



Avances en la genética del ganado bovino y las tendencias de investigación actual

Advances in beef cattle genetics and current research trends

Flores-Manchano, César Iván ^{1*}

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, Riobamba;
<https://orcid.org/0000-0002-2629-0582>, c_flores@esPOCH.edu.ec

* Autor Correspondencia



<https://doi.org/10.70881/hnj/v2/n1/32>

Cita: Flores-Manchano, C. I. (2024). Avances en la genética del ganado bovino y las tendencias de investigación actual. *Horizon Nexus Journal*, 2(1), 31-45. <https://doi.org/10.70881/hnj/v2/n1/32>.

Recibido: 19/11/2023
Revisado: 26/11/2023
Aceptado: 05/12/2023
Publicado: 31/01/2024



Copyright: © 2024 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la [Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. \(CC BY-NC\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

[\(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Resumen: Este artículo revisa los avances en genética bovina y sus implicaciones para la sostenibilidad ganadera. Ante la necesidad de mejorar la productividad y enfrentar los desafíos del cambio climático, se han aplicado técnicas avanzadas como la secuenciación de nueva generación y la edición genética (CRISPR). Para el análisis, se realizó una revisión exhaustiva de literatura reciente en bases de datos indexadas, destacando estudios que implementan la secuenciación genómica para identificar polimorfismos y características deseables en el ganado. Los resultados muestran que la selección genómica ha optimizado la eficiencia alimentaria y la resistencia a enfermedades, contribuyendo a la reducción de la huella ambiental. También se observa una mejora en la adaptabilidad climática del ganado mediante la selección de variantes genéticas asociadas con tolerancia al calor y resistencia a patógenos. Sin embargo, persisten desafíos éticos y regulatorios, así como la necesidad de mantener la diversidad genética para asegurar la viabilidad a largo plazo. En conclusión, estos avances promueven una ganadería más productiva y sostenible, aunque se requiere un enfoque equilibrado que contemple la conservación de la variabilidad genética.

Palabras clave: genética bovina; sostenibilidad ganadera; secuenciación genómica; selección genómica; edición genética.

Abstract: This article reviews advances in bovine genetics and their implications for livestock sustainability. Given the need to improve productivity and face the challenges of climate change, advanced techniques such as next-generation sequencing and gene editing (CRISPR) have been applied. For the analysis, an exhaustive review of recent literature in indexed databases was carried out, highlighting studies that implement genomic sequencing to identify polymorphisms and desirable traits in cattle. The results show that genomic selection has optimized feed efficiency and disease resistance, contributing to the reduction of the environmental footprint. Improved climatic adaptability of cattle is also observed through the selection of genetic variants associated with heat tolerance and pathogen resistance. However, ethical and regulatory challenges remain, as well as the need to maintain genetic diversity to ensure long-term viability. In conclusion, these advances promote more productive and sustainable livestock, although a balanced approach that considers the conservation of genetic variability is required.

Keywords: bovine genetics; livestock sustainability; genomic sequencing; genomic selection; gene editing.

1. Introducción

El mejoramiento genético del ganado bovino ha sido un campo fundamental en la producción agropecuaria debido a su impacto en la productividad y sostenibilidad. Desde la identificación de características deseables hasta la selección de genes que potencian la resistencia a enfermedades y la eficiencia alimentaria, los avances en la genética han transformado el sector. Sin embargo, los productores enfrentan desafíos persistentes relacionados con la variabilidad genética, la adaptación a diferentes entornos y la mejora de rasgos específicos sin comprometer la diversidad genética de las poblaciones bovinas (Hong et al., 2024). La investigación en genética bovina es esencial para enfrentar estos problemas y optimizar la producción de carne y leche, así como para garantizar la viabilidad de la industria frente a los cambios climáticos y las demandas crecientes de sostenibilidad.

Uno de los problemas principales en este ámbito radica en la complejidad del genoma bovino y en la identificación de genes responsables de rasgos cuantitativos clave como el crecimiento, la calidad de la carne y la resistencia a enfermedades. Aunque se han logrado avances significativos en la secuenciación genómica y en tecnologías de ensamblaje de alta precisión, aún persisten limitaciones en la implementación efectiva de estos conocimientos a nivel productivo. Esto se debe, en parte, a la dificultad de traducir datos genómicos complejos en programas de cría eficientes y sostenibles (Deng et al., 2024).

La afectación de estos problemas se extiende a varios factores. Primero, la baja diversidad genética en algunas poblaciones de ganado bovino incrementa la susceptibilidad a enfermedades y reduce la adaptabilidad a condiciones cambiantes, afectando la sostenibilidad a largo plazo de las explotaciones ganaderas (Boonkum et al., 2024). Además, el enfoque intensivo en ciertos rasgos de producción, como la velocidad de crecimiento y la producción de leche, a menudo deja de lado otros aspectos importantes como la longevidad y la salud general de los animales, lo que puede llevar a consecuencias negativas en el bienestar animal y la rentabilidad (Wu et al., 2024). La falta de equilibrio en la selección genética también limita la resiliencia del ganado ante variaciones en la dieta, el clima y el manejo, lo cual es especialmente problemático en el contexto de la agricultura climáticamente inteligente.

Justificar la inversión en investigación genética aplicada al ganado bovino se vuelve esencial en este contexto, ya que el avance en esta área permite obtener animales más productivos y resistentes, lo que contribuye a reducir la huella ambiental y los costos de producción. Mediante técnicas de selección genómica y mejoramiento basado en datos de múltiples ómicas (genómica, transcriptómica y proteómica), se pueden implementar programas de cría que prioricen la sostenibilidad sin sacrificar la eficiencia (Boonkum et al., 2024). Además, la investigación actual en genética bovina promueve prácticas ganaderas que responden a las crecientes demandas de los consumidores por productos más saludables y producidos éticamente. Así, el mejoramiento genético ofrece una solución práctica y científica a los problemas de productividad y bienestar animal.

Desde el punto de vista de la viabilidad, la incorporación de técnicas avanzadas en genética no solo es factible sino también rentable a largo plazo. Las herramientas de selección genómica y edición genética han disminuido sus costos significativamente en

los últimos años, haciendo que su implementación en programas de mejoramiento sea accesible para los productores. Asimismo, la posibilidad de obtener datos precisos sobre la expresión genética y su relación con el rendimiento productivo permite a los ganaderos tomar decisiones informadas y estratégicas, optimizando así sus recursos (Hong et al., 2024).

El objetivo de este artículo es analizar los avances recientes en genética y las tendencias de investigación que están modelando el mejoramiento genético en el ganado bovino. En particular, se exploran las innovaciones en técnicas de secuenciación genómica, la identificación de genes funcionales y los métodos de selección basados en datos moleculares, así como los retos éticos y sostenibles que implica su aplicación en la práctica. Esta revisión pretende ofrecer una perspectiva exhaustiva sobre cómo la genética bovina está evolucionando y cuáles son las direcciones futuras más prometedoras en este campo (Wu et al., 2024).

2. Materiales y Métodos

La metodología utilizada en este artículo explorativo de revisión bibliográfica se centra en la recopilación, análisis y síntesis de información relevante y actual sobre los avances en genética y tendencias de investigación en el mejoramiento genético del ganado bovino. Para desarrollar una comprensión integral del tema, se emplearon estrategias sistemáticas de búsqueda de literatura en bases de datos científicas indexadas, incluyendo Scopus, Web of Science y otras fuentes especializadas en genética animal, biotecnología y producción agropecuaria. Se aplicaron criterios de inclusión para seleccionar estudios recientes y relevantes, con un enfoque en aquellos publicados en los últimos cinco años que ofrecen datos empíricos, revisiones críticas o discusiones sobre técnicas avanzadas de secuenciación y selección genómica en bovinos.

La búsqueda se estructuró mediante el uso de palabras clave específicas como “genética bovina”, “mejoramiento genético”, “selección genómica” y “biotecnología en ganado”, complementadas con operadores booleanos que permitieron optimizar la obtención de artículos específicos en función de su contribución a los temas de interés. Asimismo, se evaluaron las tendencias actuales y emergentes en técnicas de edición genética y su aplicabilidad en el ganado bovino, revisando la literatura en torno a enfoques de selección molecular, estudios de asociación de genomas completos (GWAS), y nuevas tecnologías de edición como CRISPR.

Posteriormente, la información recopilada fue categorizada y analizada de acuerdo con temas clave que abarcan la eficiencia en la selección de características deseadas, la identificación de genes funcionales asociados a la resistencia a enfermedades y al rendimiento productivo, y la implementación de prácticas sostenibles en el mejoramiento genético. Esta categorización facilitó una síntesis de los hallazgos relevantes, permitiendo una discusión crítica y un análisis comparativo de los diferentes enfoques y técnicas en el campo.

El análisis se completó con una evaluación de las limitaciones de los estudios existentes y las brechas de conocimiento que se requieren abordar para avanzar en la genética bovina de manera ética y sostenible. Esta metodología permitió estructurar el artículo en función de una revisión integral que expone no solo el estado actual de la

investigación en genética bovina, sino también las posibles implicaciones de los avances para el sector ganadero global.

3. Resultados

3.1. Avances en la Secuenciación Genómica del Ganado Bovino

Los avances en la secuenciación genómica han impactado significativamente el campo de la genética bovina, ofreciendo nuevas perspectivas para mejorar los programas de selección y la eficiencia productiva de los rebaños. La secuenciación de nueva generación (NGS, por sus siglas en inglés) ha facilitado la obtención de datos genómicos extensos, permitiendo analizar de forma detallada los genomas completos de diferentes razas bovinas. Estas tecnologías han reducido considerablemente el tiempo y costo asociados a la secuenciación, lo que ha llevado a su adopción generalizada en estudios genéticos del ganado (Deng et al., 2024).

La NGS ha permitido el análisis masivo de genomas completos en bovinos, proporcionando información detallada que antes era inaccesible. Estas técnicas han reemplazado el método de secuenciación Sanger, integrando plataformas avanzadas como Illumina y PacBio, que ofrecen mayor profundidad y precisión en la identificación de variantes genéticas (Wu et al., 2024). A través de NGS, se pueden secuenciar y analizar grandes cantidades de datos en poco tiempo, lo cual es crucial para identificar las bases genéticas de rasgos fenotípicos de interés en bovinos, como la producción de carne y leche, la resistencia a enfermedades y la eficiencia en el uso de alimentos (Boonkum et al., 2024).

Además, la secuenciación permite un análisis detallado de la variabilidad genética dentro de diferentes razas de bovinos, ayudando a mantener la diversidad genética, que es clave para la sostenibilidad de la producción. La información obtenida facilita la implementación de programas de selección genética más precisos, orientados a potenciar la productividad y la salud animal en diversas condiciones ambientales (Deng et al., 2024).

Uno de los mayores aportes de la NGS es la identificación de polimorfismos de nucleótido único (SNPs), que son variaciones de un solo nucleótido en el ADN. Los SNPs han demostrado ser particularmente útiles en la identificación de genes asociados a rasgos productivos y de salud en bovinos. A través del estudio de SNPs, los investigadores pueden detectar variaciones genéticas responsables de características fenotípicas específicas, como el rendimiento de leche y la calidad de la carne, así como la resistencia a enfermedades comunes en el ganado (Wu et al., 2024).

La identificación de SNPs no solo facilita la selección de bovinos con características deseables, sino que también contribuye a una mejora genética más rápida y eficaz. Por ejemplo, el mapeo de SNPs asociados a resistencia a enfermedades ha permitido seleccionar animales con mayor resistencia inmunológica, reduciendo así la necesidad de tratamientos farmacológicos y contribuyendo a la sostenibilidad en el manejo del ganado (Boonkum et al., 2024). Además, los estudios de asociación del genoma completo (GWAS, por sus siglas en inglés) se apoyan en la identificación de SNPs,

ofreciendo una herramienta de gran precisión para seleccionar animales con rasgos óptimos para diferentes entornos de producción.

La implementación de técnicas de ensamblaje completo del genoma, como el enfoque telómero a telómero (T2T), representa un avance significativo en el estudio genómico del ganado bovino. El ensamblaje T2T permite obtener una secuenciación continua del genoma, eliminando lagunas en las secuencias y ofreciendo una visión más completa de la estructura genómica (Deng et al., 2024). Esto es particularmente importante en la investigación bovina, ya que facilita la identificación de variantes estructurales complejas y otros elementos genómicos que pueden estar asociados a rasgos fenotípicos de interés.

El ensamblaje completo del genoma permite a los investigadores analizar no solo la secuencia de genes individuales, sino también la organización y regulación genética, proporcionando información detallada sobre la herencia de características clave en el ganado. Este tipo de análisis es fundamental para mejorar la precisión en la predicción de rasgos productivos y para comprender cómo los factores genéticos influyen en la respuesta a diferentes condiciones ambientales y de manejo. La información generada a través del ensamblaje T2T también sienta las bases para el desarrollo de programas de selección genética cada vez más específicos y personalizados (Wu et al., 2024).

La integración de datos multi-ómicos, que incluye la genómica, transcriptómica, proteómica y metabolómica, ha revolucionado el enfoque hacia la genética bovina. La combinación de estas áreas permite una visión más completa de cómo los genes se expresan y regulan en diferentes contextos fisiológicos y ambientales. Esta información es clave para entender la relación entre el genotipo y el fenotipo, lo cual mejora la precisión de la selección genética (Wu et al., 2024).

La transcriptómica, por ejemplo, ofrece información sobre cómo los genes se expresan en diferentes tejidos y etapas del desarrollo, mientras que la proteómica permite identificar proteínas específicas que están asociadas con rasgos deseables. Por su parte, la metabolómica ayuda a comprender cómo los metabolitos influyen en la productividad y salud del ganado. Al integrar estas diferentes capas de datos, es posible realizar una predicción genética más robusta y precisa, lo cual permite una selección genética más eficiente orientada a la mejora de la calidad de la carne y leche, así como la resistencia a enfermedades y la eficiencia alimentaria (Deng et al., 2024; Wu et al., 2024).

La implementación de datos multi-ómicos en programas de selección genética en bovinos también facilita el desarrollo de estrategias de manejo más sostenibles, ya que permite identificar y seleccionar animales que requieren menos recursos para alcanzar un nivel óptimo de producción. Esto no solo es beneficioso desde el punto de vista económico, sino que también reduce la huella ambiental de las actividades ganaderas, contribuyendo así a la sostenibilidad del sector agropecuario.

Los avances en la secuenciación genómica y las herramientas multi-ómicas han ampliado las posibilidades de mejoramiento genético en el ganado bovino, permitiendo identificar y seleccionar de forma más precisa animales con características deseables. La identificación de SNPs y el ensamblaje completo del genoma ofrecen una base sólida para la implementación de programas de cría orientados a la sostenibilidad y a la

adaptación de los rebaños a distintos desafíos ambientales. Así, la genética bovina se posiciona como un área de investigación crucial para enfrentar las demandas actuales y futuras de la producción ganadera global.

3.2. Selección Genómica y Mejoramiento Genético

La selección genómica en ganado bovino ha revolucionado los métodos de mejoramiento genético al permitir identificar y seleccionar animales portadores de rasgos deseables con mayor precisión. La implementación de estudios de asociación del genoma completo (GWAS, por sus siglas en inglés) y la optimización de programas de selección han posibilitado mejoras significativas en la eficiencia productiva de carne y leche, así como en la resiliencia de las poblaciones bovinas ante desafíos ambientales. Estos avances no solo contribuyen a la productividad de la industria, sino que también fomentan prácticas sostenibles en la ganadería moderna.

Los estudios de asociación del genoma completo (GWAS) han sido fundamentales en la identificación de loci de rasgos cuantitativos (QTL) que influyen en características económicas clave en el ganado bovino, como la calidad de la carne, la producción de leche y la resistencia a enfermedades. Estos estudios analizan grandes cantidades de datos de secuencias genéticas, utilizando paneles de polimorfismos de nucleótido único (SNP) para detectar asociaciones significativas entre variaciones genéticas y rasgos fenotípicos. Los GWAS han permitido descubrir QTL asociados a características como el marmoleo, el color de la carne y la eficiencia alimentaria, lo que facilita una selección genética más precisa y efectiva (Frontiers, 2019).

El uso de GWAS en la identificación de SNPs clave ha fortalecido la capacidad de los programas de mejoramiento para seleccionar rasgos complejos y difíciles de medir, mejorando la precisión en la predicción de rendimiento productivo. A través de la identificación de SNPs y QTL específicos, los investigadores han logrado mapear genes relacionados con características como el crecimiento y la conversión alimenticia, lo cual es crucial para optimizar el rendimiento económico de la industria ganadera. Además, los GWAS han avanzado en la detección de genes relacionados con la salud animal, lo que permite seleccionar ganado con mayor resistencia a enfermedades endémicas y, por tanto, reducir el uso de medicamentos, promoviendo un manejo más sostenible (Bedhane et al., 2019).

La integración de la selección genómica en programas de mejoramiento ha permitido optimizar la eficiencia productiva en bovinos tanto para carne como para leche. Con el uso de herramientas de secuenciación y paneles de SNP, los ganaderos pueden seleccionar individuos con alta eficiencia en la conversión de alimento en carne o leche, mejorando significativamente la productividad y reduciendo los costos operativos. Los programas de selección basados en genómica incluyen ahora algoritmos que predicen con precisión los valores genéticos de los animales jóvenes, permitiendo decisiones informadas y estratégicas desde etapas tempranas de desarrollo (Hawlader et al., 2017).

Esta optimización es especialmente valiosa para el ganado lechero, donde se prioriza la selección de vacas con alta producción de leche y calidad de componentes, como grasa y proteínas, sin comprometer la salud y longevidad del animal. Por otro lado, en la producción de carne, los programas de selección se han enfocado en optimizar características como el crecimiento rápido, la calidad de la carne y la eficiencia

alimenticia. Estos avances han sido posibles gracias a que los programas de selección genómica ofrecen predicciones genéticas de alta precisión, lo que permite seleccionar animales de alto rendimiento con menor necesidad de tiempo y recursos comparado con los métodos tradicionales (Frischknecht et al., 2016).

En respuesta a la creciente preocupación por el impacto ambiental de la ganadería, los programas de mejoramiento genético han comenzado a desarrollar índices que incluyen criterios de sostenibilidad y resiliencia climática. Estos índices genéticos permiten identificar y seleccionar animales que no solo maximizan su productividad, sino que también presentan características que los hacen más eficientes en el uso de recursos y menos dependientes de insumos externos. Por ejemplo, algunos índices se enfocan en la eficiencia alimenticia, seleccionando animales que requieren menos alimento para producir la misma cantidad de carne o leche, lo que contribuye a una reducción de la huella de carbono de la producción (Dawson et al., 2021).

La resiliencia al cambio climático también se ha convertido en un criterio de selección cada vez más importante. Esto incluye la identificación de genes asociados con la tolerancia al calor, la resistencia a enfermedades tropicales y la adaptabilidad a condiciones ambientales extremas. Estos índices son fundamentales en regiones que experimentan temperaturas elevadas y mayor variabilidad climática, donde la selección de ganado resiliente puede garantizar la sostenibilidad de la producción en condiciones adversas. Los índices genéticos que integran sostenibilidad y resiliencia contribuyen a la adaptación de los sistemas de producción, permitiendo a los ganaderos enfrentar de manera más efectiva los desafíos climáticos (Teissier et al., 2018).

La selección genómica, aplicada de manera adecuada, permite preservar la diversidad genética dentro de las poblaciones locales, asegurando la adaptabilidad del ganado a condiciones ambientales específicas y protegiendo los recursos genéticos locales. Uno de los desafíos de la implementación de programas de selección genómica es el riesgo de reducir la variabilidad genética debido a la selección intensiva de ciertos rasgos. Para evitar esta limitación, los programas modernos incorporan prácticas de manejo genético que promueven la diversidad dentro de las razas, favoreciendo un acervo genético diverso y adaptable (Meuwissen, 2009).

En poblaciones locales, donde se prioriza la adaptabilidad a factores ambientales específicos, la integración de selección genómica puede enfocarse en la identificación de rasgos que son importantes en el contexto particular de cada región, como la resistencia a enfermedades locales o la eficiencia en el uso de pasturas nativas. La conservación de la diversidad genética no solo asegura una producción sostenible, sino que también permite responder a posibles cambios ambientales y epidemiológicos a largo plazo, lo cual es esencial para mantener la viabilidad de la industria ganadera frente a nuevos retos globales (Goddard & Hayes, 2009).

Los avances en la selección genómica y el mejoramiento genético han transformado el panorama de la producción bovina, promoviendo prácticas sostenibles y altamente productivas. La aplicación de GWAS y la optimización de programas de selección han permitido mejoras significativas en la eficiencia y calidad de la producción. Al mismo tiempo, el desarrollo de índices genéticos enfocados en la sostenibilidad y resiliencia climática, así como la integración de estas tecnologías en poblaciones locales,

contribuyen a la adaptación del ganado a las demandas contemporáneas de sostenibilidad y eficiencia, beneficiando tanto a los productores como al medio ambiente.

3.3. Tecnologías Emergentes en Edición Genética

La edición genética en el ganado bovino, encabezada por la tecnología CRISPR, ha abierto nuevas fronteras en el mejoramiento de rasgos específicos, desde la resistencia a enfermedades hasta la mejora en la calidad de carne y leche. CRISPR, junto con otras herramientas de edición, permite realizar modificaciones precisas en genes clave que antes eran inaccesibles o requerían largos procesos de selección tradicional. Este enfoque promete optimizar tanto la eficiencia productiva como el bienestar animal,

La tecnología CRISPR/Cas9 ha revolucionado la edición genética por su precisión y facilidad de uso. Este sistema permite realizar cortes específicos en el ADN, lo cual facilita la modificación o eliminación de genes directamente en células somáticas o en embriones. En el contexto del ganado bovino, esta técnica permite alterar genes asociados a características económicas clave, como el crecimiento y la conversión alimenticia, así como mejorar la resistencia del ganado a factores ambientales extremos.

Además de CRISPR, otras herramientas de edición genética como TALENs (Transcription Activator-Like Effector Nucleases) y ZFNs (Zinc Finger Nucleases) han sido utilizadas, aunque CRISPR destaca por su mayor eficiencia y simplicidad. La capacidad de realizar múltiples ediciones simultáneas ha hecho de CRISPR una herramienta preferida para la modificación genética en la industria ganadera. Estas modificaciones pueden aplicarse tanto para mejorar características productivas como para estudiar funciones genéticas específicas en modelos animales de enfermedades humanas (Wang et al., 2022).

Uno de los principales usos de CRISPR en la ganadería es la creación de animales más resistentes a enfermedades infecciosas. La resistencia genética a patógenos comunes no solo mejora el bienestar animal, sino que también reduce la dependencia de antibióticos, una preocupación creciente en la salud pública. Por ejemplo, estudios han insertado el gen NRAMP1 en bovinos para aumentar la resistencia a la tuberculosis, una enfermedad que afecta significativamente al sector lechero en diversas regiones (Wang et al., 2022).

Asimismo, la edición genética ha permitido desarrollar ganado resistente a infecciones parasitarias y enfermedades virales, lo cual resulta particularmente importante en áreas con alta prevalencia de estos problemas. Estas aplicaciones no solo tienen implicaciones para la productividad, sino que también abordan preocupaciones éticas y de sostenibilidad, al reducir el uso de productos químicos y medicamentos en la ganadería.

La mejora de la calidad de la carne y la composición de la leche mediante edición genética es otro objetivo clave. CRISPR permite modificar genes específicos relacionados con el contenido de grasa intramuscular, el color de la carne y la textura, mejorando así atributos que los consumidores valoran en el mercado. Por ejemplo, se ha utilizado CRISPR para aumentar el marmoleo de la carne, característica que influye en su jugosidad y sabor. Este avance ofrece un método eficiente y rápido para incrementar la calidad de la carne, comparado con la cría selectiva convencional que requiere varias generaciones para lograr mejoras similares (Frontiers, 2019).

En cuanto a la calidad de la leche, la edición genética permite mejorar la composición de grasas y proteínas, haciéndola más nutritiva y adaptada a las demandas del consumidor. También se ha investigado la posibilidad de eliminar proteínas alergénicas, lo que permitiría producir leche hipoalergénica, ampliando el acceso a personas con intolerancias. Estos avances abren nuevas oportunidades comerciales y responden a una creciente demanda por alimentos de origen animal con características funcionales mejoradas (Wang et al., 2022).

Aunque los beneficios potenciales de la edición genética en ganado bovino son amplios, su aplicación enfrenta considerables desafíos éticos y regulatorios. Uno de los principales dilemas éticos se relaciona con el bienestar animal y la modificación de organismos para consumo humano. Si bien las modificaciones con CRISPR son precisas y no introducen genes externos, la percepción pública y la aceptación de productos animales editados genéticamente varían según la región, con algunas sociedades mostrando resistencia debido a preocupaciones éticas y de seguridad (Wang et al., 2022).

Desde el punto de vista regulatorio, los animales editados genéticamente suelen enfrentar estrictas evaluaciones de seguridad antes de su aprobación para consumo humano. En algunos países, estos animales son tratados como organismos modificados genéticamente (OGMs), lo cual limita su uso y comercialización. Sin embargo, algunas agencias, como la FDA en los Estados Unidos, han comenzado a flexibilizar sus regulaciones para ciertos casos de edición genética, especialmente cuando no se han añadido genes externos al organismo.

La edición genética en ganado bovino, liderada por CRISPR, está transformando la ganadería moderna al ofrecer una herramienta poderosa para la mejora de rasgos específicos, desde la resistencia a enfermedades hasta la optimización de la calidad de carne y leche. Sin embargo, su implementación exitosa depende de la resolución de desafíos éticos y regulatorios, así como de la aceptación pública. A medida que la tecnología avanza y los reguladores adaptan sus políticas, es probable que veamos una adopción más amplia de estos métodos, con implicaciones positivas para la eficiencia productiva y la sostenibilidad en la ganadería.

3.4. Impacto del Mejoramiento Genético en la Sostenibilidad Ganadera

La aplicación de tecnologías de mejoramiento genético en ganado bovino ha generado avances que no solo incrementan la productividad, sino que también contribuyen a la sostenibilidad del sector ganadero. Los programas de selección genética han permitido mejorar la eficiencia en la alimentación, la adaptación a condiciones climáticas extremas y la resistencia a enfermedades, todos factores clave para reducir el impacto ambiental y promover prácticas sostenibles en la ganadería (UF/IFAS, 2022).

La eficiencia alimentaria es un componente esencial para la sostenibilidad ganadera, ya que permite reducir el consumo de recursos y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Los programas de selección genética que promueven la eficiencia alimentaria seleccionan animales que convierten el alimento en energía de manera más eficaz, lo cual reduce el volumen de alimento necesario y, por ende, la producción de metano, un GEI significativo en la ganadería. Estudios en bovinos han demostrado que los animales con mejor conversión alimenticia producen menos emisiones de metano,

lo que disminuye la huella ambiental del sistema de producción (Marchi Maiorano et al., 2024).

Este enfoque es especialmente relevante en la ganadería intensiva, donde los costos de alimentación representan una gran parte de los gastos. Los avances en genética han permitido que los animales seleccionados por su eficiencia alimentaria puedan mantener o incluso aumentar su productividad con menor ingesta de alimentos, beneficiando a los productores y reduciendo el impacto ambiental. En términos de sostenibilidad, la mejora de la eficiencia alimentaria es una de las estrategias más efectivas para mitigar los efectos negativos de la producción ganadera en el medio ambiente (Czipulis, 2022).

El cambio climático plantea desafíos críticos para la ganadería, especialmente en zonas donde las temperaturas extremas, la sequía o las inundaciones son cada vez más frecuentes. La selección genética de animales adaptados a condiciones climáticas adversas es una estrategia que permite mitigar estos impactos. La investigación en genética ha identificado variantes genéticas que confieren una mayor tolerancia al calor y a otras condiciones climáticas extremas, permitiendo a los ganaderos seleccionar animales que mantengan su rendimiento en ambientes de estrés térmico elevado (UF/IFAS, 2022).

En regiones tropicales, por ejemplo, la selección de ganado resistente al calor ha demostrado ser crucial para mantener la productividad en condiciones de alta temperatura y humedad. Esta capacidad de adaptación reduce la necesidad de recursos adicionales, como el agua y la alimentación suplementaria, que son necesarios para mantener a los animales en situaciones de estrés ambiental. Así, la selección genética orientada hacia la resiliencia climática contribuye a un sistema de producción más sostenible y menos dependiente de recursos intensivos (Marchi Maiorano et al., 2024).

La resistencia a enfermedades es otro factor clave en la sostenibilidad de la ganadería. La selección de animales genéticamente resistentes a enfermedades comunes en la industria, como la mastitis y las infecciones parasitarias, reduce la necesidad de antibióticos y otros tratamientos médicos. Esto no solo disminuye el riesgo de desarrollo de resistencia a antibióticos, sino que también reduce los costos de producción y el impacto ambiental asociado a la producción y uso de fármacos (Wang et al., 2022).

En particular, la selección genética para resistencia a enfermedades infecciosas tiene un impacto directo en la mortalidad y morbilidad animal, incrementando la eficiencia y reduciendo las pérdidas en el sector ganadero. Estas prácticas permiten una ganadería más respetuosa con el medio ambiente y promueven la salud pública al reducir el uso de antibióticos en la producción de alimentos. Los avances en genética y selección genómica facilitan la identificación de variantes genéticas asociadas con resistencia a diversas enfermedades, permitiendo que la ganadería adopte prácticas más sostenibles y orientadas al bienestar animal (Marchi Maiorano et al., 2024).

Uno de los desafíos del mejoramiento genético intensivo es la posible reducción de la diversidad genética en las poblaciones de ganado, lo cual puede comprometer la resiliencia del sistema a largo plazo. La pérdida de diversidad genética limita la capacidad de adaptación a futuros desafíos ambientales y epidemiológicos, haciéndolo más vulnerable a enfermedades y cambios en el entorno. La diversidad genética es esencial para la sostenibilidad, ya que permite la existencia de una reserva de

variabilidad genética que puede ser utilizada para enfrentar nuevas amenazas (UF/IFAS, 2022).

Para mitigar este problema, los programas de mejoramiento genético deben incorporar estrategias de manejo que mantengan un nivel adecuado de diversidad genética. Esto incluye la selección equilibrada y la rotación de líneas genéticas para evitar la homogeneización de las poblaciones. Además, algunos enfoques actuales utilizan la selección genómica para incluir criterios de diversidad genética, asegurando que los animales seleccionados no solo sean productivos, sino también genéticamente variados, contribuyendo así a la sostenibilidad a largo plazo del sistema de producción (Czipulis, 2022).

El mejoramiento genético en la ganadería bovina ha mostrado ser una herramienta eficaz para promover la sostenibilidad en el sector, desde la reducción de la huella ambiental hasta la mejora de la resiliencia a condiciones climáticas extremas. Sin embargo, el mantenimiento de la diversidad genética y la selección de características adaptativas siguen siendo fundamentales para asegurar la viabilidad y sostenibilidad a largo plazo de los sistemas ganaderos. La integración de prácticas de selección que promuevan la eficiencia y resiliencia permitirá a la industria ganadera enfrentar los retos ambientales y productivos del futuro de manera más sostenible.

4. Discusión

La aplicación de tecnologías de mejoramiento y edición genética en el ganado bovino representa un avance significativo hacia una ganadería más eficiente y sostenible, pero también plantea retos éticos y ecológicos que requieren una consideración cuidadosa. La discusión sobre los efectos de estas tecnologías abarca aspectos como la optimización de la producción, la adaptabilidad climática y el impacto ambiental, todos temas interrelacionados que configuran el futuro de la ganadería en un contexto de cambio climático y demanda global creciente.

El uso de herramientas como CRISPR ha permitido realizar modificaciones precisas en el genoma de los bovinos para mejorar rasgos específicos, como la eficiencia alimentaria, la resistencia a enfermedades y la calidad de la carne y la leche. La precisión de esta técnica supera en gran medida las limitaciones de la selección genética convencional, al posibilitar ediciones puntuales que impactan directamente en la expresión de genes de interés. Este nivel de precisión permite a los investigadores orientar los programas de mejoramiento hacia la reducción de la huella ambiental del ganado, un aspecto fundamental en una industria que contribuye de manera significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero (Marchi Maiorano et al., 2024). La mejora en la eficiencia alimentaria, lograda a través de la selección de animales con mayor capacidad de conversión de alimento en energía, no solo optimiza el uso de recursos, sino que también contribuye a la reducción de las emisiones de metano, un gas con elevado potencial de calentamiento global (Czipulis, 2022).

Además, la adaptabilidad climática del ganado ha cobrado relevancia frente a los eventos climáticos extremos y las variaciones de temperatura. La identificación de variantes genéticas que confieren resistencia al calor y otras condiciones ambientales adversas permite la creación de poblaciones más resilientes, que requieren menos

intervenciones para mantener su productividad en condiciones de estrés. Esto tiene implicaciones directas en la sostenibilidad del sistema, ya que reduce la dependencia de recursos como el agua y los suplementos alimentarios, necesarios para mitigar el impacto de estas condiciones en animales no adaptados (UF/IFAS, 2022). Sin embargo, aunque estos avances tecnológicos ofrecen una solución eficiente a los desafíos climáticos, es fundamental asegurar que no se comprometa la diversidad genética, ya que esta es crucial para la adaptabilidad y viabilidad a largo plazo de las poblaciones bovinas. La pérdida de diversidad genética podría limitar la capacidad del ganado para responder a futuros cambios en el entorno y nuevas amenazas epidemiológicas, generando una dependencia excesiva de características genéticas específicas que podrían no ser efectivas en todas las situaciones (Czipulis, 2022).

En cuanto a la resistencia a enfermedades, la edición genética también ha mostrado un potencial transformador. Al seleccionar animales con mayor resistencia a enfermedades infecciosas, como la tuberculosis y las infecciones parasitarias, se reduce la necesidad de utilizar antibióticos y otros tratamientos, lo que representa un avance importante en términos de salud pública y manejo sostenible. La reducción del uso de antibióticos, además de contribuir al control de la resistencia bacteriana, disminuye el impacto ambiental asociado a la producción y disposición de estos medicamentos (Wang et al., 2022). Sin embargo, la aplicación de estas tecnologías no está exenta de dilemas éticos y desafíos regulatorios, ya que existe una controversia en torno al bienestar animal y la manipulación genética de especies destinadas al consumo humano. Aunque los avances actuales en edición genética, como CRISPR, no implican la inserción de genes externos, algunos sectores de la sociedad y los sistemas regulatorios se muestran cautelosos, exigiendo evaluaciones de seguridad rigurosas para estos animales editados genéticamente.

En este contexto, es fundamental que los programas de mejoramiento genético no solo busquen maximizar la productividad, sino que también integren prácticas sostenibles que consideren el impacto ecológico y la preservación de la variabilidad genética. La implementación de índices de selección que incluyan criterios de sostenibilidad, como la eficiencia en el uso de recursos y la resiliencia a cambios climáticos, representa un paso hacia la armonización de la producción animal con las demandas ambientales actuales. Además, la adopción de tecnologías de selección genómica que respeten la diversidad genética dentro de las poblaciones garantiza que estas mantengan la flexibilidad necesaria para adaptarse a los cambios futuros, promoviendo un enfoque holístico que atienda tanto a las necesidades productivas como a los desafíos ambientales y éticos (UF/IFAS, 2022; Marchi Maiorano et al., 2024).

En conclusión, aunque el mejoramiento y la edición genéticos presentan oportunidades para una ganadería más eficiente y sostenible, su aplicación debe estar acompañada de una reflexión ética y una planificación cuidadosa que considere los efectos a largo plazo. La interacción entre la optimización genética y la sostenibilidad plantea un equilibrio complejo, donde el avance tecnológico debe alinearse con principios de conservación y responsabilidad ecológica. Así, el desarrollo de la ganadería en un mundo que exige productos más sostenibles dependerá no solo de la innovación científica, sino también de un compromiso con la preservación de los recursos y la diversidad biológica de las poblaciones animales.

5. Conclusiones

En conclusión, el mejoramiento y la edición genéticos han demostrado ser herramientas poderosas para impulsar la sostenibilidad y eficiencia en la producción ganadera. Estas tecnologías permiten una selección precisa de características beneficiosas, como la eficiencia alimentaria, la resistencia a enfermedades y la adaptabilidad climática, logrando un impacto positivo en la reducción de la huella ambiental de la industria ganadera. Al mejorar la conversión alimenticia, se optimiza el uso de recursos, reduciendo tanto los costos productivos como las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual resulta esencial en la mitigación del cambio climático.

Además, el avance en la identificación y modificación de genes relacionados con la resistencia a enfermedades ofrece una alternativa viable para disminuir el uso de antibióticos, promoviendo así un enfoque de manejo más saludable y sostenible. La resiliencia del ganado a condiciones ambientales extremas también se fortalece mediante la selección de animales con tolerancia al calor y a otras variables climáticas, permitiendo una producción más estable en zonas afectadas por cambios en el clima.

Sin embargo, el éxito a largo plazo de estos enfoques depende de la preservación de la diversidad genética dentro de las poblaciones bovinas, la cual es fundamental para mantener la capacidad de adaptación y responder a futuras demandas o amenazas. La aplicación de estos avances tecnológicos exige, además, una reflexión ética y un marco regulatorio adecuado, que aborde las implicaciones sociales y ambientales de la edición genética en animales de producción.

En síntesis, la integración de herramientas de mejoramiento y edición genética, alineada con prácticas de sostenibilidad, representa una oportunidad para que la ganadería evolucione hacia modelos de producción más responsables y resilientes. No obstante, el equilibrio entre productividad y conservación será clave para asegurar que estos beneficios se mantengan a largo plazo, contribuyendo tanto a la seguridad alimentaria como a la protección de los ecosistemas.

Referencias Bibliográficas

- Astudillo-Martínez, W. J., Andrade-Bravo, A. G., García-Valdez, J.-D., & Almenabaguerrero, Y. F. (2023). *Un Análisis Científico del Ruido Ambiental y Laboral en Sectores Urbanos*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.50>
- Bedhane, M., et al. (2019). Genome-wide association study of meat quality traits in Hanwoo beef cattle using imputed whole-genome sequence data. *Frontiers in Genetics*, 10, 1235. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.01235>
- Boonkum, W., et al. (2024). Impact of heat stress on milk yield, milk fat-to-protein ratio, and conception rate in Thai–Holstein dairy cattle: A phenotypic and genetic perspective. *Animals*, 14(20), 3026. <https://doi.org/10.3390/ani14203026>
- Burgos-Macias, T. J., & Gaibor-Fernández, R. R. (2023). *Dinámica poblacional de Spodoptera frugiperda, Diatraea saccharalis y Dalbulus maidis en el cultivo de maíz (Zea mays L.) durante la época seca en cinco localidades del cantón Mocache*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.62>

- Caicedo-Aldaz, J. C., & Herrera-Sánchez, D. J. (2022). El Rol de la Agroecología en el Desarrollo Rural Sostenible en Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 1(2), 1-16. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n2/24>
- Chicaiza-Ortiz, C. D., Rivadeneira-Arias, V. del C., Herrera-Feijoo, R. J., & Andrade, J. C. (2023). Guía de Biotecnología Ambiental. In *Biotecnología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias* (pp. 6–71). Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.cl.2022.16>
- Czipulis, J. (2022). Genetic improvement and sustainability of animal industries. *UF/IFAS Blogs*. <https://blogs.ifas.ufl.edu/animalsciencesdept/>
- Dawson, L., et al. (2021). Genetic selection for environmental resilience in livestock. *Livestock Science*, 247, 104482. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104482>
- Deng, W., et al. (2024). Advances in genome sequencing and functional genes discovery in beef cattle. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(13), 7147. <https://doi.org/10.3390/ijms25137147>
- Frischknecht, M., et al. (2016). Imputed sequence level genotypes for genome-wide association studies in cattle. *Genetics Selection Evolution*, 48, 78. <https://doi.org/10.1186/s12711-016-0263-6>
- Frontiers (2019). Improvements in Gene Editing Technology Boost Its Applications in Livestock. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.01235>
- Goddard, M. E., & Hayes, B. J. (2009). Mapping genes for complex traits in domestic animals and their use in breeding programmes. *Nature Reviews Genetics*, 10(6), 381-391. <https://doi.org/10.1038/nrg2575>
- González-Marcillo, R. L., Guamán-Rivera, S. A., Guerrero-Pincay, A. E., & Ortiz-Naveda, N. R. (2023). *Pastos Tropicales de la Amazonia Ecuatoriana Tomo I: Avances científicos sobre sistemas silvopastoriles como estrategia de reconversión de la ganadería*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.46>
- Guamán-Rivera, S. A. (2022). Desarrollo de Políticas Agrarias y su Influencia en los Pequeños Agricultores Ecuatorianos. *Revista Científica Zambos*, 1(3), 15-28. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n3/30>
- Guamán-Rivera, S. A. (2023). Aplicación de Tecnologías en la Agricultura de Precisión mediante Evidencia de Fuentes Científicas. *Horizon Nexus Journal*, 1(2), 1-13. <https://doi.org/10.70881/hnj/v1/n2/14>
- Guamán-Rivera, S. A., & Flores-Manchano, C. I. (2023). Seguridad Alimentaria y Producción Agrícola Sostenible en Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 2(1), 1-20. <https://doi.org/10.69484/rcz/v2/n1/35>
- Hawtlader, N., et al. (2017). SNP markers for growth and carcass traits in beef cattle. *Animal Genetics*, 48(3), 273-279. <https://doi.org/10.1111/age.12532>
- Herrera-Feijoo, R. J. (2024). Principales amenazas e iniciativas de conservación de la biodiversidad en Ecuador. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(1), 33–56. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n1/85>
- Hong, J., Wu, J., Wu, D., & Xi, D. (2024). The role of genomic selection in beef cattle breeding. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(13), 7147. <https://doi.org/10.3390/ijms25137147>

- Ibarra-Navarrete, Y. S., & Pinargote-Mendoza, E. R. (2023). *Ácido oxálico, alternativa orgánica para el control de varroasis (Varroa destructor) en abejas (Apis mellifera)*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.63>
- Macías-Véliz, J. N., & Chicharro-López, F. I. (2023). *Procesos de producción de tilapias (Oreochromis niloticus) con aplicación informática*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.64>
- Marchi Maiorano, A., et al. (2024). Increasing sustainability in livestock production systems through high-throughput phenotyping approaches. *Frontiers in Genetics*, 15, 1403133. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1403133>
- Mieles-Giler, J. W., Guerrero-Calero, J. M., Moran-González, M. R., & Zapata-Velasco, M. L. (2024). Evaluación de la degradación ambiental en hábitats Naturales. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(3), 65–88. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n3/121>
- Montero-de-la-Cueva, J. V., & Caicedo-Aldaz, J. C. (2023). Prácticas Innovadoras para una Alimentación Sostenible en la Producción Porcina. *Horizon Nexus Journal*, 1(1), 50-62. <https://doi.org/10.70881/hnj/v1/n1/12>
- Ramos-Acuña, H. E., Palomino-Pastrana, P. A., Yaulilahua-Huacho, R., Zela-Payí, N. O., Sumarriva-Bustinza, L. A., Porrás-Roque, M. S., & Camposano-Córdova, A. I. (2023). *Transformando la Ganadería: Evaluación de las Explotaciones de Vacunos*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.31>
- Rojas, F. E., & Saavedra-Mera, K. A. . (2022). Diversificación de Cultivos y su Impacto Económico en las Fincas Ecuatorianas. *Revista Científica Zambos*, 1(1), 51-68. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n1/21>
- Saavedra-Mera, K. A. (2023). Avances científicos recientes en la calidad de vida de los animales en la producción avícola. *Horizon Nexus Journal*, 1(4), 1-15. <https://doi.org/10.70881/hnj/v1/n4/25>
- Teissier, M., et al. (2018). Fine mapping and identification of causal variants in GWAS. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 135(3), 200-210. <https://doi.org/10.1111/jbg.12349>
- Wang, B., et al. (2022). Enhancing Animal Disease Resistance, Production Efficiency, and Welfare through Precise Genome Editing. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(13), 7331. <https://doi.org/10.3390/ijms23137331>
- Wu, J., et al. (2024). The role of genomic selection in beef cattle breeding. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(13), 7147. <https://doi.org/10.3390/ijms25137147>

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.