

PRODUIR MÉS ALIMENTS DE MANERA SOSTENIBLE ÉS POSSIBLE

Fertilització biotecnològica i sostenible davant el problema del creixement poblacional

JUAN CARLOS DEL POZO

El gran augment de la població mundial previst per aquest segle obligarà a incrementar la producció agrícola de manera proporcional per a assegurar-ne l'alimentació. No obstant això, actualment la societat demanda nous mètodes de producció més sostenibles i respectuosos amb el medi ambient. Per a poder obtenir aquest increment sostenible és necessari fer ús de les noves eines biotecnològiques, com ara l'edició gènica o la biologia sintètica, i del coneixement generat pels investigadors durant anys. El microbioma del sòl està emergint com una poderosa eina biotecnològica. Aquests microorganismes beneficiosos promouen el creixement vegetal a través de l'aportació de nutrients, producció d'hormones o metabòlits secundaris. Per això, l'ús d'aquests microorganismes ajudarà a incrementar la producció agrícola de manera sostenible.

Paraules clau: agricultura sostenible, sistema radicular, fertilització, nitrogen, fosfat, microbioma.

■ HUMANITAT I AGRICULTURA, UNA COEVOLUCIÓ NECESSÀRIA

Fa més de 10.000 anys, els humans van iniciar un canvi en la seua forma de vida i van passar de ser majoritàriament caçadors i recol·lectors nòmades a agricultors sedentaris. En aquell moment va començar la domesticació i l'ús de plantes de cultiu. El desenvolupament de l'agricultura va permetre als humans prehistòrics proveir-se d'aliments en abundància i de manera estable i això va propiciar la formació de comunitats cada vegada més grans amb un significatiu augment de la població. Al llarg de la història, aquest increment poblacional ha exigut un augment en la producció agrícola, la qual cosa ha derivat en una gran dependència humana d'una agricultura i ramaderia estables. Aquesta dependència, traduïda com una necessitat de «seguretat alimentària», és un dels majors reptes per a la societat actual.

Les últimes estimacions indiquen que la població humana creixerà fins als 11.000 milions en 2100

(FAO, 2017). Aquest increment, juntament amb les noves necessitats de la població als països emergents, implica que la producció agrícola s'hauria d'incrementar en quasi un 50 % (Ray, Mueller, West i Foley, 2013). Entre els anys 1960 i 1980 es va produir l'anomenada «revolució verda», que va implicar el desenvolupament i ús de noves varietats de blat, dacsa i arròs millorades genèticament, l'ús de noves tecnologies, fertilitzants, fitosanitaris i sistemes de regadiu. Aquesta «revolució» va aconseguir un increment de la producció agrícola molt significatiu. En l'actualitat, ens enfrontem a un repte similar, encara que en un context diferent. En els pròxims anys haurem d'incrementar la producció agrícola però de manera més sostenible i respectuosa amb el medi ambient. La producció agrícola actual és altament dependent de l'ús de fertilitzants, aigua, pesticides o herbicides. No obstant això, hem d'implantar noves estratègies per a desenvolupar una agricultura moderna i sostenible econòmicament i mediambientalment, i que cobrisca les necessitats de la societat. Per a això serà necessari el compromís

«En els pròxims anys haurem d'incrementar la producció agrícola però de manera més sostenible i respectuosa amb el medi ambient»

ció agrícola actual és altament dependent de l'ús de fertilitzants, aigua, pesticides o herbicides. No obstant això, hem d'implantar noves estratègies per a desenvolupar una agricultura moderna i sostenible econòmicament i mediambientalment, i que cobrisca les necessitats de la societat. Per a això serà necessari el compromís

i la coordinació de polítics i agents socials i de recerca+desenvolupament+innovació (R+D+I) tant públics com privats, ja que s’hauran d’afrontar decisions polítiques i econòmiques importants amb repercussió en la societat (Figura 1).

■ **PRODUCCIÓ SOSTENIBLE EN UN PLANETA CANVIANT**

El nitrogen i el fosfat són elements essencials per al creixement i producció de les plantes. En general, els sòls agrícoles contenen baixes quantitats d’aquests macronutrients, així que es requereix subministrar-ne de manera continuada en forma de fertilitzants. No obstant això, l’absorció d’aquests nutrients pels cultius és baixa, i per això s’ha tendit a fertilitzar en excés i això ha produït greus problemes mediambientals.

En el cas del nitrogen, l’aportació d’aquest nutrient es feia inicialment amb adob orgànic (guano) o minerals

nitrogenats. Va ser a partir de 1909 quan Haber-Bosch va desenvolupar un procés químic que permetia fixar el nitrogen atmosfèric, que es convertia així en un element il·limitat, però amb un alt cost energètic. De fet, es generen més de 450 milions de tones/any de nitrogen per a fertilitzants mitjançant aquest procés.

En la naturalesa hi ha bacteris capaços de fixar nitrogen i que estableixen relacions simbiòtiques amb certes espècies de lleguminoses. En aquesta simbiosi, els bacteris proporcionen el nitrogen necessari a les plantes a canvi d’hidrats de carboni (Mus et al., 2016). No obstant això, les espècies que majoritàriament contribueixen a l’alimentació mundial (arròs, dacs i blat) no són capaces d’establir aquestes relacions simbiòtiques i per tant la seua producció recau en l’aportació de fertilitzants. En els últims

anys, diversos grups d’investigació estan duent a terme un ambiciós programa per a generar cereals capaços de fixar nitrogen de manera autònoma o d’establir simbiosi amb microorganismes fixadors de nitrogen

«El nitrogen i el fosfat són elements essencials per al creixement i producció de les plantes»



Il·lustració de Xavi Sepúlveda

Figura 1. Per al desenvolupament d’una agricultura sostenible i productiva que garantisca una estabilitat alimentària, s’ha d’arribar a grans acords que equilibren el benestar de la societat i la sostenibilitat dels sistemes de producció. Per a això és imprescindible el compromís de diferents actors socials i polítics juntament amb l’educació i la investigació.



(Stokstad, 2016). Un d'aquests grups d'investigació està intentant introduir els gens que codifiquen el complex de la nitrogenasa, sistema multienzimàtic responsable de la fixació de nitrogen atmosfèric, dins del genoma de cereals (López-Torrejón et al., 2016). Això representa un gran repte, ja que l'assemblatge enzimàtic de la nitrogenasa és complex i es degrada ràpidament per la presència d'oxigen, de manera que la forma activa solament actua en ambients cel·lulars anaeròbics. Aquest projecte és complicat i altament arriscat, però sens dubte el seu èxit tindria una repercussió social i científica sense parangó. Altres grups d'investigació estan treballant per a «fer retrocedir els cereals en l'evolució», és a dir, estan intentant entendre en quin moment evolutiu els cereals van perdre la seua capacitat d'establir relacions simbiòtiques, ja que la major part dels gens de les plantes implicats en aquest procés estan en el seu genoma (Stokstad, 2016). L'èxit d'aquest projecte implica modificar els cereals perquè es deixen envair per bacteris, proveint-los d'aliments (carbohidrats) i de leghemoglobina, una proteïna que segresta l'oxigen per a protegir l'activitat de la nitrogenasa, mentre que els microorganismes proveeixen de nitrogen les plantes.

Al mateix temps que es duen a terme aquests projectes, de disseny arriscat i a llarg termini, altres investigacions van adreçades a identificar i millorar bacteris capaços de fixar nitrogen al sòl *per se*, la qual cosa pot tenir un efecte positiu per als cultius. Recentment s'han introduït 52 gens implicats en la fixació de nitrogen dins d'un bacteri no fixador. Aquest bacteri modificat és capaç de fixar nitrogen de l'atmosfera que pot ser utilitzat per les arrels de dacsca o blat (Setten et al., 2013). Aquests resultats indiquen que l'ús de la biotecnologia i biologia sintètica serà molt útil per a incrementar la producció de manera més sostenible.

■ LA PARADOXA DEL FOSFAT

El fòsfat és un macronutriente essencial per a la vida dels organismes, ja que forma part de molècules estructurals. Una singularitat del fòsfat és que no és substituïble per un altre element, la qual cosa fa que la biodisponibilitat del fòsfat siga essencial per a la vida (Goldford, Hartman, Smith i Segre, 2017). De fet, fa unes quantes

dècades Isaac Asimov el va descriure com un element que és «coll de botella per a la vida» i l'expresident dels EUA Franklin D. Roosevelt va ressaltar la importància política i econòmica d'aquest element i va recalcar la necessitat d'implantar una política de subministrament segur d'aquest mineral per a garantir la producció agrícola (Roosevelt, 1938).

El fòsfat utilitzat en fertilitzants s'extrau en la seua majoria de la fosforita. Actualment, les majors reserves es concentren en pocs països: la Xina, el Marroc, els EUA i Rússia. La gran demanda de fertilitzants està reduint severament les reserves de fòsfats econòmicament explotables, i diferents prediccions estimen que aquest recurs natural

pot ser limitant per a l'agricultura en uns 100-150 anys, amb el consegüent increment en el preu dels fertilitzants i l'aparició d'un problema de seguretat alimentària. En resposta a aquesta situació, diferents actors (governos, societat, investigadors, educadors, etc.) han llançat iniciatives per a utilitzar les reserves de fòsfat d'una manera més racional i sostenible, com ara millores en el reciclatge i la reducció de l'ús de compostos fosfatats, en la fertilització i en plantes que absorbisquen/utilitzen més eficientment el fòsfat.

Dins de l'àmbit dels fertilitzants, el problema principal és que les plantes només absorbeixen un petit percentatge dels nutrients que s'aporten. Tradicionalment, als països més desenvolupats s'aplica fertilitzant en excés en diferents èpoques de l'any per a garantir la màxima producció agrícola. Les plantes assimilen els nutrients de manera gradual al llarg del seu temps de creixement. Per això, un percentatge elevat dels nutrients depositats al sòl es perden per lixiviació amb les aigües de pluja o regadiu, i afluïxen a les aigües subterrànies, per volatilització en el cas del nitrogen o per la formació de sals de fòsfat poc solubles (SARE, 2019). Per això s'estan desenvolupant noves estratègies per a millorar la fertilització que inclouen, entre altres, l'agricultura de precisió, la fertilització controlada i els bioestimulants.

L'agricultura de precisió consisteix en el coneixement «precís» del mitjà agrícola, que inclou l'anàlisi del tipus de sòl, el seu pH, la necessitat d'aigua i de nutrients i la temperatura. Així, s'estan desenvolupant diversos sensors capaços de mesurar aquests paràmetres i en-

«S'estan desenvolupant noves estratègies per a millorar la fertilització que inclouen l'agricultura de precisió, la fertilització controlada i els bioestimulants»

«En la naturalesa hi ha bacteris capaços de fixar nitrogen i que estableixen relacions simbiòtiques amb certes espècies de lleguminoses»



viar les dades en temps real a l'agricultor. Així mateix, aquesta agricultura de precisió permetrà desenvolupar camps de cultiu robotitzats que siguin més eficients i productius (Van Hooijdink, 2018).

D'altra banda, en els últims anys s'han desenvolupat noves formulacions de fertilitzants que contenen estabilitzants per a prevenir la volatilització del nitrogen usat en fertilitzants o en inhibidors del procés de nitrificació. També s'han desenvolupat fertilitzants d'alliberament lent o d'alliberament controlat. En aquest últim cas, els increments en temperatura del sòl, que correlacionen amb el major creixement de les plantes i majors necessitats nutricionals, produeixen l'alliberament de nutrients. Aquesta tecnologia consisteix a encapsular els nutrients en un polímer porós en què la grandària d'obertura dels porus depèn de la temperatura, la qual cosa permet un alliberament gradual.

Finalment, els bioestimulants (o biofortificants), que poden ser d'origen vegetal, microbià o de síntesi química, s'utilitzen per a potenciar el creixement de les plantes i la seua producció. En la majoria dels casos es desconeix el mecanisme d'acció d'aquests compostos a escala molecular. En l'actualitat, gràcies al desenvolupament i abaratiment de tècniques «òmiques», s'està començant a conèixer el mecanisme d'acció d'aquests bioestimulants i de la seua percepció en la planta. Aquests estudis moleculars permetran avaluar l'impacte que té l'addició d'aquests bioestimulants en la planta a escala global (valor nutritiu, acumulació de metabòlits desitjats i no desitjats, etc.).

■ L'AGRICULTURA SOSTENIBLE NECESSITA SOLUCIONS BIOTECNOLÒGIQUES

L'ús del coneixement i la biotecnologia seran claus en els pròxims anys per a poder implantar i desenvolupar una agricultura productiva i sostenible. Per a aconseguir aquests objectius, es poden identificar i/o millorar tant els cultius com els microorganismes que hi interaccionen.

Noves varietats naturals versus edició gènica

La millora dels cultius s'ha basat en la identificació de nous fenotips que presenten alguna característica millorada (producció, resistència a estressos biòtics

i abiòtics, etc.). Generalment aquests canvis es generen per mutacions espontànies en certs individus (variabilitat natural) o mitjançant mutagènesi. Aquests mutants s'han d'encreuar amb varietats cultivades «elit» per a incorporar-hi els caràcters desitjats. El problema és que aquest procés de millora genètica és lent i tediós.

Actualment disposem d'eines biotecnològiques, com ara l'obtenció d'organismes modificats genèticament (OMG) o l'edició gènica, que poden reduir aquest temps en anys.

Recentment el desenvolupament de l'edició gènica, és a dir, el canvi de forma dirigida de la informació del DNA d'un organisme, ha obert una porta amb grans posibilitats (Gao, 2018).

No obstant això, recentment el Tribunal de Justícia de la Unió Europea, en una polèmica sentència, va determinar que els organismes generats per edició gènica s'han de considerar transgènics, ja que utilitzen un procés de transgènesi temporal. Aquesta eina permetrà modificar els genomes de les plantes de manera ràpida i específica, i generarà varietats segures amb millores en el seu fenotip, varietats que es podran utilitzar per a incrementar la producció en consumir menys fertilitzants i aigua, ser més resistents a la sequera, a les gelades, als patògens, etc. En resum, oferirà una solució ràpida i segura als grans reptes que planteja l'increment poblacional i la sostenibilitat.

Microorganismes

El sòl és un ens inert però que és capaç d'albergar una gran quantitat i diversitat de vida. Els microorganismes del sòl interaccionen contínuament amb les plantes i generen un ambient viu i dinàmic que es denomina «rizosfera».

En aquest espai s'acumulen poblacions enriquides de microorganismes sobre la base de les propietats fisicoquímiques del sòl i el tipus de plantes, el que origina una coevolució d'aquests tres components. Els microorganismes beneficiosos del sòl tenen una alta repercussió en l'agricultura, ja que determinen en gran manera la formació de la seua estructura, la nutrició vegetal, la generació de substàncies promotores del creixement vegetal i el control/vigilància sobre patògens vegetals alhora que prevenen l'aparició de malalties (Figura 2) (Singh i Trivedi, 2017).

Durant el procés d'interacció planta-microorganisme, les arrels exsuden compostos rics en carboni, que representen un 15-30 % de l'energia fotosintetitzada

«La gran demanda de fertilitzants està reduint severament les reserves de fosfats econòmicament explotables»

«Els microorganismes beneficiosos del sòl tenen una alta repercussió en l'agricultura»

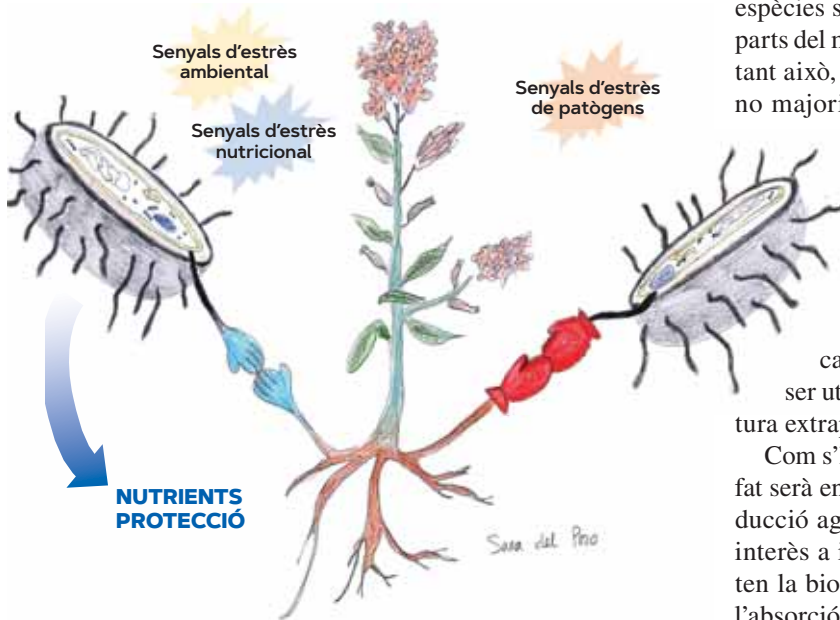


Figura 2. En la il·lustració, microbioma beneficiós (esquerra) versus microbioma patògen (dreta). Tradicionalment, els bacteris i fongs han estat considerats com a microorganismes patògens i nocius per a les plantes. No obstant això, cada vegada és més evident que dins del microbioma del sòl hi ha molts microorganismes beneficiosos per a les plantes que els faciliten l'adquisició de nutrients i les protegeixen contra altres microorganismes patògens.

Il·lustració cedida per Sara del Pozo

per la planta i que són utilitzats pels microorganismes com a font de carboni per al seu creixement. Així, les plantes paguen un peatge alt pels minerals subministrats pels microorganismes, però els compensa en el balanç final. A més de microorganismes fixadors de nitrogen, hi ha altres microorganismes capaços de mobilitzar nutrients a partir de la matèria orgànica del sòl o de sals insolubles, com ara els fosfats de calci o alumini. També hi ha microorganismes capaços de degradar molècules orgàniques complexes per a formar un fertilitzant orgànic denominat «humus» que aporta nutrients i bioestimulants del creixement vegetal. Així, al final del cicle vital de les plantes, una vegada són collides o moren, les arrels que romanen en terra s'acumulen amb la matèria orgànica processable per als microorganismes, un procés necessari per a mantenir la vida en la rizosfera i evitar la degradació i erosió dels sòls, sobretot en zones de cultiu intensiu.

En la rizosfera es troba un alt nombre de microorganismes (milions de bacteris; milers d'espècies per gram

de terra), encara que sembla que només unes poques espècies són les predominants en els sòls de diferents parts del món (Delgado-Baquerizo et al., 2018). No obstant això, és possible que algunes d'aquestes espècies no majoritàries siguin essencials per a l'adaptació de les plantes a condicions extremes. Recentment s'han identificat microorganismes en la depressió de Damakil, Etiòpia, un dels ambients més inhòspits del planeta, que es creu que podrien tenir certa similitud amb el sòl de Mart (Gómez et al., 2019). Si aquests microorganismes identificats afavoriren el creixement vegetal, podrien ser utilitzats per al desenvolupament de l'«agricultura extraplanetària».

Com s'ha comentat anteriorment, l'escassetat de fòsfor serà en el futur un dels factors limitadors de la producció agrícola. Per això, actualment hi ha un gran interès a identificar microorganismes que incrementen la biodisponibilitat de fòsfor al sòl i en faciliten l'absorció per part de la planta. S'ha estimat que caldrà un augment del 2,5 % per any de fòsfor en fertilitzants per a cobrir les necessitats alimentàries. No obstant això, aquestes estimacions no tenen en compte el fòsfor residual depositat al sòl en forma de sals poc biodisponibles o com a matèria orgànica (arrels de plantes collides). Aquest fòsfor emmagatzemat podria entrar de nou en la cadena alimentària de les plantes gràcies a l'acció dels microorganismes i ajudar a desenvolupar una fertilització més sostenible. Com a exemple, un camp de blat deposita al sòl aproximadament 5 tones/hectàrea d'arrels post-collida que es podrien transformar en aproximadament 350 kg d'humus per l'acció dels microorganismes. Això podria ser un bon complement a l'aportació de fertilitzants.

La paradoxa del fòsfor és especialment preocupant als sòls agrícoles tropicals, ja que, encara que són de bona qualitat per a l'agricultura, solen ser pobres en fòsfor. A més, a causa de les seues propietats fisicoquímiques, aquests sòls segresten grans quantitats de fòsfor i això fa que l'excés de fòsfor utilitzat durant la fertilització estiga poc disponible en anys successius (Roy et al., 2016). Per això, la identificació de microorganismes capaços de mobilitzar el fòsfor en aquests sòls serà essencial per al desenvolupament d'una agricultura eficient i sostenible en aquestes àrees i per a prevenir així la desforestació massiva. En aquest sentit, s'han identificat diferents aïllats bacterians capaços de promoure el creixement de les plantes i solubilitzar el fòsfor

«L'ús del coneixement i la biotecnologia seran clau per a poder implantar i desenvolupar una agricultura productiva i sostenible»

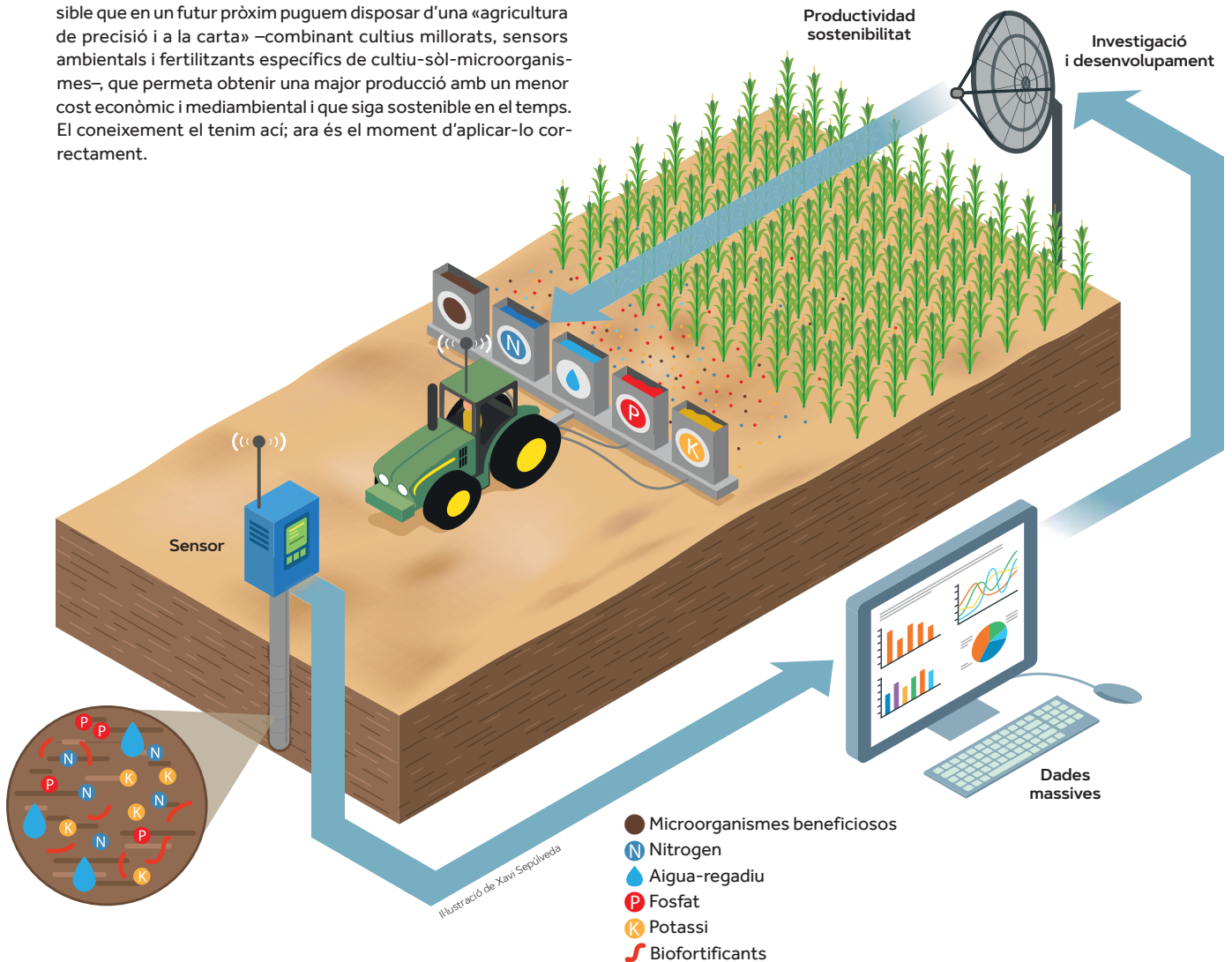
immobilitzat (Walitang et al., 2017). Aquests treballs obren una nova via d'investigació que podrà ser vital per a poder aconseguir una agricultura més sostenible i circular.

D'altra banda, les arrels vegetals són colonitzades per múltiples espècies de fongs (més de 6.000), que formen micorrizes extra o intracel·lulars. Encara que el nombre d'espècies vegetals que formen micorrizes és molt elevat, se n'han descrit algunes que no formen aquestes associacions, com és el cas d'espècies del gènere *Brassica* (la colza, la coliflor o la planta model *Arabidopsis thaliana*). No obstant això, recentment s'ha demostrat la interacció entre un fong, *Colletotri-*

chum tofieldiae, i plantes d'*Arabidopsis*, que n'afavoreix el creixement i *fitness* o eficàcia biològica en condicions de deficiència de fòsfor (Hiruma et al., 2016). Aquest descobriment és important, ja que demostra que dins de les poblacions naturals és possible trobar una gran diversitat d'interaccions que s'havien obviat prèviament.

Actualment l'ús de microorganismes com a biofortificants és explotat per empreses biotecnològiques per a incrementar la producció de certs cultius. No obstant això, s'han de tenir en compte diversos factors abans de posar aquests productes que contenen microorganismes en el mercat, com ara, per exemple, com interaccionen aquests aïllats amb la població de microorganismes

Figura 3. Sense cap dubte, els avanços tecnològics recents aplicats a l'agricultura obren noves vies d'investigació per a poder desenvolupar nous programes de fertilització més sostenible i eficaç, així com per a la regeneració de sòls degradats i poc productius. Encara que és prematur per a poder afirmar-ho, és possible que en un futur pròxim puguem disposar d'una «agricultura de precisió i a la carta» –combinant cultius millorats, sensors ambientals i fertilitzants específics de cultiu-sòl-microorganismes–, que permeti obtenir una major producció amb un menor cost econòmic i mediambiental i que siga sostenible en el temps. El coneixement el tenim aquí; ara és el moment d'aplicar-lo correctament.





del sòl on s'apliquen, i com poden afectar l'estructura del sòl. D'altra banda, serà essencial intensificar la investigació per a identificar quines rutes/gens es modifiquen per l'aplicació d'aquests microorganismes i quines podrien ser candidates en programes de millora clàssica o ser modificats mitjançant edició gènica. Així, és possible que puguem obtenir combinacions de cultius-aïllat més eficients i així incrementar la producció agrícola.

■ CONCLUSIONS

És difícil preveure amb exactitud la forma i qualitat de vida que tindrem d'ací a cent anys. No obstant això, en l'actualitat som conscients dels problemes que hem d'afrontar en les pròximes dècades. Un és la seguretat alimentària, que està estretament lligada a l'increment poblacional, i condicionada per l'efecte del canvi climàtic, l'escassetat d'aigua o l'ús de fertilitzants. En conjunt, aquests factors fan preveure dificultats ben serioses per a proveir d'aliments segurs i a preu assequible la població mundial. Com hem d'enfrontar-nos a aquests problemes? Ningú té una solució definitiva. La ciència, però, ha generat coneixements que podran ser utilitzats per a oferir solucions biotecnològiques per al desenvolupament d'una agricultura sostenible i de precisió que ens proporcione aliments de qualitat i en quantitat suficient (Figura 3). El coneixement i les eines ja estan disponibles; és el moment d'aplicar-les per al desenvolupament de noves estratègies de producció agrària que seran vitals per a aconseguir els disset objectius de desenvolupament sostenible (ODS)¹ que s'ha marcat l'ONU per als pròxims anys. ☺

REFERÈNCIES

- Delgado-Baquerizo, M., Oliverio, A. M., Brewer, T. E., Benavent-González, A., Eldridge, D. J., Bardgett, R. D., ... Fierer, N. (2018). A global atlas of the dominant bacteria found in soil. *Science*, 359(6373), 320–325. doi: [10.1126/science.aap9516](https://doi.org/10.1126/science.aap9516)
- FAO. (2017). *El futuro de la alimentación y la agricultura: Tendencias alimentación y desafíos*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Consultat en <http://www.fao.org/3/a-i6881s.pdf>
- Gao, C. (2018). The future of CRISPR technologies in agriculture. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 19, 275–276. doi: [10.1038/nrm.2018.2](https://doi.org/10.1038/nrm.2018.2)
- Goldford, J. E., Hartman, H., Smith, T. F., & Segre, D. (2017). Remnants of an ancient metabolism without phosphate. *Cell*, 168(6), 953–955. doi: [10.1016/j.cell.2017.02.001](https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.02.001)
- Gómez, F., Cavalazzi, B., Rodríguez, N., Amils, R., Ori, G. G., Olsson-Francis, K., ... Miruts, H. (2019). Ultra-small microorganisms in the polyextreme

conditions of the Dallol volcano, Northern Afar, Ethiopia. *Scientific Reports*, 9(1), 7907. doi: [10.1038/s41598-019-44440-8](https://doi.org/10.1038/s41598-019-44440-8)

Hiruma, K., Gerlach, N., Sacristán, S., Nakano Ryohei, T., Hacquard, S., Kracher, B., ... Schulze-Lefert, P. (2016). Root endophyte *Colletotrichum tofieldiae* confers plant fitness benefits that are phosphate status dependent. *Cell*, 165(2), 464–474. doi: [10.1016/j.cell.2016.02.028](https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.02.028)

López-Torrejón, G., Jiménez-Vicente, E., Buesa, J. M., Hernandez, J. A., Verma, H. K., & Rubio, L. M. (2016). Expression of a functional oxygen-labile nitrogenase component in the mitochondrial matrix of aerobically grown yeast. *Nature Communications*, 7, 11426. doi: [10.1038/ncomms11426](https://doi.org/10.1038/ncomms11426)

Mus, F., Crook, M. B., Garcia, K., Garcia Costas, A., Geddes, B. A., Kouri, E. D., ... Peters, J. W. (2016). Symbiotic nitrogen fixation and the challenges to its extension to non-legumes. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(13), 3698–3710. doi: [10.1128/AEM.01055-16](https://doi.org/10.1128/AEM.01055-16)

Ray, D. K., Mueller, N. D., West, P. C., & Foley,

J. A. (2013). Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS ONE*, 8(6), e66428. doi: [10.1371/journal.pone.0066428](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428)

Roosevelt, F. D. (1938, 20 de maig). *Message to Congress on phosphates for soil fertility*. Publicat en línia per G. Peters i J. T. Woolley. *The American Presidency Project; 1999-2011*. Santa Barbara, CA: UC Santa Barbara. Consultat en <https://www.presidency.ucsb.edu/node/208838>

Roy, E. D., Richards, P. D., Martinelli, L. A., Coletta, L. D., Lins, S. R. M., Vazquez, F. F., ... Porder, S. (2016). The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. *Nature Plants*, 2, 16043. doi: [10.1038/nplants.2016.43](https://doi.org/10.1038/nplants.2016.43)

SARE. (2019). *Management of nitrogen and phosphorus*. Consultat en <https://www.sare.org/Learning-Center/Books/Building-Soils-for-Better-Crops-3rd-Edition/Text-Version/Management-of-Nitrogen-and-Phosphorus>

Setten, L., Soto, G., Mozzicafreddo, M., Fox, A. R., Lisi, C., Cuccioloni, M., Angeletti, M., ... Ayub, N. D. (2013). Engineering *Pseudomonas protegens* Pf-5 for nitrogen fixation and its application to improve plant growth under nitrogen-deficient conditions. *PLoS ONE*, 8(5), e63666. doi: [10.1371/journal.pone.0063666](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063666)

Singh, B. K., & Trivedi, P. (2017). Microbiome and the future for food and nutrient security. *Microbial Biotechnology*, 10(1), 50–53. doi: [10.1111/1751-7915.12592](https://doi.org/10.1111/1751-7915.12592)

Stokstad, E. (2016). The nitrogen fix. *Science*, 353(6305), 1225–1227. doi: [10.1126/science.353.6305.1225](https://doi.org/10.1126/science.353.6305.1225)

Van Hoojdink, R. (2018, 20 de desembre). 4 ways robotics will affect agriculture in 2019. *Robotics Business Review*. Consultat en <https://www.roboticsbusinessreview.com/agriculture/4-ways-robotics-change-agriculture-in-2019/>

Walitang, D. I., Kim, K., Madhaiyan, M., Kim, Y. K., Kang, Y., & Sa, T. (2017). Characterizing endophytic competence and plant growth promotion of bacterial endophytes inhabiting the seed endosphere of rice. *BMC Microbiology*, 17(1), 209–209. doi: [10.1186/s12866-017-1117-0](https://doi.org/10.1186/s12866-017-1117-0)

AGRAÏMENTS:

Aquest treball està directament relacionat amb el projecte BIO2017-82209-R Rot-Phos: «Respostes de les arrels a la deficiència de fosfat: Noves aproximacions per a incrementar el creixement de les plantes amb una menor fertilització». També m'agradaria expressar el meu agraïment a Chema Lora i Olga Navarro per la seua ajuda en l'edició del text i a Sara del Pozo per la il·lustració.

JUAN CARLOS DEL POZO. Professor d'Investigació en l'INIA (Institut Nacional d'Investigació i Tecnologia Agrària i Alimentària), Madrid (Espanya). Lidera un grup d'investigació en el Centre de Biotecnologia i Genòmica de Plantes (CBGP, UPM-INIA) que està identificant nous gens reguladors del desenvolupament radicular i microbiota associada a les arrels en resposta a deficiències nutricionals, amb la finalitat d'utilitzar aquest coneixement per a desenvolupar cultius més eficients. ✉ pozo@inia.es

¹ Els disset ODS es poden consultar en la web de l'ONU: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>