

# PRODUCIR MÁS ALIMENTOS DE FORMA SOSTENIBLE ES POSIBLE

## Fertilización biotecnológica y sostenible ante el problema del crecimiento poblacional

JUAN CARLOS DEL POZO

El gran aumento de la población mundial previsto para este siglo obligará a incrementar la producción agrícola de forma proporcional para asegurar la alimentación. Sin embargo, actualmente la sociedad demanda nuevos métodos de producción más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Para poder obtener este incremento sostenible es necesario hacer uso de las nuevas herramientas biotecnológicas, como la edición génica o la biología sintética, y del conocimiento generado por los investigadores durante años. El microbioma del suelo está emergiendo como una poderosa herramienta biotecnológica. Estos microorganismos beneficiosos promueven el crecimiento vegetal a través del aporte de nutrientes, producción de hormonas o metabolitos secundarios. Por ello, el uso de estos microorganismos ayudará a incrementar la producción agrícola de forma sostenible.

Palabras clave: agricultura sostenible, sistema radicular, fertilización, nitrógeno, fosfato, microbioma.

### ■ HUMANIDAD Y AGRICULTURA, UNA COEVOLUCIÓN NECESARIA

Hace más de 10.000 años, los humanos iniciaron un cambio en su forma de vida y pasaron de ser mayoritariamente cazadores y recolectores nómadas a agricultores sedentarios. En ese momento comenzó la domesticación y el uso de plantas de cultivo.

El desarrollo de la agricultura permitió a los humanos prehistóricos abastecerse de alimentos en abundancia y de forma estable y eso propició la formación de comunidades cada vez mayores con un significativo aumento de la población. A lo largo de la historia, este incremento poblacional ha exigido un aumento en la producción agrícola, lo que ha derivado en una gran dependencia humana de una agricultura y ganadería estables. Esta dependencia, traducida como una necesidad de «seguridad alimentaria», es uno de los mayores retos para la sociedad actual.

**«En los próximos años deberemos incrementar la producción agrícola pero de forma más sostenible y respetuosa con el medio ambiente»**

Las últimas estimaciones indican que la población humana crecerá hasta los 11.000 millones en 2100 (FAO, 2017). Este incremento, junto con las nuevas necesidades de la población en los países emergentes, implica que la producción agrícola se debería incrementar en casi un 50 % (Ray, Mueller, West y Foley,

2013). Entre los años 1960 y 1980 se produjo la llamada «revolución verde», que implicó el desarrollo y uso de nuevas variedades de trigo, maíz y arroz mejoradas genéticamente, el uso de nuevas tecnologías, fertilizantes, fitosanitarios y sistemas de riego. Esta «revolución» logró un incremento de la producción agrícola muy significativo. En la actualidad, nos enfrentamos a un reto si-

milar, aunque en un contexto diferente. En los próximos años deberemos incrementar la producción agrícola pero de forma más sostenible y respetuosa con el medio ambiente. La producción agrícola actual es altamente

dependiente del uso de fertilizantes, agua, pesticidas o herbicidas. Sin embargo, debemos implementar nuevas estrategias para desarrollar una agricultura moderna y sostenible económica y medioambientalmente, y que cubra las necesidades de la sociedad. Para ello será necesario el compromiso y la coordinación de políticos y agentes sociales y de investigación+desarrollo+innovación (I+D+i) tanto públicos como privados, ya que se deberán afrontar decisiones políticas y económicas importantes con repercusión en la sociedad (Figura 1).

**«El nitrógeno y el fosfato son elementos esenciales para el crecimiento y producción de las plantas»**

En el caso del nitrógeno, la aportación de este nutriente se hacía inicialmente con abono orgánico (guano) o minerales nitrogenados. Fue a partir de 1909 cuando Haber-Bosch desarrolló un proceso químico que permitía fijar el nitrógeno atmosférico, pasando a ser un elemento ilimitado, pero con un alto coste energético. De hecho, más de 450 millones de toneladas/año de nitrógeno para fertilizantes es generado mediante este proceso.

En la naturaleza existen bacterias capaces de fijar nitrógeno y que establecen relaciones simbióticas con ciertas especies de leguminosas. En esta simbiosis, las bacterias proporcionan el nitrógeno necesario a las plantas a cambio de hidratos de carbono (Mus et al., 2016). Sin embargo, las especies que mayoritariamente contribuyen a la alimentación mundial (arroz, maíz y trigo) no son capaces de establecer estas relaciones simbióticas y por lo tanto su producción recae en el aporte de fertilizantes. En los últimos años, diversos grupos de investigación están llevando a cabo un ambicioso programa para generar cereales capaces de fijar nitrógeno de forma autónoma o de establecer simbiosis con microorganismos fijadores de nitrógeno (Stokstad, 2016). Uno de estos grupos

**■ PRODUCCIÓN SOSTENIBLE EN UN PLANETA CAMBIANTE**

El nitrógeno y el fosfato son elementos esenciales para el crecimiento y producción de las plantas. En general, los suelos agrícolas contienen bajas cantidades de estos macronutrientes, por lo que se requiere su suministro continuado en forma de fertilizantes. Sin embargo, la absorción de estos nutrientes por los cultivos es baja, y por ello se ha tendido a fertilizar en exceso, lo que ha producido graves problemas medioambientales.

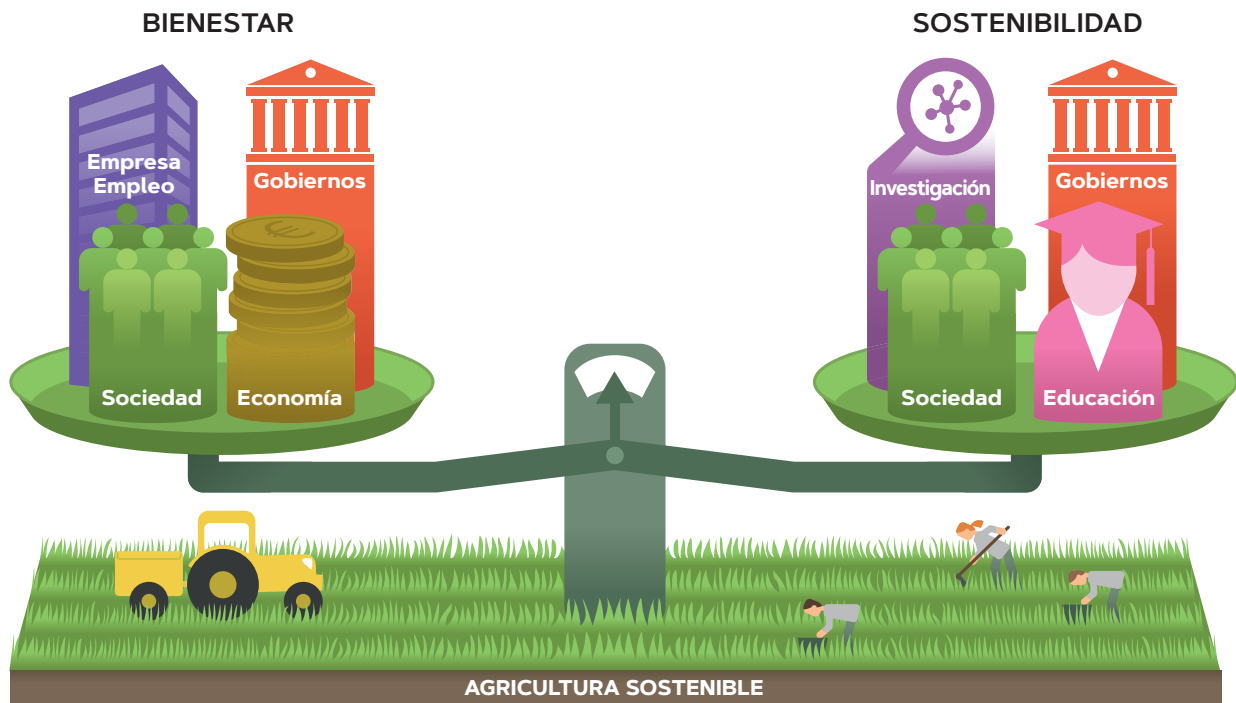


Ilustración de Xavi Sepúlveda

Figura 1. Para el desarrollo de una agricultura sostenible y productiva que garantice una estabilidad alimentaria, se debe llegar a grandes acuerdos que equilibren el bienestar de la sociedad y la sostenibilidad de los sistemas de producción. Para ello es imprescindible el compromiso de diferentes actores sociales y políticos junto con la educación y la investigación.



de investigación está intentando introducir los genes que codifican el complejo de la nitrogenasa, sistema multienzimático responsable de la fijación de nitrógeno atmosférico, dentro del genoma de cereales (López-Torrejón et al., 2016). Esto supone un gran reto, ya que el ensamblaje enzimático de la nitrogenasa es complejo y se degrada rápidamente por la presencia de oxígeno, por lo que la forma activa solamente actúa en ambientes celulares anaeróbicos. Este proyecto es complicado y altamente arriesgado, pero sin duda su éxito tendría una repercusión social y científica sin parangón. Otros grupos de investigación están trabajando para «hacer retroceder los cereales en la evolución», es decir, están intentando entender en qué momento evolutivo los cereales perdieron su capacidad de establecer relaciones simbióticas, ya que la mayor parte de los genes de las plantas implicados en este proceso están en su genoma (Stokstad, 2016). El éxito de este proyecto pasa por modificar los cereales para que se dejen invadir por bacterias, proveyéndolas de alimentos (carbohidratos) y de leghemoglobina, una proteína que secuestra el oxígeno para proteger la actividad de la nitrogenasa, mientras los microorganismos proveen de nitrógeno a las plantas.

Al mismo tiempo que se llevan a cabo estos proyectos, cuyo diseño es arriesgado y a largo plazo, otras investigaciones van encaminadas a identificar y mejorar bacterias capaces de fijar nitrógeno en el suelo *per se*, lo que puede tener un efecto positivo para los cultivos. Recientemente se han introducido 52 genes implicados en la fijación de nitrógeno dentro de una bacteria no fijadora. Esta bacteria modificada es capaz de fijar nitrógeno de la atmósfera que puede ser utilizado por las raíces de maíz o trigo (Setten et al., 2013). Estos resultados indican que el uso de la biotecnología y biología sintética será muy útil para incrementar la producción de forma más sostenible.

## ■ LA PARADOJA DEL FOSFATO

El fósforo es un macronutriente esencial para la vida de los organismos, ya que forma parte de moléculas estructurales. Una singularidad del fósforo es que no es sustituible por otro elemento, lo que hace que la biodisponibilidad del fósforo sea esencial para la vida (Goldford, Hartman, Smith y Segre, 2017). De hecho,

hace varias décadas Isaac Asimov lo describió como un elemento que es «cuello de botella para la vida» y el expresidente de EE UU Franklin D. Roosevelt resaltó la importancia política y económica de este elemento y recalcó la necesidad de implantar una política de suministro seguro de este mineral para garantizar la producción agrícola (Roosevelt, 1938).

### «La gran demanda de fertilizantes está reduciendo severamente las reservas de fosfatos económicamente explotables»

El fósforo utilizado en fertilizantes se extrae en su mayoría de la fosforita. Actualmente, las mayores reservas están concentradas en pocos países: China, Marruecos, EE UU y Rusia. La gran demanda de fertilizantes está reduciendo severamente las reservas de fosfatos económicamente explotables, y diferentes predicciones estiman que este

recurso natural puede ser limitante para la agricultura en unos 100-150 años, lo que incrementaría el precio de los fertilizantes y generaría un problema de seguridad alimentaria. En respuesta a esta situación, diferentes actores (gobiernos, sociedad, investigadores, educadores, etc.) han lanzado iniciativas para utilizar las reservas de fósforo de una manera más racional y sostenible, como son mejoras en el reciclaje y reducción del uso de compuestos fosforados, en la fertilización y en plantas que absorban/utilicen más eficientemente el fósforo.

Dentro del ámbito de los fertilizantes, el problema principal es que las plantas solo absorben un porcentaje pequeño de los nutrientes que se aportan. Tradicionalmente, en los países más desarrollados se aplica fertilizante en exceso en diferentes épocas del año para garantizar la máxima producción agrícola. Las plantas asimilan los nutrientes de forma paulatina a lo largo de su tiempo de crecimiento.

Por ello, un porcentaje elevado de los nutrientes depositados en el suelo se pierden por lixiviación con las aguas de lluvia o riego, y afluyen a las aguas subterráneas, por volatilización en el caso del nitrógeno o por la formación de sales de fósforo poco solubles (SARE, 2019). Por ello se están desarrollando nuevas estrategias para mejorar la fertilización que incluyen, entre otras, la agricultura de precisión, la fertilización controlada y los bioestimulantes.

La agricultura de precisión consiste en el conocimiento «preciso» del medio agrícola, que incluye el análisis del tipo de suelo, su pH, la necesidad de agua y de nutrientes y la temperatura. Así se están desarrollando diversos sensores capaces de medir estos parámetros

### «Los microorganismos beneficiosos del suelo tienen una alta repercusión en la agricultura»



y enviar los datos en tiempo real al agricultor. Asimismo, esta agricultura de precisión permitirá desarrollar campos de cultivos robotizados que sean más eficientes y productivos (Van Hooijdink, 2018).

Por otro lado, en los últimos años se han desarrollado nuevas formulaciones de fertilizantes que contienen estabilizantes para prevenir la volatilización del nitrógeno usado en fertilizantes o en inhibidores del proceso de nitrificación. También se han desarrollado fertilizantes de liberación lenta o de liberación controlada. En este último caso, los incrementos en temperatura del suelo, que correlacionan con mayor crecimiento de las plantas y mayores necesidades nutricionales, producen la liberación de nutrientes. Esta tecnología se basa en encapsular los nutrientes en un polímero poroso cuyo tamaño de apertura de los poros es dependiente de la temperatura, permitiendo una liberación gradual.

Por último, los bioestimulantes (o biofortificantes), que pueden ser de origen vegetal, microbiano o de síntesis química, se utilizan para potenciar el crecimiento de las plantas y su producción. En la mayor parte de los casos se desconoce el mecanismo de acción de estos compuestos a nivel molecular. En la actualidad, gracias al desarrollo y abaratamiento de técnicas «ómicas», se está empezando a conocer el mecanismo de acción de estos bioestimulantes y de su percepción en la planta. Estos estudios moleculares permitirán evaluar el impacto que tiene la adición de estos bioestimulantes en la planta a nivel global (valor nutritivo, acumulación de metabolitos deseados y no deseados, etc.).

## ■ LA AGRICULTURA SOSTENIBLE NECESITA SOLUCIONES BIOTECNOLÓGICAS

El uso del conocimiento y la biotecnología serán claves en los próximos años para poder implementar y desarrollar una agricultura productiva y sostenible. Para lograr estos objetivos, se pueden identificar y mejorar tanto los cultivos como los microorganismos que interactúan con ellos.

### *Nuevas variedades naturales versus edición génica*

La mejora de los cultivos se ha basado en la identificación de nuevos fenotipos que presentan alguna característica mejorada (producción, resistencia a estreses bióticos y abióticos, etc.). Generalmente tales cambios se generan por mutaciones espontáneas en ciertos individuos (variabilidad natural) o mediante mutagénesis.

Estos mutantes se deben cruzar con variedades cultivadas «élite» para incorporar los caracteres deseados. El problema es que este proceso de mejora genética es lento y tedioso. Actualmente contamos con herramientas biotecnológicas como la obtención de organismos modificados genéticamente (OMG) o la edición génica que pueden reducir este tiempo en años.

El reciente desarrollo de la edición génica, es decir, el cambio de forma dirigida de la información del ADN de un organismo, ha abierto una puerta con grandes posibilidades (Gao, 2018). Sin embargo, el Tribunal de Justicia de la Unión Europea, en una reciente y polémica sentencia, determinó que los organismos generados por edición génica se deben considerar transgénicos, ya que utilizan un proceso de transgénesis temporal. Esta herramienta permitirá modificar los genomas de las plantas de forma rápida y específica, y generará variedades seguras con mejoras en su fenotipo, variedades que podrán ser utilizadas para incrementar la producción al consumir menos fertilizantes y agua, ser más resistentes a la sequía, a las heladas, a los patógenos, etc. En resumen, ofrecerá una solución rápida y segura a los grandes retos planteados por el incremento poblacional y la sostenibilidad.

El reciente desarrollo de la edición génica, es decir, el cambio de forma dirigida de la información del ADN de un organismo, ha abierto una puerta con grandes posibilidades (Gao, 2018). Sin embargo, el Tribunal de Justicia de la Unión Europea, en una reciente y polémica sentencia, determinó que los organismos generados por edición génica se deben considerar transgénicos, ya que utilizan un proceso de transgénesis temporal. Esta herramienta permitirá modificar los genomas de las plantas de forma rápida y específica, y generará variedades seguras con mejoras en su fenotipo, variedades que podrán ser utilizadas para incrementar la producción al consumir menos fertilizantes y agua, ser más resistentes a la sequía, a las heladas, a los patógenos, etc. En resumen, ofrecerá una solución rápida y segura a los grandes retos planteados por el incremento poblacional y la sostenibilidad.

### *Microorganismos*

El suelo es un ente inerte pero que es capaz de albergar una gran cantidad y diversidad de vida. Los microorganismos del suelo interactúan continuamente con las plantas y generan un ambiente vivo y dinámico que se denomina «rizosfera». En este espacio se acumulan poblaciones enriquecidas de microorganismos en base a las propiedades físicoquímicas del suelo y el tipo de plantas, originándose una coevolución de estos tres componentes. Los microorganismos beneficiosos del suelo tienen una alta repercusión en la agricultura, ya que determinan en gran medida la formación de su estructura, la nutrición vegetal, la generación de sustancias promotoras del crecimiento vegetal y el control/vigilancia sobre patógenos vegetales, al tiempo que previenen la aparición de enfermedades (Figura 2) (Singh y Trivedi, 2017).

Durante el proceso de interacción planta-microorganismo, las raíces exudan compuestos ricos en carbono, que suponen un 15-30% de la energía fotosintetizada por la planta y que son utilizados por los microorganismos como fuente de carbono para su crecimiento. Así las plantas pagan un peaje alto por los minerales suministrados por los microorganismos, pero les com-

**«Se están desarrollando nuevas estrategias para mejorar la fertilización que incluyen la agricultura de precisión, la fertilización controlada y los bioestimulantes»**

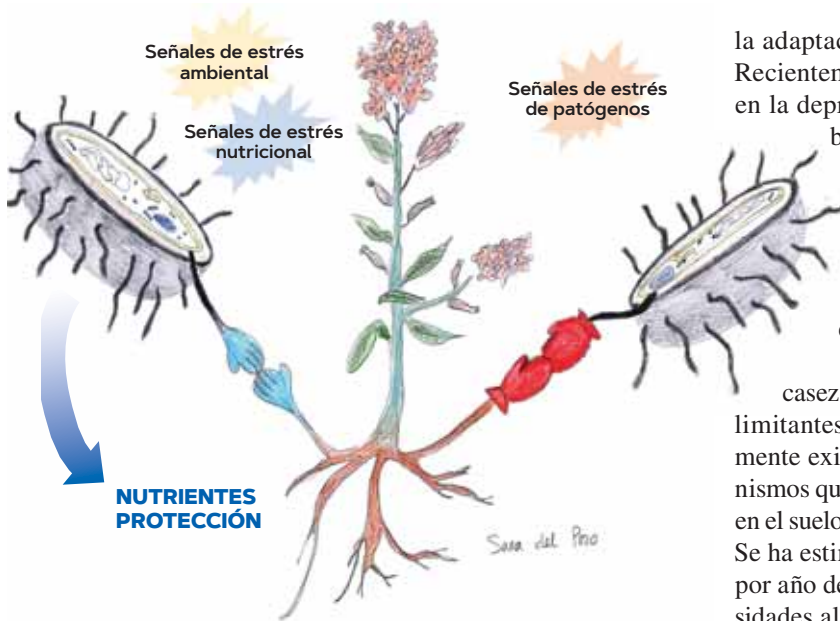


Figura 2. En la ilustración, microbioma beneficioso (izquierda) versus microbioma patógeno (derecha). Tradicionalmente las bacterias y los hongos han sido considerados como microorganismos patógenos y nocivos para las plantas. Sin embargo, cada vez es más evidente que dentro del microbioma del suelo existen muchos microorganismos beneficiosos para las plantas que les facilitan la adquisición de nutrientes del suelo y les protegen contra otros microorganismos patógenos.

Ilustración cedida por Sara del Pozo

pensa en el balance final. Además de microorganismos fijadores de nitrógeno, existen otros microorganismos capaces de movilizar nutrientes a partir de la materia orgánica del suelo o de sales insolubles, tales como los fosfatos de calcio o aluminio.

También hay microorganismos capaces de degradar moléculas orgánicas complejas formando un fertilizante orgánico denominado «humus» que aporta nutrientes y bioestimulantes del crecimiento vegetal. Así, al final del ciclo vital de las plantas, una vez son cosechadas o mueren, las raíces que permanecen en el suelo se acumulan con la materia orgánica procesable para los microorganismos, lo que es necesario para mantener la vida en la rizosfera y evitar la degradación y erosión de los suelos, sobre todo en zonas de cultivo intensivo.

En la rizosfera se encuentra un alto número de microorganismos (millones de bacterias; miles de especies por gramo de tierra), aunque parece ser que solo unas pocas especies son las predominantes en los suelos de diferentes partes del mundo (Delgado-Baque-rizo et al., 2018). Sin embargo, es posible que algunas de estas especies no mayoritarias sean esenciales para

la adaptación de las plantas a condiciones extremas. Recientemente se han identificado microorganismos en la depresión de Damakil, Etiopía, uno de los ambientes más inhóspitos del planeta, que se cree que podrían guardar cierta similitud con el suelo de Marte (Gómez et al., 2019). Si estos microorganismos identificados favorecieran el crecimiento vegetal podrían ser utilizados para el desarrollo de la «agricultura extraplanetaria».

Como se ha comentado anteriormente, la escasez de fósforo será en el futuro uno de los factores limitantes de la producción agrícola. Por ello, actualmente existe un gran interés en identificar microorganismos que incrementen la biodisponibilidad de fósforo en el suelo y faciliten su absorción por parte de la planta. Se ha estimado que se precisará un aumento del 2,5 % por año de fósforo en fertilizantes para cubrir las necesidades alimentarias. Sin embargo, estas estimaciones no tienen en cuenta el fósforo residual depositado en el suelo en forma de sales poco biodisponibles o como materia orgánica (raíces de plantas cosechadas). Este fósforo almacenado podría entrar de nuevo en la cadena alimentaria de las plantas gracias a la acción de los microorganismos y ayudar a desarrollar una fertilización más sostenible. Como ejemplo, un campo de trigo deposita en el suelo aproximadamente 5 toneladas/hectárea de raíces postcosecha que se podrían transformar en aproximadamente 350 kg de humus por la acción de los microorganismos. Esto podría ser un buen complemento al aporte de fertilizantes.

La paradoja del fósforo es especialmente preocupante en los suelos agrícolas tropicales, ya que, aunque son de buena calidad para la agricultura, suelen ser pobres en fósforo. Además, debido a sus propiedades fisicoquímicas, estos suelos secuestran grandes cantidades de fósforo, lo que hace que el exceso de fósforo utilizado durante la fertilización esté poco disponible en sucesivos años (Roy et al., 2016). Por ello, la identificación de microorganismos capaces de movilizar el fósforo en estos suelos será esencial para el desarrollo de una agricultura eficiente y sostenible en estas áreas y prevenir así la deforestación masiva. En este sentido, se han identificado diferentes aislados bacterianos capaces de promover el crecimiento de las plantas y solubilizar el fósforo inmovilizado (Walitang et al., 2017). Estos trabajos abren una nueva vía de investigación que podrá ser vital para poder alcanzar una agricultura más sostenible y circular.

### «El uso del conocimiento y la biotecnología serán clave para poder implementar y desarrollar una agricultura productiva y sostenible»

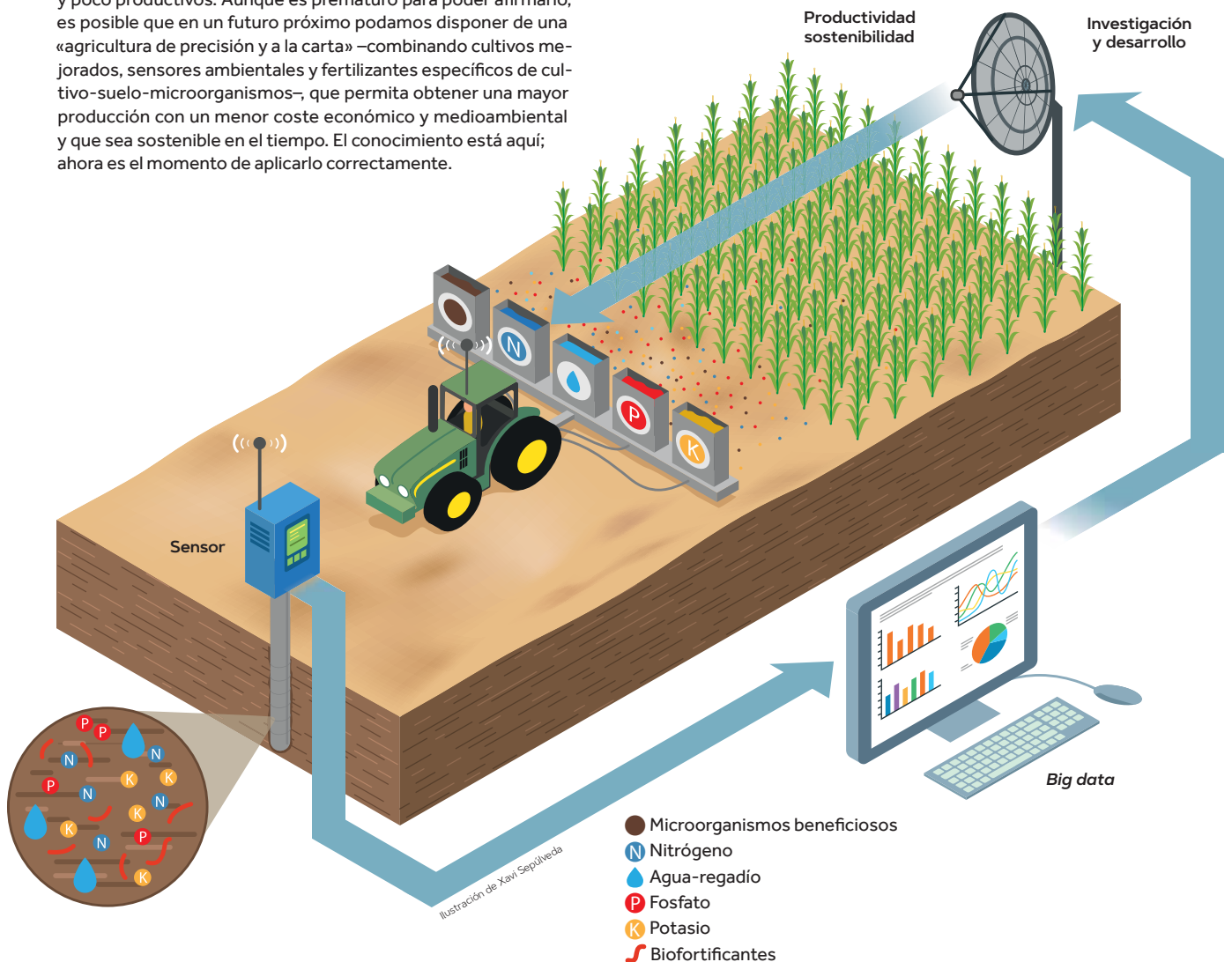
es especialmente preocupante en los suelos agrícolas tropicales, ya que, aunque son de buena calidad para la agricultura, suelen ser pobres en fósforo. Además, debido a sus propiedades fisicoquímicas, estos suelos secuestran grandes cantidades de fósforo, lo que hace que el exceso de fósforo utilizado durante la fertilización esté poco disponible en sucesivos años (Roy et al., 2016). Por ello, la identificación de microorganismos capaces de movilizar el fósforo en estos suelos será esencial para el desarrollo de una agricultura eficiente y sostenible en estas áreas y prevenir así la deforestación masiva. En este sentido, se han identificado diferentes aislados bacterianos capaces de promover el crecimiento de las plantas y solubilizar el fósforo inmovilizado (Walitang et al., 2017). Estos trabajos abren una nueva vía de investigación que podrá ser vital para poder alcanzar una agricultura más sostenible y circular.

Por otro lado, las raíces vegetales son colonizadas por múltiples especies de hongos (más de 6.000), que forman micorrizas extra o intracelulares. Aunque el número de especies vegetales que forman micorrizas es muy elevado, se han descrito algunas que no forman estas asociaciones, como es el caso de especies del género *Brassica* (la colza, la coliflor o la planta modelo *Arabidopsis thaliana*). Sin embargo, recientemente se ha demostrado la interacción entre un hongo, *Colletotrichum tofieldiae*, y plantas de *Arabidopsis*, lo que favorece su crecimiento y *fitness* o eficacia biológica en condiciones de deficiencia de fósforo (Hiruma et al., 2016). Este descubrimiento es importante, ya que de-

muestra que dentro de las poblaciones naturales es posible encontrar una gran diversidad de interacciones que se habían obviado previamente.

Actualmente el uso de microorganismos como biofortificantes está siendo explotado por empresas biotecnológicas para incrementar la producción de ciertos cultivos. Sin embargo, se deben tener en cuenta varios factores antes de poner estos productos que contienen microorganismos en el mercado, como por ejemplo cómo interaccionan estos aislados con la población de microorganismos del suelo donde se aplican, y cómo pueden afectar a la estructura del suelo. Por otro lado, será esencial intensificar la investigación para identificar

Figura 3. Sin lugar a dudas, los recientes avances tecnológicos aplicados a la agricultura abren nuevas vías de investigación para poder desarrollar nuevos programas de fertilización más sostenible y eficaz, así como para la regeneración de suelos degradados y poco productivos. Aunque es prematuro para poder afirmarlo, es posible que en un futuro próximo podamos disponer de una «agricultura de precisión y a la carta» –combinando cultivos mejorados, sensores ambientales y fertilizantes específicos de cultivo-suelo-microorganismos–, que permita obtener una mayor producción con un menor coste económico y medioambiental y que sea sostenible en el tiempo. El conocimiento está aquí; ahora es el momento de aplicarlo correctamente.





qué rutas/genes se modifican por la aplicación de estos microorganismos y cuáles podrían ser candidatos en programas de mejora clásica o ser modificados mediante edición génica. Así, es posible que podamos obtener combinaciones de cultivos-aislado más eficientes, lo que incrementaría la producción agrícola.

## ■ CONCLUSIONES

Es difícil prever con exactitud el modo y calidad de vida que tendremos dentro de cien años. Sin embargo, en la actualidad somos conscientes de los problemas a los que debemos hacer frente en las próximas décadas. Uno de ellos es la seguridad alimentaria, que está estrechamente ligada al incremento poblacional, y condicionada por el efecto del cambio climático, la escasez de agua o el uso de fertilizantes. En conjunto, estos factores hacen prever serias dificultades para abastecer de alimentos seguros y a precio asequible a la población mundial. ¿Cómo debemos enfrentarnos a estos problemas? Nadie tiene una solución definitiva. Sin embargo, la ciencia ha generado conocimientos que podrán ser utilizados para ofrecer soluciones biotecnológicas para el desarrollo de una agricultura sostenible y de precisión que nos proporcione alimentos de calidad y en cantidad suficiente (Figura 3). El conocimiento y las herramientas ya están disponibles, es el momento de su aplicación para el desarrollo de nuevas estrategias de producción agraria que serán vitales para alcanzar los diecisiete objetivos de desarrollo sostenible (ODS)<sup>1</sup> que se ha marcado la ONU para los próximos años. ☺

## REFERENCIAS

- 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. Consultado 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 nonlegumes. *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 mayo). *Message to congress on phosphates for soil fertility*. Publicado en línea por G. Peters y J. T. Woolley. *The American Presidency Project: 1999-2011*. Santa Bárbara, CA: UC Santa Barbara.

Consultado 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*. Consultado 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 Hooijdink, R. (2018, 20 de diciembre). 4 ways robotics will affect agriculture in 2019. *Robotics Business Review*. Consultado 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)

## AGRADECIMIENTOS:

Este trabajo está directamente relacionado con el proyecto BIO2017-82209-R Rot-Phos: «Respuestas de las raíces a la deficiencia de fosfato: Nuevas aproximaciones para incrementar el crecimiento de las plantas con una menor fertilización». También me gustaría expresar mi agradecimiento a Chema Lora y a Olga Navarro por su ayuda en la edición del texto y a Sara del Pozo por la ilustración.

**JUAN CARLOS DEL POZO.** Profesor de Investigación en el INIA (Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria), Madrid (España). Lidera un grupo de investigación en el Centro de Biotecnología y Genómica de Plantas (CBGP, UPM-INIA) que está identificando nuevos genes reguladores del desarrollo radicular y microbiota asociada a las raíces en respuesta a deficiencias nutricionales, con el fin de utilizar este conocimiento para desarrollar cultivos más eficientes. ✉ [pozo@inia.es](mailto:pozo@inia.es)

<sup>1</sup> Los diecisiete ODS se pueden consultar en la web de la ONU: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>