

La diversidad, una herramienta poderosa para el desarrollo de una agricultura de bajos-insumos

M.J. Suso^{1,*}, R. Bocci², V. Chable³

(1) Departamento Mejora Genética Vegetal, IAS-CSIC, Apdo 4084, 14080 Córdoba, España

(2) Associazione Italiana per l'Agricoltura Biologica, Via Piave 14, 00187 Roma, Italia

(3) INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), SAD-Paysage (Sciences for Action and Development), 65 rue de Saint Brieu, 35042 Rennes, Francia

* Autor de correspondencia: M.J. Suso [mjsuso@ias.csic.es]

> Recibido el 22 de octubre de 2012, aceptado el 24 de enero de 2013.

Suso, M.J., Bocci, R., Chable, V. (2013). La diversidad, una herramienta poderosa para el desarrollo de una agricultura de bajos-insumos. *Ecosistemas* 22(1):10-15. Doi.: 10.7818/ECOS.2013.22-1.03

El desarrollo de estrategias de mejora que vinculen la diversidad biológica y los servicios productivos y de regulación de los cultivos es un imperativo cuando se trata de la promoción de una agricultura de bajos-insumos (en la que se incluye la agricultura ecológica). En los sistemas de bajos-insumos, la producción tiene que basarse en los utensilios suministrados por la diversidad dentro y entre cultivos, usar los recursos locales e incluir a las variedades tradicionales, como fuente de genes útiles y de genotipos, para el desarrollo de nuevas variedades o para que las variedades locales evolucionen como nuevas poblaciones. Los sistemas de bajos-insumos requieren una mejora descentralizada y participativa diseñada para incorporar el "know-how" de los agricultores y la perspectiva de los consumidores. Caracteres del cultivo que permitan la reducción de los insumos, como la eficiencia en el uso de la asociación con especies beneficiosas tales como los polinizadores aumentarán en importancia. Este artículo describe aproximaciones de mejora dirigidas a la implementación de una sinergia entre los servicios de producción y de regulación prestados por la agricultura en el contexto de sistemas de bajos-insumos.

Palabras clave: agricultura ecológica, abejas polinizadoras, mejora participativa, variedades tradicionales, servicios de los ecosistemas

Suso, M.J., Bocci, R., Chable, V. (2013). Diversity, a powerful tool for developing a low-input agriculture. *Ecosistemas* 22(1):10-15. Doi.: 10.7818/ECOS.2013.22-1.03

The development of breeding strategies that link biodiversity and crop production and regulation services is compulsory when it comes to promoting a low-input agriculture (which includes organic farming). In low-input agricultural systems, yield production should rely on the tools provided by the diversity within and between crops, using local resources and including landraces as a source of useful genes and genotypes, to develop new varieties or landraces to evolve as new populations. Low-input systems require decentralized and farmer participatory breeding methods designed to incorporate the "know-how" of farmers and consumer end-user perspective. Similarly, characters that allow the reduction of inputs, such as competitiveness against weeds, resistance to pests and diseases or the efficiency of association with beneficial species such as pollinators will increase in importance. This article describes approaches aimed to improve the implementation of a synergy between production and regulation services provided by the agriculture in the context of low-input systems.

Key words: ecosystem service, bee pollinator, landraces, organic agriculture, participatory plant breeding

Introducción

Transformar la producción agrícola desde su situación actual de amenaza para biodiversidad y los servicios de los ecosistemas, hacia una contribución positiva en ambos aspectos, es un desafío clave para el siglo XXI (Kremen 2005). La agricultura debe responder al doble reto de alimentar a una población creciente y, al mismo tiempo, reducir al mínimo sus impactos ambientales globales (Seufert et al. 2012). En el pasado, la mejora de los cultivos y de las técnicas agrícolas se ha centrado principalmente en el aumento del rendimiento y, a menudo, se ha pasado por alto la importancia del medio ambiente y de la calidad de los productos para la producción de alimentos (Herder et al. 2010).

Desde la década de 1960, el paradigma "semilla mejorada-ferilizante-pesticida-riego" ha caracterizado a la agricultura convencional (AC). Este modelo agrícola implica la producción de un

pequeño número de cultivos, generalmente en régimen de monocultivo, para aumentar la eficiencia en el uso de insumos externos, la mecanización y maximizar el flujo de los recursos naturales para los productos aprovechables. La flora y la fauna silvestres son considerados competidores directos de recursos o productos cosechados, y por lo tanto se eliminan.

En la actualidad la agricultura se caracteriza por una fuerte reducción en la diversidad de las plantas cultivadas. De un total estimado de 30 000 especies de plantas comestibles, sólo 30 "alimentan al mundo", con tres cultivos principales que son el maíz, el trigo y el arroz (FAO 2006). Además de la reducción de la diversidad interespecifica de cultivos en la agricultura, la mejora genética contribuye a la disminución de la diversidad intraespecifica, mediante la selección de los "mejores" genotipos para entornos extensos, el desarrollo de cultivares genéticamente homogéneos y la promoción de un número reducido de variedades ampliamente

adaptadas (Ceccarelli 1989). Las variedades tradicionales locales (variedades procedentes de un proceso evolutivo de domesticación basado en la interacción en el tiempo entre ambientes bióticos y abióticos, el manejo de los agricultores, la selección de parientes silvestres y malas hierbas, la hibridación con otros cultivares, las mutaciones y la presión de la selección natural y humana) que fueron que fueron la norma hasta hace algunas décadas, han sido sustituidas por las líneas puras e híbridos F1 en la agricultura moderna para maximizar la rentabilidad de los sistemas de alto-insumo (Newton et al. 2009). Especialmente en la segunda mitad del siglo XX, el uso de insumos se generalizó bastante en AC para limitar significativamente la variabilidad natural del medio ambiente al que están expuestos los cultivos y reducir la necesidad de diversidad genética en las variedades comerciales (Phillips y Wolfe 2005). La falta de variabilidad genética inter e intraespecífica conduce a: 1) epidemias de plagas y enfermedades (vulnerabilidad genética), 2) falta de adaptación al aumento de los estreses abióticos como la sequía o el cambio climático, 3) falta de variación genética para características específicas de calidad (Haussmann et al. 2012) y 4) falta de alternativas varietales para los consumidores.

Los expertos consideran que la diversidad genética de los cultivos es un recurso fundamental para la adaptación y, por lo tanto, crucial para la estabilidad del suministro de alimentos (Wolfe 2000; FAO 2008; King y Lively 2012). Los sistemas agrícolas de bajos insumos y de agricultura ecológica (BI/E) se ven ahora como una posible solución a la pérdida continua de la biodiversidad. En la agricultura de BI/E, en la que no se aplican pesticidas y fertilizantes sintéticos, la variación genética del cultivo (intra y entre cultivar) es el principal mecanismo para amortiguar las fluctuaciones ambientales y el mantenimiento de caracteres importantes, tales como la estabilidad del rendimiento, la resistencia a patógenos y la adaptación a un suelo bajo en fertilidad (Murphy et al. 2005).

La agricultura de BI/E se ha propuesto como solución a las amenazas de la AC. Sin embargo, los críticos argumentan que la agricultura BI/E puede tener rendimientos más bajos y por lo tanto se necesitaría más tierra para producir la misma cantidad de alimentos que con la AC, lo que resultaría en más deforestación y pérdida de biodiversidad y esto socavaría los beneficios ambientales de las prácticas de BI/E (Seufert et al. 2012). Varios ensayos comparativos de rendimiento entre la agricultura ecológica y la AC han mostrado rendimientos significativamente menores para los sistemas de producción ecológicos (SPE) (Murphy et al. 2007). Estos estudios describen las condiciones actuales en la agricultura ecológica y la convencional en una serie de especies cultivadas. Sin embargo, utilizan mayoritariamente cultivares modernos que han sido seleccionados por los mejoradores en los sistemas convencionales, cultivares que no son los idóneos en las condiciones de BI/E. Hoy en día, una gran mayoría de los sistemas agrícolas de BI/E funcionan con la desventaja de la utilización de cultivares adaptados a altos insumos y sistemas químicamente intensivos. Los agricultores ecológicos requieren variedades adaptadas a una agricultura de BI/E (Lammerts van Bueren et al. 2002).

Murphy et al. (2007) mostraron interacciones genotipo x sistema de cultivo significativas, importantes cambios genotípicos en la clasificación, basada en la mayor o menor producción, e incrementos de producción como resultado de la selección directa en los SPE y señalaron la importancia de utilizar un programa independiente en la selección de cultivares de alto rendimiento en los SPE. Bajo ciertas condiciones, es decir, con buenas prácticas de manejo, tipos determinados de cultivo y de condiciones de crecimiento, los SPE pueden competir con los rendimientos de los sistemas de la AC (Seufert et al. 2012).

Para erigir a la agricultura de BI/E como una herramienta importante en la producción de alimentos, los factores que limitan los rendimientos, tales como la identificación de los caracteres de adaptación a BI/E y las aproximaciones de mejora genética basadas en el uso de la diversidad, deben ser plenamente comprendidos. En este artículo se examinan una serie de cuestiones clave para el desarrollo de estrategias adecuadas para la agricultura BI/E:

(1) ¿Cuáles son los caracteres más adecuados de los cultivos, (2) ¿Qué recursos genéticos y qué aproximaciones de mejora son los más apropiados?, (3) ¿Pueden las aproximaciones participativas y descentralizadas añadirse a la mejora?, 4) ¿Es posible establecer sinergias entre la producción alimentaria y la conservación de la biodiversidad (fauna y flora silvestres)?.

Caracteres para la adaptación a una agricultura BI/E

Se reconoce que los sistemas agrícolas de BI/E requieren genotipos que estén adaptados específicamente a la mayor variabilidad ambiental típica de estos sistemas y, más importante, que a menudo los genotipos mejorados para la AC son inadecuados para su uso bajo condiciones de BI/E (Lammerts van Bueren et al. 2002; Seufert et al. 2012).

La fiabilidad de los sistemas agrícolas de BI/E no sólo depende de altos niveles de rendimiento con bajos insumos sino también en gran medida de la estabilidad en el rendimiento del cultivo (se considera estabilidad del rendimiento en el contexto de la producción agrícola al mantenimiento del rendimiento en un nivel constante a pesar de la exposición a condiciones ambientales variables). Según Haussmann et al. (2012), la estabilidad del rendimiento del cultivo en entornos variables e impredecibles se puede lograr a través de: 1) la plasticidad fenotípica ("individual buffering"): las plantas individuales muestran una respuesta plástica a condiciones ambientales variables, y 2) la diversidad de rasgos de adaptación en una variedad genéticamente heterogénea ("population buffering"). Además, se necesitan caracteres que directamente confieran tolerancia o resistencia a estreses bióticos y abióticos.

Los caracteres importantes están relacionados con la viabilidad heredable y la adaptación de las plantas para sobrevivir a la situación de estrés e incluyen la capacidad competitiva, resistencia a enfermedades y la capacidad de adquisición de nutrientes (Lammerts van Bueren et al. 2002; Lammerts van Bueren et al. 2003). En cuanto a la mejora, la AC se centra más en el uso de caracteres altamente específicos, tales como resistencias a enfermedades con un control genético simple, mientras que la agricultura de BI/E tiene una mayor preocupación por la salud de la planta en su conjunto expresada por el vigor de la misma (Wolfe et al. 2008). Los sistemas de BI/E albergan un mayor número de organismos beneficiosos, tales como polinizadores, que los sistemas de AC (Morandin y Winston 2005). Por tanto, algunos caracteres adicionales como la capacidad de interactuar con estos organismos beneficiosos pueden ser importantes en la agricultura BI/E.

Desafortunadamente, la identificación de caracteres que aprovechen todo el potencial de BI/E está en su infancia. El proyecto del Séptimo Programa Marco de la Unión Europea, (7PM de la UE) SOLIBAM (Estrategias de Mejora Genética Integradas con Prácticas de Manejo para el Desarrollo de una Agricultura de BI/E; <http://www.solibam.eu>) se centra en la explotación de la diversidad y la identificación de los caracteres de las plantas apropiados para la adaptación a las diversas condiciones de BI/E en un amplio rango de regiones agro-climáticas de Europa y que pueden proporcionar una guía útil para la mejora.

Papel de los recursos genéticos y de las aproximaciones de mejora en el desarrollo de una agricultura de BI/E

Haussmann et al. (2012) y Dawson y Goldringer (2012) proporcionan excelentes revisiones de las estrategias para la mejora de poblaciones genéticamente diversas que satisfagan las necesidades de una agricultura BI/E. Como se afirmó anteriormente, en la actualidad los agricultores BI/E dependen de las variedades modernas que se utilizan para la agricultura de altos insumos. En las variedades modernas comerciales, la variación genética se reduce dando como resultado variedades fenotípica y genéticamente homogéneas, variedades de alto rendimiento pero potencialmente muy vulnerables. Por lo tanto, una pregunta relevante es cómo puede contribuir la mejora genética al desarrollo de sistemas de

BI/E más productivos. De acuerdo con [Hausmann et al. \(2012\)](#) se deben considerar los siguientes aspectos: 1) los recursos genéticos disponibles para los programas de mejora, 2) el papel de la estructura genética del cultivo, y 3) las diferentes estrategias y métodos de mejora y selección.

La evaluación y la explotación de los recursos de los bancos de germoplasma es de utilidad porque los caracteres específicos para los sistemas de BI/E pudieron perderse durante la selección bajo las condiciones modernas de altos insumos. Es necesario identificar los recursos genéticos apropiados entre las variedades locales tradicionales, ya sea para utilizarlos directamente o como líneas parentales potenciales en los programas de mejora genética de variedades mejor adaptadas. La estructura genética del propio cultivar influye en su potencial para expresar su capacidad de adaptación a las condiciones BI/E. El desarrollo de cultivares heterocigotos y/o heterogéneos es una opción para mejorar la capacidad de adaptación del cultivar a ambientes cambiantes. La capacidad de adaptación individual puede mejorarse por medio de la heterocigosidad (dos alelos diferentes en un locus) o alopoloidía (diferentes alelos disponibles en los distintos genomas de una especie alopoloide). El grado de heterocigosidad puede modificarse por los mejoradores a través de: 1) la elección del tipo de variedad - híbridos, sintéticos y cultivares de polinización abierta en las especies alógamas, 2) la explotación de los grupos heteróticos en las poblaciones y en la mejora de híbridos para maximizar la heterocigosidad, y 3) la selección recurrente para aumentar la tasa de fecundación cruzada en las especies predominantemente autógamias. El mantenimiento de la capacidad adaptativa de las poblaciones requiere variación genética intra-varietal en los caracteres adaptativos. Los cultivares genéticamente heterogéneos incluyen las variedades mezcla, las variedades multilíneas, las poblaciones en polinización libre, las poblaciones mezcla bajo un manejo dinámico y las variedades sintéticas, así como los híbridos de 3 ó 4 vías. La aproximación dinámica en el manejo de los acervos genéticos utiliza la diversidad varietal disponible dentro de cada zona agroecológica principal para crear nuevas poblaciones de amplia base genética a través de cruzamientos y recombinación genética y/o materiales genéticos geográficamente diversos seleccionados por los agricultores y mejoradores ([Simmonds 1993](#); [Hausmann et al. 2004](#)).

El uso de la biotecnología es relevante para las estrategias de mejora. [Lammerts van Bueren et al. \(2010\)](#) proporcionan un marco conceptual sobre el papel de los marcadores moleculares y la selección asistida por marcadores en la mejora para una agricultura ecológica. La mejora relacionada con los sistemas de BI/E utiliza las ventajas que ofrece la biotecnología actual mediante el uso de marcadores de ADN para optimizar el proceso de mejora. Sin embargo, el uso de marcadores moleculares de ADN ha desempeñado hasta ahora un papel menor en la mejora de sistemas de BI/E porque implica trabajar con caracteres complejos controlados por muchos genes que interactúan entre sí y con las variables ambientales ([Wolfe et al. 2008](#)). Esto es probable que cambie notablemente si, por un lado, hay un descenso en el coste de la tecnología y, por otro, aumenta el interés en la mejora para BI/E y el uso de la diversidad dentro de los cultivos. Sin embargo, conviene preguntarse si la selección genómica, con información de marcadores de ADN de alta densidad, es una estrategia prometedora para incrementar el rendimiento y mejorar la resistencia al estrés.

Actualmente, el proyecto del 7PM de la UE, SOLIBAM, tiene como objetivo la identificación de polimorfismos en las poblaciones de mejora utilizando tres tipos de marcadores moleculares: marcadores de ADN neutros, marcadores epigenéticos y marcadores de genes candidatos. Los marcadores polimórficos resultantes se utilizan para evaluar la evolución de la diversidad genética en los diferentes sistemas de manejo del cultivo en las distintas regiones agro-climáticas para comprender mejor las respuestas de los diferentes tipos de cultivares a las distintas prácticas de selección, y desarrollar estrategias para mantener los niveles adecuados de diversidad. Además, sobre la base de los conocimientos obtenidos

sobre los mecanismos genéticos y epigenéticos implicados en la adaptación a la agricultura de BI/E, se proponen estrategias apropiadas que incorporan la selección asistida por marcadores (Marker Assisted Selection, MAS) a diferentes niveles.

Los nuevos conceptos sobre la salud de las plantas también pueden ayudar a investigar con nuevas metodologías las enfermedades en el contexto más amplio de la interacción del cultivo con su ambiente, considerando, por ejemplo, la interacción con los micro-organismos ([Döring et al. 2012](#); [Grover et al. 2011](#)). SOLIBAM analiza aspectos relacionados con el equilibrio entre la mejora genética y el manejo del cultivo explorando el impacto de los Hongos Micorrizas Arbusculares (HMA) en el incremento del rendimiento y la adaptación.

Aproximaciones a la mejora participativa

[Wolfe et al. \(2008\)](#) analizan las aproximaciones de mejora centralizada versus descentralizada. El término "descentralizada" es sinónimo de "in situ" o "en la granja" y se refiere a selección directa en el ambiente objetivo. La mejora descentralizada permite un mejor ajuste al ambiente objetivo que la mejora "centralizada" o "ex situ" en la estación de experimentación/investigación. La selección descentralizada es una metodología poderosa para adaptar los cultivos al medio ambiente objetivo y al sistema de cultivo. Sin embargo, la mejora de los cultivos basada en la selección descentralizada puede perder sus objetivos si no utiliza el conocimiento de los agricultores sobre los cultivos y el medio ambiente, ya que puede fallar en la adaptación de los cultivos a las necesidades y usos específicos de las comunidades de agricultores ([Vara Sánchez y Cuellar Padilla 2013](#)).

La mejora participativa (MP) (Participatory Plant Breeding, PPB) se puede definir como la participación de varios socios (por ejemplo, agricultores, comerciantes, consumidores, ganaderos, investigadores) en el proceso de selección y se basa en la complementariedad de las habilidades y conocimientos de cada socio ([Pimbert 2011](#); [Ceccarelli 2012](#)). La MP es una aproximación que implica a todos los actores de un sector determinado no sólo en el establecimiento de objetivos de mejora, sino también en la gestión del proceso de mejora y la creación de variedades. El método MP destaca la participación de los agricultores en el proceso de mejora, en lugar de la elección por los agricultores de variedades homogéneas desarrolladas bajo sistemas de producción y condiciones ambientales diferentes ([Ceccarelli 2012](#)). Algunos estudios han demostrado que el método de MP da lugar a cultivares de alto rendimiento, resistentes a enfermedades y con la calidad deseada al mismo tiempo que se mantiene un alto grado de adaptación a las fluctuaciones de las condiciones ambientales. ([Murphy et al. 2005](#)). En la Mejora y Manejo Participativo, el cultivo evoluciona bajo los efectos combinados de la selección natural y artificial, y tiene en cuenta las prácticas de manejo, las necesidades, las expectativas y las tradiciones de los agricultores, usuarios finales y las preferencias de los consumidores.

Un aspecto clave del proyecto SOLIBAM es el desarrollo de procedimientos eficientes para la MP basados en el análisis y discusión de las prácticas de los agricultores y en la evaluación de los efectos de MP sobre la evolución de la diversidad y el rendimiento dentro de un determinado contexto agro-ecológico. Además, se están analizando dos aspectos fundamentales de la MP: (i) la forma en la que la organización de la investigación participativa y la interacción entre los actores relevantes produce innovaciones en términos de las estrategias de mejora o de las estrategias de manejo de cultivos, y (ii) las características específicas de creación/gestión de la diversidad en el proceso de selección. Actualmente, se están llevando a cabo múltiples pruebas ambientales y de mejora participativa en sitios administrados por los agricultores en toda Europa bajo el proyecto SOLIBAM (ver mapa de todos los ensayos agrícolas en www.solibam.eu). Estos ensayos implican a los agricultores en los diversos pasos de evaluación de cultivares y darán lugar a la identificación y desarrollo de cultivares de cereales y legumi-

nosas que se comporten sistemáticamente mejor que las variedades locales en una amplia gama de condiciones de producción en Europa.

Desarrollo de vínculos entre la conservación de la biodiversidad y los servicios de producción de alimentos

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EME) reconoció la importancia crítica de los entornos agrarios en el suministro de productos para el sustento humano, el apoyo a la biodiversidad de especies silvestres y el mantenimiento de los servicios de los ecosistemas (MA 2005; también puede consultarse en español en <http://www.ecomilenio.es/informe-de-resultados-eme/1760>). Históricamente, la producción de alimentos se ha visto como el servicio de máxima prioridad suministrado por los agroecosistemas y se asocia al concepto de agricultura como áreas de “sacrificio” ecológico pero esto podría no ser ya válido en muchas regiones, porque los terrenos agrícolas proporcionan un hábitat esencial para muchas especies (Morales et al. 2013). Son necesarios esfuerzos dedicados a perseguir explícitamente la producción de alimentos y los objetivos de conservación de biodiversidad en forma conjunta para desarrollar situaciones de ganador-ganador (Tschamtkke et al. 2005; Scherr y McNeely 2008).

Con respecto al problema de la pérdida de biodiversidad, hay evidencia creciente de una disminución mundial de los polinizadores (Biesmeijer et al. 2006; Potts et al. 2010; Bommarco et al. 2011). Una reducción en la disponibilidad de polinizadores y de los cultivos dependientes de los polinizadores puede tener consecuencias que son difíciles de valorar. Mientras que la mayoría de las calorías provienen de cultivos que no requieren polinización animal, la eliminación de los cultivos que requieren polinización animal se traduciría en una dieta culturalmente empobrecida y nutricionalmente inadecuada debido a la pérdida de micronutrientes (Calderone 2012). Expertos (Allen-Wardell et al. 1998; Klein et al. 2007) en ecología de la polinización han confirmado que el manejo y la protección de los polinizadores silvestres es una cuestión de suma importancia para nuestro sistema de suministro de alimentos y alientan a los mejoradores actuales para que consideren los atributos florales de interés para los polinizadores al seleccionar las nuevas variedades. Los polinizadores deben considerarse como un componente clave de la conservación de los recursos genéticos y deben abordarse en las iniciativas de mejora genética de las plantas (FAO 2008).

Estrategias de mejora para satisfacer la demanda de cultivares favorables para los polinizadores. Las Leguminosas como ejemplo.

El papel de la polinización como insumo agrícola está ganando reconocimiento (FAO 2008). Las prácticas utilizadas en los sistemas de BI/E, tales como la prohibición o la reducción del uso de pesticidas y fertilizantes químicos inorgánicos y la protección de los hábitats no cultivados son particularmente beneficiosas para la fauna silvestre de las tierras de cultivo. Los sistemas agrícolas BI/E atraen más polinizadores en comparación con los campos de los sistemas de AC siendo beneficiosos para la población de abejas nativas (Morandin y Winston 2005, Greenleaf y Kremen 2006; Power y Stout 2011).

Se están aplicando estrategias dirigidas al mantenimiento de los polinizadores, como el manejo a lo largo de los bordes de las tierras de cultivo para proporcionar recursos alimenticios y sitios de anidamiento. Sin embargo, se ha documentado que la densidad de abejas está determinada no sólo por la proporción de hábitats seminaturales sino por la presencia en los paisajes agrarios de cultivos con floración masiva que ofrecen recompensas (Rao y Stephen 2010). Las leguminosas cultivadas se consideran importantes en el mantenimiento de la fauna nativa de abejorros (Willians 1994). Asimismo, en Europa, la disminución de taxones clave de polinizadores podría revertirse por la simple introducción de más legu-

minosas en las rotaciones de los cultivos (Helenius y Stoddard 2007). En paralelo, la mejora de leguminosas para una agricultura BI/E está ligada al desarrollo de servicios no alimentarios, como los servicios de regulación y exige un cambio en el énfasis de los programas de mejora desde los servicios de producción de alimentos casi en exclusiva hacia un especial hincapié en los de regulación. Un gran número de diversas abejas visitan las leguminosas (Delaplane y Mayer, 2000) (Fig. 1). Los lugares de forrajeo y sitios de anidamiento para las abejas son algunos de los servicios proporcionados por las leguminosas en la agricultura de BI/E. La provisión de recursos florales en el propio cultivo para el sostenimiento de las poblaciones de insectos polinizadores podría ser una estrategia prometedora para mejorar los servicios de regulación que prestan las leguminosas (Suso et al. 2008; Palmer et al. 2009). Por lo tanto, nos enfrentamos a una situación en la que es necesario el desarrollo de cultivares favorables para los polinizadores. Debe considerarse el papel de las abejas polinizadoras como agentes de polinización y/o cruzamiento. Los polinizadores ayudan al incremento de semilla y la auto-polinización, pero más importante aún a incrementar la polinización cruzada (Richards 2001). Las abejas polinizadoras como agentes de polinización cruzada pueden utilizarse para mantener y reincorporar la diversidad genética. Las abejas polinizadoras, moviendo el polen de una planta a otra, aumentan el nivel de heterocigosis y de la expresión de la heterosis potencial y deben considerarse utensilios poderosos en las estrategias de mejora.

La optimización de la interfase cultivo-polinizador sería la clave para el establecimiento de estrategias de mejora que aumenten el rendimiento y su estabilidad mediada por la heterosis y asistida por las abejas, facilitando así el desarrollo de cultivares favorables para los polinizadores que fomentan su conservación. Los beneficios de abordar la mejora de leguminosas mediante la aplicación del análisis de la interfase planta-polinizador son tanto directos (producción de semillas y aumento de la estabilidad del rendimiento) como indirectos (conservación de la biodiversidad y los insectos beneficiosos).

En este marco, el análisis de la interfase planta-polinizador, esto es, de las relaciones funcionales de las plantas y sus vectores de polen, puede ayudar a identificar las sinergias entre la mejora de los cultivos y la conservación de los polinizadores. La contribución del mejorador incluiría: 1) estrategias de mejora de la eficiencia en el uso de los polinizadores para el incremento de la alogamia mediada por los insectos, y 2) el desarrollo cultivares favorables para los polinizadores apropiados para los sistemas de BI/E. La interfase planta-polinizador, es particularmente importante en el desarrollo de variedades sintéticas o en la mejora de poblaciones en condiciones de polinización abierta diseñadas para explotar la heterosis que manifiestan el rendimiento y su estabilidad así como la resistencia a estreses (Suso y Maalouf 2010; Palmer et al. 2011).



Figura 1. Visita de la abeja *Eucera numida* a una flor de un cultivo de habas. Autor J.L. Uberta

Estas variedades se crean mediante la hibridación de varios genotipos seleccionados. El desarrollo de cultivares que expresan efectos heteróticos y heterocigosis suficiente en el cultivar para mantener los niveles deseados de expresión híbrida requiere niveles elevados de cruzamiento entre las líneas parentales seleccionadas. Por lo tanto, para mantener la alogamia bajo condiciones de polinización abierta, se requiere el servicio de los vectores del polen. Considerando que la polinización cruzada depende en gran medida de cómo los caracteres florales funcionales afectan al comportamiento de los polinizadores, la polinización cruzada puede promoverse de manera más eficiente mediante la introducción en el propio cultivo de caracteres de descubrimiento, atracción, adaptación mecánica y de recompensa al polinizador apropiados. Esto es, desarrollar un cultivar favorable para los polinizadores. La identificación de los caracteres florales que optimizan la interacción planta-polinizador ayudará a definir el ideotipo más adecuado con capacidad aumentada para la polinización cruzada (Susó et al. 2005). Consecuentemente, la formulación de estrategias basadas en la selección de caracteres relevantes para los polinizadores, además de los convencionales relacionados con el comportamiento agronómico, ayudará a la conservación de los polinizadores. Dentro del sistema de BI/E, los servicios que proporcionan los polinizadores y los servicios que ofrecen los cultivos de leguminosas son interdependientes. La introducción de los correspondientes caracteres florales en el cultivo no sólo fomentará alto rendimiento, su estabilidad y la resiliencia sino que, teniendo en cuenta las necesidades de las abejas polinizadoras, ayudará a mantener la biodiversidad general y, por lo tanto, indirectamente beneficiará a los agricultores por su contribución al desarrollo de la “economía verde”.

Agradecimientos

Este artículo se ha realizado en el marco del proyecto del 7PM de la Unión Europea: SOLIBAM (Strategies for Organic and Low-input Integrated Breeding and Management; www.solibam.eu)

Referencias

- Allen-Wardell, G., Bernhardt, P., Bitner, R., Burquez, A., Buchmann, S., Cane, J., Cox, P.A., Dalton, V., Feinsinger, P., Ingram, M., Inouye, D., Jones, C.E., Kennedy, K., Kevan, P., Koopowitz, H., Medellín, R., Medellín-Morales, S., Nabhan, G.P., Pavlik, B., Tepedino, V., Torchio, P., Walker, S. 1998. The potential consequences of pollinator declines on the conservation of biodiversity and stability of food crop yields. *Conservation Biology* 12:8-17.
- Biesmeijer, J.C., Roberts, S.P.M., Reemer, M., Ohlemüller, R., Edwards, M., Peeters, T., Schaffers, A.P., Potts, S.G., Kleukers, R., Thomas, C.D., Settele, J., Kunin, W.E. 2006. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science* 313:351-354.
- Bommarco, R., Lundin, O., Smith, H.G., Rundlöf, M. 2011. Drastic historic shifts in bumble-bee community composition in Sweden. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279: 309-315.
- Calderone, N.W. 2012. Insect Pollinated Crops, Insect Pollinators and US Agriculture: Trend Analysis of Aggregate Data for the Period 1992–2009. *PLoS ONE* 7(5): e37235. doi:10.1371/journal.pone.0037235
- Ceccarelli, S. 1989. Wide adaptation: How wide? *Euphytica* 40:197-205.
- Ceccarelli, S. 2012. *Plant breeding with farmers*. A technical manual. ICARDA, Aleppo, Syria.
- Dawson, J.C., Goldringer, I. 2012. Breeding for Genetically Diverse Populations: Variety Mixtures and Evolutionary Populations, En: Lammerts van Bueren E.T., Myers J.R. (eds.), *Organic Crop Breeding*, pp.77-98, John Wiley and Sons, New Delhi, India.
- Delaplane, K.S., Mayer, D.F. 2000. *Crop pollination by bees*. CABI Publishing, New York, United States of America.
- Döring, T.F., Pautasso, M., Finckh, M.R., and Wolfe, M.S. 2012. Concepts of plant health – reviewing and challenging the foundations of plant protection. *Plant Pathology* 61:1-15.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2006. *The state of food insecurity in the world*. FAO, Rome, Italy.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2008. *A contribution to the international initiative for the conservation and sustainable use of pollinators: rapid assessment of pollinator's status conference of the parties to the convention on Biological diversity*. FAO, Rome, Italy.
- Greenleaf, S.S., Kremen, C. 2006. Wild bees enhance honey bees pollination of hybrid sunflower. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103:13890-13895.
- Grover, M., Ali, S.Z., Sandhya, V., Rasul, A., Venkateswarlu, B. 2011. Role of microorganisms in adaptation of agriculture crops to abiotic stresses. *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 27:1231-1240.
- Hausmann, B.I.G., Parzies, H.K., Presterl, T., Susic, Z., Miedaner, T. 2004. Plant genetic resources in crop improvement. *Plant Genetic Resources* 2:3-21.
- Hausmann, B.I.G., Fred Rattunde, H., Weltzien-Rattunde, E., Traoré, P.S.C., vom Brocke, K., Parzies, H.K. 2012. Breeding Strategies for Adaptation of Pearl Millet and Sorghum to Climate Variability and Change in West Africa. *Journal of Agronomy and Crop Science* 198:327-339.
- Helenius, J., Stoddard, F.L. 2007. Agro-ecosystem services from increased use and novel applications of legumes. Integrating legume biology for sustainable agriculture. Book of Abstracts. *6th European Conference on grain legumes*, Lisbon, Portugal.
- Herder, G.D., Van Isterdael, G., Beeckman, T., De Smet, I. 2010. The roots of a new green revolution. *Trends in Plant Science* 15:600-607.
- King, K., Lively, C. 2012. Does genetic diversity limit disease spread in natural host populations? *Heredity* 109:199-203.
- Klein, A.M., Vaissiere, B.E., Cane, J.H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Tscharntke, T. 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 274:303-313.
- Kremen, C. 2005. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology Letters* 8:468-479.
- Lammerts van Bueren, E.T., Struik, P.C., Jacobsen, E. 2002. Ecological concepts in organic farming and their consequences for an organic crop ideotype. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 50:1-26.
- Lammerts van Bueren, E.T., Struik, P.C., Tiemens-Hulscher, M., Jacobsen, E. 2003. Concepts of Intrinsic Value and Integrity of Plants in Organic Plant Breeding and Propagation. *Crop Science* 43:1922-1929.
- Lammerts van Bueren, E.T., Backes, G., de Vriend, H., Østergård, H. 2010. The role of molecular markers and marker assisted selection in breeding for organic agriculture. *Euphytica* 175:51-64.
- Millennium Ecosystem Assessment (MA) 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. World Health Organization, World Resources Institute, Washington DC, United States of America
- Morales, M.B., Guerrero, I., Oñate, J.J. 2013. Efectos de la gestión agraria en las aves de los cultivos cerealistas: un proceso multiescalar. *Ecosistemas* 22(1):25-29.
- Morandin, L.A., Winston, M.L. 2005. Wild bee abundance and seed production in conventional, organic, and genetically modified canola. *Ecological Applications* 15:871-881.
- Murphy, K., Lammer, D., Lyon, S.R., Carter, B., Jones, S.S. 2005. Breeding for organic and low-input farming systems: An evolutionary-participatory breeding method for inbred cereal grains. *Renewable Agriculture and Food Systems* 20:48-55.
- Murphy, K.M., Campbell, K.G., Lyon, S.R., Jones, S.S. 2007. Evidence of varietal adaptation to organic farming systems. *Field Crops Research* 102:172-177.
- Newton, A.C., Begg, G.S., Swanston, J.S. 2009. Deployment of diversity for enhanced crop function. *Annals of Applied Biology* 154:309-322.
- Palmer, R., Perez, P., Ortiz-Perez, E., Maalouf, F., Suso, M. 2009. The role of crop-pollinator relationships in breeding for pollinator-friendly legumes: from a breeding perspective. *Euphytica* 170:35-52.
- Palmer, R.G., J. Gai, Dalvi, V.A., Suso, M.J., 2011. Male Sterility and Hybrid Production Technology. En: Pratap, A., Kumar, J. (eds.), *Biology and Breeding of Food Legumes*, pp. 193-207, CABI International, Oxfordshire, United Kingdom.
- Phillips, S.L., Wolfe, M.S. 2005. Evolutionary plant breeding for low input systems. *Journal of Agricultural Science* 143:245-254.
- Pimbert, M. 2011. Participatory Research and On-Farm Management of Agricultural Biodiversity in Europe. International Institute for Environment and Development.
- Power, E.F., Stout, J.C. 2011. Organic dairy farming: impacts on insect-flower interaction networks and pollination. *Journal of Applied Ecology* 48:561-569.

- Potts, S.G., Biesmeijer, J.C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., Kunin, W.E. 2010. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecology and Evolution* 25:345-354.
- Rao, S., Stephen, W.P. 2010. Abundance and Diversity of Native Bumble Bees Associated with Agricultural Crops: The Willamette Valley Experience. *Psyche*, doi:10.1155/2010/354072
- Richards, A.J. 2001. Does low biodiversity resulting from modern agricultural practice affect crop pollination and yield? *Annals of Botany* 88:165-172.
- Scherr, S.J., McNeely, J.A. 2008. Biodiversity conservation and agricultural sustainability: towards a new paradigm of ecoagriculture landscapes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363:477-494.
- Seufert, V., Ramankutty, N., Foley, J.A. 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 485:229-232.
- Simmonds, N.W. 1993. Introgression and incorporation. Strategies for the use of crop genetic resources. *Biological Reviews* 68:539-562.
- Suso, M.J., Harder, L.D., Moreno, M.T., Maalouf, F. 2005. New strategies for increasing heterozygosity in crops: *Vicia faba* mating system as a study case. *Euphytica* 143:51-65.
- Suso, M.J., Nadal, S., Roman, B., Gilsanz, S. 2008. *Vicia faba* germplasm multiplication - floral traits associated with pollen-mediated gene flow under diverse between-plot isolation strategies. *Annals of Applied Biology* 152:201-208.
- Suso, M.J., Maalouf, F. 2010. Direct and correlated responses to upward and downward selection for outcrossing in *Vicia faba*. *Field Crops Research* 116:116-126.
- Tscharntke, T., Klein, A.M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., Thies, C. 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity - ecosystem service management. *Ecology Letters* 8:857-874.
- Vara Sánchez, I., Cuellar Padilla, C. 2013. Biodiversidad cultivada: una cuestión de coevolución y transdisciplinariedad. *Ecosistemas* 22(1):5-9.
- Williams, I. 1994. Bees for pollination: conclusions and recommendations of the EC workshop on Bees for pollination help in Brussels 2-3 March 1992. *Bee World* 75:46-48.
- Wolfe, M.S. 2000. Crop strength through diversity. *Nature* 406:681-682.
- Wolfe M.S., Baresel, J.P., Desclaux, D., Goldringer, I., Hoad, S., Kovacs, G., Löschenberger, F., Miedaner, T., Østergård, H., Lammerts van Bueren, E.T. 2008. Developments in breeding cereals for organic agriculture. *Euphytica* 163:323-346.