

Microorganismos del suelo y bioproductos en la agricultura: una mirada a los cultivos de maíz y frijol en México^φ

Roberto Rafael Ruiz-Santiago¹, Alexis Lamz-Piedra^{2*},
Jaime Martínez-Castillo¹, Carlos Horacio Acosta-Muñiz²

Introducción

En México, la agricultura incluye cultivos fundamentales para la seguridad alimentaria como parte de una herencia biocultural compleja. Una trilogía milenaria, denominada Milpa (Sistema agrícola tradicional que asocia maíz, frijol y calabaza) que integra al maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus* spp.) y calabaza (*Cucurbita* spp.), representa un sistema agroecológico que integra componentes biológicos, culturales y agrícolas. En este sistema no se percibe el papel crucial que desempeñan millones de microorganismos (*e.g.*, bacterias, hongos y otras formas de vida microscópica) en el suelo.

Actualmente, la ciencia moderna ya reconoce el valor de estos aliados invisibles y sus vínculos con las plantas. La aplicación de bioproductos derivados de microorganismos hacia el suelo promueve el crecimiento de la microbiota, el desarrollo vegetal y produce cultivos sanos y alimentos más saludables (Ortiz y Sansinenea 2022). Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (*e.g.*, bacterias fijadoras de nitrógeno, hongos micorrízicos solubilizadores de fósforo, entre otros) forman una red ecológica invisible, pero activa y sin funcionar como fertilizantes directos ni pesticidas. Estos microorganismos mejoran el

^φ ¹Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, 97205 Mérida, Yucatán, ²Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo AC. Coordinación Cuauhtémoc. Av. Río Conchos s/n, Parque Industrial Cuauhtémoc, C.P. 31570, Cuauhtémoc, Chihuahua, México. Autor de correspondencia: alexis.lamz@ciad.mx
DOI: <http://doi.org/10.56369/>



crecimiento radicular, la absorción de nutrientes, y la tolerancia a condiciones adversas, como sequía o salinidad (Bonatelli *et al.* 2021; Ortiz y Sansinenea 2022).

Hoy en día, una de las problemáticas principales en la producción agrícola a nivel mundial es el uso excesivo de fertilizantes químicos derivados del Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) (Escalante 2015). Si bien estos insumos son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, su aplicación excesiva e ineficiente genera una serie de problemas ecológicos y de salud pública, como la contaminación del agua (*e.g.* el exceso de nitratos y fosfatos no absorbidos por los cultivos se filtra hacia el manto freático), la degradación del suelo y su actividad biológica (*e.g.* acidifican o alcalinizan el suelo, reducen su materia orgánica, disminuyen su fertilidad natural a largo plazo, afectan la biodiversidad microbiana), y la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

La fabricación de fertilizantes es energéticamente intensiva y una fuente de GEI, donde el nitrógeno en el suelo puede transformarse en óxido nitroso (N₂O), un gas de efecto invernadero casi 300 veces más potente que el dióxido de carbono (CO₂). Este escenario contribuye al cambio climático y a la pérdida de biodiversidad. Además, los cambios químicos en suelo y agua alteran los ecosistemas e impactan la flora y fauna local, contribuyendo con ello a la disminución de la biodiversidad (Altieri 1999).

En el contexto agrícola actual, es urgente adoptar estrategias para producir alimentos de manera sostenible y equilibrar las necesidades nutricionales de los cultivos con la protección ambiental. Esto implica transitar hacia prácticas más eficientes y amigables con la naturaleza, como la agricultura de precisión y el fomento de los biofertilizantes (*i.e.*, producto que contiene microorganismos vivos, como bacterias y hongos, que se aplican al suelo o a las plantas para mejorar su nutrición y promover su crecimiento). El objetivo de este trabajo es analizar el papel del uso de los microorganismos como alternativa sostenible en la agricultura y destacar sus beneficios en el sistema milpa e importancia para la sostenibilidad.

“La aplicación de bioproductos derivados de microorganismos hacia el suelo promueve el crecimiento de la microbiota y el desarrollo vegetal y produce cultivos sanos y alimentos más saludables.”

Contexto global del uso de fertilizantes químicos y necesidad del uso de bioproductos

A nivel mundial, la producción agrícola refleja una dependencia por el uso de fertilizantes químicos, especialmente nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). Sin embargo, el consumo global de fertilizantes ha mostrado fluctuaciones en los últimos años. Entre 2015 y 2018, se registró una disminución considerable de 6.65 millones hacia 5.75 millones de toneladas.

Posteriormente, a partir de 2019 el consumo alcanzó cerca de 5.95 millones de toneladas en 2022 (Fig. 1a) y el uso promedio (2015-2022) de diez tipos principales de fertilizantes en la agricultura ha sido considerable (Fig. 1b).

Las soluciones de nitrato de amonio (UAN) dominan el consumo (>10M ton), seguidas por la Urea pura (>6M ton). Los fertilizantes NPK, Cloruro de potasio y Amoníaco anhidro también son comunes (>3M ton). El desafío actual es urgente y demanda la producción de alimentos de manera sostenible para equilibrar las necesidades nutricionales de los cultivos y ayudar a la protección ambiental (FAO 2025). Esto implica transitar hacia prácticas más eficientes y ecológicas, como la agricultura de precisión y el fomento de los biofertilizantes.

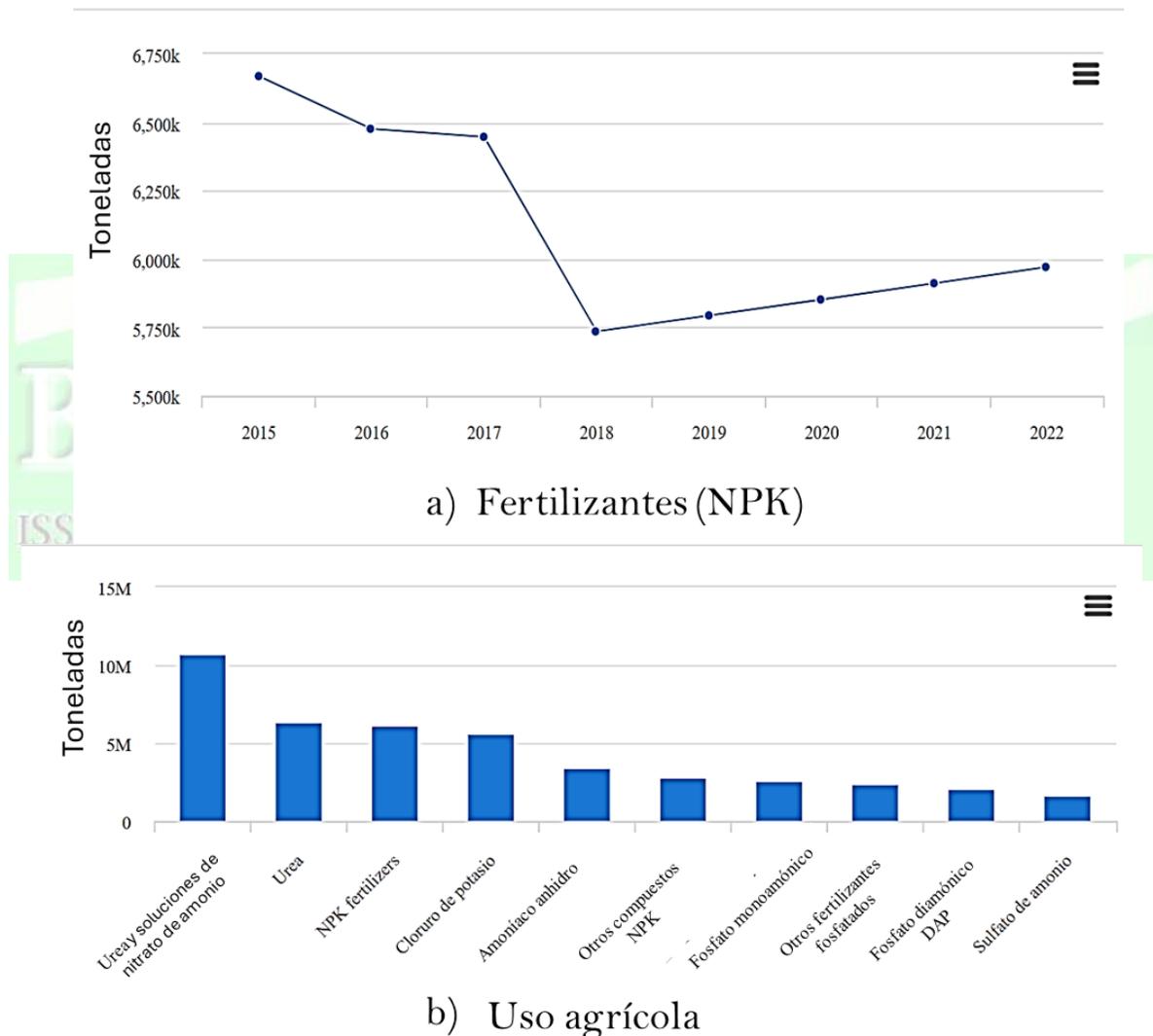


Figura 1. a) Tendencias globales del uso de fertilizantes químicos (2015-2024), b) Uso agrícola promedio de los diez tipos principales de fertilizantes en toneladas (2015-2022) (FAO 2025).

En la actualidad, India lidera la investigación científica del uso de microorganismos como fuente de biofertilizantes, con una actividad considerablemente superior a otras naciones (Fig. 2a). En este sentido, Irán, China, Brasil, Egipto, México, Estados Unidos, España, Indonesia y Pakistán completan la lista con mayor producción científica sobre esta temática. Esto subraya la importancia creciente de la investigación científica en biofertilizantes a nivel global, con una notable concentración de esfuerzos en países del sur de Asia y economías emergentes. Además, el aumento en el número de publicaciones científicas sobre el uso de microorganismos (Fig.2b) representa una tendencia positiva y un indicador clave en la investigación agrícola.

Este crecimiento exponencial indica el reconocimiento de los microorganismos como componentes esenciales para el desarrollo de estrategias de fertilización más amigables con el ambiente. El incremento de estudios es crucial para comprender y aprovechar el potencial de los biofertilizantes, esto promueve una agricultura más eficiente en el uso de recursos con un menor impacto ambiental. Este avance científico es fundamental para una transición hacia sistemas de producción de alimentos más resilientes y ecológicos (FAO 2025).

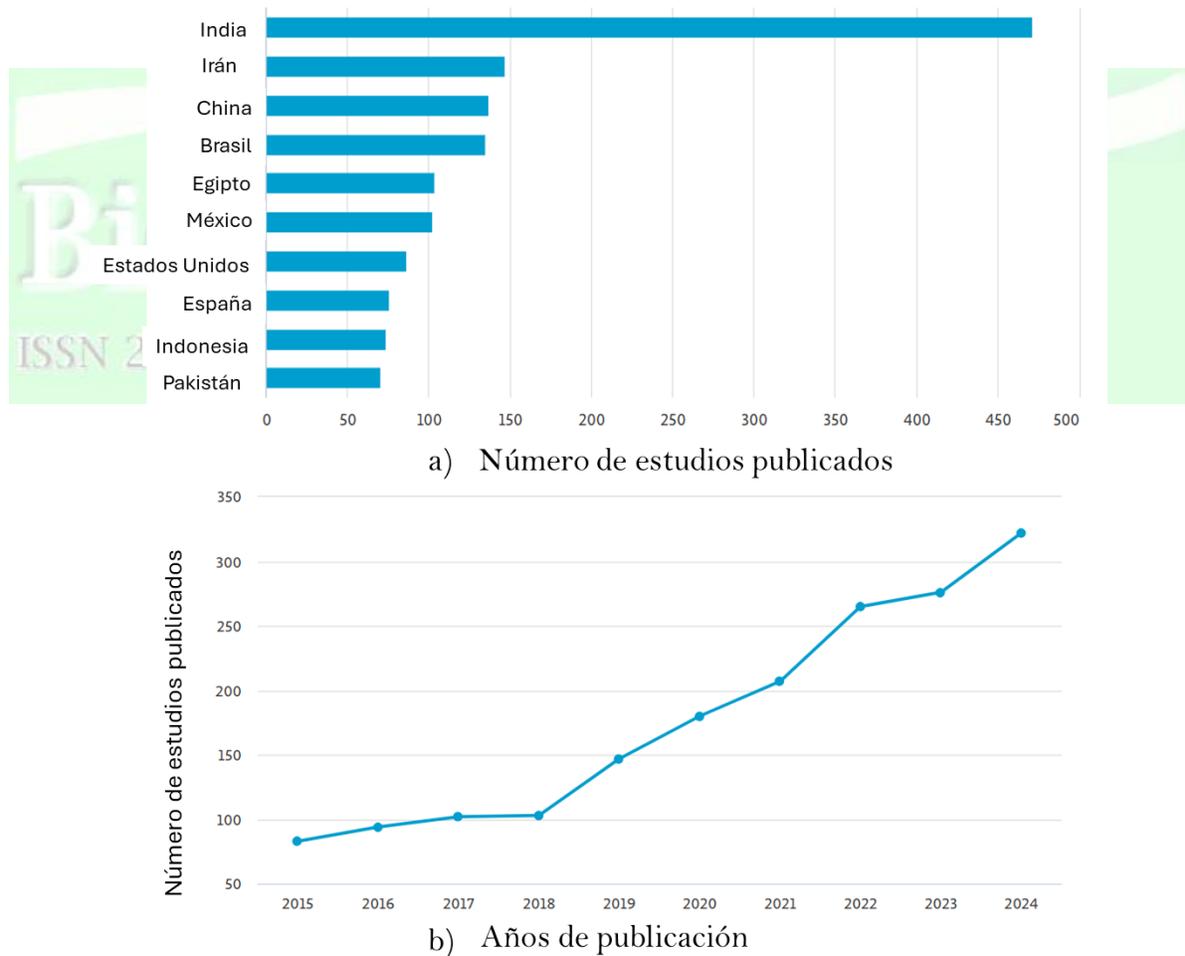


Figura 2. a) Países con publicaciones científicas sobre el uso de microorganismos benéficos para la agricultura (2015–2024), b) Tendencia anual de publicaciones científicas sobre el uso de microorganismos benéficos para la agricultura (2015–2024) (FAO 2025).

“En la actualidad, India lidera la investigación científica del uso de microorganismos como fuente de biofertilizantes, con una actividad considerablemente superior a otras naciones.”

Funciones clave de microorganismos en escenarios de producción de maíz y frijol

En la Milpa, una gran variedad de microorganismos contribuye al crecimiento, nutrición y protección de cultivos. Por ejemplo, bacterias del género *Bacillus* liberan hormonas vegetales (*e.g.* auxinas, giberelinas, citoquininas) que estimulan el desarrollo de raíces y tallos, mientras que *Rhizobium* y *Pseudomonas* producen compuestos similares que mejoran la germinación y el vigor de las plántulas.

Entre los hongos, *Trichoderma virens* y *T. harzianum* secretan moléculas que promueven la formación de raíces adicionales, *Penicillium* libera giberelinas para favorecer la floración y *Fusarium oxysporum* emite volátiles que también estimulan el crecimiento. Asimismo, bacterias como *Azotobacter*, *Azospirillum* y *Bradyrhizobium* fijan nitrógeno del aire, reduciendo la necesidad de fertilizantes, mientras que *Enterobacter* y *Serratia* transforman fósforo inaccesible en formas que las plantas pueden absorber, y *Streptomyces* ayuda a movilizar el hierro del suelo.

Los hongos, como *Aspergillus niger* solubiliza roca fosfórica con ácidos orgánicos y *Phoma* mejora la disponibilidad de nitrógeno. Para controlar plagas y enfermedades, *Bacillus licheniformis*, *Enterobacter* y *Pseudomonas* reducen distintos patógenos bacterianos y fúngicos, y *Trichoderma harzianum* refuerza la defensa de la planta contra hongos agresores como *Colletotrichum* y *Fusarium*. De este modo, estos microorganismos funcionan como aliados clave para una milpa más sana y productiva (Bender 2016; Watson-Guido y Rivera-Méndez, 2025). Estos casos se extienden a diferentes sistemas productivos, pero son más relevantes en aquellos donde se practica una agricultura de subsistencia y los bajos suministros de insumos promueven una mayor eficiencia de los microorganismos.

Algunos tipos de bioestimulantes (*i.e.*, sustancia o microorganismo que, aplicado a plantas o suelos, estimula procesos biológicos naturales para mejorar la absorción de nutrientes, el crecimiento, y la tolerancia a condiciones adversas, como sequía o altas temperaturas) en la agricultura ocasionan efectos positivos sobre los cultivos de maíz y frijol, así como sobre el ecosistema edáfico en el contexto de los cultivos de frijol y maíz (Tabla 1) (IFA 2020). Estos efectos son clave para comprender la sostenibilidad de los cultivos más allá del rendimiento inmediato y el papel de los microorganismos en el equilibrio de los agroecosistemas. Sin embargo, el impacto real de los bioestimulantes puede variar según las condiciones edafoclimáticas (*i.e.*, condiciones o características combinadas del suelo -edáfico- y el clima de una zona geográfica), las prácticas agrícolas y las interacciones entre especies

microbianas y vegetales. Por ello, se destacan también los consorcios microbianos y las sustancias orgánicas como herramientas promisorias para sistemas agroecológicos diversificados como el sistema Milpa.

“En la Milpa, una gran variedad de microorganismos contribuye al crecimiento, nutrición y protección de cultivos.”

Tabla 1. Efectos funcionales de bioestimulantes en cultivos de maíz y frijol, y en la salud del suelo en sistemas tipo milpa.

Tipo de bioestimulante	Origen / Componente principal	Maíz	Frijol	Observaciones clave
Microbianos	<i>Rhizobium</i> , <i>Azospirillum</i> , hongos micorrízicos (<i>Glomus spp.</i>)	+	+	Aumentan fijación de N (en frijol), absorción de P y tolerancia al estrés.
Sustancias húmicas	Ácidos húmicos y fúlvicos de materia orgánica	+	+	Mejoran estructura, retención de agua y actividad enzimática.
Extractos de algas y plantas	<i>Ascophyllum nodosum</i> , plantas superiores	+	0	Estimulan crecimiento y calidad; menos estudiados en leguminosas.
Péptidos y aminoácidos	Hidrolizados proteicos (plantas, animales)	+	0	Activan rutas metabólicas; posibles beneficios bajo estrés.
Consortios microbianos complejos	Mezclas vivas, compostados, fermentados	+	+	Sinergias múltiples.
Inorgánicos no esenciales	Silicio, cobalto, selenio (no nutrientes universales)	0	0	Efecto limitado; pueden ser útiles en diferentes escenarios. Requieren cuidados especiales.

Contribución positiva (+); Contribución neutra (0); Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K).

Casos de estudio

En Cuba, Martínez-González *et al.* (2016) evaluaron el efecto de los biofertilizantes y bioestimulantes naturales en el cultivo del frijol común (*P. vulgaris*) y encontraron que Azofert® (biofertilizante a base de *Rhizobium*) en combinación con productos como Biobras-16 (regulador del crecimiento) o Quitomax (bioestimulante a base de quitosano) mejoran el crecimiento de las plantas, la formación de nódulos y el contenido de nitrógeno en las hojas. Estos hallazgos destacan el valor de los bioinsumos como herramientas agroecológicas para reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos y promover una producción agrícola sostenible. Plantas de frijol fertilizadas con N (Urea), en contraste con plantas del mismo

cultivo inoculadas con rizobacterias a partir del biofertilizante Azofert®, mostraron una mejora notable con mayor altura, más hojas y un área foliar más amplia en comparación con aquellas sin el inoculante (Fig. 3).



Figura 3. Parcelas experimentales de frijol comparando la aplicación de Fertilizante N (izquierda) frente a la inoculación con rizobacterias Azofert® (derecha).

En México, Torres-Cab *et al.* (2022), evaluaron experimental la influencia de hongos micorrízicos arbusculares (HMAs) en el crecimiento del cultivo de maíz con dos productos comerciales: Micorriza INIFAP® y Glumix®. Estos productos aumentaron la biomasa aérea y radicular, especialmente Glumix®, que también mejoró el contenido de fósforo en las hojas. Aunque la altura de las plantas no varió drásticamente, si se observó un desarrollo más vigoroso. Estos resultados confirman que los HMAs pueden fortalecer el crecimiento vegetal al mejorar la nutrición y favorecer la asignación de nutrientes lo cual es clave en sistemas agrícolas sostenibles. Las plantas de maíz con micorrizas y materia orgánica (MO) mostraron mejorías en la coloración, lo que puede asociarse con un mayor contenido de pigmentos fotosintéticos (Fig. 4).



Figura 4. Parcelas de maíz que muestra el efecto de las micorrizas con baja materia orgánica (MO) (izquierda) y maíz con mayor contenido de micorrizas y materia orgánica (MO+) (derecha).

Conclusiones

Los microorganismos del suelo (*i.e.*, bacterias y hongos benéficos) cumplen funciones para la nutrición y salud de cultivos de maíz y frijol. Su uso como bioestimulantes es una alternativa frente al exceso de fertilizantes químicos que han generado impactos negativos en el ambiente y la fertilidad del suelo. La creciente evidencia científica respalda su eficacia en mejorar la absorción de nutrientes y la tolerancia al estrés, lo cual contribuye a una agricultura más eficiente y resiliente. Integrar microorganismos en los sistemas tradicionales de cultivo no solo es una estrategia viable, sino necesaria para avanzar hacia modelos de producción agroecológicos sostenibles.

Referencias

- Altieri MA. 1999. Agroecología: bases científicas para una agricultura sustentable. Editorial Nordan-Comunidad. Montevideo. 338 pp.
- Bender SF, Wagg C y van der Heijden MGA. 2016. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in Ecology and Evolution* 31(6):440-452.
- Bonatelli ML, Lacerda-Júnior GV, Bueno dos Reis JF, Fernandes-Júnior PI, Soares MI y Quecine MC. 2021. Beneficial plant-associated microorganisms from semiarid regions and seasonally dry environments: a review. *Frontiers in Microbiology* 11:553223.
- Escalante AE, Rebolledo-Gómez M, Benítez M, Travisano M (2015) Ecological perspectives on synthetic biology: insights from microbial population biology. *Front Microbiol* 6:143
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2025. The third report on the state of the world's plant genetic resources for food and agriculture. FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments. Roma. 374 pp.
- IFA (International Fertilizer Association) (2020). *Public Summary - Medium-Term Fertilizer Outlook 2020-2025*. *IFASTAT Databases*. <https://www.ifastat.org/>

- Martínez-González L, Reyes-Guerrero Y, Falcón-Rodríguez A, Nápoles-García MC y Núñez-Vázquez MC. 2016. Efecto de productos bioactivos en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) biofertilizadas. *Cultivos Tropicales* 37(3):165-171.
- Ortiz A y Sansinenea E. 2022. The role of beneficial microorganisms in soil quality and plant health. *Sustainability* 14(9):5358.
- Torres-Cab WJ, Ruiz-Sánchez E, Reyes-Ramírez A, Lugo-García GA, Tucuch-Haas JI y Pierre JF. 2022. Field evaluation of microbial insecticides against fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Smith) and corn earworm, *Helicoverpa zea* (Boddie) (Lepidoptera: Noctuidae), in maize. *Archives of Phytopathology and Plant Protection* 55(14):1713-1723.
- Watson-Guido, W. y Rivera-Méndez, W. (2025). Communication in symbiotic associations: mechanisms between arbuscular mycorrhizal fungi, plants and soil organisms. *Agronomía Mesoamericana* 36(1):57100.

Ruíz-Santiago RR, Lamz-Piedra A, Martínez-Castillo J, Acosta-Muñiz CH. 2025. Microorganismos del suelo y bioproductos en la agricultura: una mirada a los cultivos de maíz y frijol en México. *Bioagrociencias* 18 (2): 90-98.
DOI: <http://doi.org/10.56369/BAC.6420>

Bioagrociencias

ISSN 2007 - 431 X