

COM DISSENYAR CULTIUS RESISTENTS A LES MALALTIES

Dels coneixements bàsics a la biotecnologia

SELENA GIMÉNEZ-IBÁNEZ

Els registres antics descriuen com les malalties de les plantes s'atribuïen a moltes raons, com ara el poder diví, les creences religioses i la superstició. La situació ha canviat molt, i ara tenim un coneixement detallat sobre el funcionament de la immunitat vegetal. Les plantes utilitzen dos tipus de sensors per a percebre i derrotar la llarga llista d'organismes patògens que els ataquen, mentre que els microbis despleguen una infinitat d'armes especialitzades per a contenir la immunitat i facilitar la infecció. Això obre una porta per a explotar aquest coneixement i incrementar la resistència dels cultius. En aquest article descrivim nous enfocaments biotecnològics per a dissenyar cultius amb més resistència a les malalties que permeten combatre les pèrdues agrícoles i reduir les aportacions químiques, amb l'objectiu d'aconseguir una agricultura més sostenible que garantisca la seguretat alimentària.

Paraules clau: cultius, malalties, biotecnologia, seguretat alimentària.

La vida en el segle XXI fa difícil apreciar de quina manera les malalties de les plantes han afectat les societats humanes i la nostra mateixa història. Un exemple devastador és el de la Gran Fam irlandesa de 1845, que es va produir quan la malaltia coneguda com el míldiu de la patata, provocat pel patògen oomicet *Phytophthora infestans* (Figura 1), es va convertir en una epidèmia que va devastar la societat irlandesa. Va provocar la mort per inanició de prop d'un milió de persones, i un altre milió es va veure obligat a emigrar, el que va provocar la famosa diàspora irlandesa. Dos segles després, el míldiu de la patata continua sent possiblement la malaltia més nociva que afecta la patata a escala mundial. Segons l'Organització de les Nacions Unides per a l'Alimentació i l'Agricultura (FAO), cada any es perd entre el 20 i el 40% de la producció mundial dels principals cultius per culpa de malalties i plagues (Oerke, 2006). No és estrany que les pèrdues de cultius siguin més altes en aquelles regions que ja s'enfronten a la fam i a la inseguretat alimentària. Es preveu que en 2050

la població mundial arribe als 9.000 milions de persones, un 34% més que en l'actualitat. Per tant, l'agricultura moderna ha de proporcionar aliment per a la creixent població mundial i protegir-la de les epidèmies incontrolables que amenacen la seguretat alimentària.

Avui dia la producció d'aliment es basa en pràctiques agrícoles que inclouen controls biològics i de cultius, l'ús

de productes agroquímics i l'ús intencional de varietats resistents. Si bé els pesticides han contribuït molt a millorar la nostra seguretat alimentària, l'ús habitual d'agroquímics planteja problemes significatius relacionats amb els seus efectes negatius sobre la salut i l'entorn. Aquest fet subratlla la necessitat d'una transició cap a una agricultura més sostenible. L'ús intencional de va-

«Els cultius actuals són el producte de milers d'anys de selecció humana i millorament tradicional a partir de les formes silvestres originals»

rietats resistents és un mecanisme benigne en termes ecològics i econòmics per a gestionar les malalties dels cultius. Els humans han seleccionat plantes resistents a la malaltia des de les albrors de l'agricultura. Per als milloradors moderns, el desenvolupament d'una cultura resistent a la malaltia inclou dos passos. En primer

lloc, identificar plantes resistents, normalment a partir de cultivars silvestres estretament relacionades. I en segon lloc, incorporar els gens immunes responsables de la resistència a malalties en els cultius seleccionats mitjançant millorament clàssic o enginyeria genètica. Les metodologies de millorament clàssiques realitzen una introgressió de gens resistents en cultivars seleccionades mitjançant l'encreuament i la selecció dels trets desitjats en la descendència. De fet, els cultius actuals són el producte de milers d'anys de selecció humana i millorament tradicional a partir de les formes silvestres originals. Aquest és un procés llarg i intensiu que restringeix la millora genètica del cultiu a les espècies amb les quals pot encreuar-se sexualment.

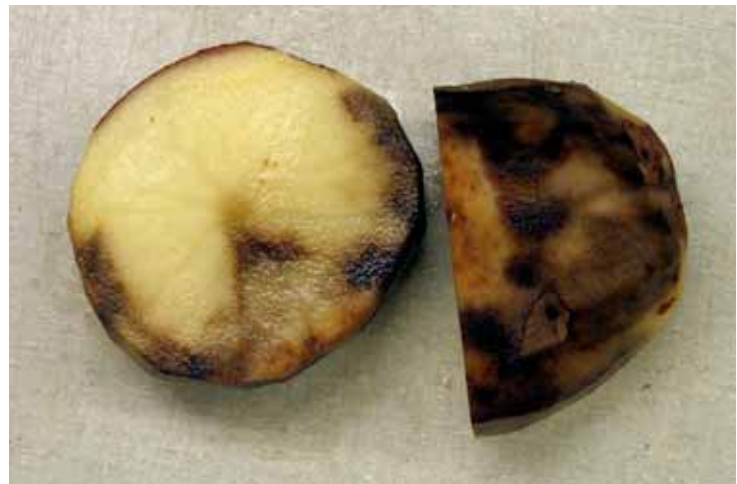
Una forma alternativa d'introduir nous gens resistents en les cultivars seleccionades és per mitjà de l'ús d'enginyeria genètica, que permet alterar directament els gens d'un organisme utilitzant biotecnologia. En concret, permet inserir, modificar o eliminar gens específics. Potser l'avantatge més important de l'enginyeria genètica és que permet intercanviar material genètic entre diferents espècies, o introduir nous gens de resistència contra patògens en els cultius que es propaguen de manera vegetativa (no sexual) com el plàtan, la iuca i la patata, i sobrepasar els límits imposats pel millorament clàssic. L'enginyeria genètica té potencial per a ampliar en gran manera l'eficiència i precisió de possibles modificacions mitjançant l'ús de tecnologies d'edició genètica d'avantguarda com CRISPR/Cas9 (sigles en anglès de «repeticions palindròmiques curtes agrupades i regularment interespaïades/proteïna associada a CRISPR 9»). Totes aquestes estratègies d'enginyeria genètica amplien les possibilitats d'introduir resistències a malalties en cultius per als quals els programes de millorament clàssics plantegen obstacles o no són factibles.

■ EL SISTEMA IMMUNE DE LES PLANTES

La investigació dels últims trenta anys amb espècies vegetals model i en cultius ha portat a una comprensió conceptual detallada sobre els mecanismes moleculars que controlen la resistència i susceptibilitat a les malalties de les plantes. Aquestes investigacions estan sintetitzades de manera elegant en el model de Jones i Dangl, conegut com a «model de zig-zag» (Jones i Dangl, 2006). Aquesta teoria postula que les plantes utilitzen dos tipus de sensors per a resistir l'atac d'organismes patògens, mentre que els microbis indueixen infeccions utilitzant tota una sèrie d'armes especialitzades. D'una banda,



Howard F. Schwartz, Colorado State University (CC BY)



Ben Millet CC BY-NC-ND 2.0

Figura 1. El patògen *Phytophthora infestans* va ser el causant de l'epidèmia de mildiu de la patata a la fi del segle XIX a Irlanda, que va provocar la que és coneguda com la Gran Fam irlandesa de 1845. En la imatge, efectes del patògen en una patata i en fulles de la planta de la patata.

«La batalla entre les plantes i els seus patògens proporciona informació que es pot utilitzar per a dissenyar cultius resistents»



ITA



ITA



GuyBlomme



FAO/Fidélis Kahura

Figura 2. Les estratègies d'enginyeria genètica per a transferir una sèrie de sensors de superfície cel·lular a espècies cultivables han demostrat ser molt eficaces. Entre altres, aquestes estratègies han proporcionat una major resistència davant malalties com el marçiment bacterià del plàtan causada per *Xanthomonas*, que representa una amenaça a la producció agrícola en algunes zones. En les imatges, detalls de talls, fruits i fulles afectades per *Xanthomonas campestris* i, a sota, un cultiu de plàtans a Tanzània on s'observen els efectes del bacteri.

la primera línia de defensa de les plantes la proporcionen els sensors immunes especialitzats de la superfície cel·lular, que detecten la presència de microbis en l'exterior de les cèl·lules de la planta quan perceben estructures o patrons microbians. Aquest reconeixement activa la seua immunitat i és la raó per la qual les plantes són generalment resistents a la gran quantitat de microbis que les envolten. Com és possible, llavors, que hi haja patògens vegetals? Com a resposta a aquesta situació, els patògens competents produeixen fitotoxines i distribueixen molècules virulentes anomenades «efectors» en les cèl·lules vegetals, amb l'objectiu d'atacar dianes concretes de les plantes hoste i provocar la infecció. Els efectors contribueixen col·lectivament a la patogènesi atacant múltiples processos cel·lulars defensius, i la seua acció és essencial per a la progressió de la malaltia. La segona línia de defensa vegetal la protagonitzen els receptors immunes intracel·lulars, que detecten els efectors quan són introduïts en les cèl·lules de la planta. Després de la detecció, els receptors intracel·lulars despleguen la immunitat en la seua forma més forta, associada habitualment amb la mort de la cèl·lula hoste en el lloc de la infecció, i restableixen la immunitat completa.

Aquest «model de zig-zag» prediu una batalla coevolutiva contínua entre plantes i patògens basada en canvis adaptatius per a inclinar la balança cap a un costat o l'altre, però també proporciona informació que es pot utilitzar per a dissenyar cultius resistents a les malalties.

■ INCORPORACIÓ DE SENSORS DE SUPERFÍCIE CEL·LULAR PER A LA PRIMERA LÍNIA DE DEFENSA

Una nova estratègia prometedora per a augmentar la resistència a malalties dels cultius es basa en el desplegament de sensors immunes especialitzats en la superfície cel·lular per a millorar el reconeixement de patògens. Els sensors de superfície cel·lular comporten una millora quantitativa de la resistència a les malalties. Per definició, els patrons microbians percebuts per aquests sensors són components moleculars molt conservats dins d'una classe de microbis i amb una funció essencial per a la seua aptitud o supervivència, la qual cosa implica que els microorganismes no poden modificar-los fàcilment per a superar la seua detecció. Per exemple, la quitina, un element estructural fonamental de totes les parets cel·lulars dels fongs, actua com un patró microbià important, que és percebut per la majoria d'espècies de plantes i activa la immunitat vegetal. Per tant, una manera d'aconseguir una resistència d'ampli espectre que a més siga duradora és per mitjà de la transferència d'aquests sensors especialitzats de la superfície cel·lular que detecten una àmplia varietat de molècules

microbianes, com la quitina en el cas dels patògens fúngics, aquells cultius que en manquen.

En 2010 es va produir un gran avanç quan l'equip liderat per Cyril Zipfel va demostrar que la transferència del sensor de superfície cel·lular que percep el factor d'allargament Tu –un dels patrons microbians més abundants en els bacteris– des d'una petita planta de la família de la mostassa a la tomaca utilitzant tècniques d'enginyeria genètica augmentava la resistència a una àmplia gamma de patògens bacterians (Lacombe et al., 2010). Des de llavors s'han utilitzat enfocaments similars d'enginyeria genètica per a transferir una sèrie de sensors de superfície cel·lular a espècies cultivables (Rodríguez-Moreno, Song i Thomma, 2017). Aquestes estratègies han demostrat ser molt eficaces. Han proporcionat una major resistència en termes quantitativs davant malalties com el càncer dels cítrics (que afecta la taronja), la malaltia bacteriana de les fulles de l'arròs, el mildiu de la patata i el marciment bacterià del plàtan causat pel bacteri *Xanthomonas* (Figura 2). Aquesta última malaltia representa una de les amenaces més importants per a la producció de plàtans a la regió africana dels Grans Llacs. Per tant, els sensors immunes de la superfície cel·lular representen una font potent de resistència duradora que es pot transferir fins i tot entre famílies de plantes molt distants per al control de malalties. Els genomes vegetals codifiquen uns quants centenars d'aquests sensors potencials que podrien complir un paper en la percepció de microbis. Avui dia la identificació de nous sensors immunes en la superfície cel·lular que perceben microorganismes i la seua transferència als cultius representa un enfocament emocionant per a millorar la resistència dels cultius a patògens importants.

■ CREACIÓ DE PARANYS BASATS EN RECEPTORS INTRACEL·LULARS CONTRA MALALTIES CRÍTIQUES

Els receptors immunes intracel·lulars són eines importants en els programes de millorament que intenten gestionar les malalties dels cultius. Aquest tipus d'immunitat es basa en un mecanisme de reconeixement molt específic, desencadenat quan un receptor immune intracel·lular detecta el seu efectors corresponent dins de la cèl·lula, injectat per un patògen que intenta induir la malaltia. D'aquesta manera, els receptors intracel·lulars solen conferir resistència només davant aquelles soques del patògen que contenen l'efector específic que reconeixen. La immunitat activada per aquests receptors intracel·lulars és més ràpida, intensa i efectiva contra el patògen adequat, en comparació amb la resistència creada pels sensors de la superfície cel·lular. Els receptors intracel·lulars solen proporcionar immuni-



Figura 3. En les imatges, assajos sobre el mildiu de la patata en cultiu. Mostren la varietat original de patata cultivada Desiree (A) i la mateixa varietat amb el receptor intracel·lular *Rpi-vnt1.1* (B), que no mostra símptomes evidents del mildiu, la malaltia provocada pel patògen *Phytophthora infestans*. Les imatges es van prendre en assajos realitzats en 2012, en una etapa avançada de la plaga del mildiu, i són cortesia del professor Jonathan D. Jones (The Sainsbury Laboratory, Norwich, Regne Unit).

«L'enginyeria genètica està emergint com una eina viable, específica i versàtil per a reforçar la resistència dels cultius a les malalties»



Cortesía de Jonathan D. Jones

tat completa davant d'un patògen concret, mentre que els sensors superficials contribueixen quantitativament a la resistència contra una àmplia varietat de microbis.

Sir Rowland Biffen va demostrar l'efectivitat d'aquesta mena de resistència per primera vegada al començament del segle xx, a través d'un programa de millorament genètic del blat (Biffen, 1905). Des de llavors, els receptors immunes intracel·lulars s'han utilitzat àmpliament, en especial en programes de millorament clàssic, gràcies als quals s'introdueixen aquest tipus de gens en cultius actuals des de parents silvestres resistents. Al mateix temps, s'han identificat i introduït nombrosos receptors intracel·lulars en plantes utilitzant tècniques d'enginyeria genètica per a generar varietats resistents a algunes malalties importants. Un exemple destacat és la introducció en la patata cultivada d'un receptor immune intracel·lular conegut com a *Rpi-vnt1.1*, aïllat a partir d'un parent sud-americà d'aquesta espècie, que confereix resistència completa davant la devastadora malaltia del míldiu de la patata (Figura 3) (Foster et al., 2009). Resulta notable que, en 2015, una varie-

tat de patata resistent al míldiu que incloïa aquest receptor intracel·lular es va convertir en el primer cultiu transgènic resistent a un patògen no viral aprovat per a ús comercial als EUA. Avui dia la identificació de nous receptors immunes intracel·lulars és una àrea d'investigació extremadament activa, que tracta de protegir els cultius més importants econòmicament dels seus patògens més devastadors.

A hores d'ara, s'ha aconseguit transferir receptors immunes intracel·lulars entre espècies pròximes de plantes amb un èxit relatiu. Per contra, la seua introducció en plantes més llunyanes, com ara espècies pertanyents a altres famílies, sol fracassar. Aquest fenomen és la raó principal per la qual els investigadors prefereixen identificar receptors immunes intracel·lulars a partir d'espècies silvestres relacionades amb els cultius, ja que és molt més probable que funcionen si s'introdueixen en una varietat cultivada pròxima. Una forma alternativa de superar aquesta problemàtica podria ser a través del redisseny directe dels receptors immunes endògens d'un cultiu per a expandir la seua capacitat de detecció. En aquest sentit, recentment s'ha generat una versió modificada sintèticament del receptor immune intracel·lular de la patata conegut com a R3a, amb capacitat per a detectar al mateix temps diversos efectors del patògen oomicet *Phytophthora infestans* (Segretin et al., 2014), mentre que un altre receptor intracel·lular de la tomaca conegut com a I2 ja s'ha modificat per a proporcionar resistència parcial a *Phytophthora infestans*, a més de proporcionar-la per al fong *Fusarium oxysporum* (Giannakopoulou et al., 2015). Encara que aquests experiments s'han realitzat en una planta model sense valor agrícola, aquests treballs pioners suggereixen que es poden modificar directament els receptors immunes endògens per a crear resistència davant diversos patògens. Aquests coneixements també es poden ampliar utilitzant tecnologies d'edició del genoma com CRISPR/Cas9, que permet modificar de manera precisa gens existents i podria ser explotada per a desenvolupar noves especificitats de detecció en els receptors immunes intracel·lulars preexistents dels cultius principals.

■ PROTECCIÓ DELS TALONS D'AQUIL·LES DE LES PLANTES

Els patògens vegetals utilitzen tota una sèrie d'estratègies moleculars per a suprimir la immunitat de les plantes. Les dianes d'aquestes estratègies es coneixen habitualment com a «gens vegetals de susceptibilitat», perquè és necessari manipular-los o suprimir-los perquè la malaltia progressi. Sorprenentment, múltiples patògens que no estan relacionats ataquen les mateixes dianes de susceptibilitat dins la planta, la qual cosa suggereix

que aquestes dianes són, de fet, importants talons d'Aquil·les per a la planta. Per tant, una estratègia recent per a protegir els cultius de les malalties es basa en l'eliminació o modificació d'aquests gens de susceptibilitat per a evitar que els patògens els manipulen.

Diversos exemples recents il·lustren com es poden aplicar amb èxit les noves tècniques d'edició genètica en els cultius per a protegir els gens vegetals de susceptibilitat atacats pels patògens. Les tàctiques utilitzades sovint pels patògens vegetals per a induir malalties inclouen, per exemple, la manipulació de gens de defensa activats durant el procés d'infecció, així com la manipulació de les principals rutes hormonals de defensa de les plantes, en les quals s'inclou l'hormona de l'àcid jasmònic. En aquest context, recentment es va reeditar en tomaca un sensor d'àcid jasmònic anomenat *JAZ2* mitjançant tecnologia CRISPR/Cas9 per a impedir que el manipulara una fitotoxina produïda per moltes soques del bacteri *Pseudomonas syringae* (Figura 4). El resultat va ser el desenvolupament de tomaques resistents a la malaltia de la taca bacteriana provocada per aquest bacteri fitopatogen (Ortigosa, Gimenez-Ibanez, Leonhardt i Solano, 2018). En un altre exemple molt elegant es va utilitzar una estratègia similar per a modificar tres gens de susceptibilitat de l'arròs, coneguts com a gens *SWEET*. Això ha permès desenvolupar una varietat d'arròs que mostra una àmplia resistència contra el patògen bacterià *Xanthomonas oryzae*, causant del foc bacterià en aquest cultiu i que és una malaltia greu en gran part d'Àsia i en algunes zones d'Àfrica (Oliva et al., 2019). Tots aquests exemples mostren com es poden utilitzar les noves tecnologies d'edició genètica per a proporcionar de manera senzilla resistència als cultius.

■ ESTRATÈGIES PER A CREAR UNA RESISTÈNCIA DURADORA

Desafortunadament, la resistència a les malalties conferida pels receptors immunes intracel·lulars, encara que és molt efectiva, sol durar poc de temps en la pràctica. Això és perquè els patògens evolucionen ràpidament per a evadir la detecció, per exemple perdent o modificant un efector detectat del seu abundant repertori. Per a superar aquest problema, una possible estratègia és a través del desenvolupament de varietats multilínia, que contenen una mescla de llavors amb diferents gens receptors intracel·lulars, la qual cosa redueix la pressió selectiva sobre un patògen en comparació amb els monocultius



Gregory Martin/EurekAlert

Figura 4. Les noves tecnologies d'edició genètica poden proporcionar d'una manera senzilla resistència als cultius davant de malalties, com per exemple davant del bacteri *Pseudomonas syringae*. En la imatge, efectes d'aquest bacteri en una tomaca.

«Avui dia hi ha només uns pocs cultius transgènics resistents a les malalties que hagen estat aprovats per al seu ús comercial»

resistents, que contenen el mateix i únic receptor intracel·lular en totes les llavors. Una altra estratègia es basa en la implantació de múltiples receptors immunes intracel·lulars en la mateixa llavor, procés conegut habitualment com a «apilament de gens». Aquesta estratègia produeix una immunitat de llarga duració, ja que són necessaris múltiples canvis simultanis en el patògen per a superar-la, i la probabilitat que això ocorregui és molt baixa. Un exemple recent de l'efectivitat d'aquesta estratègia és l'apilament mitjançant enginyeria genètica de tres receptors immunes intracel·lulars en varietats de patata dels altiplans d'Àfrica oriental contra la malaltia del míldiu de la patata. Això ha donat lloc a una varietat que és resistent a aquesta malaltia, amb una producció entre tres i quatre vegades superior respecte a la mitjana nacional (Ghislain et al., 2019). Aquestes varietats de patata resistents al míldiu es podrien adoptar ràpidament si l'entorn regulador de les cultivars millorades amb tècniques d'enginyeria genètica fora favorable. Això representaria augmentos significatius en els ingressos dels petits agricultors, davant d'una malaltia que provoca pèrdues anuals del 15 al 30 % a l'Àfrica subsahariana.

Encara que la majoria d'estratègies passades s'han centrat en la introducció de receptors immunes intracel·lulars amb bastant èxit, és probable que l'estratègia més eficaç per a combatre les malalties a llarg termini encara hagi d'arribar. Intuïtivament, aquesta estratègia



ha d'estar basada a piramidalitzar diverses capes de defensa al mateix temps, on una mateixa cultivar combine sensors superficials, receptors immunes intracel·lulars i la desactivació de gens de susceptibilitat específics. Això hauria de conferir una resistència més duradora davant una àmplia varietat de patògens, gràcies als sensors de la superfície cel·lular, i immunitat completa a soques patògenes específiques, per mitjà dels receptors immunes intracel·lulars i els gens de susceptibilitat desactivats. Aquesta estratègia combinada hauria de ser molt més duradora en la pràctica.

■ EL FUTUR QUE ENS ESPERA

Els enfocaments d'enginyeria genètica estan emergint com a eines viables, específiques i versàtils per a reforçar la resistència dels cultius a les malalties, especialment en els cultius de propagació principalment vegetativa per als quals els programes clàssics de millorament no són factibles. Les estratègies que es descriuen ací podrien permetre el desenvolupament de cultius «millorats» que detecten i responguen de manera més efectiva als patògens invasors que intenten envair-les, o que eviten les estratègies microbianes que s'apliquen per a induir la malaltia, molt possiblement sense reduir la productivitat dels cultius millorats. Avui dia hi ha només uns pocs exemples de cultius transgènics resistents a les malalties que hagen estat aprovats per a ús comercial. Això és degut a les actuals restriccions legislatives entorn dels transgènics, malgrat el consens científic que aquests cultius són tan segurs com els desenvolupats mitjançant els mètodes clàssics (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, 2016). Aquestes estratègies biotecnològiques són més efectives, respectuoses amb el medi ambient i segures que molts mètodes actuals de control basats en l'ús d'agroquímics. De fet, s'estima que l'apilament de receptors immunes intracel·lulars pot reduir l'ús de fungicides contra el míldiu de la patata en més d'un 80% (Haverkort et al., 2016). Amb el creixement continuat de la població mundial, no podem continuar ignorant els enfocaments d'enginyeria genètica per a introduir fonts de resistència en els cultius contra les principals malalties. La raó és simple: aquestes varietats superiors tenen el potencial per a combatre les pèrdues agrícoles relacionades amb les plagues al camp, permetrien reduir les aportacions químiques i representen una eina ben potent per a avançar cap a una agricultura més sostenible que garantisca la seguretat alimentària. ☺

REFERÈNCIES

Biffen, R. H. (1905). Mendel's laws of inheritance and wheat breeding. *The Journal of Agricultural Science*, 1(1), 4–48. doi: [10.1017/S002185960000137](https://doi.org/10.1017/S002185960000137)

- Foster, S. J., Park, T. H., Pel, M., Brigneti, G., Sliwka, J., Jagger, L., ... Jones, J. D. G. (2009). *Rpi-vnt1.1*, a *Tm-2(2)* homolog from *Solanum venturii*, confers resistance to potato late blight. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 22(5), 589–600. doi: [10.1094/MPMI-22-5-0589](https://doi.org/10.1094/MPMI-22-5-0589)
- Ghislain, M., Byarugaba, A. A., Magembe, E., Njoroge, A., Rivera, C., Roman, M. L., ... Kiggundu, A. (2019). Stacking three late blight resistance genes from wild species directly into African highland potato varieties confers complete field resistance to local blight races. *Plant Biotechnology Journal*, 17(6), 1119–1129. doi: [10.1111/pbi.13042](https://doi.org/10.1111/pbi.13042)
- Giannakopoulou, A., Steele, J. F., Segretin, M. E., Bozkurt, T. O., Zhou, J., Robatzek, S., ... Kamoun, S. (2015). Tomato I2 immune receptor can be engineered to confer partial resistance to the oomycete *Phytophthora infestans* in addition to the fungus *Fusarium oxysporum*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 28(12), 1316–1329. doi: [10.1094/MPMI-07-15-0147-R](https://doi.org/10.1094/MPMI-07-15-0147-R)
- Haverkort, A. J., Boonekamp, P. M., Hutten, R., Jacobsen, E., Lotz, L. A. P., Kessel, G. J. T., ... Visser, R. G. F. (2016). Durable late blight resistance in potato through dynamic varieties obtained by cisgenesis: Scientific and societal advances in the DuRPh project. *Potato Research*, 59(1), 35–66. doi: [10.1007/s11540-015-9312-6](https://doi.org/10.1007/s11540-015-9312-6)
- Jones, J. D., & Dangl, J. L. (2006). The plant immune system. *Nature*, 444(7117), 323–329. doi: [10.1038/nature05286](https://doi.org/10.1038/nature05286)
- Lacombe, S., Rougon-Cardoso, A., Sherwood, E., Peeters, N., Dahlbeck, D., Van Esse, H. P., ... Zipfel, C. (2010). Interfamily transfer of a plant pattern-recognition receptor confers broad-spectrum bacterial resistance. *Nature Biotechnology*, 28(4), 365–369. doi: [10.1038/nbt.1613](https://doi.org/10.1038/nbt.1613)
- National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. (2016). *Genetically engineered crops: Experiences and prospects*. Washington, DC: The National Academies Press. doi: [10.17226/23395](https://doi.org/10.17226/23395)
- Oerke, E. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31–34. doi: [10.1017/S0021859605005708](https://doi.org/10.1017/S0021859605005708)
- Oliva, R., Ji, C., Atienza-Grande, G., Huguet-Tapia, J. C., Perez-Quintero, A., Li, T., ... Yang, B. (2019). Broad-spectrum resistance to bacterial blight in rice using genome editing. *Nature Biotechnology*, 37(11), 1344–1350. doi: [10.1038/s41587-019-0267-z](https://doi.org/10.1038/s41587-019-0267-z)
- Ortigosa, A., Gimenez-Ibanez, S., Leonhardt, N., & Solano, R. (2018). Design of a bacterial speck resistant tomato by CRISPR/Cas9-mediated editing of *Sl-JAZ2*. *Plant Biotechnology Journal*. doi: [10.1111/pbi.13006](https://doi.org/10.1111/pbi.13006)
- Rodriguez-Moreno, L., Song, Y., & Thomma, B. P. (2017). Transfer and engineering of immune receptors to improve recognition capacities in crops. *Current Opinion in Plant Biology*, 38, 42–49. doi: [10.1016/j.pbi.2017.04.010](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.04.010)
- Segretin, M. E., Pais, M., Franceschetti, M., Chaparro-Garcia, A., Bos, J. I. B., Banfield, M. J., & Kamoun, S. (2014). Single amino acid mutations in the potato immune receptor R3a expand response to *Phytophthora* effectors. *Molecular Plant-Microbe Interaction*, 27(7), 624–637. doi: [10.1094/MPMI-02-14-0040-R](https://doi.org/10.1094/MPMI-02-14-0040-R)

AGRAÏMENTS: L'autora vol agrair a John Rathjen, Andrea Chini i Sophie Kneeshaw la seua lectura crítica i les seues útils observacions, així com al professor Jonathan D. Jones (The Sainsbury Laboratory, Norwich, Regne Unit) per facilitar les imatges dels assajos sobre el míldiu de la patata en varietats que expressen el receptor intracel·lular *Rpi-vnt1.1*. Aquest treball ha estat finançat pels projectes del Ministeri de Ciència, Innovació i Universitats número BIO2014-55884-JIN i RTI2018-094526-J-I00 per a Selena Giménez-Ibáñez. L'autora no declara cap conflicte d'interessos.

SELENA GIMÉNEZ-IBÁÑEZ. Investigadora en el Departament de Genètica Molecular de Plantes del Centre Nacional de Biotecnologia (CNB-CSIC), Madrid (Espanya). Va estudiar Enginyeria Agronòmica a la Universitat Politècnica de València i va realitzar la seua tesina en la Universitat de Wageningen (Països Baixos) en l'especialitat de biotecnologia de plantes i millorament genètic. Posteriorment es va traslladar a The Sainsbury Laboratory (Centre John Innes, Regne Unit), un centre líder en les relacions entre les plantes i els seus patògens, per a realitzar els seus estudis de doctorat. Des de 2010 ha desenvolupat la seua carrera d'investigació en el CNB-CSIC, on desenvolupa la seua activitat en relació amb les interaccions planta-microbi, centrada a entendre els mecanismes de defensa que controlen la resistència de les plantes a les plagues i com diferents tipus de microbis poden convertir-se en patògens competents, la qual cosa podria ajudar a dissenyar noves estratègies per a la protecció dels cultius. ✉ selena.gimenez@cnb.csic.es