





Artículo de divulgación

Biotecnología para la resiliencia en el gradiente urbano-rural

Biotechnology for resilience in the urban-rural gradient

Ángel Roberto Martínez-Campos ^{1,*}, Lizbeth Carrillo-Arizmendi ^{1,2}, Mariana Carolyn Cruz-Mendoza ³, Gabriela González-Vazquez ³

¹ Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, Universidad Autónoma del Estado de México. El Cerrillo Piedras Blancas, 50295, Estado de México, México.

² Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México. El Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México, 50295, Estado de México.

³ Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo. Carretera Federal Valle de Bravo, Km. 30, ejido San Antonio Laguna, Valle de Bravo, 51200, Estado de México, México.

* Autor para correspondencia: armartinezc@uaemex.mx

Recibido:

1/04/2026

Aceptado:

27/04/2026

Publicado:

8/05/2026

RESUMEN

El gradiente urbano-rural constituye un sistema socioecológico continuo y dinámico, donde los procesos naturales, productivos y urbanos se entrelazan de manera estrecha, generando efectos directos sobre la salud humana, la seguridad alimentaria y la biodiversidad. Las presiones derivadas de la urbanización, la intensificación agrícola y el cambio climático ponen en evidencia la necesidad de enfoques integrales que fortalezcan la resiliencia de los territorios sin fragmentar sus componentes sociales y ambientales. En este escenario, la biotecnología se presenta como una herramienta estratégica capaz de articular soluciones diferenciadas a lo largo del gradiente, siempre que se aplique desde una visión ética, participativa y sistémica. Su potencial no radica únicamente en la innovación tecnológica, sino en la capacidad de integrarse con el conocimiento local y responder a las necesidades específicas de cada contexto, desde espacios urbanos densamente poblados hasta paisajes rurales y periurbanos. Las aplicaciones analizadas —que abarcan sistemas productivos tradicionales regenerativos, prácticas agrícolas resilientes, bioinsumos locales y estrategias de conservación genética y ecológica— muestran que la biotecnología puede fortalecer simultáneamente la seguridad alimentaria, la salud ambiental y la estabilidad de los medios de vida. Estas experiencias demuestran que no existe una solución única, sino un conjunto de herramientas adaptables que permiten construir respuestas acordes con la diversidad social y ecológica del gradiente urbano-rural. De esta manera, la biotecnología, concebida como un puente entre innovación científica y saber comunitario, se consolida como un componente clave para promover territorios más justos, funcionales y regenerativos, capaces de sostener el bienestar humano sin comprometer la integridad de los ecosistemas que los sustentan.

Palabras clave: biología molecular, biorremediación, contaminación difusa, degradación de suelos, economía circular, edición genética.



ABSTRACT

The urban-rural gradient constitutes a continuous and dynamic socioecological system, in which natural, productive, and urban processes are closely intertwined, generating direct effects on human health, food security, and biodiversity. The pressures arising from urbanization, agricultural intensification, and climate change highlight the need for integrated approaches that strengthen territorial resilience without fragmenting their social and environmental components. In this context, biotechnology emerged as a strategic tool capable of articulating differentiated solutions along the gradient, provided that it is applied from an ethical, participatory, and systemic perspective. Its potential lies not only in technological innovation but also in its capacity to integrate local knowledge and respond to the specific needs of each context, from densely populated urban areas to rural and peri-urban landscapes. The applications analyzed—including generative traditional regenerative production systems, resilient agricultural practices, local bioinputs, and genetic and ecological conservation strategies—demonstrate that biotechnology can simultaneously strengthen food security, environmental health, and livelihood stability. These experiences show that there is no single solution, but rather a set of adaptable tools that enable context-specific responses aligned with the social and ecological diversity of the urban-rural gradient. In this way, biotechnology, conceived as a bridge between scientific innovation and community knowledge, is consolidated as a key for promoting more just, functional, and regenerative territories capable of sustaining human well-being without compromising the integrity of the ecosystems that support them.

Keywords: bioremediation, circular economy, diffuse pollution, gene editing, molecular biology, soil degradation.

INTRODUCCIÓN

El gradiente urbano-rural se expresa como un continuo que conecta ciudades, suburbios, zonas agrícolas y bosques periféricos. Más que un cambio de paisaje constituye un sistema socioecológico dinámico donde circulan materiales, energía y organismos, generando redes de interdependencia entre procesos humanos y naturales (Grimm et al., 2008). Estos socioecosistemas proveen servicios esenciales —polinización, regulación microclimática, purificación del aire y agua, y espacios de bienestar—, pero su fragilidad frente a la presión antrópica exige enfoques innovadores de gestión y conservación. El Convenio sobre la Diversidad Biológica la define como el uso de sistemas biológicos y organismos vivos para crear o modificar productos y procesos (Naciones Unidas, 1992). Más allá de los transgénicos, se ha consolidado como una ciencia integradora capaz de diagnosticar, restaurar y potenciar la vida en distintas escalas, favoreciendo una interacción armónica entre sociedad y naturaleza (FAO, 2020).

Este documento se apoya en los hallazgos de Ruiz-González et al. (2025), quienes muestran que estudiantes de secundaria y bachillerato reconocen bacterias benéficas y dañinas, pero las asocian sobre todo con la salud humana. Su conocimiento sobre aplicaciones ambientales —como la biorremediación— es limitado y presenta errores conceptuales (Casanoves et al., 2015; Fonseca et al., 2012; Ocelli, 2011). Aun así, sus actitudes hacia la biotecnología son positivas, lo que abre una oportunidad educativa para fortalecer la enseñanza en microbiología y biotecnología ambiental, de modo que el alumnado pueda comprender y argumentar críticamente sus aplicaciones en los socioecosistemas urbano-rurales (Lederman, 2019; UNESCO, 2021).

TENSIONES SOCIOECOLÓGICAS EN EL GRADIENTE URBANO-RURAL

El gradiente urbano-rural enfrenta tensiones que comprometen su equilibrio y la provisión de servicios ecosistémicos. La fragmentación del hábitat y la pérdida de biodiversidad generan “islas” ecológicas que aíslan poblaciones y reducen la conectividad genética,



debilitando la resiliencia, entendida como la capacidad de los sistemas de sobreponerse a perturbaciones y mantener sus funciones vitales (Hilty et al., 2021; Manosalva-Caicedo, 2024). A ello se suma la contaminación, pues el gradiente funciona como canal de transporte de metales pesados, hidrocarburos, nitratos y pesticidas que se acumulan en suelos y acuíferos (Nasr y Eissa, 2025). La degradación de suelos por expansión urbana y agricultura intensiva disminuye su fertilidad y microbiota esencial (Lal, 2015), mientras que la inseguridad hídrica surge de la competencia entre usos urbanos y agrícolas, agravada por la contaminación y con impactos directos en ríos y humedales (Vörösmarty et al., 2010). El cambio climático intensifica estas amenazas al potenciar islas de calor, sequías y eventos extremos que superan la capacidad adaptativa de los ecosistemas (IPCC, 2022). En conjunto, estas presiones se entrelazan y retroalimentan, reduciendo la capacidad del gradiente urbano-rural para sostener funciones ecológicas y bienestar humano.

BIORREMEDIACIÓN Y FITORREMEDIACIÓN

La biotecnología ha abierto un camino fascinante para enfrentar la contaminación de suelos y cuerpos de agua, especialmente aquellos deteriorados por actividades industriales y agrícolas. En los llamados brownfields, antiguos terrenos industriales abandonados, se han desarrollado consorcios bacterianos capaces de degradar hidrocarburos y otros contaminantes persistentes (Figura 1).

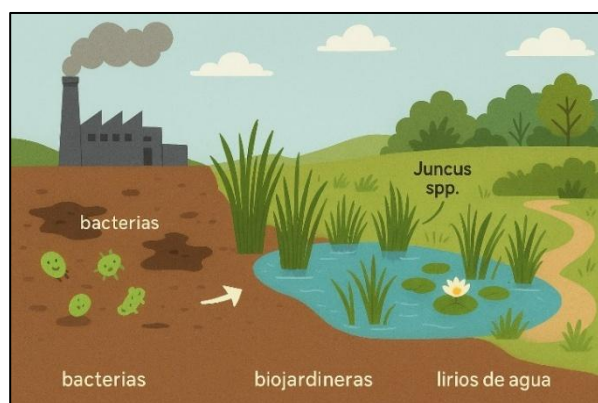


Figura 1. Ejemplos de aplicaciones de bacterias y plantas en la biorremediación de suelos contaminados por la

industria. Imagen generada por inteligencia artificial mediante Microsoft Copilot (Open AI, 2026).

A la par, ciertas especies vegetales, como los juncos (*Juncus* spp.) y el lirio de agua (*Eichhornia crassipes*), cumplen un papel esencial como fitorremediadores: sus raíces no solo acumulan metales pesados, sino que también transforman compuestos orgánicos con la ayuda de bacterias que habitan en la rizósfera. Estas técnicas, además de ser pasivas y de bajo costo, ofrecen beneficios adicionales al paisaje y al equilibrio ecológico, convirtiéndose en una alternativa prometedora para la recuperación de ambientes degradados (Glick, 2010).

AGRICULTURA URBANA Y PERIURBANA DE PRECISIÓN

En el ámbito productivo, la biotecnología impulsa sistemas agrícolas capaces de responder simultáneamente a la inseguridad alimentaria, la degradación del suelo y el estrés climático en entornos urbanos y periurbanos. Las técnicas de selección asistida por marcadores (MAS) y edición genética (CRISPR-Cas9) permiten desarrollar variedades de hortalizas y frutales adaptadas a condiciones de salinidad, sequía y altas temperaturas (Zhang et al., 2014). Asimismo, el uso de biofertilizantes y bioplaguicidas –basados en micorrizas, rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, *Bacillus thuringiensis* (Bt) y hongos entomopatógenos –mejora la salud del suelo y reduce la dependencia de insumos químicos, fortaleciendo los servicios ecosistémicos asociados a la producción agrícola (Glare y O’Callaghan, 2000).

CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD

La fragmentación del paisaje en el gradiente urbano-rural, especialmente cerca de los centros urbanos, demanda estrategias para conservar la diversidad genética funcional. Los bancos de germoplasma y el cultivo de tejidos funcionan como reservas que sostienen proyectos de revegetación y restauración en territorios donde la presión urbana ha reducido las especies nativas (Engelmann, 2011). A la par, la genómica de la conservación permite analizar la diversidad en poblaciones aisladas, información clave para diseñar corredores biológicos que conecten fragmentos separados

por infraestructuras y actividades humanas. Estos estudios también orientan programas de reforzamiento poblacional que disminuyen la endogamia y recuperan el vigor genético, favoreciendo la persistencia y adaptación de las especies en paisajes sometidos a la tensión constante entre lo urbano y lo rural como sequía, altas temperaturas, salinidad, entre otras (Figura 2) (Frankham et al., 2017).

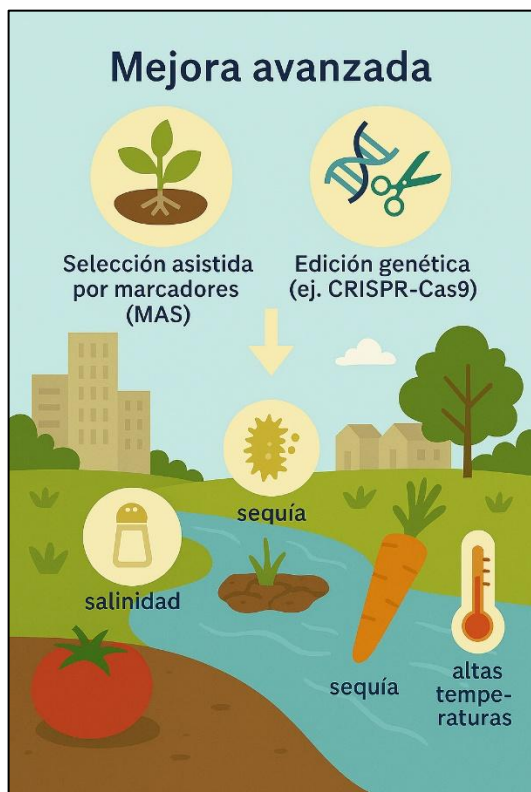


Figura 2. Variedades de hortalizas y frutales obtenidas mediante selección asistida por marcadores (MAS) y edición genética (CRISPR-Cas9), adaptadas a condiciones de estrés como sequía, salinidad y altas temperaturas. Imagen generada por inteligencia artificial mediante Microsoft Copilot (Open AI, 2026).

SIMBIOSIS URBANA: DE LOS RESIDUOS A LOS RECURSOS

La biotecnología también desempeña un papel central en la transición hacia modelos de economía circular. Los residuos orgánicos urbanos y agroindustriales pueden procesarse mediante digestión anaeróbica para generar biogás y digestato (material rico en nutrientes, resultado del proceso de digestión anaeróbica de residuos

orgánicos, como estiércol, lodos o desechos de alimentos), ambos reutilizables como biofertilizantes (Figura 3). Además, el cultivo de microalgas en aguas residuales tratadas permite la captura de CO₂ y la producción de biomasa con aplicaciones en alimentación, forraje y biocombustibles (Mata et al., 2010). Estas estrategias contribuyen a los ciclos de nutrientes y a reducir la presión sobre los ecosistemas rurales.

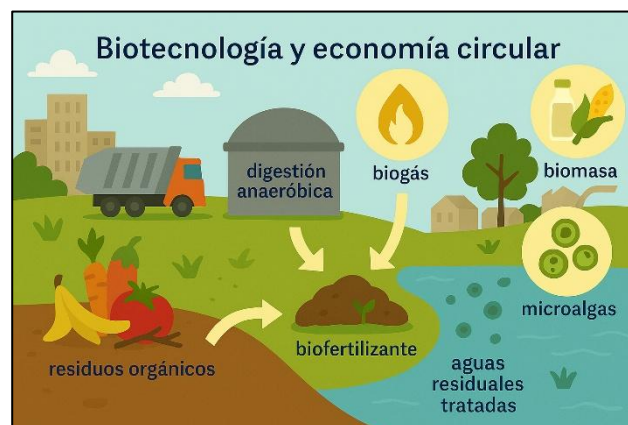


Figura 3. Procesos de digestión anaeróbica de residuos orgánicos urbanos y agroindustriales para la producción de biogás y biofertilizantes, junto con el cultivo de microalgas en aguas residuales tratadas para la captura de CO₂. Imagen generada por inteligencia artificial mediante Microsoft Copilot (Open AI, 2026).

EJEMPLOS DE APLICACIÓN EN EL GRADIENTE URBANO-RURAL DE MÉXICO

Diversas iniciativas en México muestran cómo la biotecnología puede aplicarse de manera integral a lo largo del gradiente urbano-rural. En Xochimilco, el sistema chinampa-regenerativo incorpora biofiltros y biorreactores para mejorar agua y suelo, favoreciendo la reintroducción de especies nativas como el ajolote, mientras que el uso de biofertilizantes sustituye agroquímicos y fortalece la resiliencia agrícola (González y López, 2019; Zambrano y Valiente, 2020). En Guadalajara, el proyecto Cultiva Ciudad convierte azoteas en espacios productivos mediante sustratos enriquecidos con biochar y especies seleccionadas por su tolerancia al estrés térmico (Díaz-Caamaño, 2024). En el ámbito rural, el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias

(INIFAP) desarrollan variedades de maíz nativo resistentes a la sequía, complementadas con estudios genómicos del frijol tépari que revelan mecanismos únicos de adaptación al calor y la falta de agua (Grupo Ceres, 2021; INIFAP, 2022). A su vez, la Red de Biofábricas en Morelos y Puebla produce biofertilizantes y bioplaguicidas basados en micorrizas y hongos entomopatógenos, mientras que proyectos de conservación en Veracruz y Nayarit emplean crioconservación y propagación in vitro para restaurar bosques de niebla y manglares (Ortíz-Hernández et al., 2025).

CONCLUSIONES

El gradiente urbano-rural debe entenderse como un sistema socioecológico continuo, donde procesos ecológicos, productivos y urbanos están estrechamente vinculados. Las presiones de la urbanización, la intensificación agrícola y el cambio climático muestran la necesidad de enfoques integrales que fortalezcan la resiliencia de los territorios sin fragmentar sus componentes sociales y ambientales. En este marco, la biotecnología se presenta como una herramienta estratégica capaz de ofrecer soluciones diferenciadas a lo largo del gradiente, siempre que se aplique con una visión ética, participativa y sistémica. Su valor no reside solo en la innovación tecnológica, sino en su capacidad de integrarse con el conocimiento local y responder a las necesidades específicas de cada contexto, desde ciudades densamente pobladas hasta paisajes rurales y periurbanos.

Las experiencias revisadas —que incluyen sistemas productivos regenerativos, prácticas agrícolas resilientes, bioinsumos locales y estrategias de conservación— muestran que la biotecnología puede fortalecer la seguridad alimentaria, la salud ambiental y la estabilidad de los medios de vida, contribuyendo al cumplimiento de los ODS. Más que una solución única, ofrece un conjunto de herramientas adaptables que permiten construir respuestas acordes con la diversidad social y ecológica del gradiente urbano-rural, avanzando hacia paisajes justos, funcionales y regenerativos capaces de sostener el bienestar humano sin comprometer la integridad de los ecosistemas.

Literatura citada

Casanoves, M.; González, Á.; Salvadó, Z.; Haro J.; Novo, M. (2015) Knowledge and attitudes towards

biotechnology of elementary education preservice teachers: The first Spanish experience. *International Journal of Science Education*, 37, 2923–2941. <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1116718>

Díaz-Caamaño, A. (2024) Agricultura en la ciudad: Una ruta hacia la cultura del bienestar y de la sostenibilidad. *Academia XXI* 15(29), 55–72. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252xp.2024.15.29.88657>

Engelmann, F. (2011). Use of biotechnologies for the conservation of plant biodiversity. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 47(1), 5–16. <https://doi.org/10.1007/s11627-010-9327-2>

Fonseca, M.J.; Costa, P.; Lencastre, L.; Tavares, F. (2012) Multidimensional analysis of high-school students' perceptions about biotechnology. *Journal of Biological Education*, 46, 129–139. <https://doi.org/10.1080/00219266.2011.634019>

Frankham, R.; Ballou, J.D.; Ralls, K.; Eldridge, M.; Dudash, M.R.; Fenster, C.B.; Lacy, R.C.; Sunnucks, P. (2017) *Genetic management of fragmented animal and plant populations*. Oxford University Press.

Glare, T.R.; O'Callaghan, M. (2000) *Bacillus thuringiensis: Biology, ecology and safety*. John Wiley & Sons.

Glick, B.R. (2010) Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnology Advances* 28(3), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.02.001>

González, J.A.; López, R. (2019) Uso de biofertilizantes en agroecosistemas chinamperos: alternativas sostenibles frente a agroquímicos. *Terra Latinoamericana*, 37(4), 345–356. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.345>

Grimm, N.B.; Faeth, S.H.; Golubiewski, N.E.; et al. (2008) Global change and the ecology of cities. *Science* 319(5864), 756–760.

Grupo Ceres (2021) El cultivo de maíz frente a la sequía en México. CIMMYT. <https://www.cimmyt.org/es/noticias/el-cultivo-de-maiz-frente-a-la-sequia-en-mexico/>

Hilty, J.A.; Worboys, G.L.; Keeley, A.; et al. (2021) Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors. Gland, Switzerland: IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.30>



- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2022) Selección de líneas de maíz por su tolerancia a sequía y calor. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(2), 123–134. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.45.2.123>
- Intergovernmental Panel on Climate change (IPCC). (2022) Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Lal, R. (2015) Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability* 7(5), 5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
- Lederman, N.G. (2019) Incursión de la biotecnología en la educación: Tendencias e implicaciones. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias* 18(2), 345–362. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77629802018>
- Manosalva-Caicedo, J. (2024) Conectividad ecológica y conservación en paisajes fragmentados: retos para América Latina. *Revista Colombiana de Ecología* 29(1), 15–32. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co>
- Mata, T.M.; Martins, A.A.; Caetano, N.S. (2010) Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(1), 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Naciones Unidas (1992) Convenio sobre la Diversidad Biológica. Río de Janeiro: Naciones Unidas. <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf>
- Nasr, M. A.; Eissa, N. (2025) *Rural and Urban Pollution*. 405–414. <https://doi.org/10.1002/9781394208180.ch35>
- Occelli, M.; Vilar, M.T.; Valeiras, N. (2011) Conocimientos y actitudes de estudiantes de la ciudad de Córdoba (Argentina) en relación a la biotecnología. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 10, 227–242.
- Open AI. (2026) Ejemplos de aplicaciones de bacterias y plantas en la biorremediación de suelos contaminados por la industria. [Imagen generada por inteligencia artificial]. Copilot. <https://copilot.microsoft.com/>
- Open AI. (2026) Variedades de hortalizas y frutales obtenidas mediante selección asistida por marcadores (MAS) y edición genética (CRISPR-Cas9), adaptadas a condiciones de estrés como sequía, salinidad y altas temperaturas. [Imagen generada por inteligencia artificial]. Copilot. <https://copilot.microsoft.com/>
- Open AI. (2026) Procesos de digestión anaeróbica de residuos orgánicos urbanos y agroindustriales para la producción de biogás y biofertilizantes, junto con el cultivo de microalgas en aguas residuales tratadas para la captura de CO₂. [Imagen generada por inteligencia artificial]. Copilot. <https://copilot.microsoft.com/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020) Biodiversity for food and agriculture and ecosystem services – Thematic Study for The State of the World’s Biodiversity for Food and Agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cb0649en>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2021) Manual de educación en bioética. Volumen I. Montevideo: UNESCO / Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org>
- Ortiz-Hernández, J.M.; Vovides, A.P.; Díaz-Toribio, M.H. (2025) Germination of cloud forest native shrubs with potential for restoration in central Veracruz, Mexico. *Acta Botánica Mexicana*, (132), e2365. <https://doi.org/10.21829/abm132.2025.2365>
- Ruiz-González, C.; López-Banet, L.; Ayuso-Fernández, G.E. (2025) Applications of biotechnology in the environment: Arguments from Spanish secondary school students. *Sustainability* 17(15), 6768. <https://doi.org/10.3390/su17156768>
- Vörösmarty, C.J.; McIntyre, P.B.; Gessner, M.O.; et al. (2010) Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 467(7315), 555–561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
- Zambrano, L.; Valiente, E. (2020) Restauración ecológica en sistemas chinamperos: integración de biofiltros y conservación del ajolote. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 91(3), e913597. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3.913597>
- Zhang, H.; Zhang, J.; Wei, P.; et al. (2014). The CRISPR/Cas9 system produces specific and homozygous targeted gene editing in rice in one



generation. *Plant Biotechnology Journal* 12, 797–807.
<https://doi.org/10.1111/pbi.12200>

Aviso legal/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente de los autores y colaboradores, y no de Agraria ni de sus editores. Agraria y sus editores no se responsabilizan de ningún daño a personas o bienes que resulte de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

