

ARTÍCULO DE REFLEXIÓN/REFLECTION PAPER

CIENCIA Y TECNOLOGÍA COLOMBO-SUIZA AYUDA A ALIMENTAR EL PLANETA: DE LA REVOLUCIÓN VERDE A LA REVOLUCIÓN MICROBIANA

Colombian-Swiss Research to Help Feed the Planet: From Green Revolution to Microbial Revolution

Alia RODRIGUEZ¹, Ian Robert SANDERS².

¹ Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Cra. 30 n.º 45-03, edificio 421, oficina 208. Bogotá, Colombia.

² Department of Ecology and Evolution, University of Lausanne, Biophore Building, 1015. Lausanne, Switzerland.

For correspondence. alrodriguezv@unal.edu.co

Received: 27th Mayo 2015, **Returned for revision:** 11th August 2015, **Accepted:** 9th October 2015.

Associate Editor: Fagua Álvarez Flórez.

Citation / Citar este artículo como: Rodríguez A, Sanders IR. Ciencia y tecnología Colombo-Suiza ayuda a alimentar el planeta: de la revolución verde a la revolución microbiana. Acta biol. Colomb. 2016;21(1)Supl:S297-303. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v21n1sup.50856>

RESUMEN

Por milenios los agricultores han mejorado sus cultivos utilizando la variación genética y seleccionando las mejores variedades. Hoy nos enfrentamos a un reto sin precedentes: alimentar la creciente población mundial. Así, aumentar los rendimientos de cultivos de importancia global, como la yuca, es crucial para la seguridad alimentaria. Esta raíz tropical alimenta aproximadamente 1.000 millones de personas en alrededor de 105 países en el mundo y sus productos son la tercera fuente de calorías más importante para los países del trópico. Esta planta es altamente dependiente de la asociación con hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA). Estos hongos ayudan a la planta a obtener fósforo del suelo, un nutriente limitante principalmente en los suelos del trópico. Recientemente, nuestro grupo de investigación colombo-suizo, mostró que la inoculación de cultivos de yuca con *Rhizophagus irregularis* incrementó los rendimientos en dos localidades diferentes de Colombia. Más aún, conseguimos enormes diferencias en la productividad de la yuca, utilizando diferentes líneas genéticamente mejoradas del hongo *R. irregularis*, en condiciones de campo. Es improbable observar cambios tan dramáticos, en campo, en la producción de yuca, con un ciclo de mejoramiento de la planta. Así, combinando la agronomía con la biología y la genética, proponemos un cambio en el paradigma del mejoramiento vegetal, que pueda contribuir a resolver el problema de hambruna en el mundo.

Palabras clave: mejoramiento genético, micorrizas arbusculares, *Rhizophagus irregularis*, seguridad alimentaria, suelos tropicales, yuca.

ABSTRACT

For millennia farmers have been improving crops by using their natural genetic variation, selecting the best varieties. Today we face an unprecedented challenge to feed the growing global human population that can only be achieved with major changes in how we combine science and technology with agronomy. Cassava is globally important, annually feeding almost a billion people in 105 countries. It is an important crop for subsistence farming throughout tropical and subtropical regions for smallholder farmers, but especially in sub-Saharan Africa. Cassava is highly dependant on arbuscular mycorrhizal fungi to survive. Mycorrhizal fungi form symbioses with all our major crops. They help plants obtain phosphate from the soil; an essential nutrient that limits cassava production in the tropics. Our Colombian-swiss group have shown a significant effect of *Rhizophagus irregularis* inoculation on yield of cassava in field conditions in two locations in Colombia. Further, huge differences in the productivity of cassava can be achieved by inoculating it with genetically different lines of *R. irregularis*. The variation in cassava growth we observed is so large that it would be very unlikely in one generation of plant breeding to see similar variation in cassava growth. By combining agronomy with biology and genetics, we propose a shift in the paradigm of plant breeding that could help to solve the problem of hunger in the world.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi, cassava, food security, plant breeding, *Rhizophagus irregularis*, tropical soils.

INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria

La población mundial aumenta dramáticamente. Se calcula que para el 2050 alcanzará los 9000 millones de personas, y los países en vías de desarrollo experimentarán el mayor crecimiento (FAO, 2013). Alimentar esta cantidad de personas, representa uno de los mayores retos que enfrenta la humanidad y requiere de un incremento en el rendimiento global de los cultivos de entre un 70 a un 100 % (Godfray *et al.*, 2010). La mayoría de estos incrementos, deben ocurrir con cultivos de importancia mundial, en regiones tropicales, en países en vías de desarrollo; en los cuales tanto las tasas de crecimiento poblacional como la pobreza, son normalmente muy altas (Godfray *et al.*, 2010; Foresight, 2011). Estos aumentos en rendimiento, no podrán ser sostenidos ni a través del mejoramiento genético de plantas, ni tampoco mediante el uso de más fertilizantes (Godfray *et al.*, 2010).

Fallar en este propósito, puede aumentar la ya dramática situación de hambruna en el planeta. En el mundo, actualmente, cerca de 1000 millones de personas sufren de hambre crónica y desnutrición (FAO, 2013). Anualmente, mueren cinco millones de personas por causas directas de desnutrición, y de estas, 3,5 millones son niños menores de cinco años. Esta cifra es más alta que cuando combinamos, el número de muertes que se registran globalmente por las mayores enfermedades que afectan nuestro planeta (VIH, malaria y tuberculosis anualmente suman en total 3,6 millones de personas; WHO, 2013). En Colombia, según datos del Instituto Nacional de Salud (INS, 2014), cada 33 horas muere un menor de cinco años.

Así, aumentar los rendimientos de sistemas productivos, es crucial, particularmente en cultivos considerados clave en la seguridad alimentaria, como la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) (FAO, 2005), la cual deberá aumentar sus rendimientos fuertemente (Godfray *et al.*, 2010; FAO, 2011). Esta planta es un componente esencial en la dieta de más de 1000 millones de personas en alrededor de 105 países en el mundo y sus productos son la tercera fuente de calorías más importante para los países del trópico (FAO, 2011). Además de todo el valor económico que pueden brindar los productos y subproductos de la yuca, sobresalen características como su tolerancia a la sequía, su capacidad de producirse en suelos degradados, su resistencia a plagas y enfermedades y su tolerancia a los suelos ácidos (Ceballos, 2001). Estas ventajas convierten a la yuca, en un cultivo muy importante para los suelos ácidos del trópico (Ospina y Ceballos, 2002), los cuales se caracterizan por su baja fertilidad química (Sánchez y Salinas, 1981); erosión; deficiencias de fósforo (P), nitrógeno (N) y potasio (K); acidez ($\text{pH} < 5,3$); toxicidad por aluminio y alta capacidad de fijación del fósforo (Rivas *et al.*, 2004).

En Colombia se producen aproximadamente 1'984427 toneladas de yuca por año en un área de 183313 ha y con un rendimiento promedio de 10,9 T/ha (FAO, 2011). De la producción anual del país, la Orinoquía tiene una participación del 10 % presentando el mejor rendimiento (12,4 T/ha) dentro de las regiones a nivel nacional (FINAGRO, 2009). Sin embargo, las toneladas de yuca producidas por hectárea son bajas cuando se comparan con las producidas en países como Costa Rica (16,5 T/ha), Brasil (15,3 T/ha) y Tailandia (25,0 T/ha) (FAO, 2011) y también los rendimientos potenciales estimados, dependiendo de las áreas agroecológicas, de hasta 42,3 T/ha (Rivera-Hernández *et al.*, 2012).

Debido a las condiciones típicas de los suelos del trópico que limitan la producción de la mayoría de los cultivos y demandan la aplicación de grandes cantidades de fertilizantes, se generan problemas económicos y ambientales (Pla, 2006; Owen *et al.*, 2015). Productores agrícolas en el trópico, típicamente, deben aplicar mucho más fertilizantes, que lo utilizado por agricultores de zonas templadas, para alcanzar los mismos incrementos en rendimiento. Esto es particularmente cierto, para el caso del fosfato, el cual se fija fácilmente a las partículas del suelo, reduciendo su disponibilidad y difusión hacia las raíces de las plantas (Cakmak, 2002; Owen *et al.*, 2015). Por lo tanto, es necesario el desarrollo de tecnologías que permitan mejorar la eficiencia en el uso y aprovechamiento de recursos, como en el caso del fósforo del suelo, particularmente en el trópico, con el fin de incrementar la productividad a menores costos y así, la competitividad de los cultivos de forma sostenible. Además, para el caso colombiano, donde el cultivo de la yuca tradicionalmente ha constituido una importante fuente de alimentación y de ingresos de los agricultores, es clave mejorar su competitividad y convertirlo en una fuente de recursos atractiva, en el mercado competitivo de carbohidratos.

La asociación simbiótica mutualista micorrizas arbusculares (MA) y la producción de yuca

Todas las plantas se asocian con un gran cantidad y diversidad de microorganismos, que tienen un altísimo impacto en la producción mundial de alimentos (Owen *et al.*, 2015). Los microorganismos patógenos de plantas, son responsables, en gran proporción, por las pérdidas que ocurren en los cultivos. De tal forma que los microbiólogos, han trabajado tradicionalmente, con agrónomos y especialistas en producción agrícola, para controlar patógenos de plantas. Sin embargo, los microorganismos también interactúan con las plantas, en una gran variedad de formas benéficas, confiriendo mejoras en la nutrición vegetal, resistencia a la sequía, resistencia a los patógenos y resistencia a herbívoros y tolerancia a altas temperaturas (Cakmak, 2002; Conniff, 2013; Reid y Greene, 2013).

Entre estas interacciones beneficiosas se encuentra la asociación micorrícica arbuscular que ocurre entre raíces de plantas y hongos que pertenecen al filo Glomeromycota (Schüssler *et al.*, 2001; Smith y Read, 2008). Su potencial para mejorar el problema de producción de alimentos, reside en el hecho de que todos los cultivos de importancia mundial, forman esta simbiosis naturalmente. La asociación, incrementa el crecimiento de las plantas, debido a que el hongo ayuda a las plantas a obtener fosfato a partir del suelo (Smith y Read, 2008; Ceballos *et al.*, 2013). De esta forma, la simbiosis mutualista micorrizas arbusculares, es potencialmente aplicable a una escala global, para mejorar la producción de alimentos y utilizar de una forma más eficiente las reservas de fosfato existentes (Ceballos *et al.*, 2013; Owen *et al.*, 2015). Además, los hongos del filo Glomeromycota (Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares HFMA) pueden proveer beneficios a la planta, mejorando la eficiencia en el uso del agua (Auge, 2001), protegiendo a la planta de patógenos (Borowicz, 2001) o incrementando la tolerancia a estreses (Feng *et al.*, 2002; Seckbach y Grube, 2010).

Así, y con el fin de poder incrementar los rendimientos de cultivos, es necesario el desarrollo de nuevas tecnologías (Godfray *et al.*, 2010) ó la implementación de tecnologías existentes. Para el caso de la yuca, el uso de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) es una de las tecnologías con mayor potencial, ya que se ha demostrado que esta planta es altamente dependiente de la asociación con estos hongos simbioses para la toma de fósforo en suelos con bajos contenidos de fósforo disponible (Yost y Fox, 1979; Howeler y Asher, 1982; Sieverding, 1991).

En una serie de trabajos experimentales pioneros, Sieverding y co-autores (resumido en Sieverding, 1991) reportaron efectos altamente significativos, en condiciones de campo, después de la inoculación de yuca con HFMA, en suelos típicamente ácidos en Colombia, en donde los rendimientos de esta raíz pudieron ser incrementados hasta en 5 T/ha. Sin embargo, esta aplicación requería, por parte de los agricultores, producir su propio inóculo localmente, y por tanto, exigía habilidades no tradicionales para los agricultores.

Con el potencial actual, de producir los HFMA masivamente de forma limpia (Owen *et al.*, 2015) y en condiciones *in vitro*, se abre de forma concreta, la posibilidad de mejorar los rendimientos del cultivo de yuca y consecuentemente, mejorar la seguridad alimentaria en lugares donde más se necesita. De esta forma, recientemente, Ceballos *et al.* (2013), inocularon la especie *Rhizophagus irregularis* en cultivos comerciales de yuca y obtuvieron incrementos en los rendimientos del 20 % (con un rendimiento máximo de 45 T/ha), y una disminución en la aplicación de fertilizante fosfatado de hasta el 50 % con respecto a las aplicaciones que hacen tradicionalmente los agricultores. Estos efectos fueron observados, en dos

regiones de Colombia, donde los suelos, el clima y las variedades de yuca fueron completamente diferentes.

Este aumento en rendimientos, conjugado con la disminución en la fertilización fosfatada, implicó mejoras en la productividad y rentabilidad del sistema de cultivo yuca (Ceballos *et al.*, 2013). Adicionalmente, y dado que *R. irregularis* es cultivable en sistemas *in vitro* estériles utilizando raíces transformadas de zanahoria con *Agrobacterium rhizogenes*, se pueden producir inóculos puros, libres de patógenos y con una alta concentración de propágulos dentro de un pequeño volumen, los cuales son ideales para aplicaciones en sistemas agrícolas comerciales (Owen *et al.*, 2015), incluso en regiones remotas.

Este sistema de producción del inóculo hace que el producto, con una calidad controlada, sea fácil de transportar y sea económicamente viable cuando es aplicado en cultivos (Sanders, 2010). Más aún, estos resultados indican que es posible escalar esta aplicación tecnológica a muchas áreas de los trópicos, en donde la yuca es cultivada.

Diversidad de los hongos FMA

Los HFMA son considerados generalistas. El abordaje general consiste en encontrar aislados benéficos del hongo, que estén presentes naturalmente en los suelos y tratar de utilizar este aislado en una variedad de cultivos diferentes, suelos diferentes, climas diferentes, etc. Sin embargo, se conoce que las diferentes especies fúngicas, alteran el crecimiento de las plantas de forma diferente. Igualmente, las diferentes especies vegetales, responden de manera diferente cuando son inoculadas por la misma especie de hongo FMA. Es decir, que no existe un inóculo universal de HFMA, que pueda ser efectivo para todas las especies vegetales y consecuentemente, para todos los cultivos (Sanders, 2010; Rodríguez y Sanders, 2015). El amplio rango de respuestas que se generan por la inoculación con diferentes HFMA, depende de varios factores que incluyen la genética del hospedante (la especie vegetal), la genética del simbiote (la especie y los aislados de los HFMA) y las condiciones ambientales bajo las cuales hongo y planta interactúan (Koch *et al.*, 2006; Rodríguez y Sanders, 2015).

El estudio pionero de Munkvold *et al.* (2004) demostró que la amplia diversidad funcional intra-específica de los HFMA, es un rasgo característico de estos hongos y de gran relevancia para la aplicación práctica de esta simbiosis mutualista. La diversidad intra-específica (dentro de la especie) en comparación con la diversidad inter-específica (entre especies) en los HFMA, es muy superior (Munkvold *et al.*, 2004), y constituye un potencial inexplorado y que puede subestimarse bajo enfoques clásicos biotecnológicos.

Más importante aún, en estudios recientes, se ha mostrado que líneas mejoradas del hongo modelo para los HFMA, *R. irregularis*, alteran el crecimiento de la planta diferencialmente, de forma altamente significativa, tanto en condiciones de sistema axénico (Koch *et al.*, 2004), como

en condiciones de invernadero (Angelard *et al.*, 2010). Estas líneas mejoradas genéticamente se pueden producir gracias a la alta variabilidad genética intra-específica que presenta el hongo, y que proviene de dos fuentes principales: i) la variación genética entre individuos de una misma población del hongo FMA (Koch *et al.*, 2004; Koch *et al.*, 2006) ii) la variación genética dentro del mismo hongo FMA (Kuhn *et al.*, 2001; Hijri y Sanders, 2005). Esto, en oposición al uso de organismos genéticamente modificados (GMOs), en los que se introducirían genes al hongo, con una característica deseable. Con las líneas mejoradas del hongo, las variaciones, más interesantes, y con mayor potencial de aplicación agrícola reportadas por los autores, fueron aumentos de hasta cinco veces de la biomasa en plantas de arroz (Angelard *et al.*, 2010).

Cambio de paradigma: mejoramiento genético de microorganismos para el cultivo de yuca

Frente al problema de baja producción de yuca, existen iniciativas internacionales, de gran envergadura, para el mejoramiento genético de la planta. Estas iniciativas, involucran el desarrollo de yuca GMO (por ej. BioCassava Plus) y el mejoramiento de yuca asistido por marcadores moleculares (por ej. el proyecto NEXTGEN Cassava). Sin embargo, nosotros proponemos una ruta alternativa diferente para alcanzar rendimientos en yuca más altos, la cual consiste en investigar si la genética molecular puede utilizarse para obtener hongos FMA más efectivos. Esto sería un cambio de paradigma para la agricultura y, si resulta exitoso, el mismo abordaje podría utilizarse con otros microorganismos benéficos y en otros cultivos.

Sería falso afirmar que no se ha tratado, por parte de los microbiólogos moleculares y genetistas, de crear microorganismos más efectivos. Existen muchos reportes de investigación que han tenido como objetivo modificar genéticamente bacterias, especialmente para la biorremediación de suelos contaminados, sin embargo, esta alternativa, consiste en utilizar tecnología GMO para insertar uno ó más, genes alóctonos dentro de una bacteria (Kuhad y Singh, 2013). La oposición por parte de grupos ambientalistas a tal abordaje en la agricultura es supremamente alto. Adicionalmente, muchos microorganismos que se asocian con plantas, incluyendo los HFMA, no son fácilmente transformables.

La ventaja del mejoramiento genético de plantas es que se pueden generar una gran cantidad de fenotipos diferentes, sin que sea necesario tener conocimiento previo, de la función de los diferentes genes en la planta. La desventaja es que algunos de los individuos producidos, pueden tener características deseables y muchas indeseables. Actualmente, y con el desarrollo de metodologías como el mejoramiento asistido molecularmente, este problema se ha podido superar. Sin embargo, una de las limitaciones reales, del mejoramiento de plantas y la incorporación de

nuevas características en los cultivos, es que estos procesos consumen muchísimo tiempo, debido a los prolongados tiempos generacionales de las plantas. Por ejemplo, el cultivo de la yuca toma entre diez a catorce meses. Así, una ventaja clara de muchos microorganismos, es que ellos tienen, usualmente, tiempos generacionales mucho más cortos que las plantas, lo cual significa que producir progenies variables genéticamente, puede ocurrir mucho más rápido que lo que ocurre con muchos cultivos.

Con base en los resultados obtenidos por Angelard *et al.* (2010), se hizo un análisis preliminar, en condiciones de campo, con quince líneas mejoradas de *R. irregularis* (Ceballos *et al.*, 2014), las cuales habían sido obtenidas mediante cruzamientos entre genotipos del mismo hongo, ocurridos de forma natural. Así, al inocular tres variedades de yuca con diferentes líneas mejoradas del hongo *R. irregularis* se encontraron resultados sorprendentes y prometedores. El rango de variación en peso fresco de yuca fue alto y dependió de la línea del HFMA inoculada (de efectos positivos a negativos) y las respuestas inducidas por cada aislado fúngico fueron diferentes para cada variedad de yuca (Ceballos *et al.*, 2014). Más interesante aún, estos resultados fueron reproducibles en una réplica biológica realizada con las mismas variedades de yuca, las mismas líneas del hongo y en la misma locación, pero en diferente época (Ceballos *et al.*, comunicación personal). Las diferencias en rendimiento, encontradas en estos experimentos, y que fueron generadas por la diversidad genética de las líneas del hongo, muestran el gran potencial que tiene un programa de mejoramiento genético asistido molecularmente, en estos hongos y cuyas bases pueden generar una alternativa viable frente al mejoramiento genético de plantas de uso agrícola. Dado que se trató de un tamizado preliminar en campo, donde se quería evaluar si las respuestas inducidas en plantas dependían de la línea de hongo FMA utilizada (Ceballos *et al.*, comunicación personal), se debe ahora probar un grupo de líneas en condiciones de cultivo, para poder confirmar su potencial en sistemas agrícolas reales.

El trabajo de Ceballos *et al.* (2013) incluyó un análisis económico de la aplicación biotecnológica con HFMA, revelando que aunque la inoculación no generó mayores retornos de la inversión comparados con los obtenidos con los manejos tradicionales del cultivo en la zona, el reemplazo de fertilizantes fosfatados por el inoculante micorrízico y el aumento en la productividad del cultivo, muestran una vía para el diseño de sistemas productivos sostenibles aplicables a la producción de yuca en Colombia y en sistemas agrícolas del trópico ácido.

Se enfatiza, que la aplicación de HFMA en el cultivo de la yuca, tiene un alto potencial de viabilidad económica si se mejoran y estudian, factores relacionados con: 1) la cantidad de inóculo utilizada (se utilizó el doble de la dosis estimada por el productor), 2) los precios del inóculo (se utilizaron precios europeos), 3) las perspectivas de los precios de los

fertilizantes en el futuro, 4) los efectos que genera el inóculo sobre los ciclos subsecuentes del cultivo y 5) el efecto de la inoculación en sistemas integrados de manejo de la fertilidad del suelo (por sus siglas en inglés ISFM). Así, es necesario continuar con investigaciones relacionadas con los factores mencionados, que conlleven a mejorar la eficiencia de este tipo de aplicaciones biotecnológicas.

Tecnología para la sostenibilidad agrícola donde más se necesita: Alianza Norte-Sur-Sur

Dada la alta dependencia a la asociación micorrízica arbuscular, mostrada por la yuca en condiciones de campo y su importancia socio-económica, nuestra alianza colombo-suiza se desarrolla en torno a su cultivo, en la región de los Llanos Orientales de Colombia. Así, nuestra colaboración se basa en la experticia del grupo de investigación en Ecología y Evolución, y Genómica Poblacional de la Universidad de Lausanne, Suiza, líder mundial en temas como diversidad genética de los HFMA, diversidad genética intra-específica en poblaciones de HFMA (Koch *et al.*, 2004; Koch *et al.*, 2006) y la organización del genoma y genómica en HFMA (Hijri y Sanders, 2005), en combinación con la experticia del grupo de investigación en Biotecnología de las Micorrizas de la Universidad Nacional de Colombia, en el estudio de la diversidad de HFMA (Clapp *et al.*, 2002; Rodríguez *et al.*, 2004; Rodríguez *et al.*, 2005) y en los temas de manejo integrado del suelo, biotecnología de las micorrizas arbusculares y sus aplicaciones en la producción de alimentos.

De esta forma, el grupo colombiano se ha encargado de establecer los experimentos en campo para evaluar la efectividad de la asociación micorrízica en cultivos de yuca y su escalamiento, considerando diferentes variedades de yuca comercial, condiciones edafo-climáticas representativas de regiones colombianas y líneas genéticamente mejoradas del hongo FMA, desarrolladas en Suiza. Igualmente, desarrollamos conjuntamente metodologías de secuenciamiento masivo, para la evaluación en campo, del efecto de la inoculación de HFMA en sistemas agrícolas colombianos, sobre las comunidades nativas de estos hongos. Ahora, estamos preparados para extender esta alianza Norte-Sur, a regiones del mundo en donde estos desarrollos tecnológicos, son requeridos con urgencia: por ejemplo África.

La yuca es originaria de Sur América, sin embargo esta planta es actualmente cultivada mucho más ampliamente por millones de pequeños agricultores en África, en suelos de baja fertilidad. Una prioridad nacional y regional para la mayoría de los países africanos, es hacer de la yuca un cultivo rentable, en adición a su papel como cultivo de subsistencia. Esto requerirá de enormes incrementos en la producción de yuca en esos países. En la mayoría de los países africanos, los rendimientos son bajos situándose por debajo de 10 T/ha frente a un potencial de 30-40 T/ha (FAO, 2005).

En diversos intentos por mejorar estos sistemas, se han demostrado aumentos en la productividad de sistemas yuca-

leguminosas en África, mediante el uso de cultivos asociados y el manejo integrado de la fertilidad (por sus siglas en inglés ISFM) con mejoras de entre 30 al 160 % (Pypers *et al.*, 2011; Pypers *et al.*, 2012). Sin embargo en ninguna de las opciones de ISFM se han incluido inoculaciones con HFMA. Esto, a pesar, de que el fósforo es considerado uno de los nutrientes más limitantes para la producción de yuca en esta región (Fermont *et al.*, 2009).

Existen ejemplos de bajísima productividad, como es el caso de Uganda y Tanzania, que producen respectivamente, cuatro y cinco millones de toneladas de yuca anualmente. Tanzania por ejemplo, es el país con menores rendimientos de yuca en el mundo, registrándose, aproximadamente un promedio de producción de 4 T/ha en la mayoría de sus regiones. Debido a estos bajísimos rendimientos y a la importancia de este cultivo en Tanzania, la investigación en producción de yuca tiene prioridad nacional en el programa de investigación y desarrollo del país. Para otros países como la República Democrática del Congo, que representa el país con más alto consumo de yuca en África y el segundo país productor de esta raíz, el cultivo de la yuca es también prioridad nacional. En Kenia, por ejemplo, el 60 % de la yuca que es producida, se consume en la parte occidental del país. En este país, se cultiva yuca tanto en áreas semi-áridas como con alta pluviosidad como cultivo de subsistencia y también para comercializar (Kamau *et al.*, 2010).

Reflexión final: el hambre en el mundo, Colombia y África

Los resultados obtenidos en los experimentos de campo en Colombia, tienen el potencial de constituirse en una magnífica oportunidad, para llevar tecnología desarrollada en el trópico, por una colaboración Colombo-Suiza, que contribuya a resolver el problema de producción de alimentos en el trópico y pueda aplicarse a regiones del África, en donde, como ya se indicó, la producción de yuca es fundamental y está marcada por limitantes muy severas.

Esta iniciativa además, contribuiría desde la biología, la agronomía, la ecología y la genética, a resolver el drama humano que enfrentamos actualmente y que enfrentaremos con mayor intensidad cuando la población mundial llega a los 9000 millones: la hambruna.

En África, el panorama de hambre y desnutrición es mucho más agudo que en otras regiones del mundo y tiene implicaciones que directamente impactan el desarrollo de la región. Por ejemplo, se sabe que además de la muerte, la falta de alimentos es la causa indirecta de muchas enfermedades FAO (2013). El costo económico estimado, producto de la malnutrición es de aproximadamente 5,5 % del producto interno bruto en la región. Se estima que del total de niños que viven en el mundo hoy, un 25 % de ellos son niños con crecimiento deficiente y en comparación con niños normales, estos niños tienen un 20 % más de chance de presentar deficiencias de aprendizaje. En

Uganda por ejemplo, se ha estimado que estos niños fallan permanentemente los exámenes académicos y esto le cuesta al país alrededor de 201 millones de dólares anualmente. Estos niños, no podrán alcanzar su potencial educativo, lo cual tiene un costo de 150 millones de dólares/año y este hecho reduce la fuerza productiva del país, por muerte prematura con un costo de aproximadamente 320 millones anuales (FAO, 2005).

Proponemos que la vía de la revolución microbiana, puede contribuir de manera sostenible a la solución del problema de falta de seguridad alimentaria en las regiones más vulnerables del mundo y así empezar a caminar hacia la sostenibilidad y equidad social que lleve a un desarrollo equilibrado de nuestro planeta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de la Fundación Suiza de Ciencia y Tecnología (Swiss National Science Foundation) proyecto Joint Research Project (project number IZ70Z0_131311/1), a la Universidad de Lausanne (Suiza) y a la Universidad Nacional de Colombia que nos permitieron trabajar en colaboración, producir resultados en este tema y desarrollar estas ideas.

REFERENCIAS

- Angelard C, Colard A, Niculita-Hirzel H, Croll D, Sanders IR. Segregation in a mycorrhizal fungus alters rice growth and symbiosis-specific gene transcription. *Curr Biol*. 2010;20(13):1216-21. Doi:10.1016/j.cub.2010.05.031
- Auge RM. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*. 2001;11(1):3-42. Doi:10.1007/s005720100097
- Borowicz VA. Do arbuscular mycorrhizal fungi alter plant-pathogen relations? *Ecology*. 2001;82(11):3057-3068. Doi:10.1890/0012-9658(2001)082[3057:DAMFAP]2.0.CO;2
- Cakmak I. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways. *Plant Soil*. 2002;247(1):3-24. Doi:10.1023/A:1021194511492
- Ceballos H. La Yuca en Colombia y el Mundo: Nuevas Perspectivas para un Cultivo Milenario. Cali: Publicaciones CIAT; 2001. p. 1-13.
- Ceballos I, Fernández C, Pena R, Rodríguez A, Sanders IR. Manipulating within-population genetic differences in *Rhizophagus irregularis* induces a wide range of growth responses of cassava in the field and in the presence of a native AMF community. In: Networks of Power and Influence: ecology and evolution of symbioses between plants and mycorrhizal fungi. 33rd New Phytologist Symposium; 2014 May 14-16; Zürich, Switzerland.
- Ceballos I, Ruiz M, Fernández C, Pena R, Rodríguez A, Sanders IR. The *In Vitro* Mass-Produced Model Mycorrhizal Fungus, *Rhizophagus irregularis*, Significantly Increases Yields of the Globally Important Food Security Crop Cassava. *PLoS ONE*. 2013;8(8):e70633. Doi:10.1371/journal.pone.0070633.
- Clapp JP, Rodríguez A, Dodd JC. Glomales rRNA gene diversity – all that glistens is not necessarily glomalean?. *Mycorrhiza*. 2002;12(5):269-270. Doi:10.1007/s00572-002-0175-8
- Conniff R. Enlisting bacteria and fungi from the soil to support crop plants is a promising alternative to the heavy use of fertilizer and pesticides. *Sci Amer*. 2013;76:1-4.
- FAO. A review of cassava in Africa with country case studies on Nigeria, Ghana, the United Republic of Tanzania, Uganda and Benin: Proceedings of the validation forum on the global cassava development strategy. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2005. 66 p.
- FAO. FAOSTAT 2013. Rome Italy: FAO publications. Available on: <http://faostat3.fao.org/home/index.html>.
- Foresight. The future of food and farming. Final project report. London, UK: The Government Office for Science; 2011. 211 p.
- Feng G, Zhang F, Li X, Tian C, Tang C, Rengel Z. Improved tolerance of maize plants to salt stress by arbuscular mycorrhiza is related to higher accumulation of soluble sugars in roots. *Mycorrhiza*. 2002;12(4):185-190. Doi:10.1007/s00572-002-0170-0
- Fermont AM, van Asten PJA, Tittonell P, van Wijk MT, Giller KE. Closing the cassava yield gap: An analysis from smallholder farms in East Africa. *Field Crops Res*. 2009;112(1):24-36. Doi:10.1016/j.fcr.2009.01.009
- FINAGRO. Superficie cosechada, producción y rendimiento del cultivo de yuca por departamentos. Anuario Estadístico del Sector Agropecuario, Colombia. Recuperado el 10 de Septiembre de 2012. Available on: http://www.finagro.com.co/html/i_portals/index.php..
- Godfray HCJ, Beddington JR, Crute IR, Haddad L, Lawrence D, Muir JF, *et al*. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*. 2010;327(5967):812-818. Doi:10.1126/science.1185383
- Hijri M, Sanders IR. Low gene copy number shows that arbuscular mycorrhizal fungi inherit genetically different nuclei. *Nature*. 2005;433(7022):160-163. Doi:10.1038/nature03069
- Howeler R, Asher C. Establishment of an effective endomycorrhizal association in cassava in flowing solution culture and its effect on phosphorus nutrition. *New Phytol*. 1982;90(2):229-238. Doi:10.1111/j.1469-8137.1982.tb03255.x
- Instituto Nacional de Salud, Colombia. 2014. Available on: <http://www.ins.gov.co/Paginas/inicio.aspx>. 2014.
- Kamau J, Melis R, Laing M, Derera J, Shanahan P, Ngugi E. Combining the yield ability and secondary traits of selected cassava genotypes in the semi-arid areas of Eastern Kenya. *J Plant Breed Crop Sci*. 2010;2(7):181-191.

- Koch AM, Kuhn G, Fontanillas P, Fumagalli L, Goudet J, Sanders IR. High genetic variability and low local diversity in a population of arbuscular mycorrhizal fungi. *PNAS*. 2004;101(8):2369-2374. Doi:10.1073/pnas.0306441101
- Koch AM, Croll D, Sanders IR. Genetic variability in a population of arbuscular mycorrhizal fungi causes variation in plant growth. *Ecol. Lett.* 2006;9(2):103-110. Doi:10.1111/j.1461-0248.2005.00853.x
- Kuhad RC, Singh A. *Biotechnology of environmental management and resource recovery*. New Delhi, India: Springer; 2013. p. 313.
- Kuhn G, Hijri M, Sanders IR. Evidence for the evolution of multiple genomes in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature*. 2001;414(6865):745-748. Doi:10.1038/414745a
- Munkvold L, Kjoller R, Vestberg M, Rosendahl S, Jakobsen I. High functional diversity within species of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*. 2004;164(2):357-364. Doi:10.1111/j.1469-8137.2004.01169.x
- NEXTGEN Cassava (The Next Generation Cassava Breeding). Cornell University. 2016. Available on: <http://www.nextgencassava.org/>
- Ospina B, Ceballos H. *La Yuca en el tercer milenio: sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*. Cali: Publicaciones CIAT; 2002. 26 p.
- Owen D, Williams AP, Griffith GW, Withers PJA. Use of commercial bio-inoculants to increase agricultural production through improved phosphorus acquisition. *Appl Soil Ecol.* 2015;86:41-54. Doi:10.1016/j.apsoil.2014.09.012
- Pla I. Problemas de degradación de suelos en el mundo. Problemas de degradación de suelos en el mundo: Causas y consecuencias. X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Guayaquil, Ecuador; 2006. p. 1-9.
- Pypers P, Bimponda W, Lodi-Lama JP, Lele B, Mulumba R, Kachaka C, *et al.* Combining mineral fertilizer and green manure for increased, profitable cassava production. *Agron J.* 2012;104(1):178-187. Doi:10.2134/agronj2011.0219
- Pypers P, Sanginga J-M, Kasereka B, Walangululu M, Vanlauwe B. Increased productivity through integrated soil fertility management in cassava-legume intercropping systems in the highlands of Sud-Kivu, DR Congo. *Field Crops Res.* 2011;120:76-85. Doi:10.1016/j.fcr.2010.09.004
- Reid A, Greene ES. How microbes can help feed the World. Report on an American Academy of microbiology colloquium, Washington, DC. Washington DC: American Society for Microbiology; 2013. 36 p.
- Rivas L, Hoyos P, Amezcuita E, Molina D. Manejo y usos de suelos de la altillanura colombiana. Proyecto de evaluación de impacto, convenio MADR-CIAT. Cali: Publicaciones CIAT; 2004. 43 p.
- Rivera-Hernández B, Aceves-Navarro LA, Juárez-López JF, Palma-López DJ, González-Mancillas R, González-Jiménez V. Agroecological zoning and potential yield estimation of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in the state of Tabasco, México. *AIA*. 2012;16:29-47.
- Rodríguez A, Clapp JP, Dodd JC. Ribosomal RNA gene sequence diversity in arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *J Ecol.* 2004;92(6):986-990. Doi:10.1111/j.1365-2745.2004.00935.x
- Rodríguez A, Clapp JP, Dodd JC. Studies on the diversity of the distinct phylogenetic lineage encompassing *Glomus claroideum* and *Glomus etunicatum*. *Mycorrhiza*. 2005;15(6):33-46. Doi:10.1007/s00572-003-0291-0
- Rodríguez A, Sanders IR. The role of community and population ecology in applying mycorrhizal fungi for improved food security. *ISME J.* 2015;9:1053-1061. Doi:10.1038/ismej.2014.207
- Sánchez PA, Salinas JG. Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. *Adv Agron.* 1981;34:279-406.
- Sanders IR. 'Designer' mycorrhizas?: Using natural genetic variation in AM fungi to increase plant growth. *ISME J.* 2010;4(9):1081-1083. Doi:10.1038/ismej.2010.109
- Schüssler A, Schwarzott D, Walker C. A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycol Res.* 2001;105(12):1413-1421. Doi: 10.1017/S0953756201005196
- Seckbach J, Grube M. *Symbioses and Stress*. Netherlands: Springer. 2010. pp 19-36.
- Sieverding E. Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems. Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). 1991. 371 p.
- Smith SE, Read DJ. *The mycorrhizal symbiosis*. San Diego, USA: Academic Press. 2008. 769 p.
- WHO (World Health Organization). Research for universal health coverage: World health report 2013. Luxembourg: World Health Organization. 2013. 168 p.
- Yost R, Fox R. Contribution of Mycorrhizae to P nutrition of crops growing on an Oxisol. *Agron J.* 1979;71:903-908.

