

Innovación biotecnológica en alimentos funcionales y transgénicos: avances, beneficios y desafíos en la industria alimentaria moderna

Biotechnological innovation in functional and transgenic foods: advances, benefits and challenges in the modern food industry

DOI: <https://doi.org/10.56747/rcq.v6i2.120>
Recibido Marzo 2026- Aceptado Mayo 2026
Quántica, ciencia con impacto social
Vol. 6 Núm. 2 Julio - Diciembre 2025
e-ISSN: 2954 - 5838
Pgs 7 - 28

Luis Carlos Cuello Díaz¹
Milagros Yínez Oñate Maury²
Erain Alberto Egurrola Daza³

1 Ingeniero de Alimentos, Instituto Nacional de Formación Técnica Profesional (INFOTEP), San Juan del Cesar, La Guajira, Colombia. Miembro del Semillero CREA (Centro de Recursos y Emprendimiento Agroindustrial). Correo: lcuello@infotep.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6541-5050>. Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=es&user=8a1X-UcAAAAJ. Autor de correspondencia: lcuello@infotep.edu.co.

2 Microbióloga, Instituto Nacional de Formación Técnica Profesional (INFOTEP), San Juan del Cesar, La Guajira, Colombia. Correo: m.onate@infotep.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8764-5535>. Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=es&user=__ONlgMAAAAJ.

3 Administrador de Empresas Agropecuarias, Instituto Nacional de Formación Técnica Profesional (INFOTEP), San Juan del Cesar, La Guajira, Colombia. Correo: eegurrola@infotep.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5145-7848>. Google Scholar: <https://scholar.google.com/scholar?oi=bibs&cluster=1749981211738549678&btnI=1&hl=es>.

Resumen

La biotecnología alimentaria ha impulsado transformaciones relevantes en la industria moderna mediante el desarrollo de alimentos funcionales y cultivos transgénicos con potencial para mejorar la salud humana y la productividad agrícola. Este artículo analiza avances publicados entre 2020 y 2024, con énfasis en beneficios nutricionales, regulación, bioseguridad y desafíos éticos y ambientales, a partir de una revisión narrativa de literatura científica consultada en bases de datos especializadas. Los hallazgos evidencian que los alimentos funcionales enriquecidos con compuestos bioactivos, probióticos y micronutrientes pueden contribuir a la prevención de deficiencias nutricionales y al fortalecimiento de la salud metabólica. Asimismo, cultivos transgénicos como el maíz Bt presentan equivalencia nutricional frente a variedades convencionales y ventajas ambientales asociadas con la reducción del uso de insecticidas. Sin embargo, persisten retos relacionados con la percepción del consumidor, la trazabilidad, la comunicación científica y la armonización regulatoria. Se concluye que la biotecnología aplicada a los alimentos constituye una herramienta estratégica para fortalecer la seguridad alimentaria y avanzar hacia sistemas productivos más sostenibles.

Palabras clave: biotecnología alimentaria; alimentos funcionales; organismos genéticamente modificados; seguridad alimentaria; bioseguridad; sostenibilidad.

Abstract

Food biotechnology has driven relevant transformations in the modern food industry through the development of functional foods and transgenic crops with the potential to improve human health and agricultural productivity. This article analyzes advances published between 2020 and 2024, with emphasis on nutritional benefits, regulation, biosafety, and ethical and environmental challenges, based on a narrative review of scientific literature retrieved from specialized databases. The findings show that

functional foods enriched with bioactive compounds, probiotics, and micronutrients may contribute to the prevention of nutritional deficiencies and to the improvement of metabolic health. Likewise, transgenic crops such as Bt maize show nutritional equivalence to conventional varieties and environmental advantages associated with reduced insecticide use. However, challenges remain regarding consumer perception, traceability, scientific communication, and regulatory harmonization. It is concluded that food biotechnology is a strategic tool to strengthen food security and move toward more sustainable production systems.

Keywords: food biotechnology; functional foods; genetically modified organisms; food security; biosafety; sustainability.

Introducción

En las últimas décadas, la biotecnología alimentaria se ha consolidado como un campo dinámico para la transformación de la industria agroalimentaria, al permitir el desarrollo de productos con mayor valor nutricional, funcional y tecnológico (González et al., 2021; Oliveira et al., 2021). La incorporación de compuestos bioactivos, como probióticos, prebióticos, antioxidantes y ácidos grasos esenciales, se asocia con la prevención de enfermedades metabólicas y cardiovasculares, así como con el fortalecimiento del sistema inmunológico (Khan et al., 2023; Mancini et al., 2022).

De manera paralela, los cultivos genéticamente modificados han contribuido a mejorar la productividad agrícola, aumentar la resistencia a plagas y favorecer procesos de biofortificación con micronutrientes esenciales (Tripathi et al., 2020; Sharma et al., 2024). No obstante, estos avances han generado debates sobre inocuidad, impacto ambiental, trazabilidad, regulación y aceptación social de los alimentos derivados de biotecnología moderna (FAO, 2022; Fernández & Duarte, 2023).

El objetivo de este artículo es analizar los avances, beneficios y desafíos de la innovación biotecnológica aplicada a alimentos funcionales y transgénicos, con

énfasis en cereales fortificados, compuestos bioactivos y el caso del maíz Bt como referente de aplicación agrícola.

Materiales y métodos

Se realizó una revisión narrativa de literatura científica publicada entre 2020 y 2024 en las bases de datos Scopus, PubMed, ScienceDirect y Google Scholar. Se emplearon los descriptores food biotechnology, functional foods, bioactive compounds, Bt maize y genetically modified crops, combinados con operadores booleanos según la estrategia de búsqueda de cada base de datos.

Los criterios de inclusión consideraron artículos originales, revisiones sistemáticas y reportes institucionales relacionados con alimentos funcionales, biofortificación, compuestos bioactivos, cultivos transgénicos y regulación. Se excluyeron documentos duplicados, estudios sin revisión por pares y publicaciones con información incompleta o no verificable. Para organizar la información, se diseñó una matriz de análisis con variables como tipo de estudio, año de publicación, país, enfoque metodológico, principales hallazgos y conclusiones.

El instrumento fue sometido a validación por juicio de expertos, con la participación de dos docentes investigadores en microbiología y biotecnología alimentaria, quienes evaluaron la pertinencia, claridad y coherencia de las categorías. También se realizó un pilotaje con un subconjunto equivalente al 10 % de los documentos seleccionados, lo que permitió ajustar criterios de clasificación y mejorar la consistencia de la extracción de datos. La confiabilidad del proceso se fortaleció mediante revisión cruzada de la información y comparación entre matrices.

Finalmente, la información se organizó en cinco categorías temáticas: alimentos funcionales, compuestos bioactivos, cereales fortificados, cultivos transgénicos y aspectos regulatorios vinculados con la aceptación social.

Resultados y discusión

Cereal fortificado

Los cereales fortificados representan uno de los avances más significativos en la biotecnología alimentaria aplicada a los alimentos funcionales, al combinar el valor energético de los granos con micronutrientes esenciales que contribuyen al bienestar y la prevención de deficiencias nutricionales. Estos productos son el resultado de procesos tecnológicos y biotecnológicos orientados a incrementar el contenido de vitaminas, minerales, proteínas y compuestos bioactivos, lo que los convierte en alimentos estratégicos para mejorar la seguridad alimentaria y nutricional (Oliveira et al., 2021).

En la actualidad, la fortificación de cereales con hierro, zinc, ácido fólico, vitamina B12 y calcio ha permitido reducir significativamente los índices de anemia, desnutrición infantil y enfermedades relacionadas con la carencia de micronutrientes (González et al., 2022). La aplicación de biotecnología vegetal ha permitido, además, el desarrollo de cereales transgénicos biofortificados, como el arroz dorado enriquecido con betacarotenos o el maíz con alto contenido de lisina, los cuales buscan aumentar el valor nutricional sin alterar la aceptabilidad sensorial del producto (Tripathi et al., 2020). La microencapsulación de nutrientes, la fermentación controlada y el uso de enzimas recombinantes son técnicas innovadoras que mejoran la biodisponibilidad de los compuestos fortificantes, garantizando una absorción más eficiente en el organismo (Kaur et al., 2023). Asimismo, los cereales fortificados se posicionan como vehículos funcionales capaces de incorporar probióticos y prebióticos, lo que amplía su impacto en la salud intestinal y metabólica (Mancini et al., 2022).

Sin embargo, su producción enfrenta desafíos asociados a la estabilidad de los nutrientes durante el procesamiento térmico, el costo de las tecnologías aplicadas y la aceptación del consumidor frente a los productos biotecnológicos (FAO, 2022). Aun

así, los cereales fortificados continúan siendo una de las herramientas más efectivas en la lucha contra la malnutrición y un claro ejemplo del potencial de la innovación biotecnológica en la industria alimentaria moderna.

Alimentos funcionales y compuestos bioactivos

Los alimentos funcionales se caracterizan por aportar beneficios fisiológicos adicionales a su valor nutricional básico mediante la incorporación de compuestos bioactivos como polifenoles, carotenoides, ácidos grasos omega-3, probióticos y prebióticos (González et al., 2021; Khan et al., 2023). Estos componentes actúan como moduladores metabólicos, reduciendo el estrés oxidativo y mejorando la salud intestinal (Mancini et al., 2022).

El cereal fortificado constituye una de las principales aplicaciones de la biotecnología alimentaria orientada a mejorar la nutrición poblacional. Su componente funcional está dado por la incorporación de micronutrientes esenciales, compuestos bioactivos y fibra dietaria, los cuales aportan beneficios fisiológicos más allá del valor energético tradicional del grano (Oliveira et al., 2021). En este tipo de productos, la adición de hierro, zinc, calcio, ácido fólico, vitaminas del complejo B y ácidos grasos esenciales cumple una función preventiva frente a deficiencias nutricionales crónicas (González et al., 2022). Asimismo, la inclusión de fibra soluble (β -glucanos, inulina, arabinosilanos) y antioxidantes naturales contribuye al control glucémico y lipídico, promoviendo la salud cardiovascular y metabólica (Kaur et al., 2023).

Los procesos biotecnológicos aplicados en la fortificación como la microencapsulación, la biofermentación y la inmovilización enzimática mejoran la biodisponibilidad de los nutrientes, su estabilidad térmica y su absorción intestinal. De igual manera, la adición de probióticos y prebióticos convierte al cereal en un alimento simbiótico, capaz de equilibrar la microbiota intestinal y fortalecer el sistema inmunológico (Mancini et al., 2022). Desde la perspectiva funcional, el éxito de la fortificación depende de

la interacción entre los compuestos bioactivos y la matriz alimentaria, la cual debe conservar las características sensoriales y tecnológicas del producto (FAO, 2022).

En síntesis, el cereal fortificado con componentes funcionales representa una estrategia biotecnológica eficaz para combatir la malnutrición y fomentar una alimentación saludable, sostenible y científicamente respaldada.

Cereales fortificados como estrategia nutricional

La fortificación de cereales con hierro, zinc, ácido fólico y vitaminas del complejo B ha demostrado ser una estrategia eficaz para disminuir la anemia y la malnutrición infantil (Oliveira et al., 2021; González et al., 2022). El uso de técnicas como microencapsulación y fermentación controlada ha permitido mejorar la biodisponibilidad de estos micronutrientes (Kaur et al., 2023).

Tabla 1

Componentes funcionales comunes en cereales fortificados y sus beneficios

Componente funcional	Tipo	Beneficio principal	Fuente biotecnológica
Hierro microencapsulado	Micronutriente	Prevención de anemia	Bioencapsulación con alginato
Insulina y beta-glucanos	Fibra prebiótica	Regulación intestinal y control de colesterol	Fermentación bacteriana controlada
Ácido fólico	Vitamina sintética	Desarrollo celular y prevención de defectos congénitos	Ingeniería bioquímica
Probióticos (Lactobacillus)	Microorganismos vivos	Fortalecimiento del sistema inmunológico	Fermentación láctica
Polifenoles naturales	Antioxidantes	Protección frente al estrés oxidativo	Extracción vegetal asistida

Nota. Información organizada con base en literatura científica sobre alimentos funcionales y biotecnología alimentaria.

Cultivos transgénicos: el caso del maíz Bt

El maíz Bt, desarrollado mediante la inserción del gen cry de *Bacillus thuringiensis*, expresa proteínas insecticidas específicas contra plagas del orden Lepidoptera (James, 2020; Herman et al., 2021). Diversos estudios han confirmado su equivalencia nutricional frente al maíz convencional y su contribución a la reducción del uso de pesticidas químicos (Buzoianu et al., 2020; Brookes & Barfoot, 2021). (*Bacillus thuringiensis*) constituye uno de los logros más emblemáticos de la biotecnología agrícola moderna, al ser el primer cultivo transgénico diseñado con éxito para resistir ataques de insectos mediante mecanismos biológicos naturales.

Este cultivo fue desarrollado mediante la inserción de un gen proveniente de la bacteria *Bacillus thuringiensis*, el cual codifica una proteína cristalina (Cry) con actividad insecticida específica contra plagas del orden *Lepidoptera*, entre ellas el barrenador del tallo (*Ostrinia nubilalis*), que causa pérdidas considerables en el rendimiento del maíz convencional (James, 2020).

El proceso de obtención del maíz Bt involucra técnicas de ingeniería genética avanzada, como la transformación mediada por *Agrobacterium tumefaciens* o la *biobalística* (*bombardeo de microprojectiles*), que permiten introducir el gen cry1Ab o cry1Ac en el genoma del maíz. Una vez incorporado, este gen se expresa en tejidos vegetales específicos hojas, tallos y granos donde produce la proteína Bt en concentraciones que resultan letales para los insectos plaga, pero inocuas para humanos, animales y otros organismos benéficos (Herman et al., 2021). Este mecanismo reduce la dependencia de insecticidas químicos sintéticos, mejorando la sostenibilidad y la seguridad ambiental del sistema productivo (Brookes & Barfoot, 2021).

El modo de acción de la proteína Cry ha sido ampliamente estudiado. Al ser ingerida por el insecto, la proteína se activa en su intestino alcalino y se une a receptores específicos en las células epiteliales, formando poros que causan la lisis celular y la muerte del organismo (EFSA, 2023).

Este proceso es altamente selectivo y no afecta a los mamíferos ni a otros vertebrados, dado que sus sistemas digestivos carecen de las condiciones necesarias para activar la toxina (FDA, 2022). Además, múltiples evaluaciones científicas han confirmado que el maíz Bt es nutricionalmente equivalente al maíz convencional, manteniendo los mismos niveles de proteínas, carbohidratos, grasas y micronutrientes (Núñez et al., 2021).

Desde su introducción comercial en 1996, el maíz Bt ha sido adoptado en más de 70 países, con millones de hectáreas cultivadas anualmente, convirtiéndolo en una herramienta clave para mejorar la productividad agrícola y reducir los impactos ambientales de la agricultura intensiva (ISAAA, 2023). Su éxito ha inspirado el desarrollo de otros cultivos transgénicos resistentes a insectos y enfermedades, consolidando la innovación biotecnológica como una estrategia fundamental para la seguridad alimentaria global y la sostenibilidad del sector agroindustrial (Sharma et al., 2024).

Regulación y aceptación social

Organismos internacionales como la FAO, la OMS, la EFSA y la FDA han establecido marcos regulatorios para garantizar la inocuidad de los alimentos derivados de la biotecnología moderna (FAO/WHO, 2021; FDA, 2022; EFSA, 2023). Sin embargo, la aceptación del consumidor depende en gran medida de la percepción de riesgo y de la transparencia en la comunicación científica (Fernández & Duarte, 2023). La Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) la Agencia de Protección

Ambiental (EPA) de Estados Unidos aprobaron el maíz Bt en 1996 tras rigurosas evaluaciones toxicológicas, ambientales y nutricionales. Dichas agencias concluyeron que el producto es sustancialmente equivalente al maíz convencional, sin evidencias de riesgo para la salud humana ni para el medio ambiente (FDA, 2022; EFSA, 2023).

Asimismo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la FAO respaldaron los resultados de seguridad, señalando que el maíz Bt cumple con los principios internacionales de inocuidad alimentaria establecidos por el Codex Alimentarius (FAO/WHO, 2021). Estos organismos reconocen que las proteínas Cry expresadas en el maíz Bt se degradan rápidamente en el sistema digestivo y no poseen potencial alergénico ni tóxico. Además, la regulación estadounidense exige un monitoreo continuo posterior a la comercialización, para verificar la ausencia de efectos adversos a largo plazo tanto en la salud humana como en los ecosistemas agrícolas (EPA, 2023).

Por su parte, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) y la Comisión de Bioseguridad de la Unión Europea también han emitido dictámenes favorables sobre la importación y uso del maíz Bt como materia prima para la industria alimentaria y ganadera. Estas evaluaciones se basan en estudios multianuales que comparan los perfiles fisicoquímicos, nutricionales y genómicos del maíz Bt y no Bt, reafirmando su equivalencia sustancial y ausencia de efectos imprevistos (EFSA, 2023). Actualmente, más de 25 países han aprobado su uso, entre ellos Brasil, Argentina, Sudáfrica y Filipinas, bajo marcos regulatorios que promueven la bioseguridad y la trazabilidad de los alimentos transgénicos (ISAAA, 2023).

Diferencias entre nutrientes y compuestos bioactivos

Mientras los nutrientes participan directamente en funciones metabólicas básicas, los compuestos bioactivos intervienen en procesos antioxidantes, antiinflamatorios

e inmunomoduladores (Oliveira et al., 2021; Khan et al., 2023). La obtención de estos compuestos mediante bioprocesos microbianos ha ampliado su aplicación en la industria alimentaria funcional (Mancini et al., 2022).

Implicaciones para la seguridad alimentaria

La integración de alimentos funcionales y cultivos transgénicos contribuye a mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales y a reducir las pérdidas agrícolas, fortaleciendo la seguridad alimentaria global (Tripathi et al., 2020; Sharma et al., 2024).

Ventajas competitivas

Entre sus principales ventajas destacan la resistencia natural a insectos, la reducción en el uso de pesticidas químicos, el menor costo de producción y un rendimiento agrícola superior en condiciones de estrés biótico. Además, disminuye las pérdidas poscosecha y contribuye a la sostenibilidad agroindustrial (Brookes & Barfoot, 2021).

A nivel global, el uso del maíz Bt ha generado impactos económicos y ambientales positivos. De acuerdo con Brookes y Barfoot (2021), los agricultores que adoptan esta tecnología han logrado incrementos de productividad entre 10 % y 20 %, al tiempo que reducen en más del 35 % el consumo de insecticidas sintéticos. Esto representa una mejora directa en la rentabilidad agrícola y una disminución en los costos asociados al manejo de plagas. Asimismo, la reducción en la aplicación de plaguicidas ha contribuido a preservar la biodiversidad del suelo y proteger especies benéficas como polinizadores y microorganismos edáficos (Núñez et al., 2021).

Tabla 2

Composición química comparativa entre maíz Bt y maíz no Bt (% peso seco)

Componente químico	Maíz Bt (% peso seco)	Maíz no Bt (% peso seco)	Observaciones
Proteína	9.0 – 10.0	9.1 – 10.2	Equivalente nutricional; sin diferencias significativas entre variedades.
Grasa	4.0 – 5.0	4.1 – 5.1	Contenido lipídico similar; mantiene el valor energético del grano.
Carbohidratos	72.0–75.0	72.3 – 75.2	Composición comparable; no se observan alteraciones metabólicas.
Fibra cruda	2.0 – 2.5	2.1 – 2.6	Ligeras variaciones dentro del rango normal; sin impacto tecnológico.
Cenizas (minerales totales)	1.3 – 1.5	1.4 – 1.6	Contenido mineral total similar entre ambas variedades.
Humedad	10.5 – 11.0	10.3 – 11.1	Valores normales; sin diferencia estadística significativa.

Nota. Datos expresados en porcentaje de peso seco. Elaboración propia con base en literatura científica.

Otra ventaja significativa del maíz Bt radica en su mayor estabilidad frente a condiciones climáticas adversas, ya que al disminuir el daño por insectos se evita la proliferación de hongos productores de micotoxinas, responsables de pérdidas económicas y riesgos para la salud humana (Herman et al., 2021).

Por tanto, el maíz Bt no solo mejora la eficiencia productiva, sino que fortalece la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental, consolidándose como un pilar de la innovación biotecnológica aplicada a los sistemas agroindustriales modernos.

Principales características fisicoquímicas

Estudios comparativos han mostrado que el maíz Bt mantiene características fisicoquímicas y organolépticas similares a las del maíz no Bt, incluyendo humedad, contenido proteico, carbohidratos y aceites (Núñez et al., 2021). El perfil de maíz, de minerales esenciales como calcio, magnesio, potasio, hierro y zinc no presenta diferencias significativas entre ambos tipos de lo que respalda su equivalencia nutricional (Buzoianu et al., 2020).

Tabla 3

Contenido mineral comparativo del maíz Bt y maíz no Bt

Mineral	Maíz Bt (mg/100 g)	Maíz no Bt (mg/100 g)	Observaciones
Calcio (Ca)	6.2 – 7.0	6.3 – 7.2	Sin diferencias significativas; mantiene equilibrio mineral.
Hierro (Fe)	2.3 – 2.6	2.4 – 2.7	Contenido similar; adecuada biodisponibilidad.
Hierro (Fe)	2.3 – 2.6	2.4 – 2.7	Equivalente en ambas variedades; dentro de los rangos naturales del grano.
Magnesio (Mg)	115 – 120	116 – 122	Sin cambios relevantes; contribuye a la actividad enzimática normal.
Potasio (K)	280 – 295	282 – 298	Perfil estable; importante para la regulación osmótica celular.
Fósforo (P)	220 – 230	221 – 235	Contenido comparable; esencial para la formación de energía (ATP).
Manganeso (Mn)	0.45 – 0.52	0.46 – 0.53	Valores estadísticamente equivalentes.
Cobre (Cu)	0.12 – 0.15	0.13 – 0.16	Sin diferencias nutricionales detectables.

Nota. Datos expresados en mg/100 g de muestra. Elaboración propia con base en literatura científica.

Tabla 4

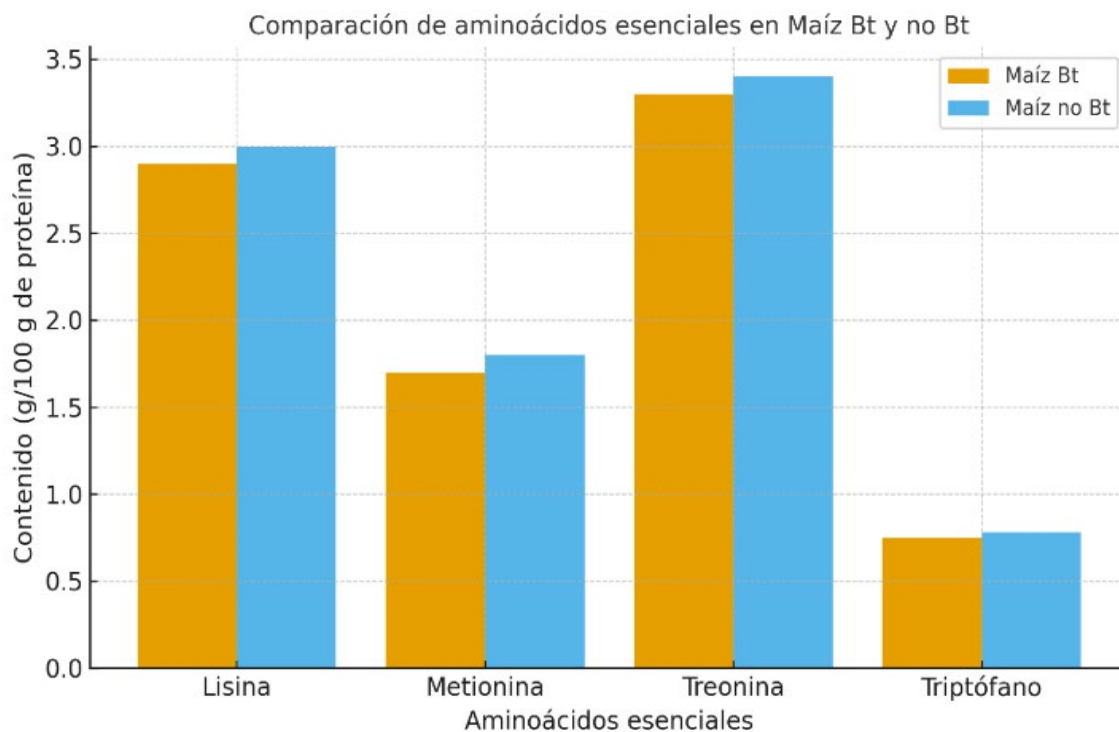
Composición de aminoácidos comparativa del maíz Bt y maíz no Bt

Aminoácido	Maíz Bt (g/100 g proteína)	Maíz no Bt (g/100 g proteína)	Observaciones
Lisina (Lys)	2.8 – 3.0	2.9 – 3.1	Esencial; sin diferencias estadísticas significativas.
Metionina (Met)	1.6 – 1.8	1.7 – 1.9	Aminoácido azufrado; estable entre variedades.
Treonina (Thr)	3.2 – 3.4	3.3 – 3.5	Valores comparables; función estructural proteica.
Triptófano (Trp)	0.7 – 0.8	0.7 – 0.8	Aminoácido limitante; sin cambios por transgénesis.
Leucina (Leu)	10.5 – 11.0	10.6 – 11.2	Perfil similar; aporta al metabolismo energético.
Isoleucina (Ile)	3.5 – 3.7	3.6 – 3.8	Sin diferencia significativa; estabilidad composicional.
Valina (Val)	4.2 – 4.5	4.3 – 4.6	Aminoácido ramificado; contenido equivalente.
Fenilalanina (Phe)	4.0 – 4.3	4.1 – 4.4	Interviene en síntesis de tirosina; sin variación.
Histidina (His)	2.1 – 2.3	2.2 – 2.4	Participa en regulación del pH; sin cambios.
Arginina (Arg)	4.0 – 4.2	4.1 – 4.3	Función metabólica; equivalencia nutricional.

Alanina (Ala)	7.5 – 7.8	7.6 – 7.9	Estabilidad química; sin diferencia significativa.
Glicina (Gly)	3.0 – 3.2	3.1 – 3.3	Asociada a la estructura del almidón; sin variación.
Serina (Ser)	4.1 – 4.3	4.2 – 4.4	Sin alteraciones funcionales detectadas.
Tirosina (Tyr)	3.2 – 3.4	3.3 – 3.5	Contenido constante; precursor de catecolaminas.
Ácido aspártico (Asp)	7.8 – 8.2	7.9 – 8.3	Sin variaciones en perfil de síntesis proteica.
Ácido glutámico (Glu)	15.0 – 15.5	15.1 – 15.6	Principal aminoácido del maíz; estabilidad confirmada.

Nota. Datos expresados en g/100 g de proteína. Elaboración propia con base en literatura científica.

Gráfica 1: Comparativo



Fuente: 2 Autoría propia. (2026)

Gen introducido

El maíz Bt es un cultivo transgénico desarrollado mediante la incorporación de un gen proveniente de la bacteria *Bacillus thuringiensis*, específicamente los genes cry1Ab o cry1Ac, responsables de codificar una proteína cristalina (Cry) con propiedades insecticidas. Este gen fue aislado y clonado mediante técnicas de ingeniería genética recombinante, y posteriormente introducido en el genoma del maíz utilizando métodos como la transformación mediada por *Agrobacterium tumefaciens* o la biobalística (James, 2020). Una vez integrado, el gen se expresa en los tejidos vegetales susceptibles al ataque de insectos principalmente hojas y tallos, lo que confiere al cultivo resistencia inherente frente a plagas del orden *Lepidoptera*, como *Ostrinia nubilalis* (barrenador europeo del maíz).

El mecanismo de acción de la proteína Cry es altamente específico. Cuando los insectos consumen tejidos del maíz Bt, la proteína es activada por enzimas intestinales en un ambiente alcalino, transformándose en una toxina activa que se une a receptores específicos del epitelio intestinal, creando poros que causan la lisis celular y la muerte del insecto (Herman et al., 2021). Esta especificidad asegura que la proteína Bt no afecte a humanos, animales ni insectos benéficos, ya que los sistemas digestivos de los mamíferos no poseen las condiciones necesarias para activar dicha proteína (EFSA, 2023). Diversos estudios de seguridad alimentaria y ambiental han confirmado que la inserción del gen cry no altera el perfil bioquímico, toxicológico ni alérgico del maíz (FDA, 2022).

Desde el punto de vista biotecnológico, el gen cry fue optimizado mediante modificación de codones para mejorar su expresión en plantas, aumentando la producción de la proteína Cry sin afectar la fisiología del maíz (Sharma et al., 2024). Además, se ha incorporado junto a promotores constitutivos, como el promotor 35S del virus del mosaico de la coliflor (CaMV 35S), que asegura la expresión continua del gen en todo el ciclo de desarrollo vegetal (Núñez et al., 2021). Estas innovaciones garantizan la efectividad del maíz Bt frente a un amplio rango de plagas y su

estabilidad genética a lo largo de generaciones, consolidando su papel como una de las herramientas biotecnológicas más exitosas en la agricultura moderna.

En los últimos años, el conocimiento sobre el gen introducido en el maíz Bt ha evolucionado hacia enfoques de edición genética de precisión, utilizando tecnologías como CRISPR-Cas9 para optimizar genes insecticidas, reducir riesgos ecológicos y mejorar la selectividad del efecto (Tripathi et al., 2020). Estas nuevas estrategias biotecnológicas buscan mantener los beneficios de la resistencia a plagas, pero con un mayor control sobre la inserción y expresión génica, garantizando la inocuidad, trazabilidad y aceptación regulatoria del producto. Así, el gen Bt se consolida como un referente de la innovación responsable en alimentos transgénicos, equilibrando productividad, sostenibilidad y seguridad alimentaria global.

Tabla 5

Comparación entre nutrientes y compuestos bioactivos en procesos biotecnológicos

Criterio	Nutrientes	Compuestos bioactivos
Nombre	Macronutrientes (carbohidratos, proteínas, lípidos) y micronutrientes (vitaminas y minerales).	Polifenoles, flavonoides, carotenoides, inulina, ácidos grasos omega-3, probióticos, fitoesteroles.
pH óptimo de estabilidad	Generalmente estable en rangos neutros (6.5 – 7.5).	Varía según el tipo: los polifenoles y antioxidantes se conservan mejor en medios ligeramente ácidos (pH 4.0 – 6.0).
Temperatura óptima	Toleran temperaturas moderadas (20–40 °C); algunos micronutrientes son sensibles al calor.	Son termo-sensibles; se degradan por encima de 45–50 °C (por ejemplo, vitamina C y compuestos fenólicos).
Sustrato principal	Materias primas alimentarias: cereales, legumbres, frutas, carnes, leche, etc.	Extractos vegetales, frutas, granos integrales, algas, hierbas, fermentos lácticos o probióticos.
Tipo de reacción	Participan en reacciones metabólicas básicas (síntesis, oxidación, catabolismo energético).	Intervienen en reacciones antioxidantes, antiinflamatorias, inmunomoduladoras y de señalización celular.
Utilización de microorganismos	Usualmente no requieren microorganismos para su obtención, aunque pueden usarse en fermentaciones nutricionales (vitaminas B y K).	Frecuentemente obtenidos o transformados mediante bioprocesos microbianos (fermentación con <i>Lactobacillus</i> , <i>Bifidobacterium</i> o levaduras).

Nota. Información organizada con base en literatura científica sobre biotecnología alimentaria y compuestos funcionales.

Las diferencias entre nutrientes y compuestos bioactivos en la industria alimentaria producidos mediante bioprocesos y establecimiento de condiciones óptimas para su obtención, se relacionan en la tabla 6.

Tabla 6

Principales prebióticos, probióticos y simbióticos empleados en la industria alimentaria

Categoría	Ejemplo / Microorganismo o compuesto	Fuente o sustrato natural	Aplicación industrial	Beneficio funcional principal
Prebiótico	Inulina	Raíz de achicoria, agave, cebolla, ajo	Yogures, bebidas funcionales, panadería	Estimula el crecimiento de Bifidobacterium y Lactobacillus; mejora la digestión y absorción de calcio.
Prebiótico	Fructooligosacáridos (FOS)	Plátano, miel, trigo, cebolla	Cereales, productos lácteos, fórmulas infantiles	Promueven flora intestinal saludable; reducen el estreñimiento.
Prebiótico	Galactooligosacáridos (GOS)	Derivados de la lactosa y leguminosas	Leches fermentadas, suplementos nutricionales	Favorecen la función inmunológica y la salud intestinal en lactantes y adultos.
Probiótico	Lactobacillus acidophilus	Cultivos lácteos, yogur, kéfir	Yogures, bebidas fermentadas, suplementos	Mejora la digestión de la lactosa; regula el microbiota intestinal.
Probiótico	Bifidobacterium bifidum	Intestino humano, lácteos fermentados	Leches funcionales, quesos y cápsulas	Refuerza la inmunidad intestinal; inhibe patógenos intestinales.

Probiótico	Lactobacillus rhamnosus GG	Aislado de microbiota intestinal humana	Productos infantiles, leches, postres	Previene diarreas infecciosas; reduce alergias y enfermedades gastrointestinales.
Probiótico	Saccharomyces boulardii	Levadura aislada de frutas tropicales	Suplementos y bebidas probióticas	Protege frente a infecciones intestinales y restaura microbiota tras tratamientos antibióticos.
Simbiótico	Inulina + Lactobacillus casei	Raíz de achicoria y cultivos lácteos	Yogures simbióticos, batidos funcionales	Combina efectos prebióticos y probióticos, mejorando la biodisponibilidad de nutrientes.
Simbiótico	FOS + Bifidobacterium longum	Frutas, miel y cultivos intestinales	Bebidas funcionales y suplementos dietéticos	Aumenta la colonización de bacterias beneficiosas y fortalece la función inmunitaria.
Simbiótico	GOS + Lactobacillus plantarum	Legumbres y fermentados vegetales	Productos de soja, leches vegetales	Equilibra el microbiota y reduce inflamaciones intestinales leves.

Nota. Información organizada con base en literatura científica sobre microbiota intestinal y biotecnología alimentaria.

Los prebióticos actúan como el “alimento” de los microorganismos beneficiosos del intestino, los probióticos son las bacterias vivas que promueven la salud digestiva, y los simbióticos combinan ambos para potenciar su efecto. En la industria alimentaria moderna, estos compuestos se aplican e en lácteos fermentados, bebidas funcionales, productos de panadería, fórmulas infantiles y suplementos, siendo pilares del desarrollo de alimentos funcionales y nutraceuticos de alta demanda.

Resultados Y Discusión

Los hallazgos de estudios recientes sugieren que los alimentos funcionales desarrollados con biotecnología muestran beneficios concretos en salud humana, especialmente cuando están enriquecidos con compuestos bioactivos capaces de regular procesos metabólicos y fortalecer la respuesta antioxidante (Khan et al., 2023). Por ejemplo, alimentos enriquecidos con prebióticos y antioxidantes han demostrado mejoras en marcadores clínicos de salud cardiometabólica, evidenciando efectos positivos sobre el colesterol y la glucosa sanguínea (González et al., 2021). Esto confirma que la aplicación biotecnológica puede traducirse en resultados tangibles de bienestar.

En productos fortificados como cereales o lácteos, se observa disminución de deficiencias nutricionales en poblaciones vulnerables, especialmente en regiones con alta prevalencia de anemia por deficiencia de hierro (Oliveira et al., 2021). Las tecnologías auxiliares, como la microencapsulación, han optimizado la estabilidad y liberación de micronutrientes, proporcionando mayor eficiencia biológica que métodos convencionales de fortificación (Kaur et al., 2023). Estos resultados avalan la aplicación de biotecnologías avanzadas como herramientas efectivas para programas de nutrición pública.

En cuanto a cultivos transgénicos, la evidencia comparativa respalda que variedades como el maíz Bt presentan perfiles nutricionales equivalentes a los convencionales, sin diferencias significativas en parámetros de composición alimentaria (Buzoianu et al., 2020). Además, la resistencia a plagas reduce la necesidad de pesticidas químicos, lo que tiene efectos positivos en la salud del suelo y en la reducción de micotoxinas asociadas al daño por insectos (Herman et al., 2021). Sin embargo, la discusión científica también reconoce desafíos vinculados a la percepción social y ética, lo cual resalta la necesidad de fortalecer la comunicación científica y las políticas públicas basadas en evidencia (Fernández & Duarte, 2023).

Conclusiones

La biotecnología alimentaria representa una herramienta estratégica para enfrentar desafíos nutricionales y productivos del siglo XXI. El desarrollo de alimentos funcionales y cultivos transgénicos, como el maíz Bt, evidencia beneficios potenciales en nutrición, sostenibilidad y eficiencia agrícola. No obstante, su consolidación depende de marcos regulatorios sólidos, educación científica, trazabilidad y aceptación social.

De manera complementaria, la incorporación de componentes funcionales como inulina, ácidos grasos esenciales, vitaminas biofortificadas y microorganismos benéficos demuestra el potencial de la biotecnología para crear alimentos orientados no solo a nutrir, sino también a promover la salud integral. El futuro de la innovación biotecnológica en el sector alimentario dependerá de la investigación multidisciplinaria, la comunicación responsable y la implementación de políticas públicas que impulsen una producción segura, equitativa y sostenible.

En este contexto, los alimentos funcionales y transgénicos deben analizarse desde una perspectiva científica y social equilibrada: como tecnologías con oportunidades relevantes para la seguridad alimentaria, pero también con retos que exigen regulación, seguimiento y diálogo con los consumidores.

Referencias

- Brookes, G., & Barfoot, P. (2021). GM crops: Global socio-economic and environmental impacts 1996-2019. *GM Crops & Food*, 12(1), 24-48.
- Buzoianu, S., Walsh, M., Rea, M., O'Sullivan, O., & Ross, R. (2020). Nutritional equivalence and mineral profile of genetically modified Bt maize. *Animal Feed Science and Technology*, 268, 114617.
- EFSA. (2023). Scientific opinion on the safety of genetically modified maize MON810. *EFSA Journal*, 21(3), 7874.

- FAO. (2022). The state of food and agriculture: Leveraging innovation in biotechnology. FAO.
- FAO/WHO. (2021). Codex principles for the risk analysis of foods derived from modern biotechnology. Codex Alimentarius.
- FDA. (2022). Biotechnology consultations on food from genetically engineered plant varieties.
- Fernández, P., & Duarte, M. (2023). Percepción del consumidor frente a los alimentos transgénicos. *Revista Iberoamericana de Biotecnología Alimentaria*, 19(2), 55-67.
- González, L., Martínez, C., & Rojas, A. (2021). Avances en alimentos funcionales. *Journal of Functional Foods*, 82, 104518.
- González, A., Paredes, J., & Luna, M. (2022). Fortificación de cereales. *Revista Latinoamericana de Ciencia y Tecnología de los Alimentos*, 14(3), 45-58.
- Herman, R. A., Price, W. D., & Dubelman, S. (2021). Compositional assessment of genetically modified maize. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(12), 3561-3570.
- James, C. (2020). Global status of commercialized biotech/GM crops. ISAAA.
- Kaur, P., Singh, A., & Mehta, S. (2023). Encapsulation and bioavailability of micronutrients. *Food Chemistry Advances*, 5, 100302.
- Khan, S., Hussain, M., & Ali, R. (2023). Functional foods and bioactive compounds. *Food Research International*, 167, 112731.
- Mancini, M., García, L., & Prado, R. (2022). Cereales funcionales. *Journal of Food Technology Research*, 9(2), 25-39.
- Oliveira, R., Santos, F., & Costa, P. (2021). Fortified foods and bioactive compounds. *Trends in Food Science & Technology*, 115, 205-218.
- Sharma, N., Patel, D., & Kumar, S. (2024). CRISPR-Cas9 and gene-edited crops. *Frontiers in Plant Science*, 15, 138924.
- Tripathi, L., Ntui, V. O., & Tripathi, J. N. (2020). Application of biotechnology for improving food security. *Current Opinion in Biotechnology*, 61, 189-196.