recerca en Agrigenòmica
(CSIC-IRTA-UAB-UB). Edifici CRAG

La població mundial actualment és de 6.700 milions de persones i creixerà fins als 9.200 milions d'habitants l'any 2050, segons preveuen les Nacions Unides. La lluita contra la pobresa i l'eradicació de la fam són els primers Objectius de Desenvolupament Sostenible, molt relacionats amb la capacitat de producció d'aliments. En aquest sentit, en aquest article s'aborda l'aportació que pot fer el desenvolupament científic en el camp de la biologia.

1. Què és un transgènic?

El terme *organisme transgènic* ja forma part del nostre vocabulari diari, tot i que, més recentment, ha estat substituït per OMG (organisme modificat genèticament, que deriva de les sigles angleses GMO, *genetically modified organism*). Tot i que no són exactament termes sinònims, s'empren en moltes ocasions indistintament.

Un organisme transgènic és aquell en el qual s'ha introduït un transgèn, sigui o no mitjançant intervenció humana. I què és

un transgèn? Anomenem *transgèn* a una informació genètica concreta que no pertanyia originalment a un organisme, però que, a partir del moment en què s'hi introdueix, ja forma part del seu bagatge genètic. Recordem que la informació genètica dels organismes, el seu manual d'instruccions, és l'ADN. Per tant, quan parlem d'un transgèn, parlem d'un gen (o de diversos gens) que codifica per a una instrucció específica. Els transgènics poden ser produïts per l'home mitjançant tècniques d'enginyeria genètica, però també es produeixen de manera natural, per infecció de virus, per exemple.

El terme OMG fa referència a un organisme modificat genèticament en què assumim, implícitament, una intervenció humana. Per modificar genèticament un organisme no cal introduir un transgèn, és a dir, una informació específica i concreta. Fa milers d'anys que els humans modifiquen organismes, fent creuaments de plantes i animals per aconseguir noves varietats que si no, no existirien i, en el procés, es generen noves combinatòries genètiques. Sense saber molts cops què feia, l'ésser humà ha "domesticat" genèticament els organismes del seu entorn, fent creuaments, mantenint i seleccionant artificialment aquells que tenen una sèrie de característiques interessants; característiques que no presenten les espècies inicials o silvestres o que, fins i tot, haurien estat seleccionades en contra. Per exemple, una mandarina o una taronja sense llavors no tenen cap sentit biològic. En aquest cas, l'home ha seleccionat creuaments genètics de plantes per generar híbrids que no tenen un nombre compatible de cromosomes per fer fruits fèrtils. Una mandarina sense llavors és estèril, i la selecció natural l'hauria eliminat. *Senso lato*, es pot

dir que totes les plantes que conreem i tots els animals domèstics, de granja o de ramaderia, són OMG. Tot i això, hem d'admetre que en la bibliografia actual, sobretot en el seu ús dins un context periodístic, sociopolític, jurídic o econòmic se sol emprar el terme OMG exclusivament per als organismes transgènics.

2. Transgènics a la natura, sense intervenció humana

L'estudi dels genomes revela que un nombre molt alt dels nostres gens són originaris d'altres espècies i els hem adquirit mitjançant el que s'anomena *transferència genètica horitzontal* (per comparació amb la transmissió genètica vertical, que és la que es dona de progenitors a descendents). Donem per sabut que, per molt que ens acostem a un cavall o a un gerani, els seus gens mai no ens "infectaran" i no els podrem passar als nostres fills. En general, és cert que entre organismes diferents la transferència genètica és un succés altament improbable, però hi ha diversos mecanismes pels quals això pot succeir i organismes on és relativament habitual (en virus i bacteris), ja que és la seva manera de practicar "sexualitat" i generar noves combinatòries genètiques. Així, aquest procés és especialment aparent en els bacteris dels hospitals, on l'intercanvi de gens entre espècies bacterianes genera bacteris patògens superresistents als antibiòtics. Als organismes superiors, aquest fenomen és molt més improbable, però un dels mecanismes que permet la transferència genètica horitzontal és la infecció amb un microbi que accidentalment s'ha "endut" gens d'un organisme infectat anteriorment i els incorpora al genoma del nou hoste. Un exemple molt curiós és el moniato, del qual s'ha descobert recentment que totes les varietats conreades contenen gens d'un bacteri que no es troben a cap dels moniatos silvestres. Per tant, el moniato que ens mengem per Tots Sants es pot considerar un "transgènic natural" que van seleccionar els primers agricultors i que fa mil·lennis que mengem.

Fins i tot nosaltres som transgènics. El nostre genoma conté més d'un 60% d'elements genètics que poden canviar de posició (transposons), que, tot i que ara formen part del nostre genoma, van envair el genoma dels nostres avantpassats, en molts casos abans que fossin ni tan sols primats. Procedents inicialment de virus i altres vectors paràsits, ara formen part del nostre genoma, i el passem als nostres descendents. Tot i que de la gran majoria dels elements genètics mòbils del nostre genoma no en coneixem la funció (si és que la tenen),

Els últims seixanta anys, no només hem après a entendre la informació codificada a l'ADN, sinó que hem après a modificar-la, a tallar-la, a amplificar-la

en alguns casos hi ha evidències que mostren que poden ser molt rellevants per generar diversitat, per exemple, als tipus neuronals del cervell.

3. Enginyeria genètica per generar transgènics

La descoberta de l'estructura de l'ADN per part de Watson i Crick (1953) va permetre avançar molt ràpidament en el coneixement de la transmissió de la informació genètica. L'ADN és la informació genètica dels organismes i codifica per les proteïnes que executen les funcions vitals. Simplificant, un gen és la informació genètica que codifica per una proteïna que té una funció concreta. Totes les cèl·lules d'un organisme tenen la mateixa informació genètica i, per tant, els mateixos gens. Però si l'ADN és la informació genètica dels éssers vius, com és que no tots els organismes som iguals? Hi ha variacions en les seqüències de l'ADN que expliquen les diferències que hi ha entre organismes diferents, fins i tot els que són més propers. A més, el nombre i el tipus de gens és diferent entre diferents organismes, i hi ha gens que codifiquen per proteïnes que només es troben en uns organismes i no en d'altres. Tot i això, el llenguatge genètic és universal, i els gens, amb lleugeres modificacions, poden ser introduïts i descodificats per tots els organismes que coneixem.

Els últims seixanta anys, no només hem après a entendre la informació codificada a l'ADN, sinó que hem après a modificar-la, a tallar-la, a amplificar-la. El desenvolupament de les tècniques d'enginyeria genètica permet introduir, eliminar o modificar un o més gens d'un organisme (sigui virus, bacteri, planta o animal) perquè s'incrementi, s'anul·li o, fins i tot, produeixi una proteïna diferent, ja sigui procedent del mateix organisme o d'un altre totalment diferent. Aquest canvi en l'ADN s'incorpora de manera estable al nou hoste i pot passar a la seva descendència. Així, doncs, podem fer organismes transgènics.

Quins organismes transgènics podem generar? Podem fer transgènesi en virus, bacteris, llevats, plantes i animals. Evidentment, també en cèl·lules aïllades que podem cultivar. La

transgènesi en virus, bacteries i llevats (microorganismes) o, fins i tot, en línies cel·lulars que es cultiven al laboratori, es considera dins de l'àmbit biotecnològic i la societat no els sol considerar quan parlem de transgènesi. En canvi, la transgènesi en plantes és rellevant per a l'agricultura i les conseqüències econòmiques que pot reportar i rep considerable atenció mediàtica. D'altra banda, la transgènesi en animals ha estat, i és encara, àmpliament utilitzada en recerca biomèdica, i en algunes aplicacions de la indústria farmacèutica. A més, tot just ara acaba de ser acceptada per l'FDA (Food and Drug Administration dels EUA, l'agència dels Estats Units que regula els aliments i medicaments per al consum humà, que és l'equivalent de l'EFSA, Autoritat Europea de Seguretat Alimentària) la comercialització dels primers animals transgènics per a l'alimentació humana (salmons transgènics, empresa AquaBounty).

Tot i que podem fer transgènics, la tècnica de transgènesi no és totipotent. Darrere de cada transgènic generat per l'ésser humà hi ha moltes hores de feina d'un equip de treball, molts intents sense resultats, i un procés de selecció molt potent. Però les tècniques d'enginyeria genètica van avançant també molt ràpidament, i surten noves metodologies que permeten modificacions genètiques cada vegada més precises i més dirigides (vegeu l'apartat 8). Per fer-nos una idea de la rellevància de la transgènesi, l'any 2007, es va concedir el premi Nobel de Medicina als doctors Capecchi, Smithies i Evans per dissenyar i obtenir els primers mamífers transgènics (en ratolins).

En aquest article, atès que el principal interès són les implicacions de la transgènesi en l'economia i el seu possible efecte sobre la sostenibilitat, ens centrarem majoritàriament en el conreu de plantes transgèniques. Així i tot, es farà esment de la transgènesi animal, en tant que també té algunes vessants que són explotables econòmicament i, fins i tot, comencen a ser comercialitzables els primers animals transgènics per al consum humà.

4. Plantes transgèniques.

Aplicacions econòmicament rellevants

Les tècniques d'enginyeria genètica per obtenir plantes transgèniques es basen en fenòmens biològics naturals, modificats al laboratori per dirigir i controlar el resultat final. La transgènesi de plantes de conreu podria permetre la "revolució verda", en què les plantes transgèniques suposarien una millora del valor alimentari i una millor sostenibilitat per als països més agrícoles i en procés de desenvolupament. Però la majoria de

plantes transgèniques comercialitzades fins al moment responen a una millora de la producció agrícola i es troben sota patents explotades per empreses, cosa que ha propiciat el posicionament d'activistes en contra de la transgènesi *per se*, sense tenir en compte la seva potencialitat ni els arguments científics ponderats sobre els seus avantatges/riscos. Fins ara, les plantes transgèniques comercialitzades s'han centrat més en la tolerància a determinats herbicides, la resistència a les plagues d'insectes i d'altres paràsits (que permeten gestionar de manera més acurada l'ús de plaguicides i adobs) o, fins i tot, la caducitat/palatabilitat/ornamentació de la flor o el fruit, però en menor mesura en l'adaptació a condicions ambientals adverses (salinitat, fred, sequera...) o l'increment del valor nutritiu, que permetran augmentar el conreu en llocs particularment difícils o complementar l'alimentació en països on la malnutrició és endèmica.

A continuació, esmentem alguns exemples de plantes transgèniques ja obtingudes.

Conreus amb resistència a insectes

El *Bacillus thuringiensis* és un bacteri que produeix una proteïna naturalment insecticida. Preparacions que contenen aquest bacteri o la proteïna són utilitzades a bastament en agricultura ecològica en què aquest és un dels pocs insecticides permesos. La proteïna només afecta les larves d'insectes i no té cap efecte en els éssers humans. Això no obstant, la persistència i l'eficàcia limitades d'aquest insecticida orgànic no l'han fet prou competitiu respecte dels insecticides químics en conreus tradicionals. Ara fa vint anys es van introduir al mercat els transgènics *Bt* (en referència a *B. thuringiensis*) que duen el gen bacterià que produeix la proteïna insecticida als seus teixits. El blat de moro *Bt* és de fet l'únic transgènic conreat a Europa, ja que es va aprovar abans que des dels estaments polítics de la Unió Europea s'apliqués una "moratòria" al conreu (no pas a la importació) dels OMG. El blat de moro *Bt* és resistent a diverses plagues, com ara el barrinador, i estalvien l'ús de grans quantitats d'insecticida químic. L'alta incidència del barrinador del blat de moro a la vall de l'Ebre i a l'Empordà i la poca importància que té en altres zones d'Europa explica per què aquest conreu OMG és important a casa nostra. Per evitar l'aparició de plagues resistents al *Bt*, les mateixes empreses de llavors recomanen fortament a l'agricultor plantar un 20% de la superfície no transgènica on els possibles insectes resistents no tenen avantatge selectiva. La no-aplicació d'aquestes recomanacions a la Xina ha potenciat l'aparició

d'insectes resistents en pocs anys. Curiosament, s'ha demostrat que els camps OMG disminueixen la població general d'insectes perjudicials, cosa que produeix un efecte protector de plagues en camps no transgènics de la mateixa zona.

Conreus amb resistència a virus

Les infeccions per virus són també devastadores en alguns conreus. El *Papaya ringspot virus* (PRV) va estar a punt d'eliminar el conreu de papaia a Hawaii si no hagués estat per la introducció d'una varietat transgènica resistent al virus. El transgènic conté el gen que produeix la proteïna de la coberta del virus, cosa que el protegeix de la infecció. La no-toxicitat de la proteïna, que ingerim naturalment en fruits amb virus, i la semblança conceptual d'aquest mecanisme amb les vacunes són les causes probables que aquest transgènic de consum directe no hagi provocat reticències en els consumidors. La papaia transgènica va ser desenvolupada pel sistema públic a través del Departament d'Agricultura dels EUA i les llavors es van distribuir gratuïtament als agricultors. El seu èxit ha fet que diversos governs i companyies privades apliquessin aquesta mateixa estratègia per desenvolupar conreus resistents a diversos virus que estan en fase d'aprovació o que ja han començat a ser conreats. En són exemples la carbassera i la prunera resistents a virus desenvolupats als EUA, una mongetera al Brasil i la tomaquera i la pebrotera a la Xina. Malgrat el seu gran èxit i poc rebuig social, aquests tipus de transgènics representen només una ínfima part de la producció d'OMG mundial.

Conreus amb resistència a herbicides

Les males herbes són un problema per a la producció de monocultius que es va imposar d'ençà de l'aparició de l'agricultura. Per eliminar-les, l'agricultura moderna utilitza treballs mecànics o bé tractaments amb herbicides. Totes dues pràctiques tenen inconvenients: l'erosió, la primera, i la segona, l'acumulació de químics al medi ambient. Per tal de disminuir i fer més selectius els tractaments, s'han desenvolupat plantes transgèniques que duen un gen de resistència a herbicides. A diferència dels casos esmentats abans, el gen de resistència produeix una forma lleugerament modificada de la proteïna diana de l'herbicida que pot ser fins i tot d'origen vegetal. La resistència a l'herbicida glifosat de Monsanto és present a tres quartes parts del total de transgènics conreats al món, raó per la qual s'hi centra sovint tot el debat sobre plantes OMG. Aquest cas combina l'ús de productes químics, la transgènesi i un cert monopoli de la tecnologia. De fet, la

mateixa empresa produeix l'herbicida i la planta que hi és resistent, en un cas comparable al de les càpsules de cafè i la cafetera *ad hoc*. Per tot això el debat sobre aquests conreus és de gran complexitat i sovint s'escapa a les implicacions directes de l'enginyeria genètica en plantes. En qualsevol cas, diversos treballs documenten que els transgènics han permès la disminució en l'ús d'herbicides i, per tant, dels costos de producció. La importació i el consum i de diverses espècies amb resistència a herbicides està permesa a Europa, però no el seu conreu.

Plantes ornamentals transgèniques

Una aplicació quantitativament poc important de les plantes OMG és la producció de varietats ornamentals amb noves característiques. En són exemples la rosa blava –de color més aviat malva– i els clavells blaus, que expressen un gen que controla la síntesi de pigment blau. La rosa va ser comercialitzada al Japó el 2009 després de vint anys de recerca a l'empresa Suntory i els clavells, a Austràlia, el 1997. L'empresa Florigene les exporta totes a molts països, incloent-hi els de la Unió Europea, on se n'ha permès la importació fàcilment perquè no són destinades a consum humà.

Conreus transgènics enriquits nutricionalment

Actualment, tots els conreus transgènics incrementen l'eficiència de producció, però un altre dels objectius pot ser l'increment del valor nutricional de les plantes destinades a l'alimentació humana, una de les promeses de la revolució verda. Aquest és l'objectiu de la generació de l'arròs daurat (*golden rice*), en què l'arròs és transgènic per als gens que codifiquen tres enzims que permeten produir provitamina A (betacarotè), d'aquí el color groc dels grans d'arròs. La deficiència de vitamina A afecta més de 120 milions de nens arreu del món, particularment en zones asiàtiques on l'arròs és la font principal d'aliment i manca el consum de fruita i verdura riques en aquesta vitamina. La deficiència en vitamina A causa més d'un quart de milió de casos de ceguesa i prop de 2 milions de morts anuals. Si la població potencialment susceptible a la deficiència en aquesta vitamina mengés arròs ric en betacarotè, l'afectació per malnutrició per causa de la manca de vitamina A podria disminuir dràsticament. En aquest cas, els investigadors que van aconseguir aquest arròs transgènic van alliberar les patents perquè "l'arròs daurat" pugui ser accessible sense un cost més alt. Tot i això, l'oposició dels activistes en contra dels transgènics han impedit que pugui ser cultivat o, ni tant sols, que els tests de seguretat puguin ser duts a

“Tots els conreus transgènics incrementen l'eficiència de producció, però un altre dels objectius pot ser l'increment del seu valor nutricional”

terme, a pesar que és altament improbable que presenti algun efecte secundari i, en canvi, la deficiència en vitamina A és un problema greu a moltes societats, que comporta un gran nombre de pèrdues de vides humanes i un elevat cost social.

Altres conreus OMG

És difícil preveure quins productes transgènics més sortiran al mercat, però a l'Argentina s'ha desenvolupat la primera soja amb resistència a condicions d'estrès –com la sequera– i ha passat ja la primera de les tres avaluacions necessàries per ser conreada en aquest país. Semblantment, científics de Califòrnia i d'Indonèsia han desenvolupat conjuntament un arròs resistent a les riudes introduint tres gens que li permeten estar submergit totalment durant uns dies. És curiós que els tres gens provenen d'un arròs silvestre i es podrien haver introduït al cultivat per hibridació, però el procés és més ràpid i precís per transgènesi, ja que s'evita així la introducció de molts gens no desitjats del parent silvestre. Els assajos de camp amb aquest OMG han donat rendiments fins a sis vegades més elevats en zones susceptibles a inundacions.

A Alemanya, el primer anticòs monoclonal produït en plantes de tabac transgènic es troba ja en fase I d'assajos clínics en humans. Aquest anticòs és dissenyat per neutralitzar el virus del VIH i protegir de la sida les dones tractades i podria ser una fita històrica en el desenvolupament comercial de fàrmacs produïts en plantes.

Plantes transgèniques en recerca

Finalment, cal esmentar la importància cabdal que han tingut els transgènics en l'avenç del coneixement en biologia vegetal. La introducció de còpies extra d'un gen és la manera de demostrar inequívocament l'efecte dels gens sobre la fisiologia o el desenvolupament de les plantes. Els transgènics poden servir per accelerar el procés de producció de noves varietats no transgèniques ajudant a establir quins gens són essencials en un procés. Aquesta informació és clau per buscar directament a la natura, o obtenir per tractament amb

agents mutagènics, els mutants d'interès, que són considerats com conreus tradicionals, no transgènics.

De fet, una part de la recerca més aplicada suposa elaborar transgènics transitoris, que poden servir per accelerar el procés de producció de noves varietats no transgèniques. Un altre exemple menys freqüent és utilitzar plantes transgèniques en el procés de creació de noves varietats convencionals. Per exemple, alguns investigadors entren fruiters transgènics (com ara, pruneres o cítrics) que fan flors en estadi juvenil, per escurçar les generacions i accelerar el procés d'hibridació convencional. Només seleccionant un descendent que hagi perdut el transgèn, quan aquesta torni a florir, les llavors resultants generaran plantes no transgèniques, que ja poden ser comercialitzada. Finalment, les noves tecnologies de modificació de gens i d'edició genòmica permeten dur a terme manipulacions molt precises en el genoma, que donen lloc a noves varietats amb mutacions indistingibles de les produïdes espontàniament (vegeu l'apartat 8). Tot i que, en el procés de creació d'aquestes mutacions dirigides en gens d'interès, hi ha intervingut un procés de transgènesi, el transgèn queda eliminat en la varietat final que, *de facto*, ja no és una planta transgènica.

D'altra banda, les plantes transgèniques emprades en recerca tenen un cultiu en espais limitats i controlats, i no estan pensades per comercialitzar-se. De fet, moltes de les plantes obtingudes són, en molts casos, menys viables que les originals atès que el seu interès rau en la dissecció i el coneixement d'un procés metabòlic concret, no en l'abaratiment d'uns costos.

5. Animals transgènics.

Aplicacions econòmicament rellevants

Animals transgènics en recerca biomèdica

Tot i que no sigui l'objectiu principal d'aquest article cal esmentar l'extremada rellevància que han tingut les tècniques de transgènesi i manipulació genètica per a la progressió de la recerca biomèdica. La microinjecció d'ADN en zigots obtinguts per fecundació *in vitro* i la modificació genètica de cèl·lules embrionàries totipotents han estat i encara són les metodologies més emprades per esbrinar la informació que conté nostre genoma, per generar models de malalties genètiques humanes i per provar noves teràpies. S'ha generat una terminologia pròpia (*knockout*, *knockin*, *knockdown*...), sense la qual ja no podem entendre els avenços en genètica humana actuals, que han estat certament exponencials.

Animals transgènics rellevants per a la farmacologia

Algunes hormones (insulina, hormones tiroidees) i enzims (alfa1-antitripsina) necessaris per al tractament de malalties humanes són molt difícils d'obtenir per síntesi química. És molt més eficient organismes vius per utilitzar-los com a "màquines" de producció. Mitjançant grans produccions en bioreactors, es poden fer créixer bioreactors bacteris i llevats transgènics, però també generar ovelles, cabres o vaques transgèniques que secretin a la llet el producte d'interès farmacològic. A partir de llet, es pot purificar fàcilment el producte per al seu ús en la indústria farmacèutica. Fins i tot, la llet d'una vaca o ovella transgènica pot ser consumida directament, per exemple, llet sense fenilalanina per poder alimentar nadons i nens que pateixen la malaltia de la fenilcetonúria.

Animals transgènics per al consum humà

El passat novembre (19/11/15), l'FDA va aprovar l'ús de salmons transgènics (AquaAdvantage) per al consum humà. Aquests salmons són transgènics per a la seva pròpia hormona del creixement, que és produïda ininterrompudament, de manera constitutiva, totes les hores del dia i estacions de l'any, la qual cosa genera salmons gegants amb un cost de temps i diners menor (en 18 mesos tenen ja la mida per ser comercialitzats envers els 36 mesos que calen per al salmó tradicional de piscifactoria), però la resta de paràmetres, biològics, fisiològics i organolèptics són indistingibles. Fins i tot, com que el transgèn és del mateix salmó, l'FDA ha deixat a decisió de l'empresa si l'etiqueta com a organisme transgènic o no. Aquesta decisió de l'FDA, després de l'oposició aferissada dels activistes antitransgènics amb el suport d'empreses molt poderoses del sector, ha obert la porta per a l'exploració d'altres animals transgènics per al consum humà que ja podran posar-se al mercat en països de l'Amèrica del Nord.

6. Impacte econòmic de les plantes transgèniques

Impacte dels transgènics en l'agricultura mundial

El 2014, els conreus modificats genèticament van ocupar uns 180 milions d'hectàrees, que representen un 10% de les terres cultivables del món. El 2012 la producció dels vint països en desenvolupament que conreen OMG –amb el Brasil, l'Argentina i l'Índia al capdavant– va superar la dels vuit països industrialitzats que en conreen, encapçalats pels EUA i el Canadà. Malgrat aquest gran volum, la immensa majoria d'hectàrees conreades amb OMG les ocupen només quatre

“El principal benefici dels cultius transgènics és econòmic, ja que les varietats comercialitzades encara no incorporen millores nutricionals per al consumidor”

espècies: la soja, el blat de moro, la colza i el cotó. En els casos de la soja i el cotó, els transgènics representen més del 80% de la producció mundial de l'espècie. Cal remarcar que, llevat de la llet de soja i d'altres derivats, normalment no consumim directament els OMG, que es destinen majoritàriament a pinsos per a animals o a la fabricació de teixits. En aquest context, cal esmentar que el bestiar de la CEE menja gràcies a 69 plantes transgèniques que formen part del seu pinso, ja que després de la crisi de les vaques boges, el pinso només pot portar proteïna vegetal. Com que a Europa no es produeix suficient soja ni panís, s'ha de comprar a països del continent americà (els EUA, l'Argentina o el Brasil), on les restriccions sobre els cultius transgènics són molt menors.

Espanya va concentrar el 92% de les hectàrees de panís transgènic (varietat MON-810) que es van conrear a Europa el 2014. A Catalunya, la meitat de tot el panís és d'aquesta varietat.

Avantatges econòmics dels transgènics

El principal benefici dels cultius transgènics és econòmic, ja que les varietats comercialitzades encara no incorporen millores nutricionals que beneficiïn directament el consumidor. L'estudi més exhaustiu que s'ha fet sobre l'impacte econòmic dels conreus transgènics es va publicar el 2011. Consisteix en l'anàlisi estadística de 721 casos estudiats i publicats en 196 articles científics. L'estudi conclou que el rendiment dels cultius transgènics és un 22% més elevat que el dels tradicionals i que l'ús de pesticides hi és un 37% inferior. L'estudi conclou que els transgènics han comportat un increment global del 68% en els ingressos (que no beneficis) dels agricultors, però aquestes xifres són molt variables. Per exemple, els rendiments dels cultius de cotó transgènic Bt a l'Índia eren fins a un 50% més alts que el cotó convencional, mentre que la millora del rendiment als països desenvolupats es limitava a un 1-28%, segons els casos. Aquesta diferència rau en el fet que als països desenvolupats els conreus no transgènics tenen ja una bona producció gràcies a l'ús intensiu de pesticides. Per tant, el benefici més important en molts

casos és la reducció en els costos de plaguicides, que s'han xifrat en un 16% als EUA i fins al 70% a la Xina. Quant al blat de moro *Bt*, presenta un rendiment del 5 al 25% més elevat que el convencional. Això, afegit a la reducció dels costos de plaguicides, comporta per als agricultors marges comercials entre un 10 i un 17% més grans. Paradoxalment, en el cas de la soja, no sembla que la reducció de costos i l'augment del rendiment compensin el cost més elevat de la llavor transgènica. En general, s'estima que els cultius transgènics beneficien els agricultors de tot el món en 7 mil milions de dòlars l'any, beneficis que són comparativament més alts als països en desenvolupament.

Distribució dels beneficis produïts pels OMG

La pregunta és, doncs, a qui beneficien majoritàriament aquests conreus? Si bé entre el 2001 i el 2009 el preu de les llavors als EUA va pujar un 135% per al blat de moro i un 108% per a la soja, l'índex de preus al consumidor només va augmentar el 20% en aquest període. Del total dels guanys econòmics lligats als OMG s'ha estimat que les companyies de llavors n'han rebut menys del 50%, tot i que els percentatges varien entre el 10 i el 70% en diversos estudis. La resta dels beneficis es comparteix entre els agricultors i els consumidors. Cal remarcar que a tots els estudis que han analitzat l'impacte en el consumidor han descrit beneficis en el preu dels aliments encara que sovint molt modestos (un 2% en els casos menys favorables), raó per la qual no són percebuts pel ciutadà mitjà.

Possibles inconvenients per als productors

En general, els cultius transgènics semblen afavorir econòmicament els petits agricultors, però els estudis reflecteixen poques vegades altres conseqüències que té passar a aquesta tecnologia.

Per exemple, un estudi local sobre la introducció de cotó transgènic a l'Àfrica del sud, demostra grans beneficis per als petits agricultors. No obstant això, el fet que la mateixa empresa que compra el cotó sigui la que proveeix els agricultors la llavor transgènica, els pesticides i fins i tot els préstecs, els fa molt més vulnerables. Un cas que ha aixecat polseguera és l'elevada taxa de suïcidis entre petits productors agrícoles de l'Índia per sobreendeutament. Però tot i algunes afirmacions publicades, els transgènics poc tenen a veure amb aquest fenomen, ja que la taxa de suïcidis d'agricultors en aquest país s'ha mantingut estable des de la introducció del cotó *Bt* l'any 2002.

En qualsevol cas, els avantatges econòmics dels OMG depenen de moltes variants i és difícil predir-ne el futur. La reducció de costos es pot veure amenaçada per l'aparició de resistències als herbicides en les males herbes o l'aparició d'insectes resistents al *Bt*. La venda de productes orgànics o ecològics ha introduït noves dinàmiques en alguns mercats, que prioritzen aquesta producció per sobre dels costos. Tot i que no és probable que el consumidor final tingui gaire influència en els productes agrícoles destinats a pinsos –on els transgènics són preponderants– el futur a Europa dependrà en gran mesura del marc legislatiu que s'estableixi. També caldrà esperar si finalment apareixen varietats més valorades pels beneficis al consumidor (vegeu més avall).

Producció de fàrmacs en plantes

Les plantes transgèniques tenen també un alt potencial econòmic com a biofàctories per a la producció de proteïnes i altres molècules orgàniques. Els vegetals presenten avantatges importants respecte dels sistemes animals en la producció de fàrmacs, com ara un cost molt més baix de producció i l'absència de potencials contaminants potencialment perillosos, per exemple, els prions que van causar la crisi de les vaques boges. Aquestes raons han esperonat alguns projectes de producció de vacunes en plantes, que es troben en fase avançada, però el cas que té més èxit és sens dubte el medicament Elelyso, remei per tractar la malaltia de Gaucher. L'Elelyso consisteix en l'enzim glucocerebrosidasa humana produït en cèl·lules de pastanaga transgèniques per l'empresa israeliana Protalix (associada a Pfizer als EUA). El fàrmac és un 25% més barat que l'equivalent produït en cèl·lules animals i menys susceptible a variacions en la producció com les que van causar escassetat del fàrmac d'origen animal. El llarg període necessari per a l'aprovació dels fàrmacs d'origen vegetal va fer que Elelyso no arribés al mercat fins al 2012, cosa que l'ha impedit ser líder en el mercat, tot i ser més competitiu. Malgrat la regulació més estricta dels OMG vegetals respecte dels animals, el potencial de les plantes, o les seves cèl·lules, en la producció de fàrmacs és enorme, ja que no es preveu que les aplicacions en medicina i farmacologia desencadenin rebuig social important.

7. Els riscos dels organismes transgènics i la percepció social

Com en tota nova tecnologia, les aplicacions es poden ponderar des de diversos punts de vista, i la visió pot ser contraposada. D'una banda es poden considerar els avantatges

que el seu ús reporta i, de l'altra, els riscos que comporta, siguin genèrics (per la tecnologia *per se*) o siguin dependents de l'aplicació que se li vulgui donar. La implementació final de la tecnologia dependrà que els avantatges superin els riscos, i que aquests puguin ser mesurables, limitats o considerats acceptables socialment.

Respecte als organismes transgènics, la majoria de regulacions existents fan referència a les situacions on poden sortir dels límits dels laboratoris científics i alliberar-se a l'entorn. Per exemple, la directiva de la Unió Europea que regula l'alliberament dels OMG a l'ambient distingeix entre els OMG que tenen com a objectiu la recerca dels que es volen dedicar al conreu per a la seva comercialització i consum. A més, especifiquen que no es poden fer generalitzacions i s'ha d'analitzar el risc de cada OMG (per cada modificació genètica i cada espècie), cas per cas, tant pel que fa als riscos per a la salut humana com l'animal o del medi ambient (en el seu conjunt). De fet, aquesta és la preocupació principal respecte al conreu de plantes transgèniques, en el seu ús per al consum humà o com a farratge d'animals destinats al consum humà i ja, últimament, amb la comercialització d'animals transgènics per a alimentació humana. L'ús no científic de termes despectius, com ara *Frankenfoods* (aliments de Frankenstein) o de frases fetes sense cap significat, com ara "No volem menjar gens" (quan l'ADN forma part de totes les cèl·lules de plantes, animals i llevats que mengem en tots els aliments, siguin o no transgènics), no ha ajudat a tenir una visió ponderada de la realitat.

També cal remarcar que la introducció dels transgènics per al consum humà es pot incrementar, sobretot amb el conreu de plantes d'interès o d'animals transgènics per al consum humà. Més encara amb les noves tecnologies d'edició genòmica (vegeu l'apartat 8). Aquí cal esmentar les diferències entre les regulacions europees i nord-americanes respecte a la indicació de l'origen transgènic dels aliments en l'etiquetatge. Mentre que als EUA només cal esmentar-ho quan hi ha diferències constatables entre l'aliment transgènic i el que no ho és, a Europa s'ha d'esmentar quan la contribució d'un transgènic és superior al 0,9% del producte final comercialitzat, independentment de si hi ha diferències qualitatives.

Podríem resumir els riscos dels aliments transgènics en tres grans grups: 1) si poden afectar la salut humana, 2) si poden afectar l'ambient des d'un punt de vista ecològic i de manteniment de la biodiversitat, i 3) si poden afectar les relacions soci-

oeconòmiques i quin impacte poden tenir en un món sostenible, particularment en països i poblacions en desenvolupament.

Possibles riscos respecte a la salut humana

En primer lloc, el fet d'afegir un gen més o de treure'n algun en un organisme no comporta *per se* un perill per a la salut humana perquè tot el que mengem està format per cèl·lules vegetals, animals, fongs i bacteris, i totes les cèl·lules contenen ADN. El fet d'introduir un gen extern a una planta no té, *per se*, per què implicar una diferència en la seva digestibilitat o en l'increment d'al·lèrgies. Les intoleràncies i al·lèrgies alimentàries es donen en determinades persones perquè tenen una informació genètica diferent que les fa més sensibles per a algun aliment en concret. Òbviament, hi ha alguns aliments per als quals els humans podem presentar més fàcilment intolerància, per exemple, al blat i a altres cereals amb gluten, o més al·lèrgies, com ara a la soja o als fruits secs (independentment de si són transgènics o no). És evident que les plantes i els animals transgènics han de passar els tests de toxicitat i al·lergenicitat que convingui per demostrar que són aptes per al consum humà.

D'altra banda, hi ha hagut alguns arguments en contra de l'ús de certs gens marcadors o selectius que es troben dins de l'ADN introduït (del transgèn). Si es tracta d'un gen que confereix resistència a antibiòtic, aquest gen podria no ser digerit dins del sistema digestiu i ser transmès a la flora intestinal, conferint aquesta resistència. El cert és que aquest fet és altament improbable i que l'ús d'antibiòtics per tractar malalties lleus té un efecte demostrat en la generació de soques bacterianes resistents a antibiòtics. Tot i això, seria recomanable evitar l'ús de possibles gens marcadors transmissibles i, de fet, moltes de les plantes transgèniques, per exemple, la soja i el panís (moresc o blat de moro), ja no contenen aquests gens de resistència. D'altra banda, pel que fa als peixos transgènics per l'hormona del creixement, podríem pensar fins a quin punt ens podria afectar. Les hormones acostumen a ser molt específiques de cada espècie i cal recordar que tot animal (també les plantes) conté les seves pròpies hormones en els seus teixits i, quan mengem, les digerim dins del sistema digestiu.

Possibles riscos respecte a l'ambient i la biodiversitat

Podem considerar una sèrie d'avantatges dels conreus de plantes transgèniques (que, evidentment, depenen de la modificació genètica concreta i de la planta modificada) que po-

L'ús de plantes transgèniques planteja també diversos tipus de riscos per al medi ambient, com els que genera qualsevol tipus de monocultiu, sigui transgènic o no

dríem resumir en: a) la reducció de la dependència de plaguicides i herbicides de base química, que són productes tòxics de molt difícil eliminació; b) l'augment de la quantitat i la qualitat dels aliments en un món afamat i que explota l'ambient pels mètodes tradicionals, quan es tracta de varietats que permeten millors rendiments per hectàrea; c) la possibilitat de conrear milions d'hectàrees de terres que ara són desèrtiques, si s'hi planten conreus transgènics més resistents a la sequera, a la salinitat o al fred. Tanmateix, l'ús de plantes transgèniques planteja també diversos tipus de riscos per al medi ambient, com els que genera qualsevol tipus de monocultiu, sigui transgènic o no.

Un primer risc ambiental és una uniformització dràstica dels conreus a partir d'unes poques varietats de llavors, seleccionades per les seves característiques interessants des del punt de vista agrícola, incrementant el monocultiu, que ja tradicionalment ha suposat pèrdua de biodiversitat i increment de plagues molt específiques (d'aquí la necessitat del desenvolupament de plaguicides). Un segon tipus de risc ambiental està en la possibilitat que plantes transgèniques resistents a herbicides es puguin encreuar amb espècies properes i generar males herbes superresistents. Aquesta possibilitat és remota en algunes plantes, però més probable en d'altres i s'hauria de considerar cas per cas. Un tercer tipus de risc és que plantes, com ara el panís, on la transgènesi és tòxica per la plaga de la barrina (un insecte barrinaire), pugui malmetre altres insectes que puguin ser beneficiosos (insectes pol·linitzadors) o pugui afectar l'ecosistema. Per aquesta raó, en l'anàlisi del risc ambiental s'avaluen també els efectes de la modificació genètica sobre altres organismes.

Altres riscos que cal considerar: l'agrotransformació d'àrees marginals (per aridesa, fred, salinitat...) en àrees de conreu significa eliminar àrees naturals amb la conseqüent disminució de la biodiversitat. D'altra banda, produir més aliments vol dir promoure la fertilitat humana i contribuir a l'explosió demogràfica, com va passar amb la revolució verda. La transformació d'hà-

bitats naturals en conreus i més humans al món són factors causants de la problemàtica ambiental actual, molt abans de la introducció de la transgènesi, però que cal valorar.

Possibles riscos socioeconòmics

Com ja s'ha esmentat, la producció de llavors de plantes transgèniques està en mans d'unes poques empreses multinacionals, que també fabriquen els herbicides i plaguicides, i pot alterar dràsticament la lliure competència del mercat, amb estratègies no beneficioses per als agricultors ni els consumidors. D'altra banda, les patents sobre material genètic que poden obtenir aquestes empreses poden limitar, en el futur, la millora genètica de determinades plantes o el seu ús, si els preus se'n ressenten. La patentabilitat dels transgènics pot ser un punt important en la seva globalització i explotació. De tota manera, cal assenyalar que no tots els conreus transgènics entren dins d'aquesta categoria, i n'hi ha que han estat desenvolupats en laboratoris públics i dels quals s'han cedit les patents (com ara l'arròs daurat).

L'agricultura de tot el món pot experimentar canvis importants, d'una banda el desenvolupament de plantes transgèniques permet conrear espècies pròpies d'un clima determinat en altres llocs. S'ha de pensar quins efectes tindria en un país en desenvolupament l'economia del qual es basa en el monocreu del cacau o del cafè, si aquestes plantes es poguessin conrear a Europa o als Estats Units. D'altra banda, la introducció en plantes de característiques com ara la resistència a la sequera o a determinades plagues poden permetre a aquests mateixos països en desenvolupament d'ampliar la seva agricultura, millorar la seva producció i eradicar la malnutrició endèmica.

8. El futur dels transgènics

Les novíssimes tècniques d'edició genòmica, com ara el sistema CRISPR/Cas9, estan revolucionant la transgènesi a tots els nivells. Potser totes les consideracions anteriors d'aquest article arribaran a ser part de la història passada, però no de la futura. Modificacions genètiques que ens semblaven inversemblants estan ara a l'abast, tan fines i precises, que no podríem ni tan sols dir que l'organisme resultant és transgènic. Les possibilitats són infinites i imprevisibles. Per a aquestes noves aplicacions, caldran noves regulacions. Durant l'últim any aquesta tecnologia ha omplert d'articles totes les revistes científiques, amb editorials demanant moratòries i, fins i tot, articles especials del *Time*, *The New York Times* o *The*

Economist. Entrem en una nova era de modificació genètica on tots els organismes i tot tipus de modificació serà possible. Fins i tot, la modificació genètica del genoma humà. Caldrà replantejar-nos de nou què som, què fem, què volem com a societat i on volem anar. ■

Bibliografia recomanada

Estudi exhaustiu i no esbiaixat dels efectes econòmics dels OMG (www.fewresources.org/gmos--biotechnology.html)

Número especial sobre els transgènics de la revista científica de referència *Nature* (nature.com/gmcrops)

Informe sobre els avantatges i riscos dels transgènics de l'Institut d'Estudis Catalans (IEC) per al Parlament de Catalunya (www.parlament.cat/document/intrade/13684)

Excel·lent revisió en castellà sobre què són els transgènics (<http://www.comunicabiotec.org/que-son-y-que-significan-los-trans-genicos-hoy-en-dia/>)

Anàlisi estadística de l'impacte econòmic mundial dels transgènics (www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4218791/)

La història econòmica dels conreus transgènics en gràfics (www.nature.com/news/gm-crops-a-story-in-numbers-1.12893)

Revisió exhaustiva sobre la tècnica, les implicacions i l'impacte econòmic de la tecnologia CRISPR/Cas9 (www.nature.com/news/crispr-the-disruptor-1.17673)