



Genética de precisión: El futuro de la cebada y la cerveza

Maximiliano Pedraza Mejía 1, Myriam Guadalupe Rodríguez Gandarilla1, Julio Armando Massange Sánchez 1*

1 Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ), Unidad de Biotecnología Vegetal, Zapopan, México. Camino Arenero 1227, El Bajío, 45019, Zapopan, Jalisco.

*Correspondencia: jmassange@ciatej.mx

Foto: Aflo

Tema

Aquí exploramos cómo la genética de precisión está transformando el mejoramiento de la cebada, el cereal clave para la producción de cerveza. Mostramos cómo herramientas como el cultivo in vitro y el sistema CRISPR/Cas9 permiten generar nuevas variedades con mejores características, así como los retos regulatorios que acompañan su aplicación en el campo.

1.Introducción

La cerveza ha acompañado a la humanidad durante más de 9,000 años, desde sus orígenes en la antigua Mesopotamia hasta convertirse en una de las bebidas más consumidas del mundo. Detrás de cada vaso hay mucho más que historia: existe un proceso biológico fascinante en el que los azúcares del grano se transforman en aromas, sabores y espuma gracias a la acción de la levadura, en presencia de agua y lúpulo. En el centro de esta transformación se

encuentra la cebada (*Hordeum vulgare* L.), ingrediente esencial de la mayoría de las cervezas. No es casualidad que entre el 30% y el 40% de su producción global se destine a la elaboración de cerveza (Figura 1).

La industria cervecera enfrenta el desafío de asegurar un suministro suficiente de grano para una demanda global en crecimiento, en un contexto marcado por el cambio climático. Sequías más frecuentes, olas de calor y otras condiciones ambientales extremas afectan directamente el rendimiento y la calidad de la cebada, poniendo en riesgo la estabilidad del cultivo y, con ello, toda la cadena productiva. Frente a este escenario, el mejoramiento genético se ha convertido en una herramienta estratégica para desarrollar nuevas variedades más resistentes y productivas. Así, la innovación en el campo no solo fortalece este cultivo agrícola, sino también a toda una industria.



Figura 1. Cebada y cerveza: la ciencia detrás de cada tarro.

Mejoramiento genético: una historia más antigua que la cerveza

Hace más de 10,000 años, mucho antes de que existieran los laboratorios y las herramientas moleculares, el mejoramiento genético ya estaba en marcha. Los primeros agricultores, guiados por la intuición, seleccionaban las semillas de las plantas más vigorosas o fáciles de cosechar. Sin saberlo, estaban eligiendo características determinadas por los genes, es decir, por el «manual de instrucciones» que guía el desarrollo de cada planta y define su tamaño, su resistencia a las enfermedades y su capacidad de adaptación al clima. Durante siglos, la cebada se mejoró de manera empírica, y muchas de esas variedades tradicionales siguen siendo valiosas en la actualidad, pues representan la base de la diversidad genética que ha permitido cultivar este cereal en entornos muy diversos. En el siglo XIX, la ciencia comenzó a explicar lo que los agricultores ya practicaban en el campo. Las ideas de Darwin sobre la selección y los principios de la herencia descritos por Mendel sentaron las bases del mejoramiento

genético moderno, en el que los cruzamientos entre distintas variedades permitieron combinar rasgos deseables de forma más dirigida y eficiente. Esto marcó el inicio de una nueva etapa: una selección basada en el conocimiento científico y no solo en la observación. Décadas más tarde, este camino conduciría al desarrollo de herramientas biotecnológicas capaces de modificar la cebada con una precisión impensable en el pasado.

¿Del azar a la precisión? Herramientas tecnológicas para la cebada del futuro

En esta nueva era, el mejoramiento genético ha dejado atrás el ensayo y error para convertirse en una estrategia de alta precisión. Herramientas actuales como la secuenciación de genomas, el cultivo in vitro y la edición genética no solo permiten identificar genes clave, sino también comprender cómo interactúan entre sí y cómo responden a distintas condiciones ambientales. La combinación de estas tecnologías abre la puerta a programas de mejora mucho más eficientes, capaces de desarrollar variedades que resistan el cambio climático sin perder la calidad maltera que busca la industria.

CRISPR/Cas9: las tijeras moleculares de precisión

El mejoramiento de precisión emplea herramientas conocidas como «tijeras moleculares»: enzimas capaces de cortar el ADN en sitios definidos para modificar con exactitud secuencias asociadas al rendimiento, a la resistencia a enfermedades o a la calidad del grano. Entre ellas, el sistema CRISPR/Cas9 se ha consolidado como la tecnología más versátil y prometedora de la biotecnología vegetal actual. Este sistema funciona gracias a un equipo de dos: la enzima Cas9 y una molécula de ARN guía, que actúa como un «GPS molecular» para localizar el punto exacto del corte. Una vez que el sistema reconoce su objetivo (ayudado por una breve secuencia de control llamada PAM), la enzima realiza el corte.

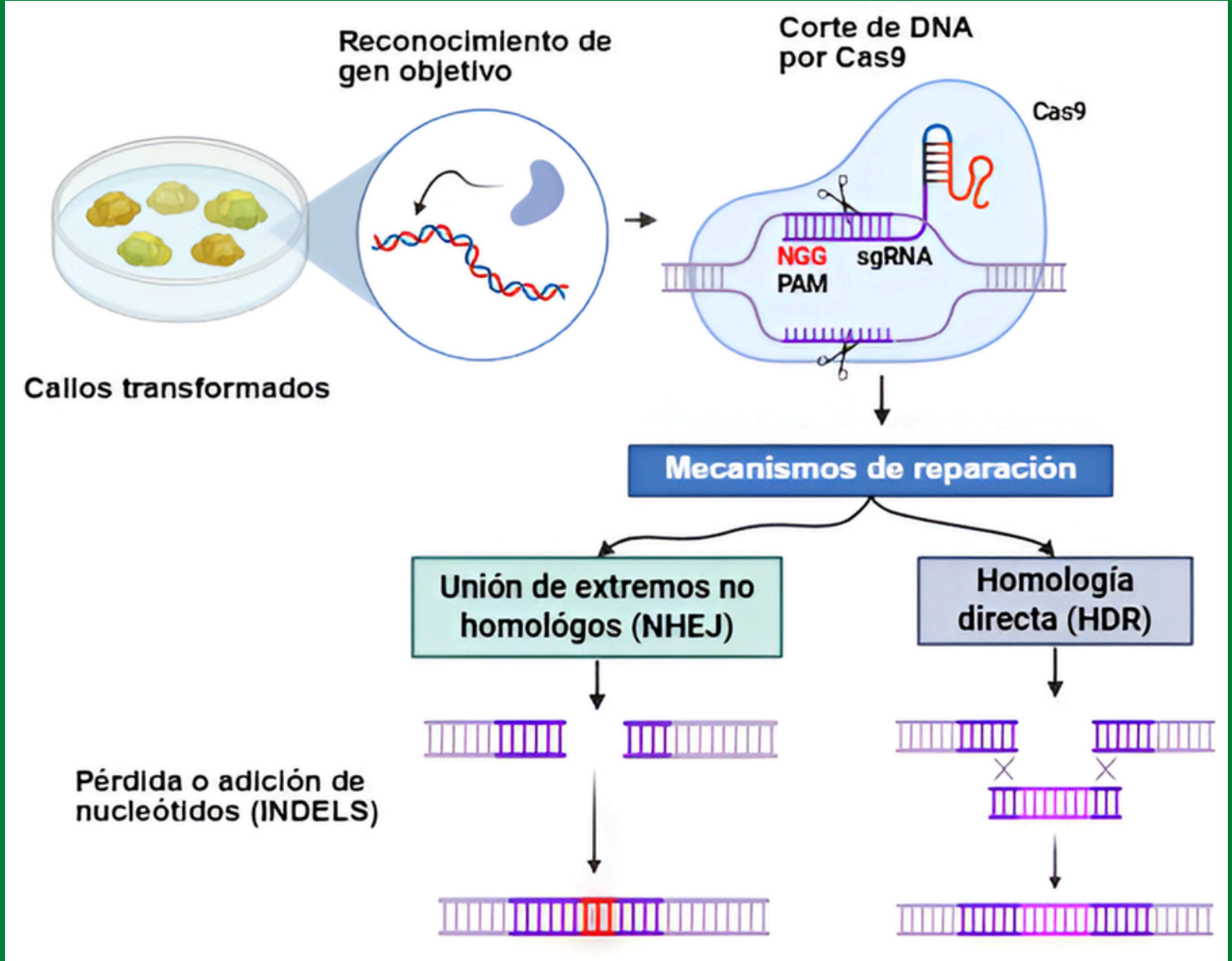


Figura 2. Cómo funciona el sistema CRISPR/Cas9 para editar genes. Se muestra cómo la herramienta CRISPR/Cas9 corta el ADN en un punto específico y cómo la célula repara ese corte mediante dos mecanismos naturales: la unión de extremos no homólogos (NHEJ), que puede generar pequeñas modificaciones, y la recombinación dirigida por homología (HDR), que permite introducir cambios más precisos. Figura creada con BioRender.com.

Es entonces cuando entra en juego la propia biología de la planta. Al activarse sus mecanismos naturales de reparación del ADN, pueden ocurrir dos tipos de “arreglos”. Uno es la unión de extremos no homólogos (NHEJ), una reparación rápida pero poco precisa, que puede “apagar” un gen al introducir pequeños cambios en su secuencia. El otro es la recombinación dirigida por homología (HDR), un proceso mucho más exacto que utiliza un molde para “reescribir” de manera específica una parte del ADN. El resultado son nuevas variedades con rasgos potenciados, logradas con una precisión que hasta hace poco parecía ciencia ficción (Figura 2).

Cultivo *in vitro*: el comienzo de la nueva cebada

Las plantas poseen una capacidad extraordinaria llamada totipotencialidad, que permite que una sola célula regenere un organismo completo. Esta propiedad es el pilar del cultivo *in vitro*, una técnica en la que tejidos vegetales se desarrollan en condiciones controladas de laboratorio, bajo una dieta estricta de nutrientes, temperatura y luz.

En el caso de la cebada, el proceso comienza con fragmentos de tejido —como embriones inmaduros— que dan origen a callos: masas de células con alta capacidad de multiplicación.

Estos callos funcionan como una «pizarra en blanco» biológica, convirtiéndose en el lienzo ideal para la edición genética, ya que a partir de ellos se pueden regenerar plantas completas que ya portan los cambios deseados.

Para guiar este desarrollo, se emplean reguladores de crecimiento. Aunque estas sustancias existen en la naturaleza, en el laboratorio se utilizan versiones sintéticas (como el 2,4-D o el dicamba) que actúan como señales precisas para optimizar el proceso. Así, el cultivo in vitro se consolida como el paso indispensable para que las innovaciones genéticas pasen del diseño a la realidad (Figura 3).

¿Cómo se combinan el cultivo in vitro y el sistema CRISPR/Cas9?

Una vez obtenidos los callos, el siguiente paso es introducir los componentes del sistema CRISPR/Cas9 en sus células. Este proceso, denominado transformación genética, consiste en «entregar» a la célula las instrucciones moleculares necesarias para que el sistema localice y edite el gen objetivo.

En el mundo vegetal, existen dos métodos principales para lograr esta entrega. El primero utiliza a *Agrobacterium tumefaciens*, una

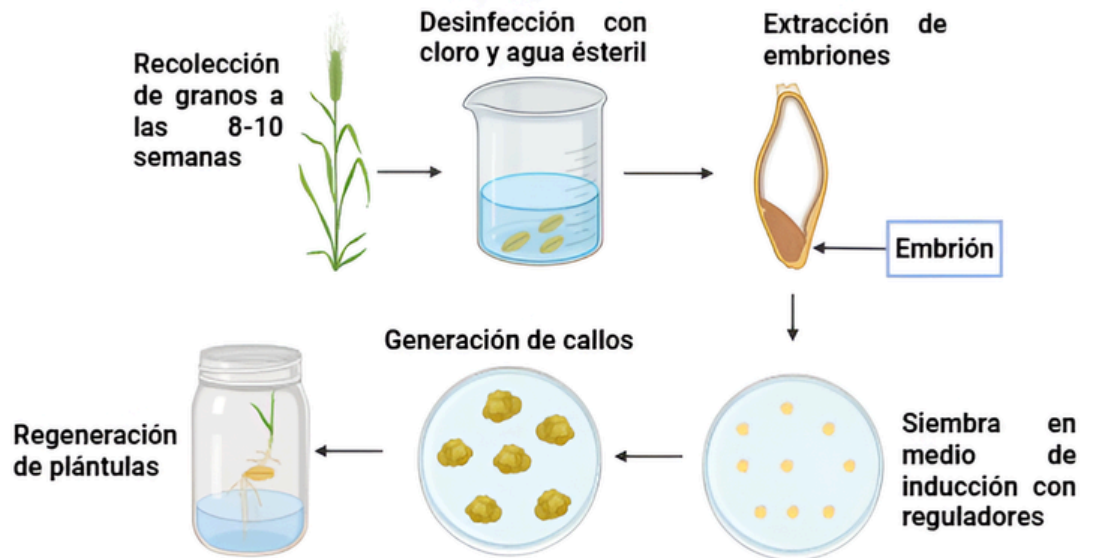


Figura 3. Cultivo in vitro: de una célula a una planta completa. Esquema del proceso que va desde la selección de embriones inmaduros hasta la formación de callos (tejido celular indiferenciado) y la regeneración de plántulas completas en condiciones controladas de laboratorio. Figura creada con BioRender.com.

bacteria del suelo conocida como la «ingeniera genética de la naturaleza» por su capacidad natural de transferir ADN a las plantas. El segundo método, más directo y mecánico, es la biobalística o «pistola de genes». Esta técnica consiste en disparar micropartículas de oro o de tungsteno recubiertas con el material genético hacia los tejidos vegetales. Aunque la biobalística es muy versátil, suele ser más costosa y requiere una calibración meticulosa para asegurar que las células reciban el mensaje sin sufrir daños (Figura 4).

Edición genética en acción: avances en cebada cervecera

Ahora que conocemos cómo funcionan las «tijeras moleculares»,

surge una pregunta natural: ¿qué se ha logrado realmente con el sistema CRISPR/Cas9 en este cultivo? Esta tecnología ya permite modificar genes específicos para obtener plantas con rasgos superiores, lo que impacta tanto en el campo como en la fábrica (Tabla 1).

Uno de los avances más prometedores es la edición del gen HvMlo. Estos están vinculados a la susceptibilidad a enfermedades; al modificarlos, se han obtenido variedades resistentes a *Blumeria graminis*, el hongo responsable del oídio. Este logro no solo protege las cosechas, sino que también permite una producción más sostenible al reducir drásticamente la necesidad de fungicidas químicos.

Pero la innovación no se queda en el campo; también llega a la maltería. Al editar los genes *Hina*, que controlan la dureza del grano, se ha logrado una textura que optimiza el malteado. Esto permite una liberación más eficiente de azúcares y enzimas, mejorando la maceración y, en última instancia, elevando la calidad sensorial de la cerveza que llega a nuestro vaso.

Retos y regulación: Más allá del laboratorio

El uso de herramientas como CRISPR/Cas9 enfrenta retos que van más allá del laboratorio. Aunque esta tecnología permite realizar cambios precisos en el ADN sin necesidad de incorporar genes de otras especies, su aplicación suele evaluarse en marcos regulatorios diseñados décadas antes de la aparición de la edición genética. En muchos casos, los desarrollos obtenidos mediante CRISPR/Cas9 se analizan bajo criterios similares a los de los organismos genéticamente modificados tradicionales, aun cuando algunas de las modificaciones pueden ser comparables a las que ocurren de manera natural o mediante mejoramiento convencional. Actualizar y definir lineamientos específicos para estas nuevas herramientas brindaría la claridad necesaria a investigadores, productores y autoridades. Una regulación moderna facilitaría la transferencia responsable de la ciencia al campo e, indirectamente, a la industria.

Así, países con una fuerte tradición agrícola, y particularmente México, podrían aprovechar la edición genética para fortalecer su soberanía alimentaria y su industria cervecera, manteniendo siempre los más altos estándares de bioseguridad y confianza pública.

El futuro de la cebada y la cerveza

La cerveza es, en esencia, el reflejo del éxito en el cultivo de la cebada. Por ello, cada avance en su mejoramiento genético impacta directamente en la calidad, la sostenibilidad y la competitividad de toda la cadena productiva. Ante la crisis climática, optimizar este cereal no es solo una necesidad técnica; es una estrategia vital para preservar su valor económico y su papel en la seguridad alimentaria global.

Herramientas moleculares como CRISPR/Cas9 abren un panorama prometedor para mejorar, de manera más precisa y eficiente, características agronómicas y tecnológicas. Sin embargo, aún queda camino por recorrer para comprender plenamente sus alcances y garantizar su aplicación responsable. El desarrollo de marcos regulatorios claros y actualizados será fundamental para equilibrar la innovación biotecnológica con la seguridad alimentaria y la protección de la biodiversidad. Si se logra ese

Tabla 1. Cómo CRISPR/Cas9 está transformando el mejoramiento de la cebada para la agricultura y la cerveza.			
Gen estudiado	¿Qué cambia en la planta?	¿Para qué sirve?	Literatura recomendada
<i>HvLOXs</i>	Mayor estabilidad del grano durante almacenamiento	Mayor eficiencia para la industria cervecera	Zeng et al., 2025
<i>HvMlo</i>	Mayor resistencia al hongo <i>Blumeria graminis</i>	Reduce pérdidas por enfermedad y disminuye el uso de fungicidas	Koide et al., 2023
<i>HvGA3ox1</i>	Plantas más bajas y resistentes al acame	Mejor adaptación a sequía y al cambio climático	Cheng et al., 2023
<i>HvHina</i>	Cambios en la dureza del grano	Optimiza el proceso de malteado y la calidad sensorial	Jiang et al., 2022
<i>HvCsIF6</i>	Menor contenido de β -glucanos	Mejora la filtración del mosto y la calidad de la cerveza	García-Giménez et al., 2020
<i>HvHordeínas</i>	Disminuyen proteínas similares al gluten	Cebada con menor contenido de gluten	Sánchez-León et al., 2018

equilibrio, estas herramientas podrán contribuir de manera responsable al futuro del campo... y también al de la cerveza.

Referencias

- Cheng, J., Hill, C., Han, Y., He, T., Ye, X., Shabala, S., Guo, G., Zhou, M., Wang, K., & Li, C. (2023). New semi-dwarfing alleles with increased coleoptile length by gene editing of gibberellin 3-oxidase 1 using CRISPR-Cas9 in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant Biotechnology Journal*, 21(4), 806-818. <https://doi.org/10.1111/pbi.13998>
- García-Giménez, G., Barakate, A., Smith, P., Stephens, J., Khor, S. F., Doblin, M. S., Hao, P., Bacic, A., Fincher, G. B., Burton, R. A., Waugh, R., Tucker, M. R., & Houston, K. (2020). Targeted mutation of barley (1,3;1,4)- β -glucan synthases reveals complex relationships between the storage and cell wall polysaccharide content. *The Plant Journal*, 104(4), 1009-1022. <https://doi.org/10.1111/tpj.14977>
- Jiang, Y., Li, J., Liu, B., Cao, D., Zong, Y., Chang, Y., & Li, Y. (2022). Novel Hina alleles created by genome editing increase grain hardness and reduce grain width in barley. *Transgenic Research*, 31(6), 637-645. <https://doi.org/10.1007/s11248-022-00324-8>
- Koide, H., Hisano, H., & Yaeno, T. (2023). CRISPR/Cas9-based generation of mlo mutants for allelic complementation experiments to elucidate MLO function in barley. *Journal Of General Plant Pathology*, 89(3), 153-158. <https://doi.org/10.1007/s10327-023-01120-w>
- Sánchez-León, S., Gil-Humanes, J., Ozuna, C. V., Giménez, M. J., Sousa, C., Voytas, D. F., & Barro, F. (2017). Low-gluten, nontransgenic wheat engineered with CRISPR/Cas9. *Plant Biotechnology Journal*, 16(4), 902-910. <https://doi.org/10.1111/pbi.12837>
- Zeng, Z., Wang, H., Luo, Y., Chen, W., Xu, M., Wei, H., Chen, Z., Xiang, T., Wang, L., Han, N., Huang, X., & Bian, H. (2025). CRISPR/Cas9-mediated editing of barley lipoxygenase genes promotes grain fatty acid accumulation and storability. *GM Crops & Food*, 16(1), 482-497. <https://doi.org/10.1080/21645698.2025.2523069>

Sobre los autores:



Maximiliano Pedraza Mejía es estudiante de la Maestría en Innovación Biotecnológica del CIATEJ. Su trabajo perfecciona el uso de «tijeras moleculares» en variedades mexicanas de cebada, combinando el cultivo in vitro con marcadores visuales para asegurar ediciones genéticas precisas y exitosas.



Myriam Guadalupe Rodríguez Gandarilla es investigadora posdoctoral de la Secihti en la Unidad de Biotecnología Vegetal del CIATEJ. Su trabajo transforma los virus de plantas en herramientas biotecnológicas para fortalecer la resistencia de los cereales frente a los desafíos de la sequía.



Julio Armando Massange Sánchez es investigador titular en la Unidad de Biotecnología Vegetal del CIATEJ. Su trabajo se centra en desarrollar variedades de cebada y arroz más resistentes al cambio climático, mediante herramientas como el cultivo in vitro y las tijeras moleculares CRISPR/Cas9, que permiten modificar genes con gran precisión.

Cita: Pedraza Mejía, M., Rodríguez Gandarilla, M. G., & Massange Sánchez, J. A. (2026). Genética de precisión: El futuro de la cebada y la cerveza. *Biotecnológica Magazine*, 4(2), 16-21. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20148008>