

Implicaciones bioéticas en el uso de la biotecnología para la conservación de agaves en el estado de Hidalgo

Bioethical implications of biotechnology use for the conservation of agaves in the state of Hidalgo

Edgar López López^{1*} and Anareli Quintero Jiménez²

¹ Laboratorio de Agrobiotecnología, Universidad Tecnológica de Mineral de la Reforma. Camino Providencia - La Calera 1000, Ex Hacienda Chavarría, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42186. Tel. +52 7713028740.

² Universidad de Guanajuato Departamento de Ingeniería Agroindustrial, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, Campus Celaya-Salvatierra, Programa de Ingeniería en Biotecnología, Av. Mutualismo Esq. Prolongación Río Lerma S/N, Celaya, Gto., México. C.P. 38060.

ABSTRACT

This study analyzes the bioethical implications of using biotechnology for the conservation of agaves in the state of Hidalgo. Techniques such as *in vitro* cultivation, cryopreservation, and genetic improvement preserve the genetic diversity of these plants, which are essential for biodiversity and local cultural practices, particularly in the face of threats such as overexploitation and climate change. However, these technologies present ethical and bioethical challenges that require attention. An evaluation of the biotechnological impacts on genetic diversity and the sustainability of traditional practices for agave conservation in Hidalgo is presented, emphasizing ethical principles such as justice, non-maleficence, and respect for traditional knowledge. The results demonstrated that these technologies enable the propagation and conservation of key species, such as *Agave salmiana* and *Agave mapisaga*, while the bioethical challenges highlight the need to involve local communities in decision-making processes. It is concluded that biotechnology can complement *in situ* conservation while promoting social equity and cultural sustainability, positioning itself as a comprehensive tool for protecting the biological and cultural heritage of agaves.

Keywords: Cryopreservation, Micropropagation, Non-maleficence, Traditional knowledge, Social equity.

RESUMEN

La presente investigación analiza las implicaciones bioéticas del uso de la biotecnología para la conservación de agaves en el estado de Hidalgo. Técnicas como el cultivo *in vitro*, la crioconservación y la mejora genética preservan la diversidad genética de estas plantas, esenciales para la biodiversidad y prácticas culturales locales, especialmente frente a amenazas como la sobreexplotación y el cambio climático. Sin embargo, estas tecnologías presentan desafíos éticos y bioéticos que requieren atención. Se presenta una evaluación de los impactos biotecnológicos en la diversidad genética y la sostenibilidad de las prácticas tradicionales para la conservación de agaves del estado de Hidalgo, destacando principios

éticos como la justicia, la no maleficencia y el respeto al conocimiento tradicional. Los resultados evidenciaron que estas tecnologías permiten la propagación y conservación de especies clave como *Agave salmiana* y *Agave mapisaga*, mientras que los desafíos bioéticos resaltan la necesidad de involucrar a las comunidades locales en los procesos de decisión. Se concluye que la biotecnología puede complementar la conservación *in situ* al tiempo que promueve la equidad social y la sostenibilidad cultural, posicionándose como una herramienta integral para proteger el patrimonio biológico y cultural de los agaves.

Palabras clave: Crioconservación, Micropropagación, No maleficencia, Conocimientos tradicionales, Equidad social.

INTRODUCCIÓN

La conservación de especies vegetales en peligro de extinción, como lo son algunas especies de agaves del estado de Hidalgo, ha encontrado en la biotecnología una herramienta destacada para su preservación a través de técnicas avanzadas como el cultivo *in vitro*, la crioconservación y la mejora genética, es posible propagar masivamente estas plantas, asegurando su supervivencia frente a la sobreexplotación y adaptándolas a condiciones ambientales cambiantes (Benelli, 2021; Bautista *et al.*, 2022). Estas tecnologías no solo contribuyen a la preservación de la diversidad genética, sino que también son esenciales para la sostenibilidad de las prácticas agrícolas tradicionales en la región (Engelmann, 2011).

El uso de la biotecnología en la conservación de agaves plantea importantes desafíos éticos y bioéticos significativos. Entre ellos, destaca el principio de justicia, dado que las comunidades rurales e indígenas, custodias de estas plantas durante generaciones, a menudo no reciben una distribución equitativa de los beneficios derivados de los avances biotecnológicos (Schroeder, 2007). Además, el principio de no maleficencia exige que cualquier intervención genética evite causar daño al ambiente, a las especies involucradas o a la salud humana, lo que implica realizar evaluaciones de riesgo exhaustivas y establecer salvaguardias adecuadas (Myhr, 2010). Por lo que es de importancia que los proyectos

*Autor para correspondencia: Edgar López López

Correo-e: e_lopez_87@hotmail.com

Recibido: 12 de septiembre de 2024

Aceptado: 5 de febrero de 2025

Publicado: 28 de febrero de 2025

biotecnológicos involucren a estas comunidades desde sus etapas iniciales, respetando su autonomía y asegurando su participación activa (Dawson *et al.*, 2021). La biotecnología, aunque ofrece grandes oportunidades para la conservación, debe ser utilizada de manera responsable y con una reflexión profunda sobre sus implicaciones éticas, garantizando que las intervenciones no solo contribuyan a la conservación de la biodiversidad, sino que también respeten los conocimientos tradicionales y promuevan la equidad social y ambiental (Soldati y Albuquerque, 2016; Bautista *et al.*, 2022; García *et al.*, 2024).

Por su parte, en Hidalgo, el uso de la biotecnología en la conservación de agaves ha sido objeto de diversas investigaciones y aplicaciones prácticas, tal es el caso del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2022) en donde han desarrollado técnicas de propagación *in vitro* para especies de agave como *A. salmiana*, con el objetivo de preservar su diversidad genética y apoyar su conservación en ecosistemas amenazados por actividades humanas. Además, el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ, 2022) ha implementado estrategias de aprovechamiento integral y sostenible de los agaves, combinando conocimientos tradicionales y científicos. Estas iniciativas locales reflejan cómo la biotecnología puede ser una herramienta clave para enfrentar los retos actuales de conservación y sostenibilidad en Hidalgo y regiones cercanas.

A pesar de las diversas investigaciones existentes que han demostrado la eficacia de técnicas para preservar la diversidad genética de especies vegetales (Engelmann, 2011; Bautista *et al.*, 2022), son pocos los estudios que han explorado de manera integral cómo estos avances afectan las prácticas tradicionales y las comunidades rurales que históricamente han manejado y protegido estas especies (Schroeder, 2007; Soldati y Albuquerque, 2016). Este análisis busca no solo complementar la conservación *in situ*, sino también contribuir a un marco ético que equilibre el progreso biotecnológico con la justicia social y la sostenibilidad cultural.

Proceso de análisis y selección de información

Se empleó una revisión bibliográfica estructurada orientada a identificar y analizar información científica relevante sobre la aplicación de la biotecnología en la conservación de agaves y los principios bioéticos involucrados. El enfoque se centró en explorar la interacción entre biotecnología, conservación de agaves y bioética, con énfasis particular en especies del estado de Hidalgo. Los principios de justicia y no maleficencia propuestos por Beauchamp y Childress (1994) se adoptaron como base teórica para evaluar las implicaciones éticas del uso de tecnologías modernas. Se priorizaron estudios publicados entre 2010 y 2024, incluyendo referencias fundamentales que respaldan los conceptos clave.

Diversidad de especies de agave en Hidalgo

El estado de Hidalgo alberga diferentes especies de agave, muchas de las cuales son consideradas de gran importancia

económica, ecológica y cultural (García *et al.*, 2024). Entre las especies que se albergan, se pueden mencionar *Agave salmiana*, *Agave mapisaga* y *Agave americana*, las cuales no solo varían en términos de sus características morfológicas, sino también en sus adaptaciones ecológicas, por ejemplo, las especies *A. salmiana* y *A. mapisaga* son empleadas para la producción de pulque (Escalante *et al.*, 2016; Figueredo *et al.*, 2021), mientras que *A. americana* es utilizada para la producción de fibras (Mansouri *et al.*, 2020). Además, existen especies endémicas que son únicas de la región centro de México, tales como *Agave xylonacantha* y *Agave horrida*, lo que resalta la importancia de Hidalgo en la conservación de la biodiversidad de agaves en México (Paneque *et al.*, 2019).

La riqueza de especies de agave en Hidalgo se debe en parte a la compleja topografía, con altitudes superiores a los 3,000 msnm, hasta áreas bajas y semidesérticas, como la región de la Barranca de Metztitlán, situada a 1,300 msnm, además de su variabilidad climática del estado, ya que la región incluye desde climas fríos en las zonas montañosas hasta climas cálidos y semidesérticos en las áreas más bajas, creando nichos ecológicos diversos que permiten la coexistencia de múltiples especies de agaves (García *et al.*, 2024). La Sierra Madre Oriental, que atraviesa el estado, es particularmente importante, ya que proporciona un hábitat ideal para muchas de estas plantas, además de que en este rango altitudinal y climático facilita la especialización de especies, lo que a su vez contribuye a la alta diversidad genética y adaptativa de los agaves en la región (Figueredo *et al.*, 2021).

Agaves de importancia para el estado de Hidalgo

Dentro de las diversas especies de agave que se cultivan en el estado de Hidalgo, se pueden destacar tres por su relevancia económica, cultural y ecológica: *A. salmiana*, *A. mapisaga* y *A. americana*. Estas especies son esenciales para la elaboración de productos tradicionales como el pulque y el mezcal, además de representar un recurso genético de gran valor, cuya conservación resulta indispensable para garantizar la sostenibilidad del ecosistema al que pertenecen (Figueredo *et al.*, 2021).

A. salmiana es una de las especies más conocidas en el estado de Hidalgo, conocida comúnmente como maguey pulquero, ya que se emplea principalmente como materia prima para la producción de pulque, una bebida fermentada con profundo significado cultural en la región (Escalante *et al.*, 2016). Hidalgo se destaca como el principal productor de pulque en México, aportando aproximadamente el 68% de la producción nacional (Figueredo *et al.*, 2021). Para 2022, se reportó que Hidalgo cuenta con alrededor de 4,858 hectáreas dedicadas al cultivo de agave pulquero, representando el 65.5% del área cultivada en todo el país (Vega *et al.*, 2023). Esta especie se cultiva tanto en sistemas extensivos como en pequeñas parcelas de productores locales, quienes lo manejan mediante técnicas tradicionales que han sido transmitidas por generaciones (Ortiz *et al.*, 2023). Además, es reconocida por su capacidad para producir cantidades significativas de aguamiel, el cual es extraído del centro de la planta y fermen-



tado para obtener el pulque, además, de ser valorado por su resistencia a las condiciones semiáridas, lo que lo convierte en un cultivo viable en las regiones montañosas de Hidalgo (Puente *et al.*, 2015).

Otra especie relevante en Hidalgo es el *A. mapisaga*, que comparte con el *A. salmiana* la capacidad de producir aguamiel en grandes cantidades (Vega *et al.*, 2023). Esta especie es notable por su tamaño imponente y su adaptación a las mismas condiciones semiáridas que el *A. salmiana*. Sin embargo, su cultivo es menos extensivo, y aunque también se utiliza en la producción de pulque, la falta de prácticas agrícolas sostenibles, como la rotación de cultivos, el manejo adecuado del suelo, y la replantación de agaves después de la cosecha, ha puesto en riesgo la conservación de sus poblaciones naturales (Bautista *et al.*, 2022). La importancia del *A. mapisaga* en la cultura local radica no solo en su uso para la producción de pulque, sino también en su valor como recurso genético para el mejoramiento de otras especies de agave, dada su variabilidad morfológica y genética (Mandujano *et al.*, 2018).

Por su parte, *A. americana*, aunque no tan ampliamente cultivado como las dos especies anteriores, también tiene un papel importante en la economía rural de Hidalgo (Figueroa *et al.*, 2021). Conocido como maguey mezcalero, esta especie se utiliza principalmente para la producción de mezcal, aunque su uso no es tan común en Hidalgo como en otros estados como en Oaxaca (Mandujano *et al.*, 2018). Sin embargo, en Hidalgo, el *A. americana* es apreciado por su versatilidad, ya que sus hojas y fibras se emplean en la elaboración de productos artesanales, como textiles y papel, además de mezcal (Mansouri *et al.*, 2020). Esta especie también se cultiva junto con otras variedades de agave en sistemas de cultivo mixtos, lo que ha llevado a una hibridación natural entre especies, aumentando la variabilidad genética y la adaptabilidad de estos cultivos a diferentes condiciones ambientales (Mandujano *et al.*, 2018).

La diversidad de agaves en Hidalgo no solo tiene implicaciones económicas, sino también ecológicas (Narváez *et al.*, 2020). Este importante recurso biológico es clave para la conservación de suelos y la biodiversidad, ya que sus sistemas radiculares ayudan a prevenir la erosión y mejoran la retención de agua en los suelos áridos y semiáridos donde predominan (García *et al.*, 2024). Es por tanto que la producción de maguey en Hidalgo debe centrarse en garantizar la sostenibilidad de estos cultivos, promoviendo prácticas agrícolas que no solo maximicen la producción y que también protejan la biodiversidad y el patrimonio cultural asociado a estas especies. Esto es especialmente importante en un contexto donde la demanda creciente de productos como el pulque, el mezcal y derivados diversos de los agaves podría llevar a la sobreexplotación de los recursos naturales si no se gestionan adecuadamente (Escalante *et al.*, 2016).

Conservación de la biodiversidad de agaves

A pesar de su importancia, la biodiversidad de agaves en Hidalgo, así como en México, enfrenta serias amenazas, ya que la sobreexplotación, la agricultura intensiva y el cambio en el

uso del suelo son los principales factores que ponen en riesgo la supervivencia de muchas especies de agave (Alducin *et al.*, 2022). Sumado a esto, la pérdida de hábitats y la erosión genética son particularmente preocupantes, ya que muchas especies de agaves dependen de nichos ecológicos específicos, mismos que están siendo alterados o destruidos por actividades humanas (Gómez *et al.*, 2021). La conservación de estas especies es crítico, no solo para mantener la biodiversidad del estado, sino también para asegurar la viabilidad a largo plazo de las prácticas culturales y económicas que dependen de ellas (Vargas *et al.*, 2007).

En respuesta a estas amenazas, actualmente se han implementado diferentes estrategias de conservación que buscan proteger tanto a las especies de agave, así como a sus hábitats donde se desarrollan. Estas estrategias incluyen la promoción de prácticas agrícolas sostenibles, la restauración de hábitats degradados y la reintroducción de especies nativas en áreas donde han sido sustraídas (Davis y Ortiz, 2023). Además, se están llevando a cabo esfuerzos de sensibilización en las comunidades locales sobre la importancia de conservar la diversidad de agaves y los beneficios a largo plazo que esto puede traer tanto para el medio ambiente como para la economía local (Delgado *et al.*, 2014).

Por otra parte, la conservación de los agaves mediante técnicas biotecnológicas recientes, es un enfoque emergente y prometedor para conocer, proteger y mejorar la diversidad de estas plantas en el Estado de Hidalgo y en la región. Un estudio realizado por Portillo *et al.* (2007) investigó la regeneración de plantas de *Agave tequilana* a partir de embriogénesis somática indirecta, logrando establecer un protocolo eficiente para la formación de embriones somáticos y su conversión en plantas completas, lo que representa un avance significativo en la propagación masiva de esta especie. Aunque el estudio se centró en *A. tequilana*, las técnicas desarrolladas pueden ser adaptadas para otras especies de agave presentes en Hidalgo, contribuyendo así a su conservación y aprovechamiento sostenible.

Bioética en el uso de la biotecnología en la conservación de agaves

La biotecnología en la conservación de los agaves se centra principalmente en la conservación *ex situ*, es decir, fuera de su entorno natural, así como la mejora genética (Tarraf y De Carlo, 2024). Técnicas como la micropropagación permiten la reproducción masiva de agaves en laboratorios a partir de tejidos vegetales, lo que resulta determinante para especies en peligro de extinción o aquellas con poblaciones silvestres reducidas (Bautista *et al.*, 2022). Además, la crioconservación de semillas y tejidos vegetales proporciona una estrategia a largo plazo para preservar la diversidad genética de los agaves, asegurando que estas plantas puedan ser reintroducidas en sus hábitats naturales cuando las condiciones sean adecuadas (Benelli, 2021).

De igual manera, la mejora genética en la conservación de agaves, incluye la selección de variedades resistentes a plagas y enfermedades, así como la adaptación a condicio-

nes climáticas cambiantes (Vásquez *et al.*, 2023). Mediante técnicas de marcadores moleculares, es posible identificar y seleccionar genes asociados con rasgos deseables, como la resistencia al estrés hídrico o la mayor producción de azúcares, fundamentales para la industria del mezcal y el pulque (Chugh, 2022).

La aplicación de biotecnología en la conservación de agaves también plantea consideraciones bioéticas que deben abordarse para garantizar un enfoque justo y respetuoso. La bioética en este contexto implica reconocer y respetar los conocimientos tradicionales asociados con los agaves, que han sido transmitidos por generaciones en comunidades indígenas y rurales de Hidalgo (Soldati y Albuquerque, 2016). Es esencial que los proyectos biotecnológicos involucren a estas comunidades desde las etapas iniciales, asegurando su participación activa y la equidad en la distribución de beneficios derivados de los avances tecnológicos (Scholz *et al.*, 2023). Además, es esencial evaluar y mitigar cualquier posible impacto negativo de estas tecnologías en los ecosistemas locales y en las prácticas culturales asociadas, ya que, el respeto por la autonomía de las comunidades implica reconocer y valorar su conocimiento tradicional en la gestión y conservación de los agaves, asegurando su consentimiento informado y participación activa en cualquier intervención biotecnológica (Roldan *et al.*, 2023).

Es por lo anterior que, el uso de la biotecnología en la conservación de los agaves implica una reflexión profunda sobre sus implicaciones éticas y bioéticas. Los principios de justicia y no maleficencia, planteados originalmente por Beauchamp y Childress (1994), constituyen pilares fundamentales en este análisis. El principio de justicia se refiere a la distribución equitativa de los beneficios y cargas, lo que en este contexto implica garantizar que las comunidades rurales e indígenas, custodias tradicionales de los agaves, participen y se beneficien equitativamente de los avances biotecnológicos. Por su parte, el principio de no maleficencia establece la obligación de no causar daño, lo que incluye minimizar los riesgos asociados a la introducción de nuevas tecnologías y proteger los ecosistemas donde se desarrollan estas plantas. Estos principios son esenciales para orientar la implementación responsable de biotecnologías que permitan tanto la conservación de los agaves como el respeto por los conocimientos tradicionales asociados a ellos (Beauchamp y Childress, 1994; Dawson *et al.*, 2021).

Uno de los principios clave de la bioética en la conservación de agaves es el respeto por la autonomía de las comunidades locales, debido a que los agaves tienen un profundo significado cultural y económico para muchas comunidades indígenas y rurales en México, incluidas las del estado de Hidalgo. Estas comunidades han desarrollado conocimientos tradicionales sobre el manejo y uso de agaves a lo largo de generaciones, y estos conocimientos deben ser reconocidos y protegidos. Cualquier iniciativa biotecnológica que busque intervenir en la conservación de agaves debe involucrar a estas comunidades desde el principio, respetando su autonomía y garantizando su consentimiento informado para

cualquier intervención que afecte sus prácticas o recursos (Dawson *et al.*, 2021).

Además, la justicia como bioético crucial, se refiere a la distribución equitativa de los beneficios derivados de los proyectos de conservación y biotecnología (CONABIO, 2022). Esto es particularmente relevante en casos de bioprospección, donde se exploran las propiedades genéticas y químicas de los agaves para su uso en industrias como la farmacéutica o la alimentaria (Bermúdez *et al.*, 2021).

Avances biotecnológicos para la bioconservación y sus aspectos éticos y bioéticos

En el desarrollo y evolución de la biotecnología, se han implementado una serie de avances tecnológicos que han impactado profundamente en la conservación de especies vegetales y la biodiversidad en general, además de que no solo la preservación de plantas en peligro de extinción, sino también la mejora genética de cultivos de importancia económica y cultural (Altman y Hasegawa, 2011). En la Tabla 1 se detalla una cronología de avances biotecnológicos significativos que han transformado las estrategias de conservación vegetal, comenzando con el establecimiento del cultivo de tejidos vegetales en los años 70, un hito liderado por investigadores como Murashige y Skoog (1962) así como George y Sherrington (1984), que permitió la propagación masiva y la conservación *ex situ* de especies de difícil propagación. En los años 80, el desarrollo de plantas transgénicas marcó un antes y un después en la biotecnología agrícola, con investigaciones como las de Bevan *et al.* (1983) y Fraley *et al.* (1983), que abrieron nuevas posibilidades para mejorar cultivos mediante la incorporación de características deseables, aunque también generaron debates bioéticos sobre su seguridad y equidad (Benbrook, 2012). En los 90, se consolidaron técnicas de criopreservación con contribuciones de Sakai (1995), que aseguraron la viabilidad a largo plazo del material genético, mientras que investigadores como Robert *et al.* (1992) iniciaron esfuerzos concretos para la propagación de agaves mediante micropropagación, marcando el inicio de su conservación biotecnológica. Durante las décadas siguientes, la ingeniería genética permitió desarrollar cultivos más resistentes a enfermedades y adaptados a condiciones extremas (Gonsalves, 2006; Tripathi *et al.*, 2008), mientras que tecnologías emergentes como CRISPR/Cas9, desarrolladas por Jinek *et al.* (2012), han revolucionado la capacidad de edición genética con aplicaciones específicas en la preservación y mejora de especies vegetales. Estos avances no solo han beneficiado la biodiversidad en general, sino que han sentado las bases para la conservación de agaves mediante técnicas que combinan la innovación científica con un enfoque sostenible, asegurando la preservación de su diversidad genética frente a amenazas como el cambio climático y la sobreexplotación (Engelmann, 2011; Benelli, 2021). Estos desarrollos han sido cruciales para la conservación de cultivos tradicionales y especies endémicas, particularmente en regiones donde la biodiversidad está amenazada por la sobreexplotación o el cambio climático (Voytas, 2013).



Tabla 1. Avances históricos en biotecnología enfocados en la conservación de plantas (1970-2020).**Table 1.** Historical advances in biotechnology focused on plant conservation (1970–2020).

Década/Año	Avance	Descripción
1970s	Inicio del cultivo de tejidos vegetales	El cultivo de tejidos vegetales se consolida como una importante técnica biotecnológica para la propagación asexual de plantas, permitiendo la conservación de especies de difícil propagación o en peligro de extinción. Investigadores como F. C. Steward y Toshio Murashige fueron pioneros en el desarrollo de técnicas de cultivo <i>in vitro</i> que revolucionaron la propagación de plantas a gran escala (Murashige y Skoog, 1962; George y Sherrington, 1984; Thorpe, 2007).
1983	Desarrollo de la primera planta transgénica	Logran crear la primera planta transgénica mediante la inserción de un gen resistente a antibióticos en el genoma vegetal. Este avance marcó un hito en la biotecnología agrícola y abrió nuevas posibilidades para la conservación de plantas mediante la ingeniería genética (Chilton <i>et al.</i> , 1977; Bevan <i>et al.</i> , 1983; Fraley <i>et al.</i> , 1983; Zambryski, 1983).
1984	Aplicación de la criopreservación en la conservación de plantas	A través de la criopreservación, investigadores como Akira Sakai, implementan técnicas para almacenar material genético de plantas a bajas temperaturas, asegurando la viabilidad a largo plazo de semillas y otros tejidos vegetales. Este método es esencial para la conservación <i>ex situ</i> en bancos de germoplasma (Sakai, 1995; Engelmann, 2004).
1990s	Ingeniería genética y resistencia a enfermedades	Durante esta década, la biotecnología permite la creación de plantas resistentes a enfermedades devastadoras. Un ejemplo notable es el desarrollo de la papaya transgénica resistente al virus de la mancha anular por Dennis Gonsalves y su equipo en la Universidad de Cornell, salvando la producción de papaya en Hawái (Gonsalves, 2006; Tripathi <i>et al.</i> , 2008).
1990s	Conservación biotecnológica de agaves	Se inician proyectos de conservación de agaves mediante técnicas de cultivo <i>in vitro</i> para pagar especies como <i>Agave tequilana</i> y <i>Agave angustifolia</i> . Investigadores como M. L. Robert lideran estudios sobre micropropagación y conservación de germoplasma de agaves, contribuyendo a la protección de estas especies frente a la sobreexplotación (Robert <i>et al.</i> , 1992).
2000s	Biotecnología y la conservación de cultivos tradicionales	La biotecnología se emplea para conservar cultivos tradicionales y esenciales para la diversidad genética. Investigadores como Ortiz-García en México proporciona un análisis sistemático sobre la presencia de transgenes en razas criollas de maíz, contribuyendo a la preservación de este cultivo (Ortiz <i>et al.</i> , 2005; Bellon y Berthaud, 2006; Piñeyro <i>et al.</i> , 2009).
2012	Introducción de CRISPR/Cas9 en la conservación de plantas	La tecnología CRISPR/Cas9, desarrollada por Emmanuelle Charpentier y Jennifer Doudna, revoluciona la biotecnología al permitir una edición genética precisa. Esta técnica se aplica en la bioconservación de plantas para mejorar la resistencia a enfermedades y condiciones extremas, facilitando la preservación de especies vegetales en riesgo (Jinek <i>et al.</i> , 2012; Mali <i>et al.</i> , 2013).
2020s	Biotecnología avanzada para la conservación de ecosistemas	Investigadores combinan biotecnología y ecología para la conservación de ecosistemas completos. Proyectos liderados por científicos como Kevin Esvelt en el MIT utilizan la edición de genes y la clonación para restaurar hábitats degradados y preservar la biodiversidad en regiones afectadas por el cambio climático (Mali <i>et al.</i> , 2013).

La conservación biotecnológica de especies de agaves, como *A. salmiana*, *A. mapisaga* y *A. americana*, ha sido un enfoque clave para proteger estos recursos frente a la sobreexplotación, ya que estas técnicas han permitido no solo la preservación de la diversidad genética, sino también la adaptación de estas plantas a nuevas condiciones ambientales (Engelmann, 2011). Así, la biotecnología no solo ha tenido un impacto en la conservación de especies, sino que también ha contribuido significativamente a la sostenibilidad de prácticas agrícolas tradicionales y a la recuperación de ecosistemas incluyendo especies de agaves como los descritos (Benelli, 2021).

El inicio del cultivo de tejidos vegetales en la década de 1970 marcó un hito trascendental en la biotecnología, proporcionando una herramienta poderosa para la propagación asexual de plantas, lo que permitió la conservación de especies de difícil propagación o en peligro de extinción (Thorpe, 2007). Sin embargo, este avance también planteó importantes consideraciones éticas y bioéticas, pues, desde

un punto de vista bioético, uno de los aspectos fundamentales es el uso responsable y equitativo de esta tecnología, ya que el cultivo de tejidos vegetales, aunque altamente beneficioso para la conservación *ex situ*, también podría haber desplazado el conocimiento tradicional de las comunidades que habían desarrollado métodos de propagación durante generaciones (Xu y Peng, 2022). En este sentido, la ética en la biotecnología implica asegurar que estas comunidades no solo sean reconocidas por su conocimiento, sino también incluidas en los procesos de desarrollo e implementación de estas tecnologías. Además, la bioética exige una reflexión sobre el impacto ambiental de estas prácticas, ya que, aunque el cultivo de tejidos vegetales se centra en la conservación, es decisivo que estos esfuerzos no conduzcan a una dependencia excesiva de tecnologías de laboratorio, que podrían descuidar la importancia de la conservación *in situ* y el respeto por los ecosistemas naturales donde estas plantas se han desarrollado (Fay, 2018). Así, el enfoque bioético en el cultivo de tejidos vegetales debe equilibrar la innovación

tecnológica con la conservación de prácticas tradicionales y la protección del medio ambiente, asegurando que las nuevas técnicas no sólo contribuyan a la biodiversidad, sino que lo hagan de manera justa y sostenible.

Al abordar el desarrollo de la primera planta transgénica en 1983, es determinante considerar los aspectos éticos y bioéticos que surgieron a raíz de este avance, debido a que la creación de organismos genéticamente modificados (OGM) abrió un nuevo capítulo en la biotecnología, permitiendo a los científicos manipular directamente el material genético de las plantas para incorporar características deseables, como la resistencia a plagas o herbicidas (Zambryski, 1983). Sin embargo, este poder tecnológico también trajo consigo importantes desafíos éticos, ya que, desde una perspectiva bioética, la ingeniería genética plantea preguntas sobre la seguridad alimentaria, los impactos ambientales y la justicia social (König *et al.*, 2004). La inserción de genes en plantas, que luego se consumen como alimentos o se introducen en ecosistemas, genera incertidumbres sobre los efectos a largo plazo en la salud humana y en la biodiversidad (Benbrook, 2012). Además, la concentración de poder en manos de empresas que controlan estas tecnologías podría exacerbar desigualdades económicas, especialmente en comunidades agrícolas que dependen de semillas tradicionales. El principio de justicia en la bioética exige una distribución equitativa de los beneficios derivados de los OGM, debido a que, en muchos casos, las comunidades locales y los pequeños agricultores que han desarrollado y mantenido cultivos tradicionales no se benefician directamente de los avances tecnológicos, mientras que las empresas que desarrollan OGM obtienen grandes beneficios (Glover, 2010).

Por su parte, la ingeniería genética ha transformado significativamente la biotecnología agrícola, permitiendo la creación de plantas resistentes a enfermedades devastadoras. Sin embargo, este avance tecnológico no está exento de consideraciones éticas y bioéticas, particularmente en lo que respecta a la modificación genética de organismos vivos y sus implicaciones a largo plazo (Qaim, 2009). Uno de los aspectos clave de la bioética en este contexto es el principio de no maleficencia, que exige que cualquier intervención genética evite causar daño, ya sea al ambiente, a las especies involucradas o a la salud humana (Myhr, 2010). Otro aspecto bioético relevante es la justicia distributiva, que se refiere a la distribución equitativa de los beneficios derivados de estas tecnologías, por lo que, en muchas ocasiones, las comunidades rurales o indígenas, que son los custodios de las tierras donde se cultivan estas plantas, no reciben una parte justa de los beneficios generados por las innovaciones biotecnológicas (Schroeder, 2007). Esto plantea cuestiones sobre el acceso y la propiedad intelectual, así como sobre la compensación adecuada para estas comunidades por su papel en la conservación de la biodiversidad.

Por otro lado, la biotecnología, al facilitar la propagación y conservación de especies de agaves como *A. salmiana*, *A. mapisaga* y *A. americana* mediante técnicas como el cultivo *in vitro*, presenta tanto oportunidades como desafíos éticos,

pues, por un lado, estas técnicas han permitido proteger especies de agave frente a la sobreexplotación, contribuyendo a la preservación de la diversidad genética y, en última instancia, a la sostenibilidad de las prácticas agrícolas tradicionales (Benelli, 2021). Sin embargo, el uso de biotecnología en la conservación también plantea importantes preguntas bioéticas.

Además, la tecnología CRISPR/Cas9, al permitir edición genética de las plantas con mutaciones sitio dirigidas, plantea preguntas sobre la equidad en la distribución de los beneficios derivados de estas innovaciones, pues las comunidades que han protegido y cultivado estas plantas durante generaciones deben recibir una parte justa de los beneficios económicos y sociales generados por su uso en biotecnología (Kuzma y Grieger, 2020). Esto se relaciona con el principio de justicia, que es clave para garantizar que los avances científicos no perpetúen o exacerben las desigualdades existentes. Es por tanto que otro aspecto bioético relevante es la consideración de los impactos a largo plazo de la edición genética en la biodiversidad y los ecosistemas, aunque CRISPR/Cas9 ofrece la posibilidad de generar variabilidad genética de especies vegetales en peligro, también existe el riesgo de efectos no deseados en el medio ambiente si no se manejan con precaución las ediciones genéticas (Modrzejewski *et al.*, 2019). La responsabilidad de los científicos y las instituciones que desarrollan estas tecnologías es garantizar que se realicen evaluaciones de riesgo exhaustivas y que se implementen salvaguardias adecuadas para minimizar cualquier daño potencial a los ecosistemas.

CONCLUSIONES

La biotecnología ofrece herramientas para la conservación de especies vegetales en peligro de extinción, como los agaves en Hidalgo, a través de técnicas como el cultivo *in vitro*, la crioconservación y la mejora genética al facilitar la propagación masiva y la preservación de su diversidad genética frente a amenazar como la pérdida de hábitats y la sobreexplotación. Sin embargo, el uso de estas tecnologías no está exento de desafíos éticos y bioéticos importantes que deben ser considerados, ya que, desde una perspectiva bioética, es importante considerar el principio de justicia, asegurando que los beneficios derivados de estas tecnologías se distribuyan equitativamente, especialmente hacia las comunidades rurales e indígenas que han sido los custodios de estas plantas durante generaciones. Igualmente, es fundamental involucrar a estas comunidades en el desarrollo y la implementación de proyectos biotecnológicos, respetando su autonomía y asegurando su participación activa.

El principio de no maleficencia también es central en este contexto, exigiendo que cualquier intervención genética evite causar daño al ambiente, a las especies involucradas o a la salud humana. Esto implica realizar evaluaciones de riesgo exhaustivas y establecer salvaguardias adecuadas para minimizar cualquier impacto negativo potencial. Además, es esencial equilibrar la innovación tecnológica con la conservación de prácticas tradicionales y el respeto por los

ecosistemas naturales. La biotecnología debe ser utilizada de manera responsable y sostenible, garantizando que las intervenciones no solo contribuyan a la conservación de la biodiversidad, sino que también respeten los conocimientos tradicionales y promuevan la equidad social y ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto apoyado por el Gobierno del Estado de Hidalgo a través del Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Hidalgo (CITNOVA).

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

REFERENCIAS

- Alducin, C., Ruiz, K.Y., Jiménez, O., Aguirre, E., Gasca, J., Eguiarte, L.E. y Medellín, R.A. 2022. Uses, knowledge and extinction risk faced by agave species in Mexico. *Plants*, 12(1), 124. <https://doi.org/10.3390/plants12010124>
- Altman, A. y Hasegawa, P.M. (Eds.). 2011. *Plant Biotechnology and Agriculture: Prospects for the 21st Century*. Academic Press.
- Bautista, E., Hernández, L. y Simpson, J. 2022. Advances in the micropropagation and genetic transformation of *Agave* species. *Plants*, 11(13), 1757. <https://doi.org/10.3390/plants11131757>
- Beauchamp, T.L. y Childress, J.F. 1994. *Principles of biomedical ethics*. Edicoes Loyola.
- Bellon, M.R. y Berthaud, J. 2006. Traditional Mexican agricultural systems and the potential impacts of transgenic maize. *Agriculture and Human Values*, 23(1), 3-14. <https://doi.org/10.1007/s10460-004-5861-z>
- Benbrook, C.M. 2012. Impacts of genetically engineered crops on pesticide use in the US—the first sixteen years. *Environmental Sciences Europe*, 24, 1-13. <https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-24>
- Benelli, C. 2021. Plant Cryopreservation: A Look at the Present and the Future. *Plants*, 10(12), 2744. <https://doi.org/10.3390/plants10122744>
- Bermúdez, M., Castillo, G.A., Urias, J.E., Escobedo, A. y Estarrón, M. 2021. Hunting bioactive molecules from the *Agave* genus: An update on extraction and biological potential. *Molecules*, 26(22), 6789. <https://doi.org/10.3390/molecules26226789>
- Bevan, M.W., Flavell, R.B. y Chilton, M.D. 1983. A chimaeric antibiotic resistance gene as a selectable marker for plant cell transformation. *Nature*, 304(5922), 184-187. <https://doi.org/10.1038/304184a0>
- Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). Aprovechamiento integral y sostenible del agave. [Consultado 25 Enero 2025] 2022. Disponible en: <https://ciatej.mx/el-ciatej/comunicacion/proyectos-de-divulgacion>
- Chilton, M.D., Drummond, M.H., Merlo, D.J., Sciaky, D., Montoya, A.L., Gordon, M.P. y Nester, E.W. 1977. Stable incorporation of plasmid DNA into higher plant cells: The molecular basis of crown gall tumorigenesis. *Cell*, 11(2), 263-271. [https://doi.org/10.1016/0092-8674\(77\)90043-5](https://doi.org/10.1016/0092-8674(77)90043-5)
- Chugh, V., Kaur, D., Purwar, S., Kaushik, P., Sharma, V., Kumar, H. y Dubey, R.B. 2022. Applications of molecular markers for developing abiotic-stress-resilient oilseed crops. *Life*, 13(1), 88. <https://doi.org/10.3390/life13010088>
- CONABIO - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Equidad y distribución de beneficios en la conservación de la biodiversidad: El caso de los agaves en México. CONABIO. [Consultado 25 Enero 2025] 2022. Disponible en <https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones>
- Davis, S.C. y Ortiz, H.G. 2023. Lessons from the history of Agave: ecological and cultural context for valuation of CAM. *Annals of Botany*, 132(4), 819-833. <https://doi.org/10.1093/aob/mcad072>
- Dawson, N.M., Coolsaet, B., Sterling, E.J., Loveridge, R., Gross, N.D., Wongbusarakum, S. y Rosado, F.J. 2021. The role of Indigenous peoples and local communities in effective and equitable conservation. *Ecology and Society*, 26(3), 19. <https://doi.org/10.5751/ES-12625-260319>
- Delgado, A., Torres, I., Blancas, J. y Casas, A. 2014. Vulnerability and risk management of *Agave* species in the Tehuacán Valley, México. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10, 1-15. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-10-53>
- Engelmann, F. 2004. Plant cryopreservation: Progress and prospects. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 40(5), 427-433. <https://doi.org/10.1079/IVP2004541>
- 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>
- Escalante, A., López, D.R., Velázquez, J.E., Giles, M., Bolívar, F. y López, A. 2016. Pulque, a traditional Mexican alcoholic fermented beverage: historical, microbiological, and technical aspects. *Frontiers in microbiology*, 7, 1026. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01026>
- Fay, M.F. 2018. Orchid conservation: How can we meet the challenges in the twenty-first century? *Botanical Studies*, 59(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s40529-018-0232-z>
- Figueredo, C.J., Álvarez, G.D., García, M.A., y Octavio, P. 2021. Morphological and genetic diversity of traditional varieties of agave in Hidalgo State, Mexico. *PLoS One*, 16(7), e0254376. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254376>
- Fraley, R.T., Rogers, S.G., Horsch, R.B., Sanders, P.R., Flick, J.S., Adams, S.P. y Bittner, M.L. 1983. Expression of bacterial genes in plant cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 80(15), 4803-4807. <https://doi.org/10.1073/pnas.80.15.4803>
- García, M.A., Figueredo, C.J. y Octavio, P. 2024. Revisión sistemática para el conocimiento de la biodiversidad mexicana: Los agaves de Hidalgo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 30(1), 1-20. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.06.030>
- George, E.F. y Sherrington, P.D. 1984. *Plant Propagation by Tissue Culture*. Exetetics Ltd. (pp. 709-pp).
- Glover, D. 2010. Exploring the resilience of Bt cotton's 'pro-poor success': The case of smallholder farmers in Gujarat, India. *Geoforum*, 41(4), 623-633. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7660.2010.01667.x>
- Gómez, E.P., Lacher Jr, T.E., Moreno, A. y Maldonado, J.J.F. 2021. Impacts of land cover change on the plant resources of an endangered pollinator. *PeerJ*, 9, e11990. <https://doi.org/10.7717/peerj.11990>



- Gonsalves, D. 2006. Transgenic papaya: development, release, impact and challenges. *Advances in virus research*, 67, 317-354. [https://doi.org/10.1016/S0065-3527\(06\)67009-7](https://doi.org/10.1016/S0065-3527(06)67009-7)
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Innovación en biotecnología forestal para la propagación del *Agave tobalá*. [Consultado 25 Enero 2025] 2022. Disponible en: <https://www.gob.mx/inifap/articulos/innovacion-en-biotecnologia-forestal-para-la-propagacion-del-agave-tobala?idiom=es>
- Jinek, M., Chylinski, K., Fonfara, I., Hauer, M., Doudna, J.A. y Charpentier, E. 2012. A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science*, 337(6096), 816-821. <https://doi.org/10.1126/science.1225829>
- König, A., Cockburn, A., Crevel, R.W.R., Debruyne, E., Grafstroem, R., Hammerling, U. y Wal, J.M. 2004. Assessment of the safety of foods derived from genetically modified (GM) crops. *Food and Chemical Toxicology*, 42(7), 1047-1088. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2004.02.019>
- Kuzma, J., y Grieger, K. 2020. Community-led governance for gene-edited crops. *Science*, 370(6519), 916-918. <https://doi.org/10.1126/science.abd1512>
- Mali, P., Yang, L., Esvelt, K.M., Aach, J., Guell, M., DiCarlo, J.E., y Church, G.M. 2013. RNA-guided human genome engineering via Cas9. *Science*, 339(6121), 823-826. <https://doi.org/10.1126/science.1232033>
- Mandujano, A., Pons, J.L., Paredes, R. y García, P. 2018. Diversidad genética de maguey (*Agave spp.*) en las sierras y llanuras del norte de Guanajuato. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(3), 511-523. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i3.1212>
- Mansouri, A., Nasr, J., Amar, B. y Elhalouani, F. 2020. Characterization of fiber extracted from *Agave americana* after burial in soil. *Fibers and Polymers*, 21, 724-732. <https://doi.org/10.1007/s12221-020-8666-9>
- Modrzejewski, D., Hartung, F., Sprink, T., Krause, D., Kohl, C. y Wilhelm, R. 2019. What is the available evidence for the range of applications of genome-editing as a new tool for plant trait modification and the potential implications for the environment?. *Environmental Evidence*, 8(1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s13750-019-0171-5>
- Murashige, T. y Skoog, F. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473-497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
- Myhr, A.I. 2010. A precautionary approach to genetically modified organisms: Challenges and implications for policy and science. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 23(6), 501-525. <https://doi.org/10.1007/s10806-010-9234-x>
- Narváez, A.U., Cruz, A. y Sangerman, D.M. 2020. Servicios ambientales: sistema agroforestal tradicional con plantas de maguey pulquero en la Altiplanicie, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(8), 1957-1969. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.2750>
- Ortiz, H.G., Hadfield, R., Gomez, T., Hultine, K., Mata, R., Petersen, S.L. y Stewart, J.R. 2023. Ecological-niche modeling reveals current opportunities for Agave dryland farming in Sonora, Mexico and Arizona, USA. *PLoS One*, 18(1), e0279877. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279877>
- Ortiz, S., Ezcurra, E., Schoel, B., Acevedo, F., Soberón, J. y Snow, A.A. 2005. Absence of detectable transgenes in local landraces of maize in Oaxaca, Mexico (2003-2004). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(35), 12338-12343. <https://doi.org/10.1073/pnas.0503356102>
- Paneque, T., Polanco, M., Jiménez, C. y Piquera, Y. 2019. Estudio etnofarmacológico de algunas especies endémicas de agave utilizados en la medicina tradicional. *Revista Científica y Tecnológica UPSE (RCTU)*, 6(2), 57-66. <https://doi.org/10.26423/rctu.v6i2.471>
- Piñeyro, A., Van Heerwaarden, J., Perales, H.R., Serratos, J.A., Rangel, A., Hufford, M.B. y Álvarez, E.R. 2009. Transgenes in Mexican maize: Molecular evidence and methodological considerations for GMO detection in landrace populations. *Molecular Ecology*, 18(4), 750-761. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2008.03993.x>
- Portillo, L., Santacruz, F., Gutiérrez, A. y Rodríguez, B. 2007. Somatic embryogenesis in *Agave tequilana* Weber cultivar azul. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 43(6), 593-601. <https://doi.org/10.1007/s11627-007-9046-5>
- Puente, C.A., Gutiérrez, A. y García, S. 2015. Micropropagation of *Agave salmiana*: Means to production of antioxidant and bioactive principles. *Frontiers in plant science*, 6, 1026. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01026>
- Qaim, M. 2009. The economics of genetically modified crops. *Annual Review of Resource Economics*, 1(1), 665-693. <https://doi.org/10.1146/annurev.resource.050708.144203>
- Robert, M.L., Herrera, J.L., Chan, J.L. y Contreras, F. 1992. Micropropagation of *Agave spp.* In *High-Tech and Micropropagation III* (pp. 306-329). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-07770-2_19
- Roldan, E.I., Medina, C. y Mendoza, Y. 2023. Políticas públicas para el aprovechamiento sustentable del maguey pulquero (*Agave salmiana*) en Hidalgo, México. *Revista Investigium IRE Ciencias Sociales y Humanas*, 14(1), 137-147. <https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.231401.13>
- Sakai, A. 1995. Cryopreservation of germplasm of woody plants. In *Cryopreservation of plant germplasm I* (pp. 53-69). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03096-7_3
- Scholz, A.H., Nunez, G., Weissgold, L. y Wussmann, K. 2023. The future of access and benefit-sharing: What next after the adoption of the global biodiversity framework and decision on digital sequence information?. *Diversity*, 16(1), 27. <https://doi.org/10.3390/d16010027>
- Schroeder, D. 2007. Benefit sharing: It's time for a definition. *Journal of Medical Ethics*, 33(4), 205-209. <https://doi.org/10.1136/jme.2006.016790>
- Soldati, G.T. y Albuquerque, U.P. 2016. Ethnobiology, ethics, and traditional knowledge protection. *Introduction to Ethnobiology*. Springer, 93-89. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28155-1_13
- Tarraf, W. y De Carlo, A. 2024. *In vitro* biotechnology for conservation and sustainable use of plant genetic resources. *Plants*, 13(14), 1897. <https://doi.org/10.3390/plants13141897>
- Thorpe, T.A. 2007. History of plant tissue culture. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 37(3), 169-180. <https://doi.org/10.1007/s12033-007-0031-3>
- Tripathi, S., Suzuki, J.Y., Ferreira, S.A. y Gonsalves, D. 2008. Papaya ringspot virus-P: characteristics, pathogenicity, sequence variability and control. *Molecular plant pathology*, 9(3), 269-280. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2008.00467.x>

- Vargas, O., Zizumbo, D. y Colunga, P. 2007. *In situ* diversity and maintenance of traditional agave landraces used in spirits production in west-central Mexico. *Economic Botany*, 61(4), 362-375. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2007\)61\[362:ISDAMO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2007)61[362:ISDAMO]2.0.CO;2)
- Vásquez, S., Montes, J.A., Gutiérrez, F.A., Reyes, S.J. y Lecona, C.A. 2023. *In vitro* mutagenesis for the improvement of *Agave* genus. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 92(7), 2065-2078. <https://doi.org/10.32604/phyton.2023.028784>
- Vega, M.A., Álvarez, G.D. y Figueredo, C.J. 2023. Sistemas de manejo de agaves pulqueros en el estado de Hidalgo. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 10(20), 92-100. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.9598>
- Voytas, D.F. 2013. Plant genome engineering with sequence-specific nucleases. *Annual Review of Plant Biology*, 64, 327-350. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105552>
- Xu, Z. y Peng, J. 2022. Ecosystem services-based decision-making: A bridge from science to practice. *Environmental Science & Policy*, 135, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.04.010>
- Zambryski, P., Joos, H., Genetello, C., Leemans, J., Montagu, M.V. y Schell, J. 1983. Ti plasmid vector for the introduction of DNA into plant cells without alteration of their normal regeneration capacity. *EMBO Journal*, 2(12), 2143-2150. <https://doi.org/10.1002/j.1460-2075.1983.tb01715.x>

