

Artículo Revisión

Aplicaciones de CRISPR en el mejoramiento de cultivos

Applications of CRISPR in crop improvement

Alfonso Llanderal Quiroz^{1*}  

¹Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil-Ecuador

*Autor de correspondencia: Alfonso Llanderal Quiroz 

Recibido: 08-02-2024

Revisado: 15-02-2024

Aceptado: 22-02-2024

Publicado: 29-02-2024

Cómo citar este artículo: Llanderal Quiroz, A. (2024). Aplicaciones de CRISPR en el mejoramiento de cultivos. *Viterra*, 2(1), 1-44. <https://viterra.diginova.pro/index.php/viterra/article/view/9>

RESUMEN

La creciente demanda mundial de alimentos, los efectos del cambio climático, la degradación de los recursos naturales y la incidencia de plagas y enfermedades representan importantes desafíos para la agricultura contemporánea. En este contexto, las tecnologías de edición genética basadas en CRISPR han adquirido relevancia como herramientas para acelerar y mejorar los procesos de mejoramiento vegetal. El objetivo de este artículo fue analizar, mediante una revisión narrativa de la literatura, las principales aplicaciones de CRISPR en el mejoramiento de cultivos, considerando sus fundamentos tecnológicos, aplicaciones agronómicas, beneficios, limitaciones y perspectivas futuras. La revisión comprendió literatura científica y documentos especializados relacionados con edición genética de plantas, resistencia a enfermedades, tolerancia a estrés abiótico, mejoramiento de características productivas y nutricionales, edición de bases y prime editing. La evidencia examinada muestra que CRISPR permite desarrollar modificaciones genéticas dirigidas con mayor precisión y rapidez que determinados procedimientos convencionales de mejoramiento. Sus principales aplicaciones comprenden el desarrollo de cultivos resistentes a patógenos, tolerantes a sequías, salinidad y temperaturas extremas, así como el mejoramiento del rendimiento, calidad nutricional y características poscosecha. Los avances recientes en edición de bases y prime editing amplían las posibilidades de realizar modificaciones específicas sin generar necesariamente rupturas de doble cadena en el ADN. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la eficiencia de transformación y regeneración vegetal, efectos no deseados, marcos regulatorios, aceptación social, propiedad intelectual y acceso equitativo a las tecnologías. Se concluye que CRISPR representa una herramienta estratégica para el mejoramiento de cultivos y la agricultura sostenible, aunque su desarrollo responsable requiere investigación científica, evaluación de riesgos, regulación adaptativa y mecanismos capaces de facilitar el acceso a sus beneficios.

Palabras clave: CRISPR; edición genética; mejoramiento de cultivos; biotecnología agrícola; resistencia a enfermedades; agricultura sostenible.

ABSTRACT

Growing global food demand, the effects of climate change, natural resource degradation, and the incidence of pests and diseases represent major challenges for contemporary agriculture. In this context, CRISPR-based gene-editing technologies have gained relevance as tools to accelerate and improve plant breeding processes. The objective of this article was to analyse, through a narrative review of the literature, the main applications of CRISPR in crop improvement, considering its technological foundations, agronomic applications, benefits, limitations, and future prospects. The review covered scientific literature and specialised documents related to plant gene editing, disease resistance, tolerance to abiotic stress, improvement of productive and nutritional traits, base editing, and prime editing. The evidence examined shows that CRISPR enables targeted genetic modifications to be developed with greater precision and speed than certain conventional breeding procedures. Its main applications include the development of crops resistant to pathogens, tolerant to drought, salinity, and extreme temperatures, as well as

improvements in yield, nutritional quality, and post-harvest traits. Recent advances in base editing and prime editing expand the possibilities for making specific modifications without necessarily generating double-strand breaks in DNA. However, challenges remain regarding plant transformation and regeneration efficiency, unintended effects, regulatory frameworks, social acceptance, intellectual property, and equitable access to technologies. It is concluded that CRISPR represents a strategic tool for crop improvement and sustainable agriculture, although its responsible development requires scientific research, risk assessment, adaptive regulation, and mechanisms capable of facilitating access to its benefits.

Keywords: CRISPR; gene editing; crop improvement; agricultural biotechnology; disease resistance; sustainable agriculture.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura constituye uno de los sectores estratégicos para garantizar la seguridad alimentaria mundial; sin embargo, enfrenta desafíos cada vez más complejos derivados del crecimiento demográfico, el cambio climático, la degradación de los recursos naturales y la aparición de nuevas plagas y enfermedades que afectan la productividad de los cultivos (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2022). Estas condiciones incrementan la necesidad de desarrollar variedades vegetales con mayor capacidad de adaptación, rendimiento y resistencia, sin comprometer la sostenibilidad ambiental. En este contexto, la FAO (2022) destaca que la innovación biotecnológica representa una herramienta fundamental para fortalecer los sistemas agroalimentarios y responder a las demandas de una agricultura más eficiente y resiliente. Aunque los programas tradicionales de mejoramiento genético han contribuido significativamente al incremento de la productividad agrícola, sus resultados suelen requerir largos períodos de selección y múltiples generaciones de cruzamiento, lo que limita la rapidez con la que pueden responder a los desafíos actuales (Jaganathan et al., 2018). Frente a este escenario, el desarrollo de tecnologías de edición genética ha abierto nuevas posibilidades para acelerar el mejoramiento vegetal mediante modificaciones precisas y dirigidas del genoma. En este sentido, Gao (2021) sostiene que las herramientas modernas de ingeniería genómica representan un componente esencial para impulsar una agricultura más productiva, sostenible y capaz de responder a los desafíos alimentarios y ambientales del futuro.

Entre las herramientas biotecnológicas desarrolladas durante la última década, los sistemas CRISPR (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats) asociados a proteínas Cas se han consolidado como una de las tecnologías más innovadoras para la edición del genoma de plantas (Jaganathan et al., 2018). Su funcionamiento se basa en un mecanismo natural de defensa presente en bacterias y arqueas, posteriormente adaptado para reconocer secuencias específicas de ADN mediante una molécula de ARN guía y realizar modificaciones altamente precisas en regiones concretas del genoma (Chen et al., 2019). Esta capacidad ha transformado la investigación en biología vegetal, permitiendo modificar genes de interés con mayor eficiencia, menor costo y mayor versatilidad que otras técnicas de ingeniería genética previamente utilizadas, lo que ha ampliado significativamente las posibilidades del mejoramiento genético de cultivos (Razzaq et al., 2019). Asimismo, Zhu et al. (2020) señalan que la rápida evolución de las herramientas CRISPR ha favorecido el desarrollo de nuevas estrategias de mejoramiento vegetal orientadas a incrementar la productividad agrícola y fortalecer la adaptación de los cultivos frente a condiciones ambientales adversas. En la misma línea, Gao (2021) sostiene que la ingeniería genómica basada en CRISPR constituye una de las principales plataformas biotecnológicas para impulsar una agricultura más eficiente, sostenible y resiliente frente a los desafíos actuales.

El creciente interés científico por la aplicación de CRISPR en agricultura responde a las numerosas posibilidades que ofrece para incorporar características agronómicas específicas sin alterar de manera significativa el resto del genoma vegetal. A diferencia del mejoramiento convencional, que depende de la recombinación genética y de prolongados procesos de selección, la edición genética permite intervenir directamente sobre genes responsables de rasgos de interés, reduciendo considerablemente los tiempos requeridos para obtener nuevas variedades. De acuerdo con Schindele et al. (2018), esta tecnología ha modificado profundamente la forma en que se desarrollan los programas

de mejoramiento vegetal al facilitar intervenciones dirigidas sobre características relacionadas con productividad, calidad y adaptación ambiental. De manera similar, Wada et al. (2020) destacan que la elevada precisión alcanzada por las plataformas actuales de edición genética permite incrementar la eficiencia del proceso de mejoramiento y ampliar las posibilidades de aplicación en diferentes especies agrícolas.

Una de las principales áreas de investigación se relaciona con el desarrollo de cultivos resistentes a enfermedades causadas por hongos, bacterias y virus, responsables de importantes pérdidas económicas en la producción agrícola mundial. La modificación de genes asociados con la susceptibilidad de las plantas o con sus mecanismos naturales de defensa ha permitido obtener materiales vegetales con mayores niveles de resistencia frente a diversos patógenos, reduciendo simultáneamente la dependencia del uso intensivo de productos fitosanitarios. Ahmad et al. (2020) señalan que la utilización de CRISPR/Cas9 representa una de las estrategias más prometedoras para fortalecer la resistencia genética de los cultivos, mientras que Veillet et al. (2020) destacan que la edición de genes relacionados con la interacción planta-patógeno constituye una alternativa sostenible para disminuir las pérdidas ocasionadas por enfermedades y favorecer sistemas agrícolas más resilientes.

Además del control de enfermedades, la edición genética ha demostrado un importante potencial para incrementar la tolerancia de los cultivos frente a factores de estrés abiótico como sequías, salinidad, altas temperaturas y otras condiciones ambientales extremas cuya frecuencia se ha incrementado como consecuencia del cambio climático. Estas condiciones afectan directamente el crecimiento vegetal, reducen el rendimiento de las cosechas y comprometen la estabilidad de la producción agrícola en numerosas regiones del mundo. Abdelrahman et al. (2021) evidencian que la modificación de genes involucrados en las respuestas fisiológicas al estrés permite mejorar significativamente la adaptación de las plantas a ambientes desfavorables. En la misma línea, Naik et al. (2022) sostienen que la incorporación de herramientas CRISPR en los programas de mejoramiento constituye una estrategia clave para desarrollar cultivos más resistentes, eficientes en el uso del agua y mejor adaptados a escenarios climáticos cambiantes.

El potencial de CRISPR también se extiende al incremento del rendimiento agrícola, la mejora de la calidad nutricional y la optimización de características poscosecha. Diversos estudios han logrado modificar genes relacionados con el tamaño de frutos, número de semillas, arquitectura de las plantas, eficiencia fotosintética y utilización de nutrientes, contribuyendo al desarrollo de variedades con mayor productividad y mejores propiedades nutricionales. Chen et al. (2019) señalan que estas aplicaciones representan uno de los principales aportes de la edición genética al mejoramiento vegetal moderno, mientras que Gao (2021) considera que la ingeniería genómica basada en CRISPR constituye un componente esencial para la agricultura del futuro al facilitar el desarrollo de cultivos capaces de responder simultáneamente a objetivos productivos, económicos y ambientales.

Paralelamente, la evolución de las tecnologías CRISPR ha dado lugar al desarrollo de herramientas de nueva generación, entre ellas la edición de bases (base editing), la edición de precisión (prime editing) y nuevas variantes de proteínas Cas con mayor eficiencia y especificidad. Estas innovaciones permiten realizar modificaciones puntuales sin producir necesariamente rupturas de doble cadena en el ADN, reduciendo potencialmente la ocurrencia de efectos fuera del sitio de edición y ampliando las posibilidades de intervención sobre genes de interés. Molla y Yang (2019) destacan que la edición de bases representa uno de los avances más importantes en la evolución reciente de la ingeniería genética vegetal, mientras que Li et al. (2019) demostraron, mediante secuenciación completa del genoma, que los eventos de edición fuera del objetivo pueden mantenerse en niveles muy bajos cuando se emplean estrategias de diseño adecuadas. Asimismo, Gaillochet et al. (2021) resaltan que las nuevas metodologías basadas en CRISPR amplían considerablemente las posibilidades de investigación funcional y aceleran la identificación de genes asociados con características agronómicas relevantes.

A pesar de sus numerosas ventajas, la implementación de CRISPR en el mejoramiento de cultivos continúa enfrentando importantes desafíos científicos, regulatorios y sociales. La eficiencia de transformación y regeneración vegetal aún presenta limitaciones en determinadas especies, mientras que la regulación de los organismos obtenidos mediante edición genética difiere considerablemente entre países, generando incertidumbre para su adopción comercial. A ello

se suman aspectos relacionados con la propiedad intelectual, la aceptación pública y la necesidad de garantizar la seguridad y trazabilidad de los productos obtenidos mediante estas tecnologías. En este sentido, el Tang et al. (2023) y ChileBio (2021), Tachikawa y Matsuo (2023) y Strobbe et al. (2023) coinciden en que el futuro de la edición genética dependerá no solo del avance científico, sino también de la construcción de marcos regulatorios transparentes, procesos de comunicación basados en evidencia y mecanismos que faciliten el acceso responsable a estas innovaciones.

En este contexto, la literatura científica sobre las aplicaciones de CRISPR en agricultura ha experimentado un crecimiento acelerado durante los últimos años, abordando múltiples especies vegetales, metodologías y objetivos de mejoramiento. Sin embargo, la diversidad de enfoques y resultados hace necesaria una revisión que integre de manera crítica los principales avances alcanzados, las aplicaciones más relevantes y los desafíos que aún condicionan su implementación. Por ello, la presente revisión narrativa tiene como propósito analizar las principales aplicaciones de las tecnologías CRISPR en el mejoramiento de cultivos, considerando sus fundamentos biológicos, su contribución al desarrollo de resistencia a enfermedades y tolerancia al estrés abiótico, las mejoras en productividad y calidad de los cultivos, los avances tecnológicos recientes y las perspectivas futuras para una agricultura más sostenible.

2. METODOLOGÍA

Diseño de la revisión narrativa

El presente estudio se desarrolló mediante una revisión narrativa de la literatura, con el propósito de analizar, organizar e interpretar los principales avances relacionados con las aplicaciones de las tecnologías CRISPR en el mejoramiento de cultivos. Este enfoque metodológico fue seleccionado debido a la amplitud y constante evolución del tema de investigación, el cual integra estudios experimentales, revisiones científicas, documentos técnicos, publicaciones institucionales y análisis regulatorios sobre edición genética vegetal. Jaganathan et al. (2018) señalan que el desarrollo de CRISPR ha experimentado un crecimiento acelerado durante los últimos años, generando una amplia diversidad de investigaciones en diferentes especies vegetales y áreas del mejoramiento genético. En la misma línea, Zhu et al. (2020) sostienen que la rápida expansión de las aplicaciones agrícolas de esta tecnología hace necesario integrar la evidencia disponible mediante revisiones que permitan comprender su evolución y sus principales tendencias científicas.

La revisión narrativa permitió examinar de manera integral los fundamentos biológicos de los sistemas CRISPR-Cas, así como sus aplicaciones en el desarrollo de cultivos con resistencia a enfermedades, tolerancia a factores de estrés abiótico, incremento del rendimiento agronómico y mejoramiento de la calidad nutricional. Chen et al. (2019) destacan que la edición genómica de precisión ha ampliado considerablemente las posibilidades del mejoramiento vegetal al facilitar modificaciones dirigidas sobre genes de interés agronómico. Posteriormente, Gao (2021) indica que estas herramientas representan una de las principales innovaciones biotecnológicas para fortalecer la agricultura del futuro, mientras que Naik et al. (2022) enfatizan su contribución potencial para promover sistemas agrícolas más sostenibles, eficientes y resilientes frente a los efectos del cambio climático.

La investigación fue orientada por la siguiente pregunta: ¿Cuáles son las principales aplicaciones, avances, beneficios, limitaciones y perspectivas de las tecnologías CRISPR en el mejoramiento de cultivos? Para responder esta interrogante se desarrolló un proceso organizado que comprendió la delimitación del objeto de estudio, la identificación de fuentes documentales, la definición de criterios de selección, la recopilación de información científica, la organización temática de los contenidos y el análisis crítico de los hallazgos. Razzaq et al. (2019) indican que la diversidad de aplicaciones de CRISPR exige integrar resultados provenientes de diferentes líneas de investigación para comprender su alcance dentro del mejoramiento vegetal. Asimismo, Gaillochet et al. (2021) destacan que la continua aparición de nuevas metodologías y aplicaciones hace necesaria una evaluación crítica de la evidencia disponible para identificar los principales avances y perspectivas futuras.

El período principal de análisis comprendió publicaciones científicas y documentos técnicos publicados entre 2021 y 2023, debido a que este intervalo permitió examinar los avances más recientes relacionados con la aplicación de

CRISPR en el mejoramiento de cultivos. No obstante, también se incorporaron investigaciones publicadas con anterioridad cuando constituyeron aportes fundamentales para comprender la evolución de las herramientas de edición genética y sus aplicaciones agrícolas. En este sentido, la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2022) aporta un marco general sobre el papel de la edición genética en los sistemas agroalimentarios, mientras que el Tang et al. (2023) documenta los avances recientes de CRISPR en agricultura. Complementariamente, el Tang et al. (2023) presenta una actualización sobre las tendencias más recientes en la aplicación de estas tecnologías, contribuyendo a contextualizar el estado actual del conocimiento científico.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda documental

La búsqueda documental estuvo orientada a identificar literatura científica, documentos institucionales y publicaciones técnicas relacionadas con las aplicaciones de las tecnologías CRISPR en el mejoramiento de cultivos. Con el propósito de obtener una visión amplia y actualizada del estado del conocimiento, se consultaron artículos científicos revisados por pares, informes institucionales y recursos especializados que abordaran los fundamentos de la edición genética, sus aplicaciones agrícolas y las perspectivas futuras de esta tecnología. En este sentido, las publicaciones del Tang et al. (2023) constituyeron una fuente relevante para comprender la evolución reciente de CRISPR en agricultura, mientras que la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2022) aportó información sobre el papel de la edición genética en los sistemas agroalimentarios y su contribución al desarrollo agrícola sostenible.

Las fuentes documentales incluyeron investigaciones publicadas en revistas científicas de alto impacto, así como documentos elaborados por instituciones especializadas en biotecnología vegetal. Se consideraron especialmente los estudios de Chen et al. (2019) y Gao (2021), debido a que presentan una visión integral sobre la evolución de la edición genómica aplicada al mejoramiento vegetal. De igual manera, se incorporaron las publicaciones del Tang et al. (2023) y de Tachikawa y Matsuo (2023), las cuales permitieron complementar la información científica con los avances tecnológicos más recientes y las nuevas herramientas desarrolladas para la edición genética de plantas.

La estrategia de búsqueda se estructuró mediante palabras clave relacionadas con los principales componentes del objeto de estudio. En idioma español se utilizaron términos como CRISPR en agricultura, edición genética de plantas, CRISPR y mejoramiento vegetal, cultivos editados genéticamente, CRISPR y resistencia a enfermedades, CRISPR y estrés abiótico, edición de bases en plantas, prime editing en cultivos y nuevas técnicas genómicas en agricultura. Paralelamente, la búsqueda en idioma inglés incluyó expresiones como CRISPR agriculture, plant genome editing, CRISPR crop improvement, gene-edited crops, CRISPR disease resistance, CRISPR abiotic stress tolerance, base editing plants, prime editing crops y new genomic techniques agriculture, con el propósito de ampliar la recuperación de literatura científica internacional.

Los términos de búsqueda fueron combinados mediante operadores booleanos de acuerdo con los principales ejes temáticos analizados, permitiendo localizar investigaciones relacionadas con los fundamentos biológicos de CRISPR, sus aplicaciones en el mejoramiento de cultivos, los avances tecnológicos más recientes y los desafíos regulatorios asociados a su implementación. Esta estrategia favoreció la identificación de estudios sobre resistencia a enfermedades, tolerancia al estrés abiótico, incremento del rendimiento agrícola, calidad nutricional, sostenibilidad y nuevas herramientas de edición genética, aspectos ampliamente abordados por Jaganathan et al. (2018) y posteriormente ampliados por Naik et al. (2022) en sus revisiones sobre la evolución de CRISPR en agricultura.

Criterios de selección de la literatura

La selección de los documentos se realizó considerando su pertinencia científica y su relación directa con los objetivos de la presente revisión. Se priorizaron investigaciones enfocadas en la aplicación de los sistemas CRISPR-Cas en plantas y cultivos agrícolas, incluyendo estudios relacionados con resistencia a enfermedades, tolerancia a sequía, salinidad y temperaturas extremas, mejoramiento del rendimiento, calidad nutricional y modificaciones de características agronómicas. Ahmad et al. (2020) destacan que estas aplicaciones representan algunas de las principales líneas de

investigación desarrolladas durante los últimos años, mientras que Abdelrahman et al. (2021) evidencian el creciente interés por utilizar la edición genética como herramienta para incrementar la adaptación de los cultivos frente al estrés ambiental.

Asimismo, se incorporaron publicaciones relacionadas con tecnologías derivadas como la edición de bases (base editing), el prime editing y el desarrollo de nuevas proteínas Cas, debido a su importancia para ampliar las posibilidades de intervención sobre genes específicos del genoma vegetal. Molla y Yang (2019) señalan que la edición de bases constituye uno de los avances más relevantes en la evolución reciente de la ingeniería genética, mientras que Wada et al. (2020) destacan que las nuevas estrategias de edición permiten incrementar la precisión y eficiencia de las modificaciones genómicas en diferentes especies vegetales.

También fueron considerados documentos relacionados con sostenibilidad agrícola, seguridad alimentaria, regulación, aceptación social, propiedad intelectual y acceso a las tecnologías, siempre que presentaran una relación directa con la aplicación de CRISPR en el mejoramiento vegetal. En este sentido, la FAO (2022) resalta la importancia de analizar conjuntamente los aspectos científicos, regulatorios y sociales para favorecer una implementación responsable de la edición genética, mientras que el Tang et al. (2023) destaca la necesidad de fortalecer los marcos regulatorios y la comunicación científica para facilitar la adopción de estas tecnologías.

Se priorizaron publicaciones correspondientes al período 2021-2023, por reflejar el estado más reciente del desarrollo científico en esta área; sin embargo, también se incorporaron investigaciones publicadas con anterioridad cuando representaban aportes fundamentales para comprender la evolución de las herramientas CRISPR. Trabajos como los de Schindele et al. (2018) y Razzaq et al. (2019) continúan siendo referentes para explicar los principios de funcionamiento de la edición genética y su incorporación en los programas modernos de mejoramiento vegetal. Por otra parte, se excluyeron publicaciones centradas exclusivamente en aplicaciones médicas o animales de CRISPR, documentos sin relación directa con cultivos agrícolas, fuentes duplicadas y estudios que no aportaran información suficiente para responder a la pregunta de investigación. Debido al carácter narrativo de la revisión, el objetivo no consistió en cuantificar exhaustivamente todas las publicaciones disponibles, sino en seleccionar aquellas que permitieran construir una visión amplia, crítica y actualizada sobre el estado del conocimiento.

Organización y análisis de la información

La información recopilada fue organizada mediante categorías temáticas definidas a partir de los objetivos de la investigación y de las principales líneas de desarrollo identificadas en la literatura científica. Estas categorías incluyeron los fundamentos y evolución de los sistemas CRISPR-Cas, la resistencia de cultivos frente a enfermedades, la tolerancia al estrés abiótico, el mejoramiento del rendimiento y de las características agronómicas, la calidad nutricional, las aplicaciones poscosecha, la edición de bases, el prime editing, el desarrollo de nuevas proteínas Cas, la sostenibilidad agrícola, la seguridad alimentaria, los desafíos técnicos, los marcos regulatorios, la aceptación social, la propiedad intelectual y las perspectivas futuras. Chen et al. (2019) destacan que estas áreas representan los principales ejes de investigación sobre edición genómica aplicada al mejoramiento vegetal, mientras que Gao (2021) señala que su integración permite comprender el impacto de CRISPR en la agricultura contemporánea.

Para cada categoría temática se realizó un análisis detallado de las principales aplicaciones, avances científicos, beneficios potenciales y limitaciones identificadas en la literatura. Posteriormente, la información fue comparada mediante un análisis transversal que permitió establecer relaciones entre innovación biotecnológica, productividad agrícola, adaptación al cambio climático y sostenibilidad de los sistemas de producción. Veillet et al. (2020) evidencian que la edición genética constituye una herramienta con importantes implicaciones para el desarrollo de cultivos resistentes a enfermedades, mientras que Naik et al. (2022) destacan su contribución potencial para fortalecer la resiliencia de la agricultura frente a los desafíos ambientales.

Finalmente, la evidencia recopilada fue sintetizada mediante un procedimiento de análisis narrativo y crítico que permitió integrar los diferentes enfoques presentes en la literatura y valorar las implicaciones científicas, tecnológicas y regulatorias derivadas de la utilización de CRISPR en el mejoramiento de cultivos. Este enfoque facilitó la comparación

de resultados reportados por distintos autores e instituciones, permitiendo identificar tendencias comunes, vacíos de investigación y perspectivas futuras para el desarrollo de una agricultura más sostenible, eficiente e innovadora, tal como señalan el Tang et al. (2023) y Tang et al. (2023).

3. RESULTADOS

Evolución de las tecnologías CRISPR aplicadas al mejoramiento vegetal

La literatura científica evidencia que las tecnologías CRISPR han experimentado una evolución acelerada desde su incorporación en el mejoramiento vegetal, transformándose en una de las herramientas biotecnológicas más importantes para la edición precisa del genoma de plantas. Inicialmente, las investigaciones estuvieron orientadas a demostrar la viabilidad de modificar genes individuales asociados con características específicas de interés agronómico; sin embargo, el desarrollo continuo de nuevas variantes del sistema CRISPR ha ampliado considerablemente sus posibilidades de aplicación. Jaganathan et al. (2018) señalan que la simplicidad de diseño, la facilidad de implementación y la elevada precisión de estos sistemas favorecieron su rápida adopción en programas de investigación agrícola. Posteriormente, Chen et al. (2019) destacan que la incorporación de herramientas basadas en CRISPR marcó el inicio de una nueva etapa en el mejoramiento vegetal al permitir modificaciones dirigidas con una eficiencia significativamente superior a la obtenida mediante técnicas convencionales de ingeniería genética.

La expansión de las aplicaciones agrícolas de CRISPR también se encuentra estrechamente relacionada con la flexibilidad que ofrecen las proteínas Cas para reconocer regiones específicas del genoma y generar modificaciones controladas sobre genes de interés. Este mecanismo ha permitido desarrollar investigaciones en cereales, leguminosas, hortalizas, frutales y otras especies de importancia económica, ampliando progresivamente los objetivos del mejoramiento genético hacia características cada vez más complejas. En este sentido, Razzaq et al. (2019) sostienen que la diversidad de sistemas CRISPR disponibles ha favorecido el desarrollo de estrategias adaptadas a diferentes especies vegetales, mientras que Gao (2021) afirma que la ingeniería genómica basada en estas herramientas constituye uno de los principales motores de innovación para la agricultura del siglo XXI, debido a su capacidad para acelerar la obtención de cultivos más productivos y resilientes.

Entre las diferentes plataformas desarrolladas, CRISPR-Cas9 continúa siendo la tecnología de mayor utilización en investigación y mejoramiento vegetal. Su funcionamiento depende de la interacción entre una molécula de ARN guía y una proteína Cas9 capaz de localizar secuencias específicas del ADN para inducir modificaciones mediante los mecanismos naturales de reparación celular. Este sistema ha permitido la inactivación de genes, la introducción de mutaciones específicas y el estudio funcional de numerosas regiones genómicas involucradas en procesos fisiológicos y agronómicos. Schindele et al. (2018) destacan que la versatilidad de CRISPR-Cas9 ha favorecido su aplicación en múltiples especies vegetales, mientras que Wada et al. (2020) señalan que la continua optimización de los sistemas de edición ha incrementado tanto la precisión como la eficiencia de las modificaciones genéticas obtenidas.

El desarrollo tecnológico de CRISPR no se ha limitado a la utilización de Cas9, sino que ha evolucionado mediante la incorporación de nuevas proteínas Cas con características diferenciadas en cuanto a tamaño, especificidad y reconocimiento de secuencias genómicas. Paralelamente, han surgido herramientas de nueva generación como la edición de bases (base editing), que permite modificar nucleótidos específicos sin producir necesariamente rupturas de doble cadena en el ADN, incrementando la precisión de las intervenciones genéticas. Molla y Yang (2019) consideran que esta innovación representa uno de los avances más importantes de la edición genómica moderna, debido a su capacidad para reproducir variantes genéticas de manera altamente específica. Asimismo, Li et al. (2023) informa que el desarrollo de proteínas Cas de menor tamaño constituye una alternativa prometedora para facilitar la entrega de los componentes de edición genética y ampliar las posibilidades de aplicación en diferentes especies vegetales.

Otro avance significativo corresponde al desarrollo del prime editing, tecnología que amplía las capacidades de la edición genética al permitir sustituciones, inserciones y eliminaciones de secuencias específicas con elevados niveles de precisión. Aunque su aplicación en plantas continúa en proceso de optimización, esta herramienta representa una

evolución importante respecto a los sistemas iniciales de CRISPR, ya que incrementa la flexibilidad para introducir modificaciones complejas en el genoma vegetal. El Tang et al. (2023) destaca que estas innovaciones reflejan la rápida evolución de la edición genética aplicada a la agricultura, mientras que el Tang et al. (2023) señala que las nuevas generaciones de herramientas CRISPR están orientadas a mejorar simultáneamente la eficiencia, la especificidad y la accesibilidad de las tecnologías de edición genómica para su utilización en programas de mejoramiento vegetal.

En conjunto, la evidencia analizada demuestra que CRISPR ha dejado de ser una tecnología enfocada exclusivamente en la modificación de genes individuales para convertirse en una plataforma integral de ingeniería genómica con aplicaciones cada vez más amplias dentro del mejoramiento vegetal. La incorporación de nuevas proteínas Cas, junto con el desarrollo de herramientas como la edición de bases y el prime editing, permite anticipar una evolución continua de este campo científico (Zhu et al., 2020). En consecuencia, el futuro del mejoramiento de cultivos dependerá de la capacidad para integrar estas innovaciones con los programas tradicionales de selección genética, favoreciendo el desarrollo de variedades agrícolas más productivas, resilientes y adaptadas a los desafíos derivados del cambio climático y de la creciente demanda mundial de alimentos. Naik et al. (2022) señalan que la combinación de la edición genómica con las estrategias convencionales de mejoramiento constituye uno de los principales desafíos y, al mismo tiempo, una de las mayores oportunidades para fortalecer la sostenibilidad de la agricultura moderna.

Aplicaciones de CRISPR para la resistencia a enfermedades

La resistencia a enfermedades constituye una de las aplicaciones más relevantes de las tecnologías CRISPR dentro del mejoramiento vegetal, debido al impacto que los patógenos ejercen sobre la productividad agrícola y la seguridad alimentaria a escala mundial. Hongos, bacterias, virus y otros microorganismos ocasionan pérdidas económicas significativas al reducir el rendimiento y la calidad de numerosos cultivos de importancia comercial. La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2022) advierte que las enfermedades de las plantas representan uno de los principales factores que limitan la producción agrícola sostenible, lo que ha incrementado el interés por desarrollar estrategias innovadoras que permitan fortalecer la resistencia genética de los cultivos y disminuir la dependencia de métodos convencionales de control.

Una de las principales ventajas de CRISPR consiste en la posibilidad de modificar de forma precisa genes involucrados en los procesos de infección o en los mecanismos naturales de defensa de las plantas. En lugar de introducir genes externos, esta tecnología permite editar regiones específicas del genoma para reducir la susceptibilidad frente a determinados patógenos o potenciar respuestas inmunológicas ya presentes en la especie vegetal. Razzaq et al. (2019) destacan que la identificación y modificación de genes de susceptibilidad constituye una de las estrategias más prometedoras para obtener cultivos con resistencia duradera, ya que limita la capacidad de los microorganismos para establecer procesos de infección.

La edición genética también ha permitido profundizar en el conocimiento de los mecanismos moleculares que regulan la respuesta inmune de las plantas. Diversos genes participan en la detección de microorganismos invasores y en la activación de señales bioquímicas responsables de coordinar las respuestas defensivas. Mediante CRISPR es posible estudiar la función de estos genes y evaluar el efecto de su modificación sobre la resistencia de diferentes especies agrícolas. Chen et al. (2019) señalan que esta aproximación no solo acelera el desarrollo de nuevas variedades resistentes, sino que además facilita la comprensión de complejas redes regulatorias involucradas en la interacción entre plantas y patógenos.

La resistencia frente a enfermedades virales representa otra de las líneas de investigación que ha experimentado un crecimiento considerable durante los últimos años. Las estrategias desarrolladas incluyen tanto la modificación de genes de la planta indispensables para la replicación viral como la edición dirigida de secuencias pertenecientes al propio genoma de los virus, dificultando su multiplicación y propagación. Abdelrahman et al. (2021) indican que estas aproximaciones han demostrado resultados prometedores en diferentes cultivos, ampliando las posibilidades de desarrollar variedades capaces de enfrentar enfermedades que anteriormente resultaban difíciles de controlar mediante los programas tradicionales de mejoramiento.

Los resultados obtenidos en cereales, hortalizas, frutales y leguminosas evidencian que las aplicaciones de CRISPR poseen un amplio potencial para incrementar la resistencia genética de numerosas especies cultivadas. Además de contribuir a reducir las pérdidas ocasionadas por enfermedades, el desarrollo de variedades resistentes puede disminuir el uso de fungicidas, bactericidas y otros productos fitosanitarios, favoreciendo sistemas agrícolas más sostenibles y con menor impacto ambiental. Naik et al. (2022) destacan que esta reducción en la dependencia de insumos químicos constituye uno de los principales beneficios de la edición genética aplicada a la agricultura, especialmente frente a los desafíos derivados del cambio climático y de la necesidad de producir alimentos de manera más sostenible.

No obstante, la literatura también reconoce que la obtención de resistencia duradera continúa representando un desafío científico importante. Los patógenos poseen una elevada capacidad evolutiva que les permite generar nuevas variantes capaces de superar mecanismos de defensa basados en un único gen o en una sola vía metabólica. Como consecuencia, las estrategias fundamentadas exclusivamente en modificaciones individuales podrían perder efectividad con el tiempo. Jaganathan et al. (2018) sostienen que el futuro del mejoramiento vegetal dependerá del desarrollo de enfoques integrales que combinen múltiples mecanismos de resistencia y permitan incrementar la estabilidad genética de los cultivos frente a la continua evolución de los agentes patógenos.

En este contexto, la edición múltiple (multiplex genome editing) surge como una de las alternativas más prometedoras para fortalecer la resistencia genética de las plantas. Esta estrategia permite modificar simultáneamente varios genes asociados con diferentes mecanismos defensivos, aumentando la probabilidad de obtener respuestas más robustas y difíciles de superar por los microorganismos. Gao (2021) señala que la capacidad de editar múltiples objetivos genéticos en una sola intervención representa una de las mayores fortalezas de las tecnologías CRISPR y constituye un elemento clave para el desarrollo de nuevas generaciones de cultivos resistentes, adaptados a las exigencias de una agricultura sostenible y de alta productividad.

Mejoramiento de cultivos tolerantes a sequía

La sequía constituye uno de los principales factores limitantes para la producción agrícola mundial, debido a que reduce la disponibilidad de agua necesaria para el crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos. El incremento en la frecuencia e intensidad de los períodos de déficit hídrico, asociado al cambio climático, ha convertido el desarrollo de variedades tolerantes a la sequía en una prioridad para los programas de mejoramiento vegetal. La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2022) señala que la escasez de agua representa uno de los mayores desafíos para garantizar la seguridad alimentaria durante las próximas décadas, por lo que resulta indispensable incorporar tecnologías capaces de fortalecer la adaptación de los cultivos a condiciones ambientales cada vez más variables.

Las respuestas fisiológicas de las plantas frente al déficit hídrico involucran numerosos procesos biológicos que actúan de manera coordinada para reducir los efectos del estrés. Entre ellos se encuentran la regulación de la apertura estomática, el crecimiento del sistema radicular, la acumulación de compuestos osmoprotectores y la activación de mecanismos antioxidantes que disminuyen el daño celular. Abdelrahman et al. (2021) destacan que la identificación de los genes responsables de estos procesos ha permitido ampliar significativamente las posibilidades de utilizar la edición genética como herramienta para incrementar la tolerancia de los cultivos frente a condiciones de sequía.

La tecnología CRISPR facilita la modificación precisa de genes involucrados en las rutas metabólicas que regulan la respuesta al estrés hídrico, permitiendo desarrollar variedades con una mayor eficiencia en el uso del agua sin alterar otras características agronómicas de interés. La posibilidad de intervenir directamente sobre genes reguladores representa una ventaja importante frente a los métodos convencionales de mejoramiento, los cuales generalmente requieren numerosos ciclos de selección para incorporar este tipo de características. Ahmad et al. (2020) indican que la edición dirigida del genoma acelera considerablemente la obtención de plantas adaptadas a condiciones de baja disponibilidad hídrica, reduciendo el tiempo necesario para generar nuevas variedades.

Uno de los principales objetivos de estas investigaciones consiste en optimizar el desarrollo del sistema radicular, ya que una mayor profundidad y ramificación de las raíces incrementa la capacidad de las plantas para explorar el suelo y acceder a reservas de agua localizadas en diferentes estratos. De igual manera, la modificación de genes asociados con la regulación estomática permite disminuir las pérdidas de agua por transpiración sin comprometer significativamente la capacidad fotosintética del cultivo. Chen et al. (2019) señalan que la combinación de estas modificaciones fisiológicas puede traducirse en una mayor estabilidad del rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico, aspecto de gran importancia para la agricultura en regiones áridas y semiáridas.

No obstante, la tolerancia a la sequía constituye una característica genética altamente compleja, ya que depende de la interacción simultánea de numerosos genes, factores ambientales y procesos fisiológicos que responden de manera dinámica a las condiciones del entorno. En consecuencia, la modificación de un único gen rara vez resulta suficiente para obtener niveles elevados de tolerancia en condiciones reales de cultivo. Naik et al. (2022) destacan que el desarrollo de variedades resistentes a la sequía requiere comprender redes regulatorias completas y no únicamente genes individuales, lo que explica el creciente interés por integrar la edición genética con herramientas de genómica funcional y análisis bioinformático.

Ante esta complejidad, las estrategias más recientes se orientan hacia la edición simultánea de múltiples genes, permitiendo intervenir diferentes rutas metabólicas relacionadas con la percepción del estrés, la regulación hormonal, la eficiencia fotosintética y el crecimiento radicular. Este enfoque incrementa la probabilidad de obtener respuestas fisiológicas más estables frente a escenarios ambientales cambiantes. Gao (2021) sostiene que la edición múltiple representa una de las principales fortalezas de las tecnologías CRISPR, debido a que posibilita el desarrollo de características agronómicas complejas que anteriormente resultaban difíciles de incorporar mediante los programas tradicionales de mejoramiento vegetal.

Los avances alcanzados durante los últimos años demuestran que la utilización de CRISPR para desarrollar cultivos tolerantes a la sequía constituye una de las aplicaciones con mayor potencial para enfrentar los efectos del cambio climático sobre la agricultura. Sin embargo, la validación de estas modificaciones continúa requiriendo evaluaciones en condiciones de campo que permitan verificar la estabilidad de las respuestas obtenidas bajo diferentes ambientes de producción. Tang et al. (2023) señala que la integración entre edición genética, genómica avanzada y programas convencionales de mejoramiento será determinante para desarrollar variedades agrícolas capaces de mantener altos niveles de productividad frente a escenarios de creciente escasez hídrica.

Aplicaciones frente a salinidad y otros tipos de estrés abiótico

La salinidad del suelo constituye uno de los principales factores de estrés abiótico que limitan el crecimiento y la productividad de los cultivos en numerosas regiones del mundo. La acumulación excesiva de sales reduce la capacidad de las plantas para absorber agua, altera el equilibrio iónico y afecta diversos procesos fisiológicos esenciales para el desarrollo vegetal. La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2022) reconoce que la expansión de las áreas afectadas por salinización representa una amenaza creciente para la seguridad alimentaria, lo que ha incrementado el interés por desarrollar variedades capaces de mantener su productividad bajo estas condiciones adversas.

Las respuestas de las plantas frente a la salinidad dependen de complejas redes de regulación genética que controlan el transporte de sodio y potasio, la homeostasis celular, el equilibrio osmótico y la activación de mecanismos antioxidantes. La tecnología CRISPR ha permitido intervenir de manera precisa genes involucrados en estos procesos, facilitando el estudio de su función biológica y la obtención de modificaciones orientadas a incrementar la tolerancia de diferentes especies agrícolas. Abdelrahman et al. (2021) destacan que la edición dirigida de genes relacionados con el transporte de iones constituye una de las estrategias más prometedoras para fortalecer la adaptación de los cultivos frente a ambientes con elevadas concentraciones salinas.

El control del transporte iónico representa uno de los mecanismos más importantes para reducir los efectos negativos de la salinidad sobre el metabolismo vegetal. Las proteínas transportadoras regulan la entrada, distribución y

acumulación de sodio dentro de las células, evitando concentraciones tóxicas que comprometan el crecimiento de la planta. La modificación de estos genes mediante herramientas de edición genética permite optimizar dichos mecanismos fisiológicos y mejorar la estabilidad del cultivo bajo condiciones de estrés. Chen et al. (2019) señalan que la posibilidad de intervenir directamente sobre estos reguladores moleculares constituye una ventaja significativa respecto a las estrategias convencionales de mejoramiento, debido a la mayor precisión y rapidez con que pueden obtenerse las modificaciones deseadas.

Además del equilibrio iónico, la tolerancia a la salinidad depende de la capacidad de las plantas para responder al incremento del estrés oxidativo generado por la acumulación de especies reactivas de oxígeno. La activación de enzimas antioxidantes y de diferentes rutas metabólicas de protección celular resulta fundamental para minimizar los daños ocasionados por este tipo de estrés. Ahmad et al. (2020) indican que la edición genética facilita la identificación y modificación de genes reguladores involucrados en estos mecanismos, permitiendo desarrollar cultivos con una respuesta fisiológica más eficiente frente a condiciones ambientales desfavorables.

Las temperaturas extremas representan otro de los principales factores de estrés abiótico abordados mediante las tecnologías CRISPR. Tanto las altas temperaturas como los episodios de frío intenso afectan procesos fisiológicos esenciales como la fotosíntesis, la respiración, la floración, la formación de frutos y el llenado de semillas, ocasionando importantes reducciones en el rendimiento agrícola. Naik et al. (2022) destacan que el incremento de los eventos climáticos extremos ha convertido la tolerancia térmica en una característica prioritaria para los programas modernos de mejoramiento vegetal, impulsando el desarrollo de investigaciones dirigidas a identificar genes asociados con estas respuestas adaptativas.

La evidencia científica muestra que los diferentes tipos de estrés abiótico rara vez actúan de manera aislada en los sistemas agrícolas. En condiciones reales de producción es frecuente que las plantas enfrenten simultáneamente sequía, salinidad y temperaturas extremas, generando respuestas fisiológicas mucho más complejas que las observadas bajo condiciones experimentales controladas. Gao (2021) señala que esta interacción entre múltiples factores ambientales exige replantear las estrategias tradicionales de mejoramiento, orientándolas hacia el desarrollo de variedades capaces de responder de manera integrada a diversos escenarios de estrés.

Frente a esta realidad, las investigaciones más recientes se orientan hacia la utilización de estrategias de edición múltiple del genoma, capaces de modificar simultáneamente varios genes relacionados con diferentes mecanismos de adaptación ambiental. Este enfoque incrementa las posibilidades de desarrollar cultivos con tolerancia combinada a múltiples factores de estrés, fortaleciendo su estabilidad productiva bajo condiciones climáticas cambiantes. El Tang et al. (2023) sostiene que la integración de la edición genética con herramientas avanzadas de genómica funcional permitirá acelerar el desarrollo de variedades agrícolas más resilientes, constituyendo una de las principales líneas de innovación para garantizar la sostenibilidad de la producción de alimentos durante las próximas décadas.

CRISPR y mejoramiento del rendimiento de los cultivos

El incremento del rendimiento agrícola ha constituido históricamente uno de los principales objetivos del mejoramiento vegetal, debido a la necesidad de satisfacer la creciente demanda mundial de alimentos mediante sistemas de producción cada vez más eficientes y sostenibles. El crecimiento de la población, la reducción de la superficie agrícola disponible y los efectos del cambio climático han intensificado la búsqueda de tecnologías capaces de incrementar la productividad de los cultivos sin comprometer los recursos naturales. La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2022) destaca que el aumento sostenible del rendimiento será un componente esencial para garantizar la seguridad alimentaria durante las próximas décadas, lo que ha impulsado el desarrollo de herramientas biotecnológicas como CRISPR.

La tecnología CRISPR permite intervenir de manera precisa genes relacionados con diversos componentes que determinan el rendimiento de las plantas, facilitando la modificación de características agronómicas que anteriormente requerían largos procesos de selección convencional. La identificación de genes asociados con el crecimiento, la floración, la formación de frutos y la producción de biomasa ha ampliado considerablemente las

posibilidades de obtener variedades con mayor potencial productivo. Chen et al. (2019) señalan que la edición dirigida del genoma permite acelerar el mejoramiento de caracteres cuantitativos al intervenir directamente sobre regiones genéticas responsables del desarrollo de los órganos productivos.

Uno de los aspectos más estudiados corresponde a la arquitectura de la planta, debido a su influencia sobre la eficiencia en la captación de luz, la distribución de los fotoasimilados y el aprovechamiento de los recursos disponibles. Características como la altura, el número de ramas, el ángulo de inserción de las hojas y la organización de las estructuras reproductivas condicionan el rendimiento final del cultivo. Jaganathan et al. (2018) destacan que la modificación de genes reguladores del desarrollo vegetal permite optimizar estas características morfológicas, favoreciendo un mejor equilibrio entre crecimiento vegetativo y producción de órganos cosechables.

La edición genética también ha demostrado un importante potencial para modificar características relacionadas con el tamaño, número y peso de frutos, semillas y otros órganos de interés comercial. Numerosos genes participan en la regulación de la división y expansión celular durante el desarrollo reproductivo, por lo que su modificación puede traducirse en incrementos significativos de la productividad. Razzaq et al. (2019) sostienen que la capacidad de intervenir estos procesos de manera específica representa una ventaja considerable frente a los métodos convencionales de mejoramiento, al permitir obtener cambios dirigidos sin alterar otras características deseables del cultivo.

No obstante, el rendimiento constituye un carácter altamente complejo y de naturaleza poligénica, resultado de la interacción entre múltiples genes y diversos factores ambientales. La expresión de una determinada característica productiva puede variar significativamente entre regiones, condiciones climáticas y sistemas de manejo, por lo que las modificaciones genéticas deben ser evaluadas en diferentes escenarios antes de su incorporación en programas de mejoramiento. Naik et al. (2022) indican que la estabilidad del rendimiento continúa siendo uno de los principales retos de la edición genética aplicada a la agricultura, especialmente cuando las variedades deben responder a condiciones ambientales cambiantes.

Esta complejidad explica la necesidad de complementar los estudios desarrollados en laboratorio e invernadero con evaluaciones de campo realizadas bajo condiciones representativas de producción. Los ensayos multilocales permiten determinar si las modificaciones introducidas mediante CRISPR mantienen un comportamiento consistente frente a diferentes ambientes y prácticas agrícolas, proporcionando información fundamental para su futura utilización comercial. Gao (2021) señala que la validación agronómica constituye una etapa indispensable dentro del proceso de desarrollo de nuevas variedades editadas, debido a que las respuestas observadas en condiciones controladas no siempre reflejan el comportamiento del cultivo en ambientes reales.

La evidencia científica también demuestra que el mayor potencial de CRISPR no radica en sustituir completamente los programas tradicionales de mejoramiento vegetal, sino en complementarlos mediante herramientas que permitan acelerar la incorporación de características agronómicas de interés. La integración entre la edición genética, la selección convencional y las tecnologías de análisis genómico favorece procesos de mejoramiento más eficientes y precisos, reduciendo significativamente los tiempos necesarios para desarrollar nuevas variedades. El Tang et al. (2023) destaca que esta combinación representa una de las principales tendencias de la agricultura moderna y constituye un elemento estratégico para incrementar la productividad agrícola sin comprometer la sostenibilidad de los sistemas de producción.

Mejoramiento de la calidad nutricional mediante edición genética

El mejoramiento de la calidad nutricional de los cultivos representa una de las aplicaciones más prometedoras de las tecnologías CRISPR, debido a su potencial para contribuir a la reducción de las deficiencias nutricionales que afectan a millones de personas en el mundo. Además de incrementar la productividad agrícola, los programas modernos de mejoramiento buscan desarrollar alimentos con mayor contenido de vitaminas, minerales, proteínas y otros compuestos bioactivos que favorezcan una alimentación más saludable. La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2022) destaca que la mejora del valor nutricional de los cultivos constituye una estrategia

fundamental para fortalecer la seguridad alimentaria y combatir las diferentes formas de malnutrición presentes tanto en países en desarrollo como en economías industrializadas.

La edición genética mediante CRISPR permite intervenir genes involucrados en las rutas metabólicas responsables de la síntesis, acumulación y transporte de nutrientes dentro de los tejidos vegetales. A diferencia de las técnicas convencionales de mejoramiento, esta herramienta facilita la modificación específica de genes relacionados con procesos bioquímicos determinados, reduciendo la incorporación de características no deseadas durante los programas de selección. Chen et al. (2019) señalan que la elevada precisión de la edición genómica ofrece nuevas oportunidades para optimizar la composición nutricional de los cultivos sin alterar significativamente otras características agronómicas de importancia comercial.

Uno de los principales objetivos de estas investigaciones consiste en incrementar la concentración de vitaminas y micronutrientes esenciales presentes en los alimentos de origen vegetal. Diversos estudios han demostrado que la modificación de genes asociados con rutas biosintéticas específicas permite favorecer la acumulación de compuestos beneficiosos para la salud humana. Gao (2021) sostiene que la edición genética representa una herramienta estratégica para desarrollar cultivos biofortificados, capaces de contribuir a la prevención de deficiencias nutricionales mediante el consumo habitual de alimentos con mayor valor biológico.

Además del incremento de vitaminas y minerales, la tecnología CRISPR ha sido utilizada para mejorar la calidad de proteínas, aceites y otros componentes nutricionales presentes en diferentes especies agrícolas. La modificación de genes relacionados con el metabolismo de aminoácidos y lípidos permite optimizar la composición química de los alimentos, favoreciendo la producción de variedades con perfiles nutricionales más equilibrados. Naik et al. (2022) destacan que estas aplicaciones amplían considerablemente las posibilidades del mejoramiento vegetal, al orientar los objetivos de selección no solamente hacia el incremento del rendimiento, sino también hacia la producción de alimentos con mayor calidad nutricional.

Otra línea de investigación de creciente interés corresponde a la reducción de compuestos considerados indeseables desde el punto de vista nutricional o sanitario. Algunos cultivos contienen sustancias antinutricionales, metabolitos secundarios o proteínas capaces de disminuir la biodisponibilidad de nutrientes o generar reacciones adversas en determinados grupos de consumidores. La edición dirigida de genes responsables de la síntesis de estos compuestos permite reducir su concentración sin afectar el desarrollo normal de la planta. Razzaq et al. (2019) indican que esta estrategia ofrece importantes ventajas para mejorar la inocuidad y aceptación de diversos productos agrícolas destinados al consumo humano.

La modificación de proteínas relacionadas con procesos alérgicos constituye igualmente una aplicación de gran interés para la biotecnología vegetal. La posibilidad de alterar secuencias génicas específicas permite disminuir la expresión de determinadas proteínas alergénicas presentes en algunos alimentos, contribuyendo potencialmente al desarrollo de productos más seguros para personas con sensibilidades alimentarias. Abdelrahman et al. (2021) destacan que estas investigaciones representan un campo emergente dentro de la edición genética aplicada a cultivos, aunque enfatizan la necesidad de realizar rigurosas evaluaciones de seguridad antes de su utilización comercial.

A pesar del enorme potencial de estas aplicaciones, la modificación de rutas metabólicas complejas requiere una evaluación integral de los posibles efectos secundarios que puedan producirse sobre otros procesos fisiológicos de la planta. La alteración de un gen puede generar cambios en diferentes vías metabólicas debido a la estrecha interacción existente entre los sistemas de regulación celular. Wada et al. (2020) señalan que la caracterización funcional de los genes editados y el análisis de sus efectos pleiotrópicos constituyen etapas esenciales para garantizar la estabilidad y seguridad de las variedades desarrolladas mediante edición genética.

En conjunto, la evidencia disponible demuestra que la tecnología CRISPR ofrece amplias posibilidades para mejorar el valor nutricional de los cultivos y contribuir al desarrollo de sistemas alimentarios más saludables y sostenibles. Sin embargo, el impacto real de estas innovaciones dependerá no solo de los avances científicos alcanzados, sino también de factores relacionados con la regulación, la aceptación social y el acceso de la población a las nuevas variedades desarrolladas. El Tang et al. (2023) destaca que la integración de la investigación biotecnológica con políticas públicas

orientadas a la seguridad alimentaria será determinante para que estos avances puedan traducirse en beneficios concretos para la sociedad.

Aplicaciones de CRISPR para características poscosecha

Las pérdidas poscosecha representan uno de los principales desafíos para los sistemas agroalimentarios, ya que una proporción considerable de la producción agrícola se deteriora durante las etapas de almacenamiento, transporte, distribución y comercialización. Este problema no solo disminuye la disponibilidad de alimentos para el consumo humano, sino que también reduce la eficiencia de los recursos utilizados durante la producción, como agua, fertilizantes, energía y mano de obra. La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2022) destaca que la reducción de las pérdidas poscosecha constituye una estrategia prioritaria para fortalecer la seguridad alimentaria y mejorar la sostenibilidad de las cadenas de suministro agrícola.

En este contexto, la tecnología CRISPR ha abierto nuevas posibilidades para modificar genes involucrados en los procesos fisiológicos que determinan la conservación de frutas, hortalizas y otros productos agrícolas después de la cosecha. La regulación de la maduración constituye uno de los principales objetivos de estas investigaciones, debido a que la velocidad con la que ocurren estos procesos influye directamente sobre la vida útil y la calidad comercial de los alimentos. Chen et al. (2019) señalan que la edición genética permite intervenir de manera específica genes responsables de la síntesis y percepción de fitohormonas relacionadas con la maduración, favoreciendo el desarrollo de variedades con mayor capacidad de conservación.

El ablandamiento de los tejidos vegetales representa otro de los procesos ampliamente estudiados mediante herramientas de edición genómica. Durante la maduración se producen modificaciones en la pared celular que reducen la firmeza de los frutos y aceleran su deterioro durante el almacenamiento y transporte. La modificación de genes asociados con estos mecanismos permite disminuir la velocidad de degradación de los tejidos sin afectar necesariamente otras características fisiológicas del cultivo. Gao (2021) destaca que la regulación precisa de estos procesos constituye una alternativa prometedora para prolongar la vida útil de los productos agrícolas y reducir las pérdidas económicas ocasionadas por el deterioro poscosecha.

La resistencia frente a daños mecánicos ocasionados durante la manipulación, el transporte y la distribución también constituye una importante línea de investigación dentro del mejoramiento vegetal. Frutos con mayor firmeza y estabilidad estructural presentan menor susceptibilidad a golpes, deformaciones y lesiones que favorecen la entrada de microorganismos patógenos. Naik et al. (2022) indican que la incorporación de estas características mediante edición genética puede contribuir significativamente a mejorar la calidad comercial de los alimentos y disminuir las pérdidas registradas a lo largo de la cadena agroalimentaria.

Otra aplicación relevante corresponde a la modificación de procesos bioquímicos relacionados con la oxidación y el oscurecimiento de tejidos vegetales. Estos fenómenos afectan tanto la apariencia visual como el valor nutricional de numerosos productos hortofrutícolas, reduciendo su aceptación por parte de consumidores y mercados. La edición de genes implicados en estas rutas metabólicas ofrece la posibilidad de retrasar dichos procesos y mantener durante más tiempo las características organolépticas de los alimentos. Razzaq et al. (2019) sostienen que este tipo de modificaciones representa una alternativa innovadora para incrementar la competitividad de los productos agrícolas sin recurrir necesariamente a tratamientos químicos posteriores a la cosecha.

Sin embargo, las aplicaciones poscosecha deben desarrollarse considerando no solamente el incremento de la vida útil, sino también la conservación de las propiedades sensoriales y nutricionales que determinan la aceptación del consumidor. Una prolongación excesiva del período de almacenamiento podría modificar atributos como sabor, aroma, textura o contenido nutricional si no se controlan adecuadamente los efectos fisiológicos derivados de la edición genética. Abdelrahman et al. (2021) destacan que la evaluación integral de estas características resulta indispensable para garantizar que las mejoras obtenidas en conservación no comprometan la calidad final de los alimentos destinados al consumo humano.

En conjunto, la evidencia científica demuestra que la utilización de CRISPR para optimizar las características poscosecha posee un elevado potencial para fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios, al reducir simultáneamente las pérdidas de alimentos y el desperdicio de recursos utilizados durante la producción agrícola. El Tang et al. (2023) señala que la integración de estas tecnologías con los programas modernos de mejoramiento vegetal permitirá desarrollar cultivos con mayor capacidad de conservación, favoreciendo cadenas de suministro más eficientes y contribuyendo a una producción alimentaria más sostenible frente a los desafíos globales actuales.

Edición de bases y nuevas posibilidades para el mejoramiento vegetal

La edición de bases (base editing) representa uno de los avances más importantes en la evolución de las tecnologías CRISPR, al ampliar considerablemente las posibilidades de modificación precisa del genoma vegetal. A diferencia de los sistemas convencionales de edición, esta herramienta permite cambiar nucleótidos específicos sin generar necesariamente rupturas de doble cadena en el ADN, reduciendo la probabilidad de alteraciones no deseadas y aumentando la precisión del proceso. Molla y Yang (2019) consideran que esta innovación ha transformado el campo de la ingeniería genética vegetal, al ofrecer una alternativa altamente eficiente para reproducir variaciones genéticas naturales asociadas con características agronómicas de interés.

El principio de funcionamiento de la edición de bases se fundamenta en la combinación de proteínas Cas modificadas con enzimas capaces de convertir una base nitrogenada en otra de manera dirigida. Esta estrategia permite realizar cambios puntuales en regiones específicas del genoma sin depender de los mecanismos tradicionales de reparación celular que intervienen en otros sistemas CRISPR. Chen et al. (2019) señalan que esta mayor precisión incrementa las posibilidades de corregir mutaciones o introducir variantes favorables relacionadas con el rendimiento, la resistencia a enfermedades y la adaptación ambiental de los cultivos.

Una de las principales ventajas de esta tecnología radica en su capacidad para reproducir mutaciones puntuales presentes de forma natural en diferentes especies vegetales. Numerosos caracteres agronómicos de importancia económica dependen de modificaciones en uno o pocos nucleótidos, por lo que la edición de bases facilita la incorporación de estas variantes sin alterar el resto del genoma. Gao (2021) destaca que esta característica permite acelerar significativamente los programas de mejoramiento vegetal, favoreciendo el desarrollo de variedades con atributos específicos mediante intervenciones altamente controladas.

Las aplicaciones potenciales de la edición de bases abarcan un amplio conjunto de características relacionadas con la productividad, la calidad nutricional, la resistencia a enfermedades y la tolerancia frente a factores de estrés abiótico. La posibilidad de modificar genes individuales con elevada exactitud ofrece nuevas oportunidades para optimizar procesos fisiológicos complejos sin introducir cambios innecesarios en otras regiones del genoma. Naik et al. (2022) indican que esta precisión convierte a la edición de bases en una herramienta especialmente valiosa para el mejoramiento de caracteres cuantitativos que requieren modificaciones genéticas muy específicas.

Otra característica relevante de esta tecnología consiste en que muchas de las modificaciones obtenidas pueden realizarse sin incorporar material genético externo al organismo vegetal. Este aspecto ha generado un importante debate en torno a los marcos regulatorios aplicables a los cultivos editados mediante CRISPR, ya que en determinados casos las modificaciones resultantes son similares a mutaciones que podrían producirse de manera espontánea en la naturaleza. Tachikawa y Matsuo (2023) señala que esta situación ha motivado la revisión de las normativas vigentes en diversos países, con el propósito de establecer criterios regulatorios acordes con los avances alcanzados por las nuevas técnicas de edición genómica.

A pesar de las ventajas ofrecidas por la edición de bases, la literatura también reconoce la existencia de desafíos técnicos que requieren investigaciones adicionales. La eficiencia de las conversiones puede variar entre especies vegetales, tejidos y sistemas de transformación utilizados, mientras que la posibilidad de generar modificaciones fuera del sitio objetivo continúa siendo objeto de evaluación. Wada et al. (2020) destacan que la optimización de los sistemas de edición y el perfeccionamiento de las herramientas de validación molecular constituyen aspectos esenciales para garantizar la precisión y seguridad de las modificaciones obtenidas.

Asimismo, la entrega eficiente de los componentes responsables de la edición genética continúa representando uno de los principales retos para la aplicación de estas tecnologías en un mayor número de especies agrícolas. La capacidad para transportar proteínas Cas, ARN guía y enzimas editoras hacia las células vegetales influye directamente sobre la eficiencia del proceso y sobre la posibilidad de ampliar su utilización en programas de mejoramiento de cultivos de interés económico. El Tang et al. (2023) destaca que el desarrollo de nuevos sistemas de entrega y de proteínas Cas optimizadas permitirá incrementar la eficiencia de la edición de bases y consolidar su utilización como una de las herramientas más importantes del mejoramiento vegetal de precisión.

En conjunto, la evidencia científica demuestra que la edición de bases representa una evolución significativa dentro de las tecnologías CRISPR, al proporcionar niveles de precisión superiores para la modificación del genoma vegetal. Su integración con otras herramientas de edición genética y con los avances de la genómica funcional permitirá ampliar progresivamente las posibilidades del mejoramiento vegetal, favoreciendo el desarrollo de cultivos más productivos, resilientes y adaptados a las necesidades de una agricultura sostenible. Tang et al. (2023) considera que esta tecnología constituye uno de los pilares sobre los cuales continuará evolucionando la próxima generación de herramientas para la edición genética aplicada a la agricultura.

Prime editing y edición genética de nueva generación

El prime editing representa una de las innovaciones más recientes dentro de la evolución de las tecnologías CRISPR y ha despertado un creciente interés por su capacidad para realizar modificaciones genéticas con un nivel de precisión superior al de las herramientas desarrolladas inicialmente. Esta tecnología amplía las posibilidades de edición al permitir sustituciones, inserciones y deleciones específicas de secuencias de ADN sin requerir, en la mayoría de los casos, la generación de rupturas de doble cadena. Anzalone et al. no forma parte de las referencias consideradas en esta revisión; sin embargo, Wada et al. (2020) destacan que las nuevas estrategias de edición de precisión constituyen un avance significativo para el mejoramiento vegetal al reducir la probabilidad de modificaciones no deseadas y aumentar la exactitud de las intervenciones genómicas.

El funcionamiento del prime editing combina una proteína Cas modificada con una transcriptasa inversa y una guía especializada que contiene la información necesaria para introducir el cambio genético deseado. Este mecanismo permite escribir directamente la modificación sobre el ADN de la planta, ampliando considerablemente el tipo de alteraciones que pueden realizarse respecto a los sistemas tradicionales de CRISPR-Cas9. Gao (2021) señala que esta capacidad representa uno de los avances tecnológicos más importantes de la edición genómica moderna, debido a que incrementa la flexibilidad para modificar genes asociados con características agronómicas complejas.

Las aplicaciones potenciales del prime editing abarcan numerosos objetivos dentro del mejoramiento vegetal, incluyendo la corrección de mutaciones puntuales, la incorporación de variantes favorables presentes en otras variedades y la modificación precisa de genes relacionados con productividad, calidad nutricional, resistencia a enfermedades y adaptación a condiciones ambientales adversas. La elevada precisión de esta tecnología resulta especialmente valiosa cuando se pretende intervenir regiones genómicas cuya alteración debe realizarse sin afectar secuencias adyacentes. Naik et al. (2022) destacan que estas herramientas ofrecen nuevas oportunidades para desarrollar cultivos con características altamente específicas, respondiendo a las necesidades de una agricultura más eficiente y sostenible.

A pesar de sus ventajas, la aplicación del prime editing en especies vegetales aún enfrenta diversos desafíos técnicos que limitan su utilización a gran escala. La eficiencia del proceso puede variar considerablemente entre especies, variedades e incluso entre diferentes tipos de tejidos vegetales, debido a las diferencias existentes en los mecanismos celulares responsables de la regeneración y transformación genética. Schindele et al. (2018) señalan que la optimización de los protocolos de transformación constituye un aspecto fundamental para incrementar la eficiencia de las herramientas de edición genómica en plantas.

Otro aspecto que continúa siendo objeto de investigación corresponde a la optimización de los componentes moleculares utilizados durante el proceso de edición. La mejora en el diseño de las ARN guía, la incorporación de

nuevas proteínas Cas y el perfeccionamiento de las transcriptasas inversas buscan incrementar la eficiencia y reducir la aparición de modificaciones fuera del sitio objetivo. Li et al. (2023) destaca que el desarrollo de nuevas generaciones de herramientas CRISPR responde precisamente a la necesidad de aumentar la precisión y ampliar las posibilidades de aplicación en un mayor número de especies agrícolas.

La combinación del prime editing con otras tecnologías emergentes de edición genética constituye una de las principales tendencias identificadas en la literatura reciente. La integración con sistemas de edición de bases, análisis bioinformáticos y plataformas avanzadas de secuenciación permite diseñar estrategias de mejoramiento cada vez más específicas y adaptadas a las características particulares de cada cultivo. El Tang et al. (2023) señala que esta convergencia tecnológica acelerará el desarrollo de variedades vegetales con modificaciones genéticas altamente controladas, fortaleciendo la capacidad de respuesta de la agricultura frente a los desafíos productivos y ambientales del futuro.

En conjunto, la evidencia disponible demuestra que el prime editing forma parte de una nueva generación de herramientas de edición genómica que continuará ampliando las posibilidades del mejoramiento vegetal durante los próximos años. Aunque todavía existen limitaciones relacionadas con la eficiencia y la aplicación en determinadas especies, los avances tecnológicos observados permiten anticipar un crecimiento sostenido de su utilización en programas de investigación y desarrollo agrícola. El Tang et al. (2023) considera que el perfeccionamiento continuo de estas herramientas será determinante para consolidar una agricultura basada en la edición genética de alta precisión, capaz de responder a las demandas de productividad, sostenibilidad y seguridad alimentaria del siglo XXI.

Nuevas proteínas Cas y sistemas de edición genética

El desarrollo de nuevas proteínas Cas constituye una de las principales líneas de innovación dentro de la evolución de las tecnologías CRISPR, debido a que ha permitido ampliar las posibilidades de edición genética más allá de las capacidades inicialmente ofrecidas por Cas9. Aunque este sistema continúa siendo la herramienta más utilizada en investigación y mejoramiento vegetal, sus limitaciones relacionadas con el reconocimiento de determinadas secuencias genómicas y el tamaño de la proteína han impulsado la búsqueda de alternativas con mejores características funcionales. Chen et al. (2019) señalan que la diversificación de las proteínas Cas ha incrementado significativamente la versatilidad de la edición genómica, permitiendo adaptar las estrategias de intervención a diferentes especies y objetivos de mejoramiento.

Las investigaciones recientes han identificado proteínas Cas con capacidades diferenciadas para reconocer nuevas secuencias del ADN y generar modificaciones con mayores niveles de especificidad. Estas variantes amplían el número de regiones genómicas susceptibles de ser editadas, incrementando las posibilidades de intervenir genes que anteriormente resultaban difíciles de modificar mediante las herramientas convencionales. Gao (2021) destaca que la expansión del repertorio de proteínas Cas representa uno de los avances más importantes para la agricultura moderna, ya que facilita el diseño de estrategias de edición ajustadas a las particularidades genéticas de cada especie vegetal.

Otra característica de gran interés corresponde al desarrollo de proteínas Cas de menor tamaño, cuya utilización facilita el transporte de los componentes de edición genética hacia las células vegetales. La entrega eficiente de estas herramientas constituye uno de los principales desafíos técnicos para numerosas especies agrícolas, especialmente aquellas que presentan dificultades durante los procesos de transformación genética. Li et al. (2023) informa que las nuevas proteínas CRISPR de dimensiones reducidas poseen un importante potencial para simplificar los procedimientos de edición y ampliar la aplicación de estas tecnologías en un mayor número de cultivos de interés agronómico.

La búsqueda de sistemas con mayor especificidad también responde a la necesidad de reducir la aparición de modificaciones fuera del sitio objetivo (off-target effects), aspecto que continúa siendo uno de los principales retos para la edición genómica de precisión. El perfeccionamiento de las proteínas Cas permite incrementar la exactitud con la que se reconocen las secuencias del ADN, disminuyendo el riesgo de alterar regiones no deseadas del genoma. Wada

et al. (2020) destacan que la optimización de estos sistemas constituye un requisito indispensable para fortalecer la seguridad y confiabilidad de las aplicaciones agrícolas derivadas de la edición genética.

Además de las proteínas dirigidas al ADN, las investigaciones han ampliado el estudio hacia sistemas capaces de actuar sobre moléculas de ARN, generando nuevas alternativas para regular temporalmente la expresión génica sin producir modificaciones permanentes en el genoma. Estas herramientas representan una nueva dimensión dentro de la ingeniería genética vegetal, ya que permiten modificar procesos fisiológicos específicos mediante intervenciones reversibles y altamente controladas. Naik et al. (2022) señalan que estas estrategias podrían complementar las aplicaciones tradicionales de CRISPR y ofrecer soluciones adaptadas a diferentes necesidades del mejoramiento vegetal.

La continua exploración de la diversidad natural de los sistemas CRISPR ha permitido descubrir nuevas proteínas con propiedades funcionales particulares, ampliando progresivamente el conjunto de herramientas disponibles para la edición genética. La caracterización de estos sistemas proporciona información valiosa sobre nuevos mecanismos moleculares que posteriormente pueden ser optimizados mediante ingeniería de proteínas para mejorar su eficiencia y especificidad. El Tang et al. (2023) destaca que esta evolución permanente constituye uno de los principales motores de innovación en biotecnología vegetal y continuará impulsando el desarrollo de herramientas cada vez más precisas para la modificación del genoma.

En conjunto, la evidencia científica demuestra que el futuro del mejoramiento vegetal no dependerá exclusivamente de una única herramienta de edición genética, sino de un conjunto diverso de sistemas capaces de responder a diferentes objetivos de investigación y producción agrícola. La disponibilidad de nuevas proteínas Cas, junto con el desarrollo de tecnologías complementarias, permitirá seleccionar la estrategia más adecuada según las características biológicas de cada especie y las necesidades específicas de los programas de mejoramiento. El Tang et al. (2023) considera que esta diversificación tecnológica será fundamental para consolidar una agricultura de precisión basada en herramientas genómicas cada vez más eficientes, seguras y adaptables a los desafíos que enfrentará la producción mundial de alimentos durante las próximas décadas.

CRISPR y sostenibilidad de los sistemas agrícolas

La sostenibilidad constituye uno de los principales ejes que orientan el desarrollo de las aplicaciones actuales de CRISPR en el mejoramiento de cultivos. La agricultura enfrenta el desafío de incrementar la producción de alimentos para abastecer a una población mundial en constante crecimiento, al mismo tiempo que debe reducir los impactos ambientales derivados del uso intensivo de recursos naturales. En este contexto, la edición genética se presenta como una herramienta capaz de contribuir al desarrollo de sistemas productivos más eficientes, resilientes y ambientalmente responsables. La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2022) destaca que la sostenibilidad agrícola requiere integrar innovaciones tecnológicas con estrategias de conservación de los recursos naturales, garantizando simultáneamente la productividad y la protección del ambiente.

Una de las principales contribuciones potenciales de CRISPR se relaciona con el desarrollo de cultivos resistentes a enfermedades y plagas, lo que puede disminuir la dependencia de fungicidas, insecticidas y otros productos fitosanitarios utilizados durante el ciclo de producción. La reducción del uso de estos insumos favorece la disminución de residuos químicos en el ambiente y limita los efectos negativos sobre organismos benéficos y ecosistemas agrícolas. Naik et al. (2022) señalan que la incorporación de resistencia genética mediante edición del genoma representa una estrategia sostenible para fortalecer el manejo integrado de plagas y enfermedades, reduciendo los costos de producción y mejorando la eficiencia ambiental de los sistemas agrícolas.

No obstante, la literatura coincide en que la resistencia genética obtenida mediante edición del genoma no debe considerarse una solución aislada frente a los problemas fitosanitarios. Los patógenos y las plagas poseen una elevada capacidad de adaptación evolutiva, lo que puede favorecer la aparición de nuevas variantes capaces de superar determinados mecanismos de resistencia. En consecuencia, las variedades editadas deben incorporarse dentro de programas de manejo integrado que contemplen rotación de cultivos, monitoreo fitosanitario, conservación de la

biodiversidad y uso racional de otras estrategias de control. Jaganathan et al. (2018) destacan que la integración de diferentes herramientas de manejo constituye la alternativa más efectiva para garantizar la durabilidad de las resistencias desarrolladas mediante edición genética.

Otra importante contribución de CRISPR se relaciona con el incremento de la eficiencia en el uso del agua. El desarrollo de cultivos con mayor tolerancia a la sequía permite mantener niveles adecuados de productividad bajo condiciones de disponibilidad hídrica limitada, reduciendo la vulnerabilidad de la agricultura frente a los efectos del cambio climático. Además, la modificación de genes asociados con la absorción y utilización eficiente del agua puede favorecer un mejor aprovechamiento de este recurso, especialmente en regiones donde la escasez hídrica constituye una limitación permanente para la producción agrícola. Abdelrahman et al. (2021) indican que estas aplicaciones representan una de las principales líneas de investigación para fortalecer la adaptación de los cultivos a escenarios climáticos cada vez más complejos.

La edición genética también ofrece oportunidades para mejorar la eficiencia en la utilización de nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal. La optimización de genes relacionados con la absorción, transporte y metabolismo de nitrógeno, fósforo y otros elementos minerales puede contribuir a reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos, disminuyendo tanto los costos de producción como los impactos ambientales derivados de su utilización excesiva. Gao (2021) sostiene que el desarrollo de variedades con mayor eficiencia nutricional constituye una estrategia prometedora para avanzar hacia sistemas agrícolas más sostenibles, especialmente en regiones donde los recursos destinados a la fertilización son limitados.

Otro aspecto estrechamente relacionado con la sostenibilidad corresponde a la reducción de las pérdidas poscosecha mediante la obtención de cultivos con mejores características de conservación. La prolongación de la vida útil de frutas, hortalizas y otros productos agrícolas permite disminuir el desperdicio de alimentos y aprovechar de manera más eficiente los recursos utilizados durante todo el proceso productivo. El Tang et al. (2023) destaca que estas aplicaciones generan beneficios ambientales, económicos y sociales, al reducir simultáneamente las pérdidas de alimentos y la presión sobre los sistemas de producción agrícola.

En conjunto, la evidencia analizada demuestra que CRISPR posee un importante potencial para contribuir a diferentes dimensiones de la sostenibilidad agrícola, incluyendo la reducción del uso de insumos químicos, el aprovechamiento eficiente del agua y los nutrientes, la disminución de pérdidas poscosecha y el fortalecimiento de la resiliencia de los cultivos frente al cambio climático. Sin embargo, el impacto real de estas innovaciones dependerá de su integración con prácticas agronómicas sostenibles, políticas públicas adecuadas y estrategias de desarrollo rural que promuevan una utilización responsable de la biotecnología. El Tang et al. (2023) señala que la sostenibilidad de la agricultura del futuro dependerá de la capacidad para combinar innovación científica, gestión eficiente de los recursos naturales y una adecuada gobernanza de las nuevas tecnologías genómicas.

Contribuciones potenciales de CRISPR a la seguridad alimentaria

La seguridad alimentaria constituye uno de los principales desafíos que enfrenta la humanidad en el siglo XXI, debido al crecimiento sostenido de la población, la reducción de los recursos naturales disponibles y los efectos cada vez más evidentes del cambio climático sobre la producción agrícola. Garantizar la disponibilidad de alimentos suficientes, nutritivos y accesibles requiere incorporar tecnologías capaces de incrementar la productividad de manera sostenible y fortalecer la resiliencia de los sistemas agroalimentarios. La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2022) señala que el fortalecimiento de la seguridad alimentaria dependerá de la capacidad para integrar innovación científica, sostenibilidad ambiental y desarrollo social, aspectos en los que la edición genética comienza a desempeñar un papel cada vez más relevante.

Una de las principales contribuciones potenciales de CRISPR consiste en el incremento y la estabilización del rendimiento de los cultivos mediante la incorporación de características relacionadas con resistencia a enfermedades, tolerancia a factores de estrés abiótico y optimización de procesos fisiológicos asociados al crecimiento vegetal. La posibilidad de reducir las pérdidas ocasionadas por hongos, bacterias, virus y condiciones ambientales adversas

permite mejorar la disponibilidad de alimentos incluso bajo escenarios climáticos desfavorables. Naik et al. (2022) destacan que la edición genómica ofrece herramientas capaces de fortalecer la capacidad adaptativa de los cultivos, favoreciendo sistemas de producción más estables frente a la creciente variabilidad ambiental.

La mejora de la calidad nutricional representa otra importante contribución de las tecnologías CRISPR a la seguridad alimentaria. Además de incrementar la cantidad de alimentos disponibles, resulta indispensable mejorar su valor biológico para responder a los problemas de malnutrición y deficiencias de micronutrientes presentes en numerosas regiones del mundo. La modificación dirigida de genes involucrados en la síntesis y acumulación de vitaminas, minerales, proteínas y otros compuestos de interés nutricional permite desarrollar variedades biofortificadas con mayor capacidad para satisfacer las necesidades alimentarias de la población. Gao (2021) sostiene que la edición genética constituye una estrategia innovadora para complementar las políticas de nutrición y salud pública mediante el desarrollo de cultivos con mejores características alimenticias.

La reducción de las pérdidas poscosecha también desempeña un papel fundamental dentro de las estrategias orientadas a fortalecer la seguridad alimentaria. Una proporción importante de los alimentos producidos a nivel mundial se pierde durante las etapas de almacenamiento, transporte y comercialización, disminuyendo la disponibilidad efectiva para el consumo humano. El desarrollo de variedades con mayor vida útil y mejor capacidad de conservación permite aprovechar más eficientemente los recursos invertidos durante la producción agrícola. Chen et al. (2019) destacan que la edición genética aplicada a procesos de maduración y conservación constituye una alternativa con elevado potencial para disminuir el desperdicio de alimentos y mejorar la eficiencia de las cadenas agroalimentarias.

Sin embargo, la evidencia científica también demuestra que la seguridad alimentaria no depende exclusivamente del desarrollo de tecnologías capaces de incrementar la producción agrícola. Factores económicos, sociales, institucionales y políticos influyen de manera decisiva sobre el acceso de agricultores y consumidores a los beneficios derivados de la innovación biotecnológica. La disponibilidad de variedades editadas resulta insuficiente si estas no pueden ser adoptadas por los productores o si los alimentos obtenidos permanecen fuera del alcance de amplios sectores de la población. FAO (2022) enfatiza que la seguridad alimentaria comprende simultáneamente las dimensiones de disponibilidad, acceso, utilización y estabilidad, por lo que requiere enfoques integrales que trasciendan los avances exclusivamente tecnológicos.

La transferencia de estas innovaciones hacia los pequeños y medianos productores constituye otro aspecto determinante para maximizar el impacto de CRISPR sobre la producción de alimentos. La capacitación técnica, el fortalecimiento de los sistemas nacionales de investigación y el acceso equitativo a las nuevas tecnologías condicionarán el grado de adopción de las variedades desarrolladas mediante edición genética. El Tang et al. (2023) señala que el aprovechamiento de las herramientas CRISPR dependerá de la existencia de políticas que promuevan la innovación responsable y faciliten la incorporación de estas tecnologías dentro de programas nacionales de desarrollo agrícola.

En conjunto, la literatura analizada demuestra que CRISPR posee un considerable potencial para contribuir a la seguridad alimentaria mediante el incremento de la productividad, el fortalecimiento de la resiliencia de los cultivos, la mejora de la calidad nutricional y la reducción de las pérdidas poscosecha. No obstante, estos beneficios solo podrán materializarse plenamente cuando las innovaciones biotecnológicas sean acompañadas por estrategias orientadas a garantizar el acceso equitativo, el fortalecimiento institucional y el desarrollo sostenible de los sistemas agroalimentarios. El Tang et al. (2023) destaca que el verdadero impacto de la edición genética dependerá de la capacidad para integrar el conocimiento científico con políticas públicas que favorezcan una producción de alimentos más inclusiva, resiliente y sostenible.

Aplicaciones de CRISPR en cultivos de importancia estratégica

La aplicación de las tecnologías CRISPR se ha expandido progresivamente hacia un amplio número de especies vegetales consideradas estratégicas para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de diferentes regiones del

mundo. Aunque las primeras investigaciones se concentraron en plantas modelo utilizadas en estudios de biología molecular, los avances alcanzados durante los últimos años han permitido trasladar estas herramientas hacia cultivos de interés comercial, ampliando significativamente las posibilidades del mejoramiento genético. Jaganathan et al. (2018) destacan que la versatilidad de la edición genómica ha favorecido su incorporación en programas dirigidos al desarrollo de variedades con mayor productividad, resistencia y adaptación ambiental.

Los cereales constituyen uno de los grupos de cultivos donde CRISPR ha alcanzado un mayor nivel de desarrollo científico. Entre ellos, el arroz representa uno de los principales modelos experimentales debido a la amplia disponibilidad de información genómica y a la eficiencia de los sistemas de transformación utilizados en esta especie. Las investigaciones han permitido modificar genes relacionados con el rendimiento, la resistencia a enfermedades, la eficiencia en el uso de nutrientes y la tolerancia a diferentes factores de estrés ambiental. Chen et al. (2019) señalan que estos avances han convertido al arroz en una de las especies de referencia para evaluar nuevas estrategias de edición genética aplicables posteriormente a otros cultivos de importancia económica.

El trigo constituye otro cultivo prioritario para la investigación biotecnológica debido a su relevancia dentro de la alimentación mundial y a la complejidad de su genoma. La naturaleza poliploide de esta especie representa un desafío para los programas tradicionales de mejoramiento, ya que numerosos genes se encuentran presentes en múltiples copias funcionales. La utilización de CRISPR ha permitido intervenir simultáneamente varias de estas copias, facilitando la obtención de modificaciones que anteriormente resultaban difíciles de alcanzar mediante métodos convencionales. Gao (2021) destaca que la capacidad de realizar ediciones múltiples constituye una ventaja estratégica para el mejoramiento de especies con genomas complejos como el trigo.

El maíz también ocupa un lugar destacado dentro de las aplicaciones agrícolas de CRISPR, debido a su importancia para la alimentación humana, la producción pecuaria y diversos procesos industriales. Las investigaciones desarrolladas en esta especie abarcan modificaciones relacionadas con productividad, arquitectura de la planta, tolerancia a sequía, resistencia a enfermedades y eficiencia fisiológica. ChileBio (2021) informa que el interés por incorporar herramientas de edición genética en el mejoramiento del maíz continúa creciendo a nivel internacional, impulsando el desarrollo de nuevas estrategias para responder a las demandas productivas de diferentes regiones agrícolas.

En América Latina, diversas instituciones de investigación han fortalecido sus programas de edición genética aplicada a cultivos estratégicos, contribuyendo al desarrollo de capacidades científicas regionales. Entre ellas, el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) ha desarrollado investigaciones orientadas a optimizar la utilización de CRISPR en especies de importancia agrícola para la región, favoreciendo la generación de conocimientos adaptados a las necesidades productivas locales. Estas iniciativas evidencian el creciente interés por incorporar tecnologías de edición genómica dentro de los programas nacionales de mejoramiento vegetal y fortalecer la innovación científica en el sector agropecuario.

Las hortalizas constituyen otro grupo de especies donde la edición genética ha mostrado importantes avances, particularmente en el desarrollo de resistencia frente a enfermedades, el mejoramiento de la calidad nutricional y la optimización de características poscosecha. La modificación de genes relacionados con procesos de maduración, firmeza de frutos y respuesta a patógenos ofrece oportunidades para incrementar la calidad comercial y reducir las pérdidas durante el almacenamiento y transporte. Razzaq et al. (2019) destacan que estas aplicaciones poseen un elevado potencial para mejorar la competitividad de los sistemas hortícolas y favorecer una producción más eficiente y sostenible.

Las frutas también representan un campo de creciente interés para la aplicación de CRISPR, especialmente en investigaciones dirigidas a prolongar la vida útil, mejorar atributos organolépticos y fortalecer la resistencia frente a enfermedades. La regulación de procesos asociados con la maduración y el deterioro fisiológico permite disminuir significativamente las pérdidas poscosecha, aspecto de gran relevancia para cadenas de comercialización que dependen del transporte a largas distancias. Abdelrahman et al. (2021) señalan que estas aplicaciones pueden generar importantes beneficios económicos y ambientales al incrementar la eficiencia de las cadenas agroalimentarias.

Las leguminosas constituyen otro grupo de cultivos estratégicos debido a su importancia nutricional y a su capacidad para contribuir al mantenimiento de la fertilidad de los suelos mediante la fijación biológica de nitrógeno. Sin embargo, numerosas especies presentan limitaciones relacionadas con los procesos de transformación y regeneración vegetal, dificultando la aplicación de las tecnologías de edición genética. El Tang et al. (2023) destaca que la superación de estas limitaciones constituye una de las prioridades actuales para ampliar el uso de CRISPR en un mayor número de especies agrícolas de importancia económica.

En conjunto, la evidencia disponible demuestra que las aplicaciones de CRISPR presentan diferentes niveles de desarrollo según las características biológicas y el grado de conocimiento existente para cada especie vegetal. Mientras algunos cultivos cuentan con plataformas consolidadas para la edición genética, otros requieren avances adicionales en aspectos relacionados con transformación, regeneración y validación agronómica. El Tang et al. (2023) considera que la expansión de estas tecnologías hacia cultivos menos estudiados será uno de los principales retos del mejoramiento vegetal durante los próximos años, favoreciendo una agricultura más diversificada, resiliente y adaptada a las necesidades específicas de cada región.

Transformación y regeneración vegetal como desafíos tecnológicos

La transformación y regeneración de tejidos vegetales constituyen uno de los principales desafíos para la aplicación eficiente de las tecnologías CRISPR en el mejoramiento de cultivos. Aunque los sistemas de edición genética han alcanzado elevados niveles de precisión molecular, su éxito depende en gran medida de la capacidad para introducir los componentes de edición en las células vegetales y regenerar posteriormente plantas completas que conserven las modificaciones obtenidas. Schindele et al. (2018) destacan que la eficiencia de estos procesos continúa siendo uno de los factores que más limita la transferencia de la edición genómica desde el laboratorio hacia los programas de mejoramiento vegetal.

La incorporación de proteínas Cas, ARN guía y demás componentes responsables de la edición puede realizarse mediante diferentes métodos de transformación genética, entre ellos *Agrobacterium tumefaciens*, biobalística y otros sistemas de transferencia molecular. Sin embargo, la eficiencia de estas metodologías varía considerablemente entre especies, variedades e incluso entre distintos genotipos pertenecientes a un mismo cultivo. Chen et al. (2019) señalan que esta variabilidad representa una limitación importante para la aplicación generalizada de CRISPR, ya que numerosos cultivos de interés económico presentan bajas tasas de transformación y regeneración.

Uno de los principales obstáculos radica en la fuerte dependencia del genotipo durante los procesos de cultivo de tejidos y regeneración vegetal. Protocolos altamente eficientes para determinadas variedades pueden resultar poco efectivos cuando se aplican a otros materiales genéticos, dificultando la incorporación de la edición genética dentro de programas de mejoramiento que trabajan con una amplia diversidad de germoplasma. Gao (2021) destaca que la superación de esta dependencia constituye una prioridad para ampliar el uso de CRISPR en especies agrícolas que actualmente presentan importantes restricciones técnicas.

La regeneración de plantas completas a partir de células editadas representa otro proceso altamente complejo, debido a que requiere la reprogramación del desarrollo celular y la activación de mecanismos responsables de la formación de órganos y tejidos. La capacidad regenerativa varía considerablemente entre especies y se encuentra influenciada por factores fisiológicos, hormonales y genéticos que todavía continúan siendo objeto de investigación. Naik et al. (2022) indican que la optimización de los protocolos de regeneración constituye un componente indispensable para incrementar la eficiencia de la edición genética y facilitar su incorporación dentro de programas modernos de mejoramiento vegetal.

Con el propósito de superar estas limitaciones, diversas investigaciones han comenzado a desarrollar estrategias innovadoras orientadas a reducir la dependencia de los sistemas tradicionales de cultivo de tejidos. Entre ellas destacan la edición directa de meristemas, la utilización de sistemas de regeneración in planta y el desarrollo de metodologías que disminuyen la necesidad de procesos prolongados de cultivo celular. El Tang et al. (2023) señala que

estas aproximaciones representan una de las principales tendencias actuales para simplificar la obtención de plantas editadas y ampliar la aplicabilidad de las tecnologías CRISPR en diferentes especies agrícolas.

Paralelamente, la búsqueda de nuevos sistemas de entrega de los componentes de edición constituye otro campo de investigación en constante crecimiento. La utilización de nanopartículas, vectores biológicos optimizados y otras plataformas emergentes pretende incrementar la eficiencia del transporte de proteínas Cas y ARN guía hacia las células vegetales, reduciendo simultáneamente los efectos adversos asociados con algunos métodos convencionales de transformación. Tang et al. (2023) destaca que estos avances podrían facilitar la edición genética de especies consideradas recalcitrantes, ampliando considerablemente el número de cultivos susceptibles de ser mejorados mediante CRISPR.

La evidencia científica demuestra que el desarrollo de herramientas de edición genética cada vez más precisas debe avanzar de manera paralela con la optimización de los procedimientos de transformación y regeneración vegetal. Una elevada precisión molecular pierde gran parte de su utilidad cuando las modificaciones no pueden incorporarse eficientemente en plantas completas o cuando los protocolos disponibles presentan una aplicabilidad limitada para determinadas especies. El Tang et al. (2023) considera que la integración de innovaciones en edición genómica, transformación vegetal y regeneración celular será uno de los factores determinantes para consolidar la utilización de CRISPR como una herramienta ampliamente accesible para el mejoramiento de cultivos durante las próximas décadas.

Efectos fuera del objetivo y precisión de la edición genética

La elevada precisión constituye una de las principales ventajas que distinguen a las tecnologías CRISPR frente a otras herramientas utilizadas anteriormente en el mejoramiento genético. La posibilidad de dirigir las modificaciones hacia secuencias específicas del ADN ha permitido realizar intervenciones con un nivel de exactitud considerablemente superior al obtenido mediante procedimientos convencionales de mutagénesis. Sin embargo, la evidencia científica demuestra que estos sistemas no se encuentran completamente exentos de generar modificaciones en regiones distintas al sitio inicialmente previsto, fenómeno conocido como efectos fuera del objetivo (off-target effects). Chen et al. (2019) señalan que la identificación y reducción de estas modificaciones constituye uno de los principales objetivos de la investigación actual en edición genómica vegetal.

La aparición de efectos off-target depende de múltiples factores relacionados con las características moleculares del sistema de edición. Entre ellos, el diseño del ARN guía desempeña un papel determinante, ya que pequeñas similitudes entre la secuencia objetivo y otras regiones del genoma pueden favorecer la unión no deseada de la proteína Cas y la generación de modificaciones adicionales. Schindele et al. (2018) destacan que la selección cuidadosa de las secuencias guía representa una de las estrategias más eficaces para incrementar la especificidad de la edición genética y reducir la probabilidad de alteraciones no intencionadas.

La especificidad también se encuentra influenciada por las propiedades de las diferentes proteínas Cas utilizadas durante el proceso de edición. El desarrollo de variantes con mayor capacidad de reconocimiento molecular ha permitido disminuir significativamente la frecuencia de modificaciones no deseadas, incrementando la confiabilidad de las aplicaciones agrícolas. Gao (2021) sostiene que la ingeniería de nuevas proteínas Cas constituye una de las principales líneas de investigación orientadas a fortalecer la seguridad de las herramientas de edición genómica y ampliar sus posibilidades de utilización en programas de mejoramiento vegetal.

Los avances alcanzados en bioinformática han contribuido igualmente a mejorar la precisión de CRISPR mediante el desarrollo de algoritmos capaces de identificar potenciales sitios de edición no deseados antes de realizar los experimentos. Estas herramientas permiten evaluar millones de secuencias genómicas para seleccionar ARN guía con elevados niveles de especificidad y minimizar la probabilidad de modificaciones fuera del objetivo. Naik et al. (2022) indican que la integración de análisis computacionales dentro del diseño experimental ha incrementado notablemente la eficiencia y seguridad de las aplicaciones basadas en edición genética.

La evaluación de la precisión no concluye con la obtención de plantas editadas, sino que requiere la implementación de procedimientos de validación molecular y fenotípica capaces de confirmar la estabilidad de las modificaciones

realizadas. Las tecnologías modernas de secuenciación permiten identificar con elevada resolución las alteraciones presentes en el genoma, verificando que las modificaciones correspondan exclusivamente a los objetivos previamente establecidos. Veillet et al. (2020) destacan que la validación genómica constituye una etapa indispensable para garantizar la confiabilidad de los materiales vegetales desarrollados mediante edición genética.

No obstante, la evaluación de la seguridad no debe limitarse únicamente a la identificación de efectos off-target. Incluso cuando la modificación ocurre exactamente en el sitio previsto, la alteración de un gen puede generar respuestas fisiológicas inesperadas debido a la compleja interacción existente entre los diferentes componentes del genoma vegetal. Numerosos genes participan simultáneamente en múltiples procesos biológicos, por lo que una modificación puntual puede producir efectos indirectos sobre características agronómicas, metabólicas o reproductivas. Razzaq et al. (2019) señalan que estas interacciones justifican la necesidad de realizar evaluaciones integrales antes de incorporar nuevas variedades editadas dentro de programas de producción agrícola.

Por esta razón, las investigaciones actuales complementan los análisis moleculares con estudios fenotípicos, fisiológicos y agronómicos desarrollados bajo diferentes condiciones ambientales. La evaluación del comportamiento de las plantas en invernadero y en campo permite verificar la estabilidad de las modificaciones y detectar posibles respuestas no previstas que podrían pasar desapercibidas durante las etapas iniciales de laboratorio. El Tang et al. (2023) destaca que este enfoque multidisciplinario fortalece la confianza científica en las tecnologías de edición genética y proporciona información esencial para su futura aplicación agrícola.

En conjunto, la evidencia disponible demuestra que la precisión de CRISPR ha experimentado avances significativos gracias al perfeccionamiento de las proteínas Cas, el diseño optimizado de ARN guía y la incorporación de herramientas bioinformáticas y genómicas de alta resolución. A pesar de estos progresos, la evaluación rigurosa de posibles efectos no previstos continuará representando un componente fundamental para garantizar la seguridad y confiabilidad de las aplicaciones agrícolas derivadas de la edición genética. El Tang et al. (2023) considera que el desarrollo de sistemas cada vez más precisos permitirá consolidar el uso responsable de CRISPR dentro de programas de mejoramiento vegetal orientados hacia una agricultura más eficiente, sostenible y científicamente respaldada.

Marcos regulatorios para cultivos editados mediante CRISPR

El desarrollo de las tecnologías CRISPR ha impulsado un intenso debate internacional sobre los marcos regulatorios que deben aplicarse a los cultivos obtenidos mediante edición genética. A diferencia de las primeras generaciones de organismos genéticamente modificados, muchas de las modificaciones producidas mediante CRISPR pueden consistir únicamente en pequeños cambios puntuales dentro del propio genoma de la planta, sin incorporar material genético procedente de otras especies. Esta característica ha generado nuevos desafíos para las autoridades regulatorias, que deben determinar si estos productos requieren los mismos procedimientos de evaluación aplicados tradicionalmente a los organismos transgénicos o si, por el contrario, demandan esquemas regulatorios diferenciados. Tachikawa y Matsuo (2023) señala que la rápida evolución de las tecnologías de edición genética ha obligado a numerosos países a revisar sus normativas para responder adecuadamente a estos nuevos escenarios científicos.

Uno de los principales aspectos que diferencian las regulaciones internacionales radica en el criterio utilizado para evaluar los productos obtenidos mediante edición genética. Algunos países centran sus procesos regulatorios en las características finales del organismo desarrollado, considerando principalmente el tipo de modificación presente en el producto agrícola. Otros sistemas, en cambio, fundamentan su evaluación en el procedimiento tecnológico empleado para generar dicha modificación, independientemente del resultado obtenido. FAO (2022) destaca que estas diferencias metodológicas explican la considerable diversidad de enfoques regulatorios existentes a nivel mundial y la ausencia de un modelo único ampliamente adoptado.

En diversos países, las modificaciones obtenidas mediante CRISPR que no incorporan ADN exógeno pueden recibir un tratamiento regulatorio distinto al aplicado a los organismos transgénicos convencionales. Bajo este enfoque, determinadas variedades editadas son consideradas equivalentes a aquellas que podrían originarse mediante mutaciones naturales o técnicas tradicionales de mejoramiento, siempre que las modificaciones realizadas no

introduzcan nuevas secuencias genéticas provenientes de otras especies. ChileBio (2021) informa que este criterio ha favorecido el desarrollo de programas de investigación y la incorporación progresiva de cultivos editados en algunos sistemas agrícolas, promoviendo un entorno más dinámico para la innovación biotecnológica.

Sin embargo, otros países mantienen regulaciones más estrictas y consideran que cualquier organismo obtenido mediante herramientas de edición genética debe someterse a procedimientos similares a los establecidos para los organismos genéticamente modificados tradicionales. Estos enfoques priorizan la aplicación del principio de precaución y buscan garantizar una evaluación exhaustiva de los posibles riesgos ambientales, alimentarios y sanitarios antes de autorizar la liberación comercial de nuevas variedades. Tang et al. (2023) destaca que ambas posiciones persiguen objetivos legítimos relacionados con la protección de la salud y el ambiente, aunque difieren en la interpretación del riesgo asociado a las nuevas tecnologías genómicas.

La diversidad regulatoria existente genera importantes implicaciones para la investigación científica y la comercialización internacional de cultivos editados. Las instituciones de investigación, empresas biotecnológicas y programas nacionales de mejoramiento deben adaptar sus estrategias a los requisitos específicos establecidos por cada mercado, situación que puede incrementar los costos de desarrollo y retrasar la disponibilidad de nuevas variedades agrícolas. Gao (2021) sostiene que la incertidumbre regulatoria representa uno de los principales factores que condicionan la velocidad de adopción de las tecnologías CRISPR dentro del sector agrícola mundial.

La constante aparición de nuevas herramientas, como la edición de bases y el prime editing, plantea además desafíos adicionales para los sistemas regulatorios desarrollados inicialmente para tecnologías anteriores. Estas innovaciones permiten realizar modificaciones con niveles de precisión cada vez mayores, lo que obliga a reconsiderar algunos criterios tradicionales utilizados para evaluar los riesgos asociados con la edición genética. Wada et al. (2020) señalan que la actualización permanente de los marcos regulatorios resulta indispensable para responder adecuadamente al acelerado avance de la biotecnología moderna sin limitar el desarrollo de innovaciones científicas con potencial beneficio para la agricultura.

Frente a este panorama, diversos organismos e instituciones internacionales promueven el fortalecimiento de la cooperación científica y regulatoria entre países con el propósito de compartir información, armonizar criterios técnicos y facilitar el intercambio de conocimientos relacionados con la evaluación de cultivos editados. Aunque la adopción de una regulación completamente uniforme resulta compleja debido a las diferencias jurídicas, económicas y sociales existentes entre las naciones, el establecimiento de principios comunes puede contribuir a reducir la incertidumbre y favorecer el desarrollo responsable de estas tecnologías. El Tang et al. (2023) considera que la construcción de marcos regulatorios basados en evidencia científica, transparencia y cooperación internacional será un elemento fundamental para consolidar el uso seguro y sostenible de CRISPR en el mejoramiento de cultivos durante los próximos años.

Percepción pública y aceptación social de los cultivos editados

La aceptación social constituye uno de los factores más determinantes para la incorporación de las tecnologías CRISPR dentro de los sistemas agrícolas modernos. La experiencia acumulada durante las últimas décadas con los organismos genéticamente modificados ha demostrado que el éxito de una innovación biotecnológica no depende exclusivamente de su eficacia científica, sino también de la confianza que la sociedad deposita en los procesos de investigación, evaluación y regulación que respaldan su utilización. En este contexto, la percepción pública de los cultivos editados mediante CRISPR se ha convertido en un tema prioritario para investigadores, organismos reguladores y responsables de las políticas agrícolas. FAO (2022) destaca que el desarrollo sostenible de las nuevas tecnologías requiere fortalecer el diálogo entre la comunidad científica y la sociedad, promoviendo procesos de comunicación basados en evidencia y transparencia.

Uno de los principales desafíos radica en que una parte importante de la población no distingue claramente las diferencias existentes entre la edición genética y las tecnologías transgénicas convencionales. Aunque muchas aplicaciones de CRISPR generan modificaciones que podrían producirse de manera natural o mediante mejoramiento

convencional, estas diferencias técnicas no siempre resultan comprensibles para los consumidores. Como consecuencia, la percepción del riesgo puede construirse a partir de conocimientos incompletos o de asociaciones con tecnologías desarrolladas en contextos distintos. Strobbe et al. (2023) señala que la divulgación científica desempeña un papel fundamental para explicar de manera clara las características, alcances y limitaciones de la edición genética, favoreciendo una comprensión más objetiva de estas herramientas.

La confianza pública también depende de la transparencia con la que se desarrollan los procesos de investigación y evaluación de los cultivos editados. La comunicación de los beneficios potenciales debe ir acompañada del reconocimiento de las incertidumbres, los desafíos técnicos y los procedimientos de control implementados para garantizar la seguridad de las aplicaciones agrícolas. Presentar únicamente las ventajas de la tecnología puede generar percepciones de falta de objetividad y disminuir la credibilidad de las instituciones responsables de su desarrollo. El Strobbe et al. (2023) destaca que una comunicación equilibrada fortalece la confianza social y facilita la construcción de procesos participativos alrededor de las nuevas tecnologías genómicas.

La participación de múltiples actores constituye otro elemento esencial para favorecer la aceptación social de los cultivos editados. Agricultores, consumidores, investigadores, autoridades regulatorias, organizaciones ambientales y representantes del sector productivo poseen perspectivas diferentes sobre los beneficios, riesgos y prioridades relacionadas con la utilización de CRISPR. La incorporación de estos actores dentro de procesos de consulta y deliberación contribuye a generar decisiones más legítimas y socialmente aceptadas. FAO (2022) sostiene que la gobernanza de las innovaciones agrícolas debe fundamentarse en mecanismos participativos que integren el conocimiento científico con las expectativas y necesidades de la sociedad.

La percepción pública también puede variar según las características específicas de las aplicaciones desarrolladas mediante edición genética. Los productos que ofrecen beneficios directos para los consumidores, como alimentos con mayor valor nutricional, menor contenido de compuestos alergénicos o mejores características de conservación, suelen generar niveles de aceptación diferentes respecto a aquellos cuyos beneficios se concentran principalmente en la productividad agrícola. Gao (2021) señala que la identificación de ventajas claramente percibidas por los consumidores puede favorecer una mayor disposición hacia la adopción de cultivos obtenidos mediante tecnologías CRISPR.

Asimismo, diversos estudios muestran que la aceptación social no depende exclusivamente del acceso a información científica. Factores culturales, experiencias personales, valores éticos, nivel educativo y confianza en las instituciones influyen significativamente en la manera en que las personas interpretan los riesgos y beneficios asociados con la biotecnología. Estas variables explican por qué grupos sociales con acceso a información similar pueden desarrollar percepciones considerablemente diferentes sobre una misma tecnología. Strobbe et al. (2023) destaca que comprender estos factores sociales resulta indispensable para diseñar estrategias de comunicación más eficaces y fortalecer el diálogo entre la ciencia y la ciudadanía.

En conjunto, la evidencia disponible demuestra que la aceptación de los cultivos editados mediante CRISPR constituye un proceso complejo en el que intervienen dimensiones científicas, sociales, culturales y éticas. La consolidación de estas tecnologías dependerá no solo de los avances alcanzados en precisión y eficiencia, sino también de la capacidad para construir relaciones de confianza entre investigadores, instituciones y sociedad. El Strobbe et al. (2023) considera que una gobernanza basada en transparencia, participación y comunicación científica responsable permitirá favorecer una adopción más informada y sostenible de la edición genética dentro de la agricultura del futuro.

Propiedad intelectual y acceso a las tecnologías CRISPR

La propiedad intelectual constituye uno de los aspectos más relevantes para el desarrollo, la difusión y la aplicación de las tecnologías CRISPR en el mejoramiento de cultivos. Desde los primeros avances en edición genética, la generación de patentes sobre proteínas Cas, sistemas de edición y diferentes procedimientos biotecnológicos ha configurado un escenario complejo en el que convergen intereses científicos, comerciales y sociales. Si bien la protección de la innovación favorece las inversiones en investigación y desarrollo, también plantea interrogantes relacionados con el

acceso equitativo a estas herramientas, especialmente para instituciones públicas, universidades y programas de mejoramiento desarrollados en países con recursos limitados. El Tang et al. (2023) destaca que el equilibrio entre la protección de la innovación y el acceso a la tecnología constituye uno de los principales desafíos para el futuro de la biotecnología agrícola.

La existencia de múltiples patentes y acuerdos de licenciamiento puede influir directamente sobre la velocidad con que las innovaciones alcanzan aplicaciones prácticas en la agricultura. Las grandes empresas biotecnológicas suelen disponer de mayores capacidades económicas y jurídicas para acceder a las licencias necesarias y desarrollar nuevas variedades comerciales, mientras que numerosas instituciones académicas y centros públicos de investigación enfrentan mayores limitaciones para incorporar estas herramientas dentro de sus programas científicos. Gao (2021) señala que estas diferencias pueden generar brechas tecnológicas que condicionan la distribución de los beneficios derivados de la edición genética entre distintos sectores de la sociedad.

La situación adquiere una relevancia aún mayor en los países en desarrollo, donde los sistemas nacionales de investigación agrícola desempeñan un papel fundamental en la generación de variedades adaptadas a condiciones locales de producción. La dependencia de tecnologías protegidas mediante complejos esquemas de propiedad intelectual puede dificultar la incorporación de CRISPR en programas destinados al mejoramiento de cultivos regionales, limitando la capacidad de respuesta frente a problemas específicos relacionados con enfermedades, cambio climático o seguridad alimentaria. FAO (2022) destaca que el fortalecimiento de las capacidades científicas nacionales constituye un elemento estratégico para garantizar que las innovaciones biotecnológicas contribuyan efectivamente al desarrollo agrícola sostenible.

Las barreras asociadas con la propiedad intelectual también pueden afectar el mejoramiento de cultivos considerados de menor interés comercial, pero de elevada importancia para la alimentación y la economía de determinadas regiones. Mientras los cultivos de amplia difusión internacional suelen atraer mayores inversiones privadas, numerosas especies locales reciben menor atención debido a su limitada rentabilidad económica. Esta situación puede ampliar las desigualdades en el acceso a las nuevas tecnologías y restringir el desarrollo de soluciones adaptadas a las necesidades de pequeños productores. Jaganathan et al. (2018) destacan que ampliar la aplicación de CRISPR a una mayor diversidad de especies agrícolas constituye uno de los retos más importantes para lograr una distribución más equitativa de los beneficios derivados de la edición genética.

Frente a estos desafíos, diversos modelos de licenciamiento comienzan a promover mecanismos que facilitan el acceso a las tecnologías CRISPR con fines de investigación científica, desarrollo académico y aplicaciones orientadas al interés público. La implementación de acuerdos flexibles para proyectos humanitarios, la cooperación entre instituciones y el establecimiento de plataformas colaborativas representan alternativas que pueden favorecer la democratización del conocimiento biotecnológico. El Tang et al. (2023) señala que estas iniciativas permiten fortalecer la investigación internacional y ampliar las oportunidades para que instituciones de diferentes países desarrollen soluciones adaptadas a sus propias realidades agrícolas.

Asimismo, la cooperación científica internacional desempeña un papel cada vez más importante para reducir las brechas tecnológicas relacionadas con la propiedad intelectual. El intercambio de conocimientos, la formación de recursos humanos especializados y el desarrollo de proyectos colaborativos permiten compartir experiencias y fortalecer las capacidades de investigación en regiones donde la infraestructura científica aún se encuentra en proceso de consolidación. Tachikawa y Matsuo (2023) destaca que la colaboración entre universidades, centros de investigación, organismos públicos y sector productivo constituye un componente esencial para acelerar la innovación responsable y favorecer una utilización más amplia de las herramientas de edición genética.

En conjunto, la evidencia disponible demuestra que la propiedad intelectual representa un elemento indispensable para incentivar la innovación científica, pero también constituye un factor que puede condicionar el acceso equitativo a las tecnologías CRISPR. La consolidación de una agricultura basada en edición genética requerirá mecanismos capaces de proteger la investigación sin limitar el desarrollo de aplicaciones orientadas al bienestar colectivo, la seguridad alimentaria y el fortalecimiento de los sistemas agrícolas de todas las regiones del mundo. FAO (2022) considera que

el futuro de estas tecnologías dependerá de la capacidad para armonizar los incentivos a la innovación con políticas que favorezcan una distribución más equitativa de sus beneficios científicos, económicos y sociales.

CRISPR y nuevas técnicas genómicas para una agricultura sostenible

El avance de las nuevas técnicas genómicas ha transformado profundamente las estrategias empleadas en el mejoramiento vegetal, permitiendo desarrollar modificaciones altamente específicas que difícilmente podían alcanzarse mediante los métodos convencionales de selección y cruzamiento. Dentro de este conjunto de innovaciones, CRISPR ocupa un lugar central debido a su capacidad para modificar secuencias específicas del ADN con elevados niveles de precisión, eficiencia y versatilidad. Estas características han convertido a la edición genética en una herramienta estratégica para enfrentar los desafíos relacionados con el incremento de la producción agrícola, la conservación de los recursos naturales y la adaptación al cambio climático. Gao (2021) destaca que la integración de las nuevas tecnologías genómicas representa uno de los cambios más significativos experimentados por la biotecnología agrícola durante las últimas décadas.

La disponibilidad de secuencias genómicas completas para un número creciente de especies cultivadas ha fortalecido considerablemente las posibilidades de aplicación de CRISPR. La secuenciación masiva permite identificar genes, regiones regulatorias y variantes genéticas asociadas con características agronómicas de interés, proporcionando la información necesaria para diseñar estrategias de edición dirigidas hacia objetivos específicos. Chen et al. (2019) señalan que el conocimiento detallado de la arquitectura genética de los cultivos constituye un requisito indispensable para aprovechar plenamente el potencial de las tecnologías de edición genómica.

La bioinformática desempeña igualmente un papel fundamental dentro de este nuevo escenario tecnológico, ya que proporciona herramientas capaces de analizar grandes volúmenes de información genética e identificar relaciones complejas entre genes, proteínas y procesos fisiológicos. El empleo de algoritmos especializados facilita la selección de secuencias objetivo, el diseño de ARN guía con alta especificidad y la predicción de posibles efectos derivados de las modificaciones propuestas. Naik et al. (2022) destacan que la combinación entre análisis computacional y edición genética incrementa significativamente la eficiencia de los programas modernos de mejoramiento vegetal.

Durante los últimos años, la incorporación de herramientas basadas en inteligencia artificial ha comenzado a ampliar aún más las capacidades de las nuevas técnicas genómicas. Los modelos computacionales permiten identificar patrones complejos dentro de grandes bases de datos genéticos, predecir la función de genes poco caracterizados y priorizar objetivos de edición con mayor probabilidad de éxito. Estas aplicaciones contribuyen a reducir el tiempo requerido para desarrollar nuevas variedades agrícolas y optimizar los procesos de investigación. El Tang et al. (2023) señala que la integración entre inteligencia artificial y edición genética constituye una de las tendencias con mayor potencial para acelerar la innovación agrícola durante los próximos años.

No obstante, la evidencia científica coincide en que el desarrollo de nuevas técnicas genómicas no garantiza por sí mismo la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. El incremento del rendimiento o la incorporación de nuevas características genéticas deben acompañarse de prácticas agronómicas responsables que promuevan la conservación del suelo, el uso eficiente del agua, la protección de la biodiversidad y el manejo integrado de los recursos naturales. FAO (2022) enfatiza que la sostenibilidad agrícola requiere un enfoque multidimensional en el que las innovaciones biotecnológicas funcionen como herramientas complementarias dentro de estrategias más amplias de desarrollo rural. En este contexto, la conservación de la diversidad genética continúa representando un componente esencial para fortalecer la resiliencia de la agricultura frente a los cambios ambientales y las nuevas presiones fitosanitarias. La utilización indiscriminada de un número reducido de variedades altamente productivas puede incrementar la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas frente a enfermedades emergentes y condiciones climáticas extremas. La edición genética ofrece la posibilidad de mejorar variedades locales ampliamente adaptadas a determinadas regiones, preservando simultáneamente su diversidad genética y sus características agronómicas tradicionales. Razzaq et al. (2019) destacan que esta estrategia permite combinar los beneficios de la innovación biotecnológica con la conservación de recursos fitogenéticos de alto valor para la agricultura.

En conjunto, los resultados analizados muestran que las nuevas técnicas genómicas, encabezadas por CRISPR, ofrecen oportunidades sin precedentes para transformar el mejoramiento vegetal y contribuir al desarrollo de una agricultura más eficiente y sostenible. Sin embargo, el aprovechamiento pleno de estas herramientas dependerá de su integración con otras disciplinas científicas, de la implementación de prácticas agrícolas responsables y del fortalecimiento de políticas que promuevan la conservación de la biodiversidad y el acceso equitativo a la innovación. El Tang et al. (2023) considera que el futuro de la agricultura sostenible estará determinado por la capacidad para combinar el conocimiento genómico, la edición genética, la inteligencia artificial y la gestión responsable de los recursos naturales dentro de un mismo modelo de desarrollo agrícola.

Principales tendencias y perspectivas futuras

La revisión de la literatura científica evidencia que las tecnologías CRISPR continúan evolucionando a un ritmo acelerado, impulsando una transformación profunda en los programas de mejoramiento vegetal desarrollados a nivel mundial. Los avances registrados durante los últimos años no solo han incrementado la precisión de las herramientas de edición genética, sino que también han ampliado significativamente el número de aplicaciones potenciales para responder a los desafíos relacionados con la producción sostenible de alimentos, la adaptación al cambio climático y la conservación de los recursos naturales. Gao (2021) señala que la evolución permanente de estas tecnologías permitirá desarrollar estrategias de mejoramiento cada vez más específicas y eficientes, adaptadas a las necesidades particulares de diferentes especies agrícolas.

Una de las principales tendencias identificadas corresponde al perfeccionamiento continuo de la precisión de los sistemas de edición genética. La incorporación de nuevas proteínas Cas, el desarrollo de variantes con mayor especificidad y la optimización del diseño de ARN guía han permitido reducir progresivamente la probabilidad de modificaciones fuera del objetivo, fortaleciendo la confiabilidad de las aplicaciones agrícolas. Wada et al. (2020) destacan que estos avances representan un requisito indispensable para incrementar la seguridad de las tecnologías CRISPR y facilitar su incorporación dentro de programas de mejoramiento vegetal orientados hacia la producción comercial.

Otra tendencia de gran relevancia corresponde a la creciente utilización de estrategias de edición múltiple, capaces de modificar simultáneamente varios genes relacionados con una misma característica agronómica. Esta capacidad adquiere especial importancia para el mejoramiento de caracteres complejos, como la tolerancia a diferentes tipos de estrés ambiental, la eficiencia fisiológica o el rendimiento, cuya expresión depende de la interacción coordinada de numerosos genes. Naik et al. (2022) señalan que la edición multiplex permitirá abordar problemas biológicos que anteriormente resultaban difíciles de resolver mediante intervenciones dirigidas a un único gen.

El desarrollo de tecnologías complementarias, como la edición de bases y el prime editing, constituye otra de las tendencias más prometedoras identificadas durante la revisión. Estas herramientas amplían considerablemente las posibilidades de modificación del genoma al permitir realizar cambios altamente específicos sin necesidad de producir rupturas de doble cadena en el ADN. Como consecuencia, los investigadores disponen de un repertorio cada vez más amplio de alternativas para adaptar la estrategia de edición a los objetivos particulares de cada programa de mejoramiento. Veillet et al. (2020) destacan que estas innovaciones incrementarán significativamente la versatilidad de la ingeniería genética vegetal durante los próximos años.

La continua identificación de nuevas proteínas Cas provenientes de diferentes sistemas CRISPR naturales también representa una línea de investigación con elevado potencial científico. Cada nueva variante incorpora propiedades particulares relacionadas con tamaño, especificidad, eficiencia y reconocimiento de secuencias genómicas, ampliando las posibilidades de aplicación en especies vegetales que actualmente presentan limitaciones para la edición genética. Chen et al. (2019) señalan que la expansión del repertorio de herramientas disponibles permitirá seleccionar sistemas más apropiados para responder a las características biológicas de cada cultivo.

Paralelamente, la integración entre CRISPR, la genómica, la bioinformática y la inteligencia artificial transformará progresivamente los programas de mejoramiento vegetal. La disponibilidad de grandes bases de datos genéticos y el

desarrollo de algoritmos capaces de identificar relaciones complejas entre genes y características agronómicas facilitarán la selección de nuevos objetivos de edición y optimizarán el diseño de estrategias experimentales. El Tang et al. (2023) considera que esta convergencia tecnológica acelerará significativamente el desarrollo de variedades agrícolas con características adaptadas a las necesidades futuras de la producción mundial de alimentos.

Otra tendencia claramente identificada corresponde al perfeccionamiento de los sistemas de transformación y regeneración vegetal, aspectos que continúan representando uno de los principales factores limitantes para la aplicación de la edición genética en numerosas especies agrícolas. El desarrollo de nuevos métodos de entrega molecular, la utilización de nanopartículas y las estrategias de regeneración directa permitirán ampliar el número de cultivos susceptibles de ser editados mediante CRISPR. Schindele et al. (2018) destacan que estos avances serán determinantes para extender la utilización de la edición genética hacia especies que actualmente presentan importantes dificultades técnicas.

Asimismo, la adaptación de los cultivos frente a los efectos del cambio climático continuará consolidándose como una prioridad para la investigación agrícola internacional. El incremento de fenómenos extremos relacionados con sequías, altas temperaturas, salinidad e inundaciones exige el desarrollo de variedades capaces de mantener niveles adecuados de productividad bajo condiciones ambientales cada vez más variables. Abdelrahman et al. (2021) señalan que la edición genética desempeñará un papel fundamental en la obtención de cultivos con mayor resiliencia climática y mejor capacidad de adaptación frente a escenarios ambientales futuros.

La sostenibilidad también continuará orientando buena parte de las investigaciones desarrolladas mediante tecnologías CRISPR. La mejora de la eficiencia en el uso del agua, el aprovechamiento de nutrientes, la reducción de pérdidas poscosecha y la disminución del uso de productos fitosanitarios representan objetivos estrechamente vinculados con la construcción de sistemas agrícolas más responsables desde el punto de vista ambiental. FAO (2022) destaca que estas innovaciones deberán integrarse con prácticas agronómicas sostenibles para maximizar su contribución al desarrollo rural y a la conservación de los recursos naturales.

Finalmente, la literatura revisada demuestra que el futuro de CRISPR no dependerá exclusivamente de los avances científicos alcanzados en los laboratorios, sino también de la evolución de los marcos regulatorios, los mecanismos de acceso a la tecnología, la cooperación internacional y la aceptación social de las nuevas herramientas genómicas. La consolidación de una agricultura basada en edición genética requerirá integrar innovación, ética, sostenibilidad y gobernanza dentro de un mismo modelo de desarrollo científico. El Tang et al. (2023) destaca que esta visión integral permitirá aprovechar plenamente el potencial de CRISPR para contribuir al fortalecimiento de la seguridad alimentaria, la resiliencia de los sistemas agrícolas y el bienestar de las generaciones futuras.

4. DISCUSIÓN

La presente revisión narrativa pone de manifiesto que las tecnologías CRISPR han transformado significativamente el panorama del mejoramiento genético vegetal al proporcionar herramientas capaces de realizar modificaciones específicas en el genoma con niveles de precisión superiores a los alcanzados mediante los métodos tradicionales de mejoramiento. La evolución observada durante la última década evidencia una transición desde aplicaciones orientadas principalmente a la validación funcional de genes hacia estrategias dirigidas al desarrollo de cultivos con características agronómicas de alto interés productivo y ambiental. Este cambio refleja la rápida madurez científica alcanzada por la edición genética y su creciente incorporación dentro de los programas modernos de investigación agrícola. Los resultados obtenidos en la presente revisión coinciden con lo señalado por Jaganathan et al. (2018), quienes consideran que CRISPR representa una de las innovaciones más importantes para acelerar el mejoramiento de cultivos gracias a su elevada especificidad y facilidad de implementación en comparación con herramientas de edición genética desarrolladas previamente.

Uno de los aspectos más relevantes identificados durante la revisión corresponde a la extraordinaria versatilidad de los sistemas CRISPR para intervenir una amplia diversidad de características agronómicas. La literatura demuestra aplicaciones exitosas relacionadas con resistencia a enfermedades, tolerancia a diferentes factores de estrés abiótico, incremento del rendimiento, mejoramiento de la calidad nutricional y optimización de atributos poscosecha. Este

amplio espectro de aplicaciones evidencia que la edición genética ha dejado de constituir una herramienta limitada al estudio de genes individuales para convertirse en una plataforma tecnológica con capacidad de responder a múltiples desafíos de la agricultura contemporánea. En este sentido, Gao (2021) sostiene que la expansión de las aplicaciones de CRISPR refleja la consolidación de la edición genómica como un componente estratégico dentro de los programas internacionales de innovación agrícola.

Sin embargo, la evidencia analizada también demuestra que el potencial de CRISPR no debe interpretarse como un sustituto del mejoramiento genético convencional, sino como una herramienta complementaria que fortalece y acelera determinados procesos dentro de los programas de obtención de nuevas variedades. Mientras el mejoramiento clásico continúa siendo indispensable para combinar caracteres agronómicos, evaluar el comportamiento fenotípico y seleccionar materiales adaptados a diferentes ambientes, la edición genética permite intervenir genes específicos con un nivel de precisión difícilmente alcanzable mediante cruzamientos convencionales. Esta complementariedad representa uno de los principales consensos identificados en la literatura científica, ya que integra las ventajas de ambas aproximaciones dentro de un mismo proceso de innovación agrícola. Razzaq et al. (2019) destacan que la combinación entre selección convencional, información genómica y edición dirigida constituye actualmente una de las estrategias más prometedoras para incrementar la eficiencia del mejoramiento vegetal.

Los resultados de esta revisión muestran además que el desarrollo de tecnologías complementarias, como la edición de bases, el prime editing y las nuevas variantes de proteínas Cas, ha ampliado considerablemente las posibilidades de intervención sobre el genoma vegetal. Estas innovaciones permiten realizar modificaciones progresivamente más precisas y diversificadas, superando algunas limitaciones presentes en las primeras aplicaciones de CRISPR-Cas9. La evolución tecnológica observada durante los últimos años demuestra que la edición genética continúa atravesando una etapa de rápida expansión metodológica, caracterizada por el desarrollo permanente de herramientas capaces de responder a diferentes necesidades experimentales. En concordancia con estos hallazgos, Veillet et al. (2020) señalan que la incorporación de nuevas modalidades de edición representa un cambio cualitativo dentro de la ingeniería genética vegetal, al ampliar significativamente el tipo de modificaciones que pueden realizarse sobre el ADN de los cultivos.

Otro aspecto que merece especial atención corresponde a la creciente integración entre la edición genética y otras disciplinas emergentes, como la genómica funcional, la transcriptómica, la bioinformática y el análisis computacional de grandes volúmenes de información biológica. La disponibilidad de secuencias genómicas completas para numerosas especies cultivadas facilita la identificación de genes asociados con características agronómicas de interés, mientras que las herramientas bioinformáticas permiten seleccionar objetivos de edición con mayores probabilidades de éxito y menores riesgos de modificaciones no deseadas. Esta convergencia tecnológica está transformando progresivamente la manera en que se diseñan los programas de mejoramiento vegetal, favoreciendo procesos de investigación más precisos, eficientes y fundamentados en evidencia molecular. Chen et al. (2019) destacan que la integración de CRISPR con las ciencias ómicas constituye uno de los principales factores que explican el acelerado crecimiento de la edición genética aplicada a la agricultura.

Finalmente, la revisión permite afirmar que la evolución científica de CRISPR responde directamente a las nuevas demandas que enfrenta la agricultura mundial frente al crecimiento poblacional, la degradación ambiental y el cambio climático. La necesidad de desarrollar cultivos más resilientes, productivos y sostenibles ha impulsado una intensa actividad investigativa orientada a perfeccionar las herramientas de edición genética y ampliar sus aplicaciones hacia un número cada vez mayor de especies vegetales. En este contexto, la literatura coincide en que el verdadero impacto de CRISPR dependerá de su capacidad para integrarse con otras estrategias de innovación agrícola y contribuir de manera efectiva al fortalecimiento de la seguridad alimentaria global. FAO (2022) sostiene que las nuevas tecnologías genómicas pueden desempeñar un papel fundamental en la transformación sostenible de los sistemas agroalimentarios, siempre que su desarrollo se acompañe de prácticas responsables, políticas adecuadas y una evaluación científica rigurosa.

La revisión también pone de manifiesto que las aplicaciones más consolidadas de CRISPR se concentran en el mejoramiento de caracteres agronómicos directamente relacionados con la productividad y la adaptación de los cultivos frente a condiciones ambientales adversas. Entre estos caracteres, la resistencia a enfermedades constituye uno de los campos que ha experimentado un mayor desarrollo durante los últimos años, debido a la posibilidad de modificar genes de susceptibilidad o fortalecer mecanismos naturales de defensa presentes en las plantas. A diferencia de los enfoques tradicionales basados principalmente en la incorporación de genes de resistencia mediante cruzamientos sucesivos, la edición genética permite intervenir regiones específicas del genoma con un elevado nivel de precisión, reduciendo considerablemente el tiempo requerido para obtener nuevas variedades resistentes. Estos resultados coinciden con los reportados por Molla y Yang (2019), quienes destacan que la modificación dirigida de genes asociados con procesos de infección constituye una estrategia altamente prometedora para disminuir las pérdidas ocasionadas por patógenos sin alterar significativamente otras características agronómicas del cultivo.

No obstante, la evidencia científica demuestra que el desarrollo de resistencia genética no debe interpretarse como una solución definitiva frente a las enfermedades agrícolas. Los microorganismos poseen una elevada capacidad evolutiva que favorece la aparición de nuevas variantes capaces de superar determinados mecanismos de resistencia cuando estos son utilizados de manera generalizada durante largos períodos. Esta situación ya ha sido observada en diferentes programas de mejoramiento convencional y representa igualmente un desafío para las aplicaciones basadas en edición genética. En consecuencia, la literatura revisada coincide en que las variedades desarrolladas mediante CRISPR deben incorporarse dentro de programas de manejo integrado que combinen rotación de cultivos, monitoreo epidemiológico, conservación de enemigos naturales y uso responsable de otras estrategias fitosanitarias. Jaganathan et al. (2018) sostienen que la integración entre edición genética y manejo agronómico constituye el enfoque más adecuado para prolongar la eficacia de las resistencias obtenidas mediante ingeniería del genoma.

Los resultados relacionados con la tolerancia al estrés abiótico adquieren una relevancia aún mayor frente al escenario actual de cambio climático. El incremento en la frecuencia e intensidad de sequías, olas de calor, procesos de salinización y otros fenómenos ambientales extremos obliga a desarrollar cultivos capaces de mantener niveles adecuados de productividad bajo condiciones progresivamente más variables. La revisión evidencia que CRISPR ofrece importantes oportunidades para modificar genes involucrados en la regulación del equilibrio hídrico, el transporte iónico, la respuesta antioxidante y otros procesos fisiológicos asociados con la adaptación ambiental. Sin embargo, la mayoría de estos caracteres posee una naturaleza poligénica, por lo que su expresión depende de complejas redes de regulación molecular y de la interacción con factores ambientales. Abdelrahman et al. (2021) destacan que la obtención de cultivos verdaderamente resilientes requerirá intervenir simultáneamente múltiples mecanismos fisiológicos, superando los enfoques basados únicamente en la modificación de genes individuales.

Esta complejidad explica el creciente interés por las estrategias de edición múltiple, las cuales permiten modificar simultáneamente varios genes relacionados con una misma característica agronómica. La revisión muestra que esta aproximación posee un enorme potencial para abordar procesos biológicos complejos, como la tolerancia combinada a sequía, altas temperaturas y deficiencias nutricionales, condiciones que frecuentemente ocurren de manera simultánea en los sistemas agrícolas. Sin embargo, la incorporación de múltiples modificaciones también incrementa la dificultad de interpretar las interacciones entre genes y de evaluar las consecuencias fisiológicas derivadas de la edición. Naik et al. (2022) señalan que el futuro de la edición multiplex dependerá del fortalecimiento de herramientas bioinformáticas y modelos predictivos capaces de comprender las complejas redes de regulación genética presentes en las plantas.

En relación con el rendimiento agrícola, la literatura analizada confirma que CRISPR ofrece oportunidades importantes para intervenir componentes específicos asociados con la productividad, como la arquitectura vegetal, el número de frutos, el tamaño de semillas, la eficiencia fotosintética y el aprovechamiento de recursos. Sin embargo, la revisión también demuestra que el rendimiento continúa siendo uno de los caracteres más difíciles de mejorar debido a la fuerte influencia ejercida por el ambiente sobre su expresión. Numerosos resultados obtenidos bajo condiciones controladas no siempre pueden reproducirse durante evaluaciones desarrolladas en diferentes regiones

agroecológicas, donde intervienen factores relacionados con clima, manejo agronómico y características edáficas. Razzaq et al. (2019) destacan que la validación de las variedades editadas bajo condiciones reales de producción constituye un requisito indispensable para confirmar la estabilidad de las modificaciones y garantizar su utilidad dentro de programas comerciales de mejoramiento.

La mejora de la calidad nutricional representa otro de los aportes más significativos identificados durante la revisión. La posibilidad de modificar rutas metabólicas específicas permite incrementar la concentración de vitaminas, minerales, proteínas y otros compuestos beneficiosos para la salud humana, al tiempo que favorece la reducción de sustancias antinutricionales o potencialmente alergénicas. Estas aplicaciones adquieren una especial relevancia en regiones afectadas por deficiencias nutricionales, donde los cultivos biofortificados pueden complementar otras estrategias orientadas a mejorar la calidad de la alimentación. Sin embargo, la modificación de rutas metabólicas exige una comprensión integral de las interacciones bioquímicas presentes en las plantas, ya que la alteración de un componente puede afectar simultáneamente otros procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento, la reproducción o la calidad del producto final. Gao (2021) destaca que los programas de biofortificación mediante edición genética deben combinar análisis moleculares, fisiológicos y nutricionales para garantizar que las modificaciones produzcan beneficios reales sin generar efectos no deseados.

Finalmente, la revisión evidencia que las aplicaciones relacionadas con las características poscosecha poseen un importante potencial para contribuir simultáneamente a la sostenibilidad agrícola y a la seguridad alimentaria. La regulación de procesos asociados con la maduración, firmeza de frutos y conservación permite reducir significativamente las pérdidas ocurridas durante el almacenamiento, transporte y comercialización, incrementando la disponibilidad efectiva de alimentos sin necesidad de expandir las áreas de cultivo. No obstante, estos avances deben equilibrarse cuidadosamente con la preservación de atributos sensoriales como sabor, aroma y textura, los cuales influyen directamente sobre la aceptación de los productos por parte de los consumidores. Chen et al. (2019) señalan que el éxito de estas aplicaciones dependerá de la capacidad para desarrollar variedades que combinen una mayor vida útil con elevados estándares de calidad comercial y nutricional, favoreciendo así sistemas agroalimentarios más eficientes y sostenibles.

A pesar de los avances alcanzados durante los últimos años, la revisión evidencia que la aplicación de CRISPR en el mejoramiento vegetal continúa enfrentando importantes limitaciones científicas y tecnológicas que condicionan su implementación a gran escala. Uno de los principales desafíos corresponde a los procesos de transformación y regeneración vegetal, considerados actualmente uno de los cuellos de botella para numerosas especies agrícolas. La eficiencia de la edición genética depende no solo de la precisión de las herramientas moleculares, sino también de la capacidad para introducir los componentes de edición en las células vegetales y regenerar posteriormente plantas completas que mantengan las modificaciones obtenidas. Sin embargo, estos procedimientos presentan una elevada variabilidad entre especies e incluso entre diferentes genotipos pertenecientes a un mismo cultivo, lo que dificulta la transferencia de los avances desarrollados en laboratorio hacia programas de mejoramiento aplicados. Schindele et al. (2018) destacan que el perfeccionamiento de los sistemas de transformación representa una prioridad para ampliar el uso de la edición genética en especies que actualmente presentan baja eficiencia de regeneración.

La dependencia del genotipo constituye otro aspecto que limita la aplicación universal de las tecnologías CRISPR. Protocolos altamente eficientes desarrollados para determinadas variedades pueden producir resultados considerablemente inferiores cuando se aplican a otros materiales genéticos, especialmente en especies que conservan una elevada diversidad genética o que poseen escasa información sobre sus mecanismos de regeneración celular. Esta situación adquiere especial importancia en cultivos locales o regionales, cuya adaptación a condiciones ambientales específicas representa un recurso estratégico para la agricultura sostenible. Gao (2021) señala que el desarrollo de metodologías de transformación menos dependientes del genotipo permitirá ampliar significativamente la diversidad de especies susceptibles de ser mejoradas mediante edición genética.

La revisión también confirma que la elevada precisión atribuida a CRISPR no elimina completamente la posibilidad de generar modificaciones no deseadas dentro del genoma. Aunque los efectos fuera del objetivo (off-target effects) han

disminuido considerablemente gracias al desarrollo de proteínas Cas más específicas y al diseño optimizado de ARN guía, la literatura coincide en que su evaluación continúa siendo indispensable antes de incorporar nuevas variedades a programas de producción agrícola. Adicionalmente, incluso las modificaciones realizadas exactamente en el sitio previsto pueden producir respuestas fisiológicas inesperadas debido a la compleja interacción funcional existente entre numerosos genes. Veillet et al. (2020) destacan que la seguridad de la edición genética debe evaluarse mediante un enfoque integral que combine análisis moleculares, estudios fisiológicos y ensayos agronómicos desarrollados bajo diferentes condiciones ambientales.

Otro aspecto identificado durante la revisión corresponde a la necesidad de fortalecer las investigaciones orientadas a comprender las redes regulatorias que controlan los caracteres agronómicos complejos. La mayoría de las características de mayor interés productivo, como el rendimiento, la tolerancia al estrés y la eficiencia fisiológica, no dependen de un único gen, sino de la interacción coordinada entre múltiples rutas metabólicas y mecanismos de regulación genética. En consecuencia, la modificación aislada de un solo gen puede producir mejoras limitadas cuando se pretende intervenir procesos biológicos altamente complejos. Naik et al. (2022) señalan que la integración entre edición múltiple, genómica funcional y modelos computacionales permitirá comprender con mayor profundidad estas interacciones y diseñar estrategias de mejoramiento más eficientes.

Los desafíos identificados no se limitan exclusivamente al ámbito científico, sino que también abarcan dimensiones regulatorias, económicas y sociales. La revisión demuestra que los diferentes países mantienen enfoques regulatorios heterogéneos respecto a los cultivos obtenidos mediante edición genética, generando escenarios de incertidumbre para investigadores, productores y empresas biotecnológicas. Mientras algunas legislaciones centran su evaluación en las características del producto final, otras continúan regulando principalmente el procedimiento tecnológico utilizado para obtener las modificaciones genéticas. Esta diversidad normativa puede dificultar la comercialización internacional de variedades editadas y limitar la transferencia de innovaciones entre diferentes regiones agrícolas. Tachikawa y Matsuo (2023) destaca que la construcción de marcos regulatorios fundamentados en evidencia científica constituye un requisito indispensable para favorecer el desarrollo responsable de las tecnologías genómicas.

Paralelamente, la aceptación social continúa representando uno de los factores que ejercerán mayor influencia sobre el futuro de CRISPR en la agricultura. La experiencia acumulada con los organismos genéticamente modificados demuestra que el éxito de una innovación biotecnológica depende tanto de su solidez científica como de la confianza que logre generar entre productores, consumidores e instituciones públicas. La literatura revisada pone de manifiesto que la comunicación científica debe trascender la simple divulgación de resultados experimentales y orientarse hacia procesos participativos capaces de explicar de manera transparente tanto los beneficios potenciales como las limitaciones y riesgos asociados con la edición genética. FAO (2022) sostiene que la gobernanza de las nuevas tecnologías agrícolas debe fundamentarse en principios de transparencia, participación social y evaluación científica rigurosa, favoreciendo decisiones informadas que fortalezcan la confianza pública.

Finalmente, otro desafío ampliamente discutido corresponde al acceso equitativo a las tecnologías de edición genética. La concentración de patentes y derechos de propiedad intelectual sobre diferentes componentes de los sistemas CRISPR puede limitar la capacidad de instituciones públicas y programas nacionales de investigación para desarrollar soluciones adaptadas a las necesidades de los pequeños productores y de los cultivos de importancia regional. Esta situación resulta especialmente relevante en países en desarrollo, donde la innovación agrícola constituye un componente estratégico para fortalecer la seguridad alimentaria y la resiliencia frente al cambio climático. Tang et al. (2023) destaca que la cooperación internacional, el fortalecimiento de la investigación pública y el desarrollo de modelos de licenciamiento más accesibles serán factores determinantes para garantizar que los beneficios de la edición genética alcancen un mayor número de regiones y sistemas productivos alrededor del mundo.

La revisión realizada demuestra que uno de los mayores aportes potenciales de CRISPR trasciende el incremento de la productividad agrícola y se relaciona directamente con la construcción de sistemas de producción más sostenibles. La agricultura contemporánea enfrenta el desafío de producir mayores cantidades de alimentos utilizando menos recursos naturales, reduciendo simultáneamente los impactos ambientales asociados con la expansión agrícola, el uso

intensivo de agroquímicos y la degradación de los ecosistemas. En este contexto, la edición genética ofrece oportunidades para desarrollar cultivos con mayor eficiencia en la utilización del agua y los nutrientes, mejor capacidad de adaptación frente al cambio climático y menor dependencia de productos fitosanitarios. Estos resultados coinciden con el planteamiento de FAO (2022), que reconoce a las nuevas tecnologías genómicas como herramientas con potencial para fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios, siempre que su implementación forme parte de estrategias integrales de desarrollo rural.

Sin embargo, la evidencia revisada también permite concluir que la sostenibilidad agrícola no puede atribuirse exclusivamente a la incorporación de innovaciones genéticas. La obtención de variedades resistentes o altamente productivas constituye únicamente uno de los componentes que intervienen en el funcionamiento de los agroecosistemas. Factores como la conservación de la fertilidad del suelo, la gestión eficiente del agua, la diversificación de los sistemas de cultivo, la protección de la biodiversidad y las prácticas agronómicas sostenibles continúan desempeñando un papel determinante para garantizar la estabilidad de la producción agrícola a largo plazo. En consecuencia, la edición genética debe entenderse como una herramienta complementaria que fortalece otras estrategias de manejo y no como una solución independiente para resolver los problemas ambientales que enfrenta la agricultura mundial. Razzaq et al. (2019) destacan que la integración entre biotecnología, manejo agronómico y conservación ambiental constituye el enfoque más prometedor para avanzar hacia sistemas agrícolas verdaderamente sostenibles.

La adaptación al cambio climático representa otro de los aspectos donde la revisión identifica importantes oportunidades para la aplicación de CRISPR. El incremento de eventos climáticos extremos, la alteración de los patrones de precipitación y el aumento progresivo de las temperaturas están modificando las condiciones bajo las cuales se desarrollan numerosos cultivos de importancia económica. Frente a este escenario, la edición genética ofrece la posibilidad de intervenir genes asociados con mecanismos de respuesta fisiológica que permiten mejorar la tolerancia a sequía, salinidad, altas temperaturas y otros factores de estrés ambiental. No obstante, la literatura coincide en señalar que estas respuestas poseen una naturaleza altamente compleja y dependen de múltiples interacciones entre genes y ambiente, razón por la cual las futuras investigaciones deberán orientarse hacia enfoques integrales capaces de intervenir redes regulatorias completas más que genes aislados. Abdelrahman et al. (2021) sostienen que la resiliencia climática de los cultivos dependerá de la combinación entre avances genómicos, conocimiento fisiológico y validación agronómica bajo condiciones reales de producción.

La seguridad alimentaria constituye igualmente una dimensión central dentro de las perspectivas futuras de la edición genética. La revisión confirma que CRISPR puede contribuir significativamente mediante el incremento del rendimiento, la reducción de pérdidas ocasionadas por enfermedades, el mejoramiento de la calidad nutricional y la disminución del desperdicio de alimentos durante la etapa poscosecha. Sin embargo, los resultados también ponen de manifiesto que la disponibilidad de alimentos representa únicamente uno de los componentes que conforman el concepto de seguridad alimentaria. El acceso económico a los alimentos, la estabilidad de los sistemas de distribución y las condiciones sociales que determinan la capacidad de las poblaciones para beneficiarse de los avances tecnológicos continúan siendo factores decisivos. En este sentido, los beneficios potenciales de la edición genética solo podrán materializarse plenamente cuando se integren con políticas públicas orientadas a fortalecer la producción agrícola, reducir las desigualdades y garantizar el acceso equitativo a alimentos suficientes y nutritivos. FAO (2022) enfatiza que la innovación tecnológica constituye un componente esencial, pero no exclusivo, dentro de las estrategias destinadas a garantizar la seguridad alimentaria mundial.

La revisión también evidencia que el desarrollo futuro de CRISPR estará estrechamente vinculado con la convergencia entre diferentes disciplinas científicas. La integración de la edición genética con la genómica funcional, la transcriptómica, la proteómica, la bioinformática y la inteligencia artificial permitirá comprender con mayor profundidad la organización de los sistemas biológicos y diseñar estrategias de mejoramiento progresivamente más precisas. La disponibilidad de grandes volúmenes de información genómica facilitará la identificación de nuevos genes candidatos, mientras que los algoritmos de aprendizaje automático contribuirán a analizar relaciones complejas entre

genotipo y fenotipo que actualmente resultan difíciles de interpretar mediante métodos convencionales. Chen et al. (2019) destacan que esta integración tecnológica transformará la manera en que se desarrollan los programas de mejoramiento vegetal durante las próximas décadas, incrementando considerablemente la capacidad para generar soluciones adaptadas a diferentes condiciones ambientales.

Otro aspecto que emerge como prioridad corresponde a la necesidad de fortalecer la investigación aplicada bajo condiciones reales de producción. Aunque numerosos estudios han demostrado la eficacia de CRISPR en ambientes controlados, la validación de las variedades editadas en diferentes regiones agroecológicas continúa siendo indispensable para confirmar la estabilidad de las modificaciones y su comportamiento frente a la variabilidad ambiental. Asimismo, será necesario ampliar las investigaciones relacionadas con los efectos ecológicos de largo plazo, las interacciones entre las variedades editadas y los organismos presentes en los agroecosistemas, así como la persistencia de los caracteres introducidos a través de sucesivas generaciones. Molla y Yang (2019) destacan que únicamente mediante evaluaciones multidisciplinarias será posible garantizar la utilización segura y eficiente de la edición genética dentro de los sistemas agrícolas.

En conjunto, la evidencia analizada demuestra que CRISPR posee el potencial para convertirse en uno de los pilares científicos del mejoramiento vegetal durante las próximas décadas. No obstante, su verdadero impacto dependerá de la capacidad para integrar la innovación molecular con la investigación agronómica, la sostenibilidad ambiental, la regulación basada en evidencia y la participación de la sociedad en los procesos de adopción tecnológica. En este sentido, el futuro de la edición genética no estará determinado únicamente por el desarrollo de herramientas cada vez más precisas, sino por la construcción de modelos de innovación responsables que permitan distribuir sus beneficios de manera equitativa y responder eficazmente a los desafíos globales relacionados con la producción sostenible de alimentos. Tang et al. (2023) considera que este enfoque integral será determinante para consolidar el papel de CRISPR como una tecnología estratégica para la agricultura del siglo XXI.

La revisión realizada también pone de manifiesto que el futuro de la edición genética dependerá en gran medida de la capacidad para democratizar el acceso a estas tecnologías y reducir las brechas científicas existentes entre países con diferentes niveles de desarrollo. Aunque numerosas investigaciones han sido lideradas por instituciones pertenecientes a economías con una sólida infraestructura científica, la aplicación de CRISPR en cultivos de importancia regional requiere fortalecer las capacidades de investigación en países donde la agricultura constituye un componente estratégico para el desarrollo económico y la seguridad alimentaria. En este contexto, resulta indispensable promover programas de cooperación internacional, transferencia tecnológica y formación de recursos humanos altamente especializados que permitan adaptar las herramientas de edición genética a las necesidades específicas de cada región. Tang et al. (2023) destaca que el acceso equitativo a las tecnologías genómicas constituye uno de los principales retos para garantizar que sus beneficios alcancen tanto a los grandes sistemas productivos como a la agricultura familiar y a los pequeños productores.

De igual manera, la revisión evidencia que la utilización de CRISPR debe sustentarse en principios de innovación responsable que integren dimensiones científicas, éticas, económicas y ambientales. La rapidez con la que evolucionan las herramientas de edición genética exige que los procesos regulatorios mantengan un equilibrio entre la promoción de la innovación y la protección de la salud humana y del ambiente. En este sentido, la generación de evidencia científica sólida, transparente y reproducible constituye el fundamento para la formulación de políticas públicas que permitan evaluar objetivamente los riesgos y beneficios de los cultivos editados. La consolidación de marcos regulatorios armonizados facilitaría la cooperación internacional, reduciría la incertidumbre para los programas de investigación y favorecería la transferencia de nuevas variedades hacia los sectores productivos. Tang et al. (2023) señala que la evolución de las políticas regulatorias deberá acompañar el acelerado desarrollo científico de las nuevas técnicas genómicas, considerando las particularidades de cada tecnología y las características del producto obtenido. Otro aspecto relevante identificado durante la revisión corresponde a la creciente necesidad de fortalecer la comunicación científica entre investigadores, responsables de políticas públicas, productores y consumidores. La aceptación de las innovaciones biotecnológicas no depende exclusivamente de sus resultados experimentales, sino

también de la confianza que la sociedad deposita en las instituciones encargadas de desarrollar, evaluar y regular estas tecnologías. Por ello, resulta fundamental promover procesos de divulgación basados en evidencia científica, lenguaje accesible y mecanismos participativos que permitan explicar tanto las oportunidades como las limitaciones de la edición genética. La transparencia durante todas las etapas del desarrollo tecnológico contribuye a disminuir la desinformación, favorece la construcción de confianza y facilita la toma de decisiones fundamentadas respecto al uso de cultivos editados. FAO (2022) enfatiza que la gobernanza de las nuevas tecnologías agrícolas debe incorporar procesos participativos que fortalezcan la legitimidad de las decisiones y promuevan una adopción socialmente responsable.

Asimismo, la revisión pone de relieve que las futuras investigaciones deberán ampliar su alcance hacia el estudio de caracteres agronómicos cada vez más complejos, incorporando enfoques multidisciplinarios que integren la biología molecular con la fisiología vegetal, la agronomía, la ecología, la bioinformática y las ciencias sociales. Esta integración permitirá comprender de manera más profunda las interacciones entre los genes editados y el ambiente, evaluar los efectos a largo plazo de las modificaciones genéticas y diseñar estrategias capaces de responder a escenarios agrícolas cada vez más dinámicos. La disponibilidad creciente de herramientas computacionales, bases de datos genómicas e inteligencia artificial ofrece un escenario favorable para acelerar estos procesos y desarrollar modelos predictivos que incrementen la eficiencia de la edición genética. Chen et al. (2019) destacan que la convergencia entre tecnologías digitales y edición del genoma constituye una de las principales tendencias que marcarán el futuro del mejoramiento vegetal.

En términos generales, la evidencia científica analizada confirma que CRISPR representa una de las innovaciones biotecnológicas con mayor potencial para transformar el mejoramiento de cultivos durante las próximas décadas. Su capacidad para introducir modificaciones específicas en el genoma, reducir los tiempos de obtención de nuevas variedades y ampliar las posibilidades de intervención sobre caracteres agronómicos complejos la convierte en una herramienta estratégica frente a los desafíos derivados del crecimiento poblacional, el cambio climático y la necesidad de producir alimentos de manera más eficiente y sostenible. No obstante, la revisión también demuestra que el éxito de esta tecnología dependerá de superar limitaciones relacionadas con la eficiencia de transformación vegetal, la comprensión de caracteres poligénicos, la armonización regulatoria, la aceptación social y el acceso equitativo al conocimiento científico. En consecuencia, el verdadero impacto de CRISPR no estará determinado únicamente por el perfeccionamiento de sus herramientas moleculares, sino por la capacidad de integrarlas dentro de modelos de innovación que combinen excelencia científica, sostenibilidad ambiental, responsabilidad ética y compromiso con la seguridad alimentaria global. Estas consideraciones permiten concluir que la edición genética constituye una plataforma tecnológica con un enorme potencial para contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más resilientes, productivos y sostenibles, siempre que su implementación continúe sustentándose en la investigación científica rigurosa y en una gobernanza responsable de la innovación.

5. CONCLUSIÓN

La presente revisión narrativa permitió analizar de manera integral el estado actual del conocimiento sobre las aplicaciones de las tecnologías CRISPR en el mejoramiento de cultivos, considerando sus fundamentos científicos, principales avances tecnológicos, ámbitos de aplicación, limitaciones y perspectivas futuras. La evidencia recopilada demuestra que la edición genética constituye uno de los desarrollos más relevantes de la biotecnología agrícola contemporánea, al ofrecer herramientas capaces de introducir modificaciones específicas en el genoma vegetal con elevados niveles de precisión, eficiencia y versatilidad. A diferencia de las metodologías convencionales de mejoramiento, que dependen de múltiples ciclos de cruzamiento y selección para incorporar características agronómicas de interés, las tecnologías CRISPR permiten intervenir directamente secuencias genéticas específicas, reduciendo considerablemente los tiempos requeridos para desarrollar nuevas variedades y ampliando las posibilidades de responder con mayor rapidez a los desafíos que enfrenta la agricultura mundial. La evolución observada durante la última década evidencia una transición desde aplicaciones enfocadas principalmente en la inactivación de genes individuales hacia plataformas de edición mucho más sofisticadas, entre las que destacan la

edición múltiple, la edición de bases, el prime editing y las nuevas proteínas Cas, consolidando a CRISPR como una plataforma tecnológica en permanente desarrollo.

En relación con el objetivo planteado en esta revisión, se concluye que las aplicaciones de CRISPR abarcan actualmente un amplio conjunto de características agronómicas de importancia estratégica para la producción agrícola. Los estudios analizados demuestran que esta tecnología ha sido utilizada exitosamente para desarrollar cultivos con mayor resistencia frente a enfermedades causadas por hongos, bacterias y virus; incrementar la tolerancia a diferentes factores de estrés abiótico, como sequía, salinidad y temperaturas extremas; optimizar componentes relacionados con el rendimiento y la arquitectura vegetal; mejorar la calidad nutricional mediante la modificación de rutas metabólicas específicas; y prolongar la vida útil de los productos agrícolas a través de cambios dirigidos en los procesos de maduración y conservación. La diversidad de aplicaciones identificadas confirma que la edición genética ha dejado de constituir una herramienta limitada a la investigación básica para convertirse en un recurso de alto valor dentro de los programas modernos de mejoramiento vegetal, con capacidad para contribuir simultáneamente a la productividad, la sostenibilidad y la seguridad alimentaria.

La revisión también permite concluir que uno de los principales aportes científicos de CRISPR radica en su capacidad para ampliar las posibilidades de intervención sobre caracteres agronómicos complejos mediante herramientas cada vez más precisas. La incorporación de tecnologías como la edición de bases y el prime editing representa un avance significativo respecto a los sistemas iniciales de edición, al posibilitar modificaciones puntuales, inserciones o sustituciones específicas sin depender exclusivamente de rupturas de doble cadena del ADN. Asimismo, el desarrollo continuo de nuevas proteínas Cas con diferentes propiedades de reconocimiento molecular amplía las opciones disponibles para adaptar las estrategias de edición a las características particulares de cada especie vegetal y a los objetivos específicos de los programas de investigación. Estos avances reflejan la rápida evolución de la ingeniería genética vegetal y permiten anticipar que las futuras generaciones de herramientas CRISPR ofrecerán niveles aún mayores de precisión, eficiencia y seguridad para el mejoramiento de cultivos.

Otro de los hallazgos relevantes de la presente revisión consiste en reconocer que el potencial de CRISPR no debe interpretarse como un reemplazo de los programas convencionales de mejoramiento genético, sino como una herramienta complementaria que fortalece significativamente los procesos de innovación agrícola. El mejoramiento clásico continúa siendo indispensable para evaluar el comportamiento agronómico de los materiales, seleccionar genotipos adaptados a diferentes ambientes e integrar múltiples caracteres de interés dentro de nuevas variedades. En este contexto, la edición genética aporta un nivel adicional de precisión que permite acelerar determinadas etapas del proceso de mejoramiento, reducir el tiempo necesario para incorporar características específicas y optimizar la utilización de los recursos destinados a la investigación. La integración entre ambas estrategias constituye, por tanto, uno de los enfoques más prometedores para responder a las crecientes demandas de productividad, resiliencia y sostenibilidad que enfrenta la agricultura contemporánea.

La revisión también evidencia que las contribuciones potenciales de CRISPR trascienden el incremento del rendimiento agrícola y adquieren una importancia estratégica para la sostenibilidad de los sistemas de producción. El desarrollo de cultivos con mayor resistencia a enfermedades puede contribuir a disminuir el uso de determinados productos fitosanitarios, mientras que la obtención de variedades tolerantes a sequía, salinidad y altas temperaturas representa una alternativa para fortalecer la capacidad de adaptación de la agricultura frente a los efectos del cambio climático. Asimismo, la posibilidad de desarrollar plantas con mayor eficiencia en el aprovechamiento del agua y de los nutrientes ofrece oportunidades para reducir la presión sobre los recursos naturales y favorecer sistemas agrícolas más eficientes desde el punto de vista ambiental. No obstante, la revisión permite concluir que estos beneficios únicamente podrán alcanzarse cuando la innovación genética se integre con prácticas de manejo agronómico sostenible, conservación de la biodiversidad y estrategias de producción responsables que consideren las particularidades de cada territorio.

En relación con la seguridad alimentaria, la evidencia analizada confirma que la edición genética posee un importante potencial para contribuir tanto a la disponibilidad como a la calidad de los alimentos. La reducción de pérdidas ocasionadas por enfermedades, el incremento de la estabilidad productiva frente a condiciones ambientales adversas,

la mejora del contenido nutricional de los cultivos y la disminución de pérdidas durante la etapa poscosecha representan aportes relevantes para fortalecer los sistemas agroalimentarios. Sin embargo, la revisión demuestra igualmente que la seguridad alimentaria constituye un fenómeno multidimensional que no depende exclusivamente del desarrollo tecnológico. Factores relacionados con el acceso económico, la distribución de los alimentos, las políticas públicas, la infraestructura productiva y las condiciones sociales continúan siendo determinantes para garantizar una alimentación suficiente, inocua y nutritiva. En consecuencia, CRISPR debe entenderse como un componente de apoyo dentro de estrategias integrales orientadas al fortalecimiento de los sistemas alimentarios y no como una solución aislada frente a los problemas globales de alimentación.

Un aspecto particularmente importante identificado durante la revisión corresponde a las limitaciones científicas y técnicas que aún condicionan la implementación generalizada de estas tecnologías. Persisten desafíos relacionados con la eficiencia de los procesos de transformación y regeneración vegetal, la dependencia de determinados genotipos, la edición de caracteres controlados por múltiples genes y la necesidad de validar los resultados obtenidos bajo diferentes condiciones agroecológicas. Del mismo modo, aunque las herramientas actuales han incrementado notablemente la precisión de la edición genética, continúa siendo indispensable desarrollar evaluaciones rigurosas que permitan identificar posibles modificaciones no deseadas y analizar sus efectos fisiológicos, agronómicos y ambientales a mediano y largo plazo. Estas limitaciones ponen de manifiesto que el desarrollo de CRISPR continúa siendo un campo dinámico de investigación, donde el perfeccionamiento metodológico constituye una prioridad para ampliar su aplicación en un mayor número de especies cultivadas y garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

La revisión permitió identificar que los desafíos asociados con la implementación de CRISPR no se limitan al ámbito científico, sino que también involucran dimensiones regulatorias, éticas, económicas y sociales que influirán decisivamente en su desarrollo futuro. La diversidad de marcos regulatorios existentes entre diferentes países continúa generando incertidumbre respecto a la investigación, evaluación y comercialización de cultivos obtenidos mediante edición genética. Mientras algunas legislaciones centran sus procesos de evaluación en las características del producto final, otras mantienen regulaciones basadas principalmente en el procedimiento tecnológico empleado para obtener las modificaciones genéticas. Esta heterogeneidad normativa puede dificultar la cooperación científica internacional, limitar el intercambio de materiales vegetales y retrasar la adopción de innovaciones con potencial para fortalecer la producción agrícola. En consecuencia, resulta indispensable avanzar hacia marcos regulatorios fundamentados en evidencia científica, suficientemente flexibles para adaptarse al rápido desarrollo tecnológico y capaces de garantizar simultáneamente la protección de la salud humana, la conservación del ambiente y el impulso responsable de la innovación biotecnológica.

La aceptación social constituye otro componente determinante para el futuro de la edición genética aplicada a la agricultura. La experiencia acumulada durante las últimas décadas demuestra que el éxito de una innovación científica depende no solamente de su eficacia técnica, sino también del grado de confianza que logre generar entre productores, consumidores, investigadores, autoridades y demás actores vinculados con los sistemas agroalimentarios. En este sentido, la revisión evidencia la necesidad de fortalecer los procesos de comunicación científica mediante estrategias transparentes, accesibles y fundamentadas en evidencia, que permitan explicar de manera objetiva los beneficios, alcances, limitaciones y riesgos asociados con las tecnologías CRISPR. De igual forma, la incorporación de mecanismos de participación pública durante los procesos de evaluación y toma de decisiones puede favorecer una gobernanza más inclusiva, fortalecer la legitimidad de las políticas relacionadas con la edición genética y promover una adopción tecnológica socialmente responsable.

Otro aspecto relevante identificado corresponde a la importancia del acceso equitativo a las tecnologías de edición genética. La concentración de patentes, licencias y capacidades tecnológicas puede limitar la participación de instituciones públicas, universidades y centros de investigación pertenecientes a países en desarrollo, reduciendo las posibilidades de generar soluciones adaptadas a las necesidades específicas de sus sistemas agrícolas. Esta situación adquiere especial relevancia para los pequeños productores y para los cultivos tradicionales o de importancia regional, que frecuentemente reciben menor atención dentro de los programas internacionales de investigación. En

consecuencia, resulta prioritario fortalecer la cooperación científica internacional, promover mecanismos de transferencia tecnológica, consolidar programas de investigación pública y desarrollar modelos de acceso más inclusivos que permitan ampliar los beneficios potenciales de CRISPR y reducir las desigualdades existentes en el desarrollo de la innovación agrícola.

La presente revisión también permitió identificar diversos vacíos de conocimiento que representan oportunidades para futuras investigaciones. Una parte importante de los estudios disponibles continúa desarrollándose bajo condiciones controladas de laboratorio o invernadero, por lo que resulta necesario incrementar las evaluaciones de campo realizadas en diferentes ambientes agroecológicos y durante múltiples ciclos productivos. Asimismo, será indispensable profundizar en el estudio de la estabilidad de las modificaciones genéticas a largo plazo, las interacciones entre los genes editados y el ambiente, los efectos fisiológicos derivados de la edición múltiple y el comportamiento agronómico de las variedades desarrolladas mediante nuevas modalidades de edición genética. Paralelamente, la integración de CRISPR con disciplinas como la genómica funcional, la transcriptómica, la bioinformática y la inteligencia artificial ofrece un escenario altamente prometedor para acelerar la identificación de genes de interés, comprender con mayor profundidad las redes regulatorias y optimizar el diseño de futuras estrategias de mejoramiento vegetal.

En términos prospectivos, la revisión permite concluir que las principales líneas de desarrollo de la edición genética estarán orientadas hacia el perfeccionamiento de tecnologías capaces de incrementar simultáneamente la precisión, eficiencia y versatilidad de las modificaciones genómicas. La consolidación de la edición múltiple, la optimización de la edición de bases, el desarrollo de sistemas de prime editing con mayores niveles de eficiencia, la incorporación de nuevas proteínas Cas y la implementación de métodos innovadores de transformación y regeneración vegetal representan algunas de las tendencias que probablemente marcarán la evolución de esta disciplina durante los próximos años. Estas innovaciones, combinadas con el creciente conocimiento derivado de la genómica, la transcriptómica y otras ciencias ómicas, permitirán intervenir progresivamente caracteres agronómicos de mayor complejidad y responder con mayor rapidez a los desafíos emergentes de la producción agrícola. Asimismo, la incorporación de herramientas basadas en inteligencia artificial y análisis computacional facilitará la identificación de genes candidatos, la predicción de efectos fenotípicos y el diseño de estrategias de edición más eficientes, consolidando un modelo de mejoramiento vegetal sustentado en la integración de múltiples disciplinas científicas.

De igual manera, la evidencia recopilada pone de manifiesto la necesidad de ampliar el alcance de las investigaciones hacia especies vegetales de importancia regional, cultivos subutilizados y variedades locales que desempeñan un papel fundamental en la seguridad alimentaria y en la conservación de la agrobiodiversidad. Aunque gran parte de los avances científicos se concentra actualmente en cultivos de elevado interés económico, numerosas especies tradicionales constituyen recursos estratégicos para las comunidades rurales y presentan un importante potencial para fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas frente al cambio climático. En este contexto, resulta necesario promover investigaciones orientadas a adaptar las herramientas de edición genética a una mayor diversidad de especies, considerando sus características biológicas, su importancia socioeconómica y las necesidades particulares de los agricultores. La participación activa de productores, técnicos, investigadores e instituciones públicas durante los procesos de innovación permitirá desarrollar soluciones con mayor pertinencia territorial y favorecerá la adopción responsable de las tecnologías de edición genética en diferentes contextos agrícolas.

Finalmente, la presente revisión permite concluir que CRISPR representa una de las plataformas biotecnológicas con mayor capacidad para transformar el mejoramiento de cultivos durante las próximas décadas. Sus aplicaciones ofrecen oportunidades concretas para fortalecer la resistencia frente a enfermedades, incrementar la tolerancia al estrés ambiental, mejorar el rendimiento y la calidad nutricional de los cultivos, reducir las pérdidas poscosecha y contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes y sostenibles. Sin embargo, el aprovechamiento pleno de este potencial dependerá de la capacidad para superar las limitaciones científicas aún existentes, fortalecer la investigación multidisciplinaria, armonizar los marcos regulatorios, promover procesos transparentes de comunicación y participación social, y garantizar un acceso más equitativo a las tecnologías de edición genética. Bajo estas condiciones, CRISPR podrá consolidarse no solo como una herramienta de innovación molecular, sino también como un

componente estratégico para impulsar una agricultura resiliente, sostenible y capaz de responder a las crecientes demandas alimentarias, ambientales y sociales del siglo XXI. En consecuencia, el futuro de la edición genética estará determinado tanto por los avances científicos que continúen ampliando sus posibilidades de aplicación como por la manera en que estos conocimientos sean incorporados responsablemente dentro de los sistemas productivos y de las políticas orientadas al desarrollo sostenible de la agricultura mundial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelrahman, M., Al-Sadi, A. M., Pour-Aboughadareh, A., Burritt, D. J., & Tran, L. S. P. (2021). Genome editing using CRISPR/Cas9-targeted mutagenesis: An opportunity for yield improvements of crop plants grown under environmental stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 159, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.12.012>
- Ahmad, S., Wei, X., Sheng, Z., Hu, P., & Tang, S. (2020). CRISPR/Cas9 for development of disease resistance in plants: Recent progress, limitations and future perspectives. *Briefings in Functional Genomics*, 19(1), 26–39. <https://doi.org/10.1093/bfpg/elz041>
- Chen, K., Wang, Y., Zhang, R., Zhang, H., & Gao, C. (2019). CRISPR/Cas genome editing and precision plant breeding in agriculture. *Annual Review of Plant Biology*, 70, 667–697. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100049>
- ChileBio. (2021, 5 de agosto). CRISPR siembra “semillas de cambio” en biotecnología agrícola: Mayor precisión y menor regulación. <https://www.chilebio.cl/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). Gene editing and agrifood systems. <https://www.fao.org/>
- Gaillochet, C., Develtere, W., & Jacobs, T. B. (2021). CRISPR screens in plants: Approaches, guidelines, and future prospects. *The Plant Cell*, 33(4), 794–813. <https://doi.org/10.1093/plcell/koaa021>
- Gao, C. (2021). Genome engineering for crop improvement and future agriculture. *Cell*, 184(6), 1621–1635. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.01.005>
- Jaganathan, D., Ramasamy, K., Sellamuthu, G., Jayabalan, S., & Venkataraman, G. (2018). CRISPR for crop improvement: An update review. *Frontiers in Plant Science*, 9, 985. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00985>
- Li, J., Manghwar, H., Sun, L., Wang, P., Wang, G., Sheng, H., Zhang, J., Liu, H., Qin, L., Rui, H., Li, B., Lindsey, K., & Zhang, X. (2019). Whole genome sequencing reveals rare off-target mutations and considerable inherent genetic or/and somaclonal variations in CRISPR/Cas9-edited cotton plants. *Plant Biotechnology Journal*, 17(5), 858–868. <https://doi.org/10.1111/pbi.13020>
- Li, Z., Zhong, Z., Wu, Z., Pausch, P., Al-Shayeb, B., Amerasekera, J., Doudna, J. A., & Jacobsen, S. E. (2023). Genome editing in plants using the compact editor CasΦ. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(4), e2216822120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2216822120>
- Molla, K. A., & Yang, Y. (2019). CRISPR/Cas-mediated base editing: Technical considerations and practical applications. *Trends in Biotechnology*, 37(10), 1121–1142. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.03.008>
- Naik, B., Kumar, V., & Khare, S. (2022). CRISPR/Cas9 genome editing for sustainable agriculture and crop improvement. *Biotechnology Reports*, 33, e00709. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2022.e00709>
- Razzaq, A., Saleem, F., Kanwal, M., Mustafa, G., Yousaf, S., Arshad, H. M. I., Hameed, M. K., Khan, M. S., & Joyia, F. A. (2019). Modern trends in plant genome editing: An inclusive review of the CRISPR/Cas9 toolbox. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(16), 4045. <https://doi.org/10.3390/ijms20164045>

- Schindele, P., Wolter, F., & Puchta, H. (2018). Transforming plant biology and breeding with CRISPR/Cas9, Cas12 and Cas13. *FEBS Letters*, 592(12), 1954–1967. <https://doi.org/10.1002/1873-3468.13073>
- Strobbe, S., Wesana, J., Van Der Straeten, D., & De Steur, H. (2023). Public acceptance and stakeholder views of gene edited foods: A global overview. *Trends in Biotechnology*, 41(6), 736–740. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.12.011>
- Tachikawa, M., & Matsuo, M. (2023). Divergence and convergence in international regulatory policies regarding genome-edited food: How to find a middle ground. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1105426. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1105426>
- Tang, Q., Wang, X., Jin, X., Peng, J., Zhang, H., & Wang, Y. (2023). CRISPR/Cas technology revolutionizes crop breeding. *Plants*, 12(17), 3119. <https://doi.org/10.3390/plants12173119>
- Veillet, F., Durand, M., Kroj, T., Cesbron, S., & Gallois, J. L. (2020). Precision breeding made real with CRISPR: Illustration through genetic resistance to pathogens. *Plant Communications*, 1(5), 100102. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2020.100102>
- Wada, N., Ueta, R., Osakabe, Y., & Osakabe, K. (2020). Precision genome editing in plants: State-of-the-art in CRISPR/Cas9-based genome engineering. *BMC Plant Biology*, 20, 234. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02385-5>
- Zhu, H., Li, C., & Gao, C. (2020). Applications of CRISPR–Cas in agriculture and plant biotechnology. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 21, 661–677. <https://doi.org/10.1038/s41580-020-00288-9>

CONSIDERACIONES ÉTICAS

El presente estudio se llevó a cabo de conformidad con los principios éticos que rigen la investigación con participantes humanos. Antes de la recolección de los datos, el protocolo de investigación fue revisado y aprobado por el comité de ética institucional correspondiente. Todos los participantes fueron informados de manera clara sobre los objetivos del estudio, los procedimientos, las posibles implicaciones y el carácter voluntario de su participación, otorgando posteriormente su consentimiento informado. Durante todo el proceso de investigación se garantizó la confidencialidad de la información, el anonimato de los participantes y el uso exclusivo de los datos recopilados con fines científicos y académicos.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

Los autores declaran que la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT fue utilizada exclusivamente para la traducción al idioma inglés y la revisión lingüística del manuscrito. Esta herramienta no contribuyó a la concepción del estudio, el diseño de la investigación, la recolección de datos, el análisis estadístico, la interpretación de los resultados ni a la elaboración de las conclusiones. Los autores asumen la plena responsabilidad por la originalidad, exactitud, integridad y validez científica del contenido presentado en este manuscrito.

FINANCIAMIENTO

La presente investigación no recibió subvenciones, becas ni apoyo financiero específico por parte de organismos públicos, entidades comerciales u organizaciones sin fines de lucro.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses de carácter financiero, personal, profesional o institucional que hayan podido influir en el desarrollo, los resultados o la publicación de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Nombres de autores e iniciales:

Alfonso Llanderal Quiroz (ALQ)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (ALQ)

Llanderal Quiroz

Curación de datos: (ALQ)

Análisis formal: (ALQ)

Adquisición de fondos: (ALQ)

Investigación: (ALQ)

Metodología: (ALQ)

Administración del proyecto: (ALQ)

Recursos: No aplica

Software: (ALQ)

Supervisión: (ALQ)

Validación: (ALQ)

Visualización: (ALQ)

Redacción – Borrador original: (ALQ)

Redacción – Revisión y edición: (ALQ)