

Uso de microorganismos como agentes adsorbentes para la mitigación de Micotoxinas en alimentos: una estrategia Biotecnológica para garantizar la seguridad alimentaria

Sara Velandia Pabón

Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería
Programa de Maestría en Biotecnología Alimentaria
Bogotá, Colombia
30 de Septiembre de 2025

Uso de microorganismos como agentes adsorbentes para la mitigación de Micotoxinas en alimentos: una estrategia Biotecnológica para garantizar la seguridad alimentaria

Sara Velandia Pabón

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Biotecnología Alimentaria

Modalidad

Monografía

Directora:

PhD. Claudia Liliana Vargas Serna

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Programa de Maestría en Biotecnología Alimentaria

Bogotá, Colombia

30 de Septiembre de 2025

DECLARACIÓN DE DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Los autores del presente trabajo manifestamos que conocemos el contenido del Acuerdo 06 de 2008, Estatuto de Propiedad Intelectual de la UNAD, Artículo 39 referente a la cesión voluntaria y libre de los derechos de propiedad intelectual de los productos generados a partir de la presente propuesta. Asimismo, conocemos el contenido del Artículo 40 del mismo Acuerdo, relacionado con la autorización de uso del trabajo para fines de consulta y mención en los catálogos bibliográficos de la UNAD.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a las docentes que me acompañaron en el desarrollo de este trabajo, por su orientación, compromiso y entrega. De igual manera, expreso mi gratitud a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, institución que me ha formado desde mi pregrado, transformando mi vida académica y personal, y abriéndome puertas que jamás imaginé. Gracias por ser parte esencial de este camino.

*La educación no solo abre puertas,
transforma destinos. Cuando crees en ti y
encuentras quienes te guíen, no hay límites para lo
que puedes lograr.*

— Anónimo

Resumen

La contaminación por micotoxinas en alimentos es un problema global debido a sus efectos tóxicos en la salud, la pérdida de cultivos básicos y los costos asociados al control y cumplimiento regulatorio. Estas toxinas, producidas por hongos como *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*, presentan una alta resistencia a los métodos convencionales de eliminación, tales como los tratamientos térmicos, químicos y físicos, incluyendo el calentamiento, el uso de absorbentes y la aplicación de compuestos específicos. Esta limitada eficacia de las técnicas tradicionales evidencia la necesidad de desarrollar soluciones innovadoras que permitan una reducción más efectiva de las micotoxinas en los alimentos y garanticen su inocuidad. Este proyecto identifica estrategias basadas en el uso de microorganismos para reducir la presencia de micotoxinas en alimentos, a través de un análisis bibliométrico, se exploran las capacidades de hongos en la reducción de micotoxinas y sus mecanismos de acción y especies más estudiadas, la clasificación de estrategias biotecnológicas aplicadas y la identificación de áreas de investigación futura para optimizar su uso en alimentos, también, se busca resaltar el papel de los microorganismos no solo como agentes reductores de micotoxinas, sino como herramientas sostenibles en la biotecnología alimentaria. La integración de estas estrategias podría transformar los sistemas de control actuales, promoviendo la seguridad alimentaria y abriendo nuevas posibilidades para su aplicación en cadenas de producción a escala industrial.

Palabras clave: Contaminación fúngica, Sistemas de control biológico, Procesos enzimáticos, Interacción huésped-microbiota, Tecnologías emergentes.

Abstract

Mycotoxin contamination in food is a global issue due to its toxic effects on health, the loss of staple crops, and the costs associated with control and regulatory compliance. These toxins, produced by fungi such as *Aspergillus*, *Fusarium*, and *Penicillium*, are resistant to conventional elimination methods. Current approaches for mycotoxin removal include thermal, chemical, and physical treatments, such as heating, the use of absorbents, and the application of specific chemical compounds. This highlights the need for innovative solutions. This project proposes identifying strategies based on the use of microorganisms to reduce the presence of mycotoxins in food. Through a bibliometric analysis, the project explores the capabilities of fungi in reducing mycotoxins by analyzing existing literature on their mechanisms of action and the most studied species, classifying applied biotechnological strategies, and identifying future research areas to optimize their use in food. Additionally, it aims to emphasize the role of microorganisms not only as agents to reduce mycotoxins but also as sustainable tools in food biotechnology. The integration of these strategies could transform current control systems, promote food safety, and open new possibilities for their application in industrial-scale production chains.

Keywords: Fungal contamination, Biological control systems, Enzymatic processes, Host-microbiota interaction, Emerging food technologies.

Tabla de contenido

Introducción	12
Objetivos	13
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
Metodología	14
Análisis bibliométrico	14
Capítulo 1. Mecanismos de Acción de los Microorganismos en la Reducción de Micotoxinas	18
Micotoxinas.....	18
Mecanismos de acción	18
Evidencias científicas de los mecanismos	35
Capítulo 2. Estrategias Biotecnológicas Aplicadas al Uso de Microorganismos en Alimentos Contaminados con Micotoxinas.....	37
Clasificación de Estrategias Biotecnológicas	37
Consorcios Microbianos	41
Formulaciones Bioprotectoras	43
Alteración metabólica y biocontrol.....	46
Estrategias Emergentes	48
Inactivación Enzimática de Micotoxinas	48
Enfoque Holístico de Prevención-Protección-Resiliencia	49
Factores que Influyen en las Estrategias	51
Adaptabilidad Microbiana.....	52
Barreras prácticas y técnicas en el uso de estrategias biotecnológicas	53
Perspectivas Futuras.....	55
Capítulo 3. Estrategias para Optimizar el Uso de Microorganismos en la Mitigación de Micotoxinas en Alimentos.....	59
Identificación de Vacíos de Conocimiento	59
Ingeniería Genética para Optimización Microbiana	62
Inmovilización de Microorganismos y Enzimas en Soportes Biodegradables	63
Adaptación a Escenarios Reales	64
Evaluación de Eficacia en Condiciones Reales	64
Desarrollo de Protocolos para Aplicaciones Específicas.....	66

<i>Uso de microorganismos como agentes adsorbentes para la mitigación de Micotoxinas en alimentos: una estrategia Biotecnológica para garantizar la seguridad alimentaria.</i>	9
Innovación en Estrategias Combinadas	66
Aplicación de Tecnologías Emergentes	69
Inteligencia Artificial y Modelado	70
Perspectivas de Aplicación	73
Discusión regulatoria y normativa	74
Futuras Directrices	75
Conclusiones	77
Recomendaciones.....	79
Referencias.....	80

Listado de tablas

Tabla 1. Relación de Países y su influencia	15
Tabla 2. Revistas con mayor influencia	15
Tabla 3. Tipos de micotoxinas y alimentos afectados	18
Tabla 4. Enzimas implicadas en la biodegradación de micotoxinas y sus funciones	26
Tabla 5. Microorganismos y Mecanismos de Acción para el Control de Hongos Toxigénicos.....	30
Tabla 6. Mecanismos Microbianos para la Reducción de Micotoxinas.....	35
Tabla 7. Aplicaciones del Biocontrol en Almacenamiento en Diferentes Productos.....	40
Tabla 8. Aplicaciones de Consorcios Microbianos en Diferentes Productos.....	42
Tabla 9. Aplicaciones de Microorganismos en la Adsorción de Micotoxinas	44
Tabla 10. Aplicaciones de Formulaciones Bioprotectoras en Diferentes Productos.....	45
Tabla 11. Aplicaciones de Alteración Metabólica en Diferentes Productos	47
Tabla 12. Aplicaciones del Biocontrol en Diferentes Productos.....	48
Tabla 13. Estrategias Emergentes para la Mitigación de Micotoxinas	51
Tabla 14. Factores y su influencia en la Mitigación de Micotoxinas.....	52
Tabla 15. Adaptabilidad Microbiana y Eficiencia en la Reducción de Micotoxinas	53
Tabla 16. Barreras Prácticas y Técnicas en el uso de estrategias biotecnológicas.....	53
Tabla 17. Ventajas, Desafíos y Perspectivas de Estrategias Combinadas	57
Tabla 18. Áreas de Optimización en el uso de Microorganismos.....	58
Tabla 19. Vacíos de Conocimiento en la Mitigación de Micotoxinas con Microorganismos.....	61

Listado de figuras

Figura 1. Revistas con mayor influencia.....	16
Figura 2. Palabras Clave	17
Figura 3. Mecanismos Enzimáticos para la Biodegradación de Micotoxinas	27
Figura 4. Clasificación de Estrategias Biotecnológicas Biocontrol en almacenamiento.....	38

Introducción

La contaminación por micotoxinas en alimentos y piensos representa uno de los mayores desafíos para la seguridad alimentaria a nivel global. Estas sustancias tóxicas, producidas principalmente por hongos del género *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*, afectan negativamente la salud humana y animal, además de generar pérdidas económicas significativas en las cadenas de producción y comercialización de alimentos (Alemayehu et al., 2023). A pesar de los esfuerzos por reducir su impacto mediante estrategias químicas y físicas, estas soluciones presentan limitaciones relacionadas con su efectividad, costo y sostenibilidad, especialmente en países en desarrollo donde las micotoxinas son más prevalentes.

En este contexto, los microorganismos surgen como una alternativa biotecnológica prometedora para la mitigación de micotoxinas. Su capacidad para adsorber, degradar y transformar estas toxinas en compuestos no tóxicos mediante mecanismos como la biodegradación enzimática, la formación de biopelículas y la competencia biológica, los posiciona como una solución innovadora y sostenible (Jurick, 2022). Sin embargo, la implementación de estas estrategias enfrenta desafíos significativos, como la estabilidad microbiana en condiciones reales, la eficacia en matrices alimentarias complejas y la falta de protocolos estandarizados para su aplicación a gran escala (Tian et al., 2022).

Este trabajo tiene como objetivo explorar y proponer investigaciones futuras que permitan optimizar el uso de microorganismos en la mitigación de micotoxinas. A través de un análisis detallado de las estrategias existentes, la identificación de vacíos de conocimiento y la propuesta de líneas de investigación, se busca proporcionar un marco integral para superar las limitaciones actuales y maximizar el impacto de estas intervenciones. Asimismo, se destaca la importancia de integrar tecnologías emergentes, como biosensores, inteligencia artificial y modelado matemático, para mejorar la eficacia y adaptabilidad de estas estrategias en diferentes contextos industriales y agrícolas.

Además de abordar las estrategias tradicionales y emergentes, este trabajo enfatiza la necesidad de colaboración interdisciplinaria y la alineación de estas intervenciones con los objetivos globales de sostenibilidad y seguridad alimentaria. La mitigación de micotoxinas no solo representa un desafío técnico, sino también una oportunidad para transformar los sistemas productivos hacia modelos más resilientes y responsables. De esta manera, este estudio busca aportar al diseño de soluciones innovadoras que fortalezcan la seguridad alimentaria y promuevan la sostenibilidad en las cadenas de suministro, con impacto positivo en la salud pública y el desarrollo económico.

Objetivos

Objetivo general

Analizar el uso de microorganismos en la reducción de la contaminación por micotoxinas en alimentos.

Objetivos específicos

Identificar los mecanismos de acción de los microorganismos reductores de micotoxinas en alimentos.

Determinar las estrategias biotecnológicas empleadas en el uso de microorganismos para la reducción de micotoxinas en alimentos.

Plantear investigaciones futuras que permitan optimizar el uso de microorganismos en la mitigación de micotoxinas en alimentos.

Metodología

Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico se realizó utilizando la base de datos Scopus, propiedad de Elsevier, con el propósito de identificar las tendencias científicas en el uso de micotoxinas, adsorbentes y agentes aplicados en alimentos, específicamente relacionados con los hongos *Aspergillus Penicillium* y *Fusarium*. Para ello, se empleó el siguiente algoritmo de búsqueda: *[mycotoxin] OR [adsorbent] OR [agent, food] AND [aspergillus AND penicillum AND fusarium]*, vinculando los términos a título, resumen y palabras clave. La búsqueda se efectuó en el periodo comprendido entre 2015 y 2025, arrojando un total de 937 documentos, los cuales fueron clasificados en diversas categorías según su tipo: artículos (674), revisiones (147), capítulos de libro (84), informes de conferencia (20), editoriales (5), pequeñas encuestas (3), cartas (2) y un libro (1).

Para garantizar la relevancia y la representatividad del análisis, se recopilaron datos como nombres de los autores, títulos, tipos de publicación, año, instituciones de filiación, país de edición, número de citas y tipo de acceso. La muestra incluyó documentos mayoritariamente en idioma inglés (895), seguidos por publicaciones en chino (10), español (10), ruso (8) y portugués (4). El análisis inicial permitió identificar las revistas más relevantes en el tema, las palabras clave con mayor frecuencia de aparición y los países con mayor influencia en la producción científica sobre micotoxinas y agentes adsorbentes en alimentos.

Los documentos analizados fueron publicados por autores afiliados a instituciones de 98 países, reflejando el alcance global del tema estudiado. Entre estos, 363 documentos (38,73%) están disponibles en acceso abierto, lo que facilita su consulta y reutilización. Los Estados Unidos lideraron la producción científica con 84 documentos, representando aproximadamente el 8,96% del total. Brasil ocupó el segundo lugar con 70 publicaciones, seguido de Italia con 67, India con 65 y España con 62 documentos. Completan el listado de los 10 países con mayor contribución: China (58), Austria (52), Nigeria (48), Reino Unido (47) y Egipto (43). Estos países no solo destacan por el volumen de publicaciones, sino también por su impacto en términos de citas y colaboraciones internacionales. La distribución completa de los 10 principales países se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Relación de Países y su influencia

País	Publicaciones
Estados Unidos	84
Brasil	70
Italia	67
India	65
España	62
China	58
Austria	52
Nigeria	48
Reino Unido	47
Egipto	43
Colombia	6

Fuente: Tomado de Scopus

La Tabla 2 presenta las 10 principales revistas que publicaron documentos sobre micotoxinas y agentes adsorbentes. Estas revistas reflejan el interés de la comunidad científica en el tema, con publicaciones distribuidas en diversos campos relacionados con la biotecnología alimentaria, microbiología y toxicología. La revista *Toxins* lidera el ranking con 64 documentos, seguida por el *International Journal of Food Microbiology* con 63 publicaciones. Ambas revistas destacan por su enfoque en alimentos, toxicología y microbiología, consolidándose como referentes en la temática estudiada. Otras revistas importantes incluyen *Mycopathologia* (26), el *Journal of the Science of Food and Agriculture* (19) y *Food Control* (19).

Tabla 2. Revistas con mayor influencia

Revista	Publicaciones
Toxins	64
International Journal of Food Microbiology	63
Mycopathologia	26
Journal of the Science of Food and Agriculture	19
Food Control	19
Mycotoxin Research	16
Journal of Food Protection	12
World Mycotoxin Journal	11
Food and Chemical Toxicology	10
Journal of Agricultural and Food Chemistry	8

Fuente: Tomado de Scopus

Es importante destacar que estas revistas abordan temas relacionados con biotecnología alimentaria, toxicología química, control de alimentos, y química agrícola, áreas fundamentales en el estudio de las micotoxinas y su control. Además, la distribución geográfica de estas publicaciones indica una fuerte presencia de revistas vinculadas a regiones líderes en investigación alimentaria, como Europa y los Estados Unidos, (Figura 1).

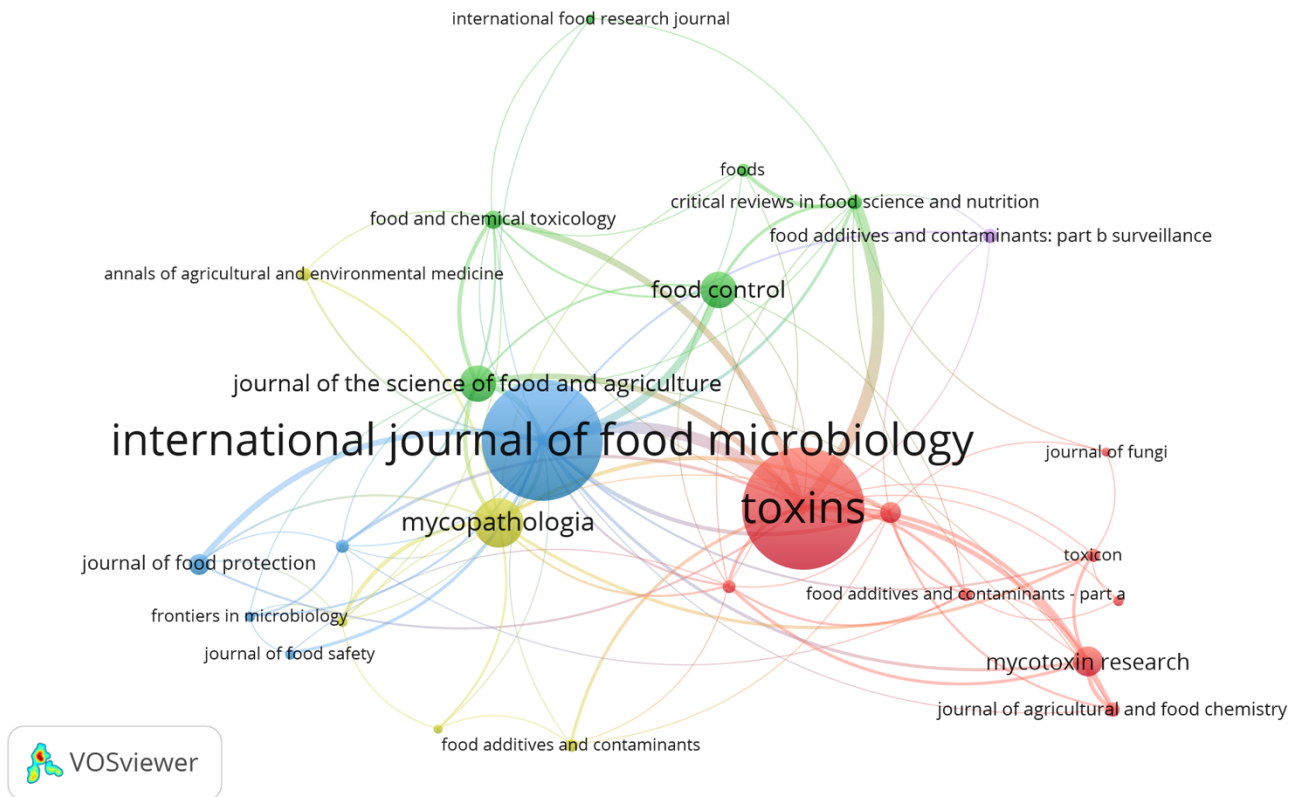


Figura 1. Revistas con mayor influencia

Fuente: Tomado de Scopus, Elaborado en VOS Viewer

El análisis de palabras clave, realizado mediante el software VOSviewer, permitió identificar los conceptos más relevantes en la literatura científica sobre micotoxinas y agentes adsorbentes. En la Figura 2 se muestra el mapa de coocurrencias generado, que agrupa los términos en diferentes clústeres representados por colores, según su proximidad semántica y frecuencia de aparición conjunta. Entre las palabras con mayor centralidad y frecuencia se destacan *mycotoxins*, *aflatoxins*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *foodsafety*, *aflatoxin* y *fumonisin*, lo que evidencia el enfoque predominante en hongos toxigénicos, toxinas específicas y su relación directa con la inocuidad alimentaria.

- **Clúster rojo**, donde *mycotoxins* es el nodo central, se asocia con términos como *food safety*, *detoxification*, *contamination*, *essential oils* y *antifungal activity*, reflejando un

enfoque en estrategias de control, preservación y riesgos para la salud.

- **Clúster verde** agrupa las principales toxinas estudiadas (*aflatoxins, fumonisins, ochratoxins, zearalenone, patulin*) junto con compuestos relacionados (*citirinin, ergot alkaloids*), evidenciando una orientación hacia la caracterización química y toxicología de micotoxinas.
- **Clúster azul** está compuesto por términos como *maize, soybean, Aspergillus flavus, Aspergillus niger* y *mycoflora*, lo cual sugiere una relación con matrices alimentarias específicas y especies fúngicas predominantes en la agricultura.
- **Clúster amarillo**, donde se agrupan *Aspergillus, Penicillium* y *Alternaria*, representa los hongos toxigénicos más comunes y su estudio en diversos contextos. Finalmente, otros términos como *biological control* y *mycology*, si bien se encuentran menos centralizados, indican líneas de estudio complementarias en el control y caracterización fúngica.

La Figura 2 ilustra claramente las relaciones entre los términos: el tamaño de los nodos representa la frecuencia con la que aparecen en la literatura, y las líneas de conexión indican coocurrencias significativas. Esta visualización permite evidenciar la estructura conceptual del campo, destacando su carácter multidisciplinario, donde convergen áreas como microbiología, seguridad alimentaria, toxicología y biotecnología aplicada.

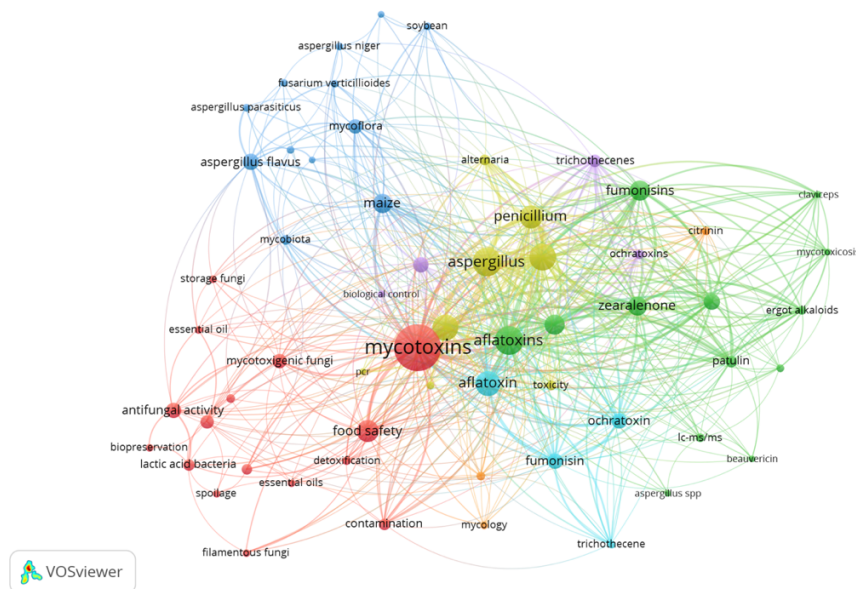


Figura 2. Palabras Clave

Fuente: Tomado de Scopus, Elaborado en VOS Viewer

Capítulo 1. Mecanismos de Acción de los Microorganismos en la Reducción de Micotoxinas

Micotoxinas

Mecanismos de acción

Las micotoxinas, metabolitos tóxicos de hongos como *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*, representan un riesgo para la salud y la seguridad alimentaria debido a su resistencia química y térmica (Ramos Girona et al., 2020). Su ingesta puede causar inmunosupresión, daños hepáticos y renales, además de efectos teratogénicos y cancerígenos. Las micotoxinas generan importantes pérdidas económicas en la industria alimentaria debido al rechazo de productos contaminados, restricciones comerciales y costos asociados a su monitoreo y control, unas de las micotoxinas más comunes podrían ser las *aflatoxinas*, *ocratoxinas*, *fumonisinias*, *zearalenona*, *patulina*.

Las micotoxinas abarcan una amplia variedad de compuestos tóxicos que afectan diversos alimentos de consumo humano y animal (Tabla 3):

Tabla 3. Tipos de micotoxinas y alimentos afectados

Micotoxinas	Alimentos afectados	Referencias
Aflatoxinas	Producidas principalmente por <i>Aspergillus flavus</i> y <i>Aspergillus parasiticus</i> . Estas toxinas suelen contaminar productos como el maíz, maní, nueces, higos y leche (a través de piensos contaminados), y son conocidas por su alta toxicidad hepática y su potencial cancerígeno.	(Shabeer et al., 2022).
Ocratoxinas	Generadas por <i>Aspergillus ochraceus</i> y <i>Penicillium verrucosum</i> , las ocratoxinas se encuentran en cereales, café, cacao, vino y frutas deshidratadas. Su consumo está relacionado con efectos nefrotóxicos y posibles riesgos cancerígenos.	(Ding et al., 2023).
Fumonisinias	Producidas por <i>Fusarium verticillioides</i> y <i>Fusarium proliferatum</i> . Estas toxinas afectan principalmente el maíz y sus derivados, y están asociadas con daños hepáticos y esofágicos en humanos y animales.	(Chen et al., 2021).

Micotoxinas	Alimentos afectados	Referencias
Zearalenona	Esta micotoxina producida por <i>Fusarium graminearum</i> contamina cereales como trigo, cebada, avena y maíz. Su estructura química similar a los estrógenos la convierte en un disruptor hormonal, afectando la función reproductiva tanto en animales como en humanos. En humanos, su exposición se ha asociado con alteraciones en el ciclo menstrual, pubertad precoz y otros efectos endocrinos.	(Han et al., 2022).
Patulina	Asociada a <i>Penicillium expansum</i> , afecta principalmente frutas como manzanas y peras, así como sus derivados, incluidos jugos y purés. Es conocida por su toxicidad aguda y efectos inmunosupresores.	(Bacha et al., 2023).

Fuente: Elaboración propia

La presencia de estas micotoxinas en alimentos representa una preocupación global debido a su impacto en la salud y el comercio internacional de productos alimentarios (Vargas Peralvo et al., 2024). En el contexto de la reducción de micotoxinas, se han investigado diversos hongos por su capacidad para interactuar con estas sustancias y mitigar su impacto, algunos de los géneros más relevantes incluyen *Saccharomyces*, *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Rhodotorula*.

El uso de hongos como agentes reductores de micotoxinas ofrece una vía prometedora para mejorar la inocuidad de los alimentos mediante mecanismos naturales y sostenibles (Piotrowska, 2021). el control de las micotoxinas en los alimentos y piensos constituye uno de los principales retos en la seguridad alimentaria a nivel global, diversos enfoques han sido desarrollados para mitigar la contaminación por estas sustancias tóxicas, y entre ellos, el uso de microorganismos ha emergido como una estrategia biotecnológica prometedora y sostenible. Los microorganismos presentan una variedad de mecanismos de acción que actúan directamente sobre las micotoxinas o modifican las condiciones ambientales y metabólicas para limitar su formación y acumulación, estos mecanismos abarcan desde la adsorción física de las micotoxinas en componentes de la pared celular de microorganismos, hasta la biodegradación enzimática que transforma las toxinas en compuestos menos tóxicos (Sun et al., 2023). Además, estrategias indirectas como la competencia biológica y la alteración del metabolismo del hospedador se han destacado por su capacidad para inhibir el crecimiento de hongos toxigénicos y la producción de micotoxinas (Envina Troncoso & Stiglich Fuentealba, 2021). La comprensión de estos

mecanismos no solo permite optimizar su aplicación en contextos industriales y agrícolas, sino que también abre nuevas posibilidades para el desarrollo de tecnologías innovadoras en el manejo de micotoxinas.

En las siguientes secciones, se detallarán los principales mecanismos de acción que los microorganismos utilizan para mitigar la presencia de micotoxinas, destacando sus fundamentos, aplicaciones y perspectivas futuras.

Adsorción física

La adsorción física constituye uno de los mecanismos más estudiados en el contexto de la interacción entre microorganismos y micotoxinas, este proceso implica la unión no covalente de las micotoxinas a la superficie celular de los microorganismos mediante interacciones electrostáticas, hidrofóbicas o de enlace de Van der Waals (Romera Garcia, 2021). Los microorganismos, especialmente levaduras y bacterias, han demostrado poseer componentes estructurales en sus paredes celulares que desempeñan un papel clave en la captura y retención de micotoxinas, reduciendo así su biodisponibilidad en matrices alimentarias y disminuyendo los riesgos asociados a su consumo.

Es importante destacar que la eficacia de la adsorción física está influenciada por diversos factores que determinan la interacción entre las micotoxinas y las superficies microbianas. Variables como el pH del medio, la temperatura, la composición química del entorno y la estructura de la pared celular de los microorganismos juegan un papel fundamental en la capacidad de captura de micotoxinas (Valdivia Aranda, 2023). Estas condiciones no solo afectan la afinidad de las micotoxinas por los sitios de unión microbianos, sino que también modulan la estabilidad de las interacciones involucradas en el proceso de adsorción. Comprender y optimizar estos factores es esencial para maximizar la efectividad de esta estrategia en la reducción de micotoxinas en matrices alimentarias.

pH

El pH del medio no solo influye en las propiedades electrostáticas e iónicas, sino que también impacta indirectamente en la estabilidad estructural de las paredes celulares microbianas y en la conformación tridimensional de los sitios activos responsables de la adsorción. Por ejemplo, en ambientes con pH extremo (por debajo de 3 o por encima de 9), estas estructuras pueden

desestabilizarse, reduciendo la eficacia del proceso de adsorción. Los enlaces hidrofóbicos pueden debilitarse, disminuyendo la eficacia en la captura de micotoxinas como las aflatoxinas, que dependen de interacciones de este tipo. En cambio, un pH óptimo mantiene la estructura intacta y funcional de los componentes clave, como los β -glucanos en levaduras, maximizando las interacciones con micotoxinas específicas (Valdivia Aranda, 2023).

El pH del medio no solo influye en las interacciones electrostáticas que facilitan la adsorción física de las micotoxinas a las paredes celulares microbianas, sino que también puede modificar las propiedades de los componentes estructurales responsables de este proceso. Por ejemplo, en microorganismos como las bacterias ácido-lácticas, un pH en el rango de 4 a 6 potencia la carga de las manoproteínas y β -glucanos en sus paredes celulares, optimizando su capacidad de adsorción (Peles et al., 2021). Estas condiciones también pueden crear un entorno menos favorable para la biodisponibilidad de micotoxinas, reforzando el papel de estos microorganismos como agentes adsorbentes efectivos.

La capacidad de ciertos microorganismos, como *Saccharomyces cerevisiae*, para adaptarse a fluctuaciones de pH en matrices fermentadas es un factor clave que amplía su rango de aplicación en distintos productos alimenticios. Esta adaptabilidad permite que estos microorganismos mantengan su eficacia como agentes adsorbentes incluso en condiciones variables, como las que se encuentran en entornos industriales reales, donde el pH puede cambiar significativamente según el alimento y los procesos involucrados. Además, investigaciones recientes han demostrado que ajustar el pH del medio de cultivo no solo mejora la capacidad de adsorción de ciertas cepas, sino que también puede servir como una estrategia para seleccionar microorganismos más eficientes y específicos en la captura de micotoxinas. Estas adaptaciones y estrategias son fundamentales para optimizar el control de micotoxinas en contextos agrícolas y alimentarios (Xu et al., 2023).

Temperatura

La temperatura influye directamente en la eficiencia de la adsorción física de micotoxinas, ya que afecta tanto la integridad estructural de las paredes celulares microbianas como las interacciones moleculares involucradas en este proceso. En microorganismos como *Bacillus subtilis*, las temperaturas moderadas preservan la fluidez y funcionalidad de las membranas celulares, lo que facilita una mayor

disponibilidad de sitios de unión para las micotoxinas. Además, estas condiciones térmicas optimizan las interacciones electrostáticas e hidrofóbicas que caracterizan la adsorción física, incrementando la retención de toxinas en las superficies microbianas. Por otro lado, la formación de biopelículas microbianas, que pueden actuar como una extensión de las superficies adsorbentes, también depende de temperaturas óptimas que favorecen su estabilidad y capacidad de captura. Estos efectos destacan cómo el control de la temperatura puede potenciar significativamente el rendimiento de la adsorción física en contextos alimentarios (Bakshi et al., 2020).

Por otro lado, la tolerancia térmica de los microorganismos puede influir en su aplicación en diferentes contextos industriales. Mientras que algunas cepas de levaduras, como *Saccharomyces cerevisiae*, son resistentes a variaciones térmicas y conservan su capacidad de adsorción en un rango amplio de temperaturas, otras bacterias, como las ácido-lácticas, muestran una reducción significativa en su actividad fuera de su rango térmico óptimo. La temperatura también afecta la dinámica del medio circundante. Por ejemplo, incrementos leves en la temperatura pueden reducir la viscosidad del medio, facilitando la difusión de micotoxinas hacia los sitios de adsorción. Sin embargo, temperaturas excesivamente altas pueden conducir a la desnaturalización de proteínas estructurales y enzimáticas, limitando la eficacia del proceso (Patel et al., 2023).

Por último, los estudios sobre la interacción entre temperatura y otros factores, como el pH y la composición del medio, han demostrado que el control simultáneo de estas variables puede maximizar la eficiencia de los microorganismos en aplicaciones de biocontrol y mitigación de micotoxinas, asegurando resultados consistentes en condiciones variables (Bakshi et al., 2020; Patel et al., 2023).

Composición del Medio

La composición del medio no solo influye en las interacciones entre micotoxinas y superficies microbianas, sino que también afecta directamente la viabilidad y actividad metabólica de los microorganismos. Por ejemplo, medios ricos en carbohidratos simples pueden promover un crecimiento más rápido de microorganismos beneficiosos para la adsorción de micotoxinas, pero al mismo tiempo generar productos secundarios que alteren las propiedades del medio, reduciendo la eficacia en la adsorción de micotoxinas. Por otro lado, compuestos como los polisacáridos pueden actuar como agentes protectores para las células microbianas, estabilizando sus propiedades

funcionales frente a fluctuaciones en la fuerza iónica del entorno. La presencia de compuestos competidores no solo interfiere directamente en los sitios de unión, sino que también puede modificar las características químicas de las micotoxinas, alterando su carga o polaridad y reduciendo su afinidad por las superficies celulares. Por ejemplo, las proteínas en solución pueden unirse a las micotoxinas formando complejos, lo que disminuye la disponibilidad de estas para ser adsorbidas por microorganismos como *Saccharomyces cerevisiae* (Juárez-Maldonado et al., 2021).

Además, la interacción de cationes y aniones presentes en el medio puede influir en las propiedades de la pared celular microbiana. En *Lactobacillus rhamnosus*, los cationes divalentes como el calcio pueden estabilizar la estructura de los ácidos lipoteicoicos, mejorando la afinidad por ciertas micotoxinas en condiciones específicas de pH y temperatura. Sin embargo, en concentraciones excesivas, estos mismos iones pueden saturar los sitios de unión disponibles, disminuyendo la capacidad de adsorción. Por otro lado, la fuerza iónica del medio puede afectar la interacción electrostática entre las micotoxinas y las células microbianas. Un medio con alta fuerza iónica puede reducir la efectividad de la adsorción al debilitar las interacciones entre cargas opuestas, mientras que un medio con baja fuerza iónica puede intensificar estas interacciones, favoreciendo la unión de micotoxinas como las aflatoxinas (Mabagala & Mng'ong'o, 2022).

Finalmente, la composición del medio también puede influir en la expresión de factores estructurales y enzimáticos clave para los procesos de adsorción y biodegradación. Por ejemplo, medios enriquecidos con fuentes específicas de nitrógeno o fósforo pueden estimular la producción de enzimas degradadoras de micotoxinas en hongos como *Trichoderma spp.*, aumentando su capacidad para reducir la toxicidad de estas sustancias en matrices alimentarias (Mabagala & Mng'ong'o, 2022).

Estructura y Composición de la Pared Celular

La estructura y composición de la pared celular microbiana son determinantes clave de su capacidad para adsorber micotoxinas, ya que dictan la disponibilidad y naturaleza de los sitios de unión. La variabilidad en la arquitectura de la pared celular entre especies microbianas, como las diferencias en el tipo y la cantidad de polisacáridos, lípidos y proteínas, influye directamente en su capacidad de adsorción. Por ejemplo, los microorganismos con paredes celulares ricas en manoproteínas o ácidos teicoicos exhiben un mayor potencial de unión debido a la abundancia de

grupos funcionales, como amino (-NH₂), carboxilo (-COOH), hidroxilo (-OH) y fosfato (-PO₄³⁻), capaces de formar interacciones electrostáticas e hidrofóbicas con las micotoxinas. Adicionalmente, las paredes celulares con un alto contenido lipídico pueden facilitar interacciones hidrofóbicas, especialmente relevantes para micotoxinas como las aflatoxinas, que poseen regiones hidrofóbicas prominentes (Awuchi et al., 2021).

La complejidad de la pared celular también contribuye a su eficacia; los microorganismos con paredes celulares multicapa o estructuralmente intrincadas suelen ser más efectivos en la adsorción de toxinas, ya que ofrecen una mayor superficie y una diversidad de sitios de unión. Además, la integridad y organización de la pared celular son factores críticos, ya que las alteraciones o deficiencias en sus componentes pueden comprometer el proceso de adsorción. Como destaca (Kihal, 2022). Las especies con estructuras de pared celular complejas demuestran capacidades superiores para la unión de micotoxinas, lo que las hace ventajosas en aplicaciones dirigidas a mitigar la presencia de toxinas. Diseñar cepas microbianas con composiciones optimizadas de pared celular podría representar una estrategia prometedora para mejorar la eficiencia de adsorción, particularmente en matrices alimentarias complejas o bajo condiciones ambientales desafiantes.

La pared celular de los microorganismos, en particular de las levaduras y bacterias Grampositivas, es una estructura altamente organizada y funcional que facilita el proceso de adsorción, en levaduras como *Saccharomyces cerevisiae*, los componentes principales responsables de la adsorción son los β-glucanos, las manoproteínas y otros polisacáridos complejos, estos biopolímeros presentan grupos funcionales que interactúan directamente con las micotoxinas mediante enlaces de baja energía, como interacciones iónicas o hidrofóbicas, por ejemplo, los β-glucanos contienen cadenas laterales de glucosa que pueden establecer enlaces con compuestos hidrofóbicos como las aflatoxinas, atrapándolas en una matriz insoluble (Rodríguez et al., 2023). En el caso de las bacterias Grampositivas, su pared celular está compuesta predominantemente por peptidoglicano, ácidos teicoicos y lipoteicoicos, los cuales proporcionan cargas negativas o hidrofóbicas dependiendo del entorno, estas características permiten la captura de micotoxinas como la zearalenona o las fumonisinas a través de interacciones electrostáticas, especialmente en condiciones de pH que favorecen la carga opuesta entre la micotoxina y la superficie bacteriana (Fruhauf et al., 2024).

A pesar de la eficacia demostrada de la adsorción física en la captura de micotoxinas, este

mecanismo enfrenta varios retos importantes que limitan su aplicación a gran escala. Uno de los principales desafíos es garantizar la estabilidad y eficiencia de los microorganismos adsorbentes en condiciones industriales, donde las variaciones en el pH, la temperatura y la composición del medio pueden afectar la integridad estructural de sus paredes celulares y, por ende, su capacidad de adsorción, (Zdravec et al., 2022). Además, la presencia de compuestos competidores, como proteínas o lípidos en las matrices alimentarias, puede interferir con los sitios de unión disponibles en los microorganismos, reduciendo la eficacia del proceso. Otro reto significativo es la selección de cepas con una alta especificidad y capacidad de adsorción para diferentes tipos de micotoxinas, lo que requiere una caracterización exhaustiva de los microorganismos y sus mecanismos de acción (Ndiaye et al., 2022).

Finalmente, la integración de este método en sistemas de producción industrial plantea desafíos relacionados con la viabilidad económica y la aceptación regulatoria, lo que subraya la necesidad de desarrollar tecnologías complementarias y estrategias optimizadas para superar estas limitaciones.

Biodegradación enzimática

La biodegradación enzimática representa un mecanismo biológico crucial mediante el cual los microorganismos transforman micotoxinas tóxicas en compuestos no tóxicos o de menor toxicidad. Este proceso involucra a microorganismos como bacterias, hongos y levaduras que actúan directamente sobre las micotoxinas a través de enzimas que catalizan reacciones químicas dirigidas a la estructura molecular de las toxinas. La biodegradación enzimática es altamente efectiva para reducir la contaminación por micotoxinas en matrices alimentarias y piensos, lo que la convierte en una estrategia prometedora para garantizar la seguridad alimentaria (Nahle et al., 2022).

Este mecanismo se basa en el reconocimiento específico de las micotoxinas por parte de enzimas microbianas, que actúan sobre enlaces clave en sus estructuras químicas, como los enlaces éster, epóxido, amida o glicosídico. Al romper o modificar estos enlaces, las enzimas transforman las micotoxinas en compuestos menos tóxicos o más fácilmente eliminables, reduciendo su impacto en la seguridad alimentaria. Las micotoxinas son compuestos químicos complejos con grupos funcionales que determinan su toxicidad y estabilidad. Las enzimas microbianas alteran estos grupos funcionales al romperlos o modificarlos, reduciendo así las propiedades tóxicas de las micotoxinas. Por ejemplo, en el caso de las aflatoxinas, compuestos extremadamente estables y tóxicos, las enzimas oxidativas producidas por microorganismos como *Aspergillus flavus* catalizan reacciones que disminuyen su

toxicidad, transformándolas en metabolitos menos reactivos (Subagia et al., 2024). Los principales tipos de enzimas implicadas en la biodegradación de micotoxinas se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Enzimas implicadas en la biodegradación de micotoxinas y sus funciones

Enzimas	Definición	Referencias
Oxidasa	Estas enzimas, como las lacasas y peroxidasas, catalizan la oxidación de compuestos orgánicos mediante la transferencia de electrones. Las lacasas, producidas por hongos como <i>Trametes versicolor</i> , son especialmente eficaces en la degradación de aflatoxinas y ocratoxinas.	(Urlacher & Koschorreck, 2021).
Esterasa	Actúan sobre enlaces éster en las micotoxinas, rompiendo su estructura y generando compuestos menos tóxicos. Las esterases bacterianas han demostrado eficacia en la degradación de zearalenona, un disruptor hormonal frecuente en cereales.	(Larsbrink & Lo Leggio, 2023).
Expóxido Hidrolasa	Estas enzimas son clave en la detoxificación de micotoxinas como las fumonisinas, al romper los grupos epóxido responsables de su toxicidad.	(Gautheron & Jéru, 2021).
Desmetilasa	Enzimas responsables de eliminar grupos metilo de las micotoxinas, reduciendo su capacidad de interacción con macromoléculas biológicas. Son eficaces contra compuestos como las ocratoxinas.	(Wang et al., 2020).
Proteasa	Capaces de degradar micotoxinas peptídicas mediante la hidrólisis de enlaces peptídicos. Estas enzimas tienen aplicaciones potenciales en alimentos como la leche, productos cárnicos y los derivados de soja que pueden estar contaminados.	(Solanki et al., 2021).

Fuente: Elaboración propia

Los mecanismos de acción enzimática para la biodegradación de micotoxinas siguen un proceso bien definido que consta de tres pasos fundamentales, como se pueden observar en la Figura 3.

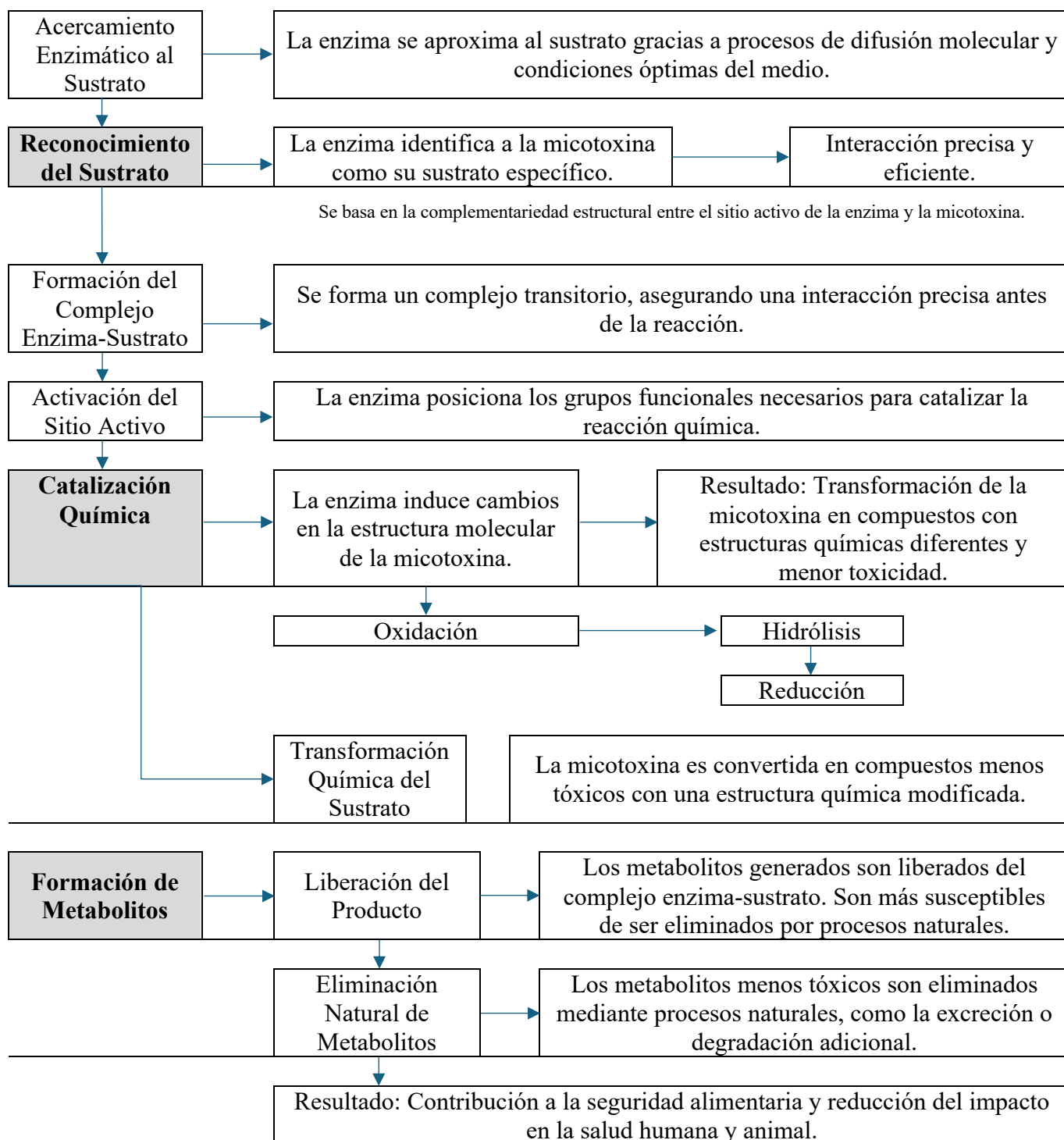


Figura 3. Mecanismos Enzimáticos para la Biodegradación de Micotoxinas

Fuente: Elaboración propia

La biodegradación enzimática de micotoxinas está influenciada por diversos factores que afectan directamente la eficiencia del proceso, las condiciones ambientales, como la temperatura, el pH y la concentración de oxígeno, desempeñan un papel crucial, ya que cada enzima tiene un rango óptimo de condiciones en las que opera con máxima eficacia, alteraciones en estos parámetros pueden reducir significativamente la actividad enzimática, además, la presencia de inhibidores, como metales pesados o productos secundarios generados durante el proceso, puede interferir con la acción de las enzimas, limitando su capacidad para degradar las micotoxinas, por último, la concentración de micotoxinas en el medio también es un factor determinante, ya que niveles elevados pueden saturar los sitios activos de las enzimas, disminuyendo la velocidad de biodegradación y, en consecuencia, la eficiencia del proceso, estos factores subrayan la importancia de optimizar las condiciones de aplicación para maximizar los beneficios de la biodegradación enzimática en la mitigación de micotoxinas (Navale et al., 2021)

Diversos hongos han demostrado un destacado potencial en la biodegradación enzimática de micotoxinas gracias a su capacidad para producir enzimas específicas, *Aspergillus niger* es uno de los más estudiados, conocido por la síntesis de lacasas y otras oxidorreductasas (Janusz et al., 2020). Que son altamente efectivas en la degradación de fumonisinas y ocratoxinas, particularmente en cereales contaminados, por su parte, los hongos del género *Trichoderma spp.* destacan por su producción de hidrolasas (Lima et al., 2024). Enzimas que transforman micotoxinas como la zearalenona y las aflatoxinas en compuestos menos tóxicos, convirtiéndose en herramientas clave para la reducción de estos contaminantes en ambientes agrícolas y alimentarios, la capacidad enzimática de estos hongos no solo los posiciona como agentes prometedores en el manejo de micotoxinas, sino que también resalta su importancia en aplicaciones de biotecnología alimentaria, al actuar directamente sobre las estructuras químicas de las toxinas, estos organismos contribuyen a mejorar la inocuidad alimentaria de manera sostenible, además, su habilidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales amplía las posibilidades de su implementación en sistemas industriales y de biocontrol, consolidando su papel como una solución innovadora en la gestión de micotoxinas.

Finalmente, este tipo de biodegradación ofrece un gran potencial para aplicaciones industriales, particularmente en el tratamiento de alimentos como cereales, frutos secos y productos lácteos, así como en piensos contaminados con micotoxinas, tecnologías avanzadas, como la inmovilización

enzimática, están siendo investigadas para mejorar la estabilidad y la reutilización de las enzimas en entornos industriales (Meneau Hernández et al., 2021). El avance en la comprensión de los mecanismos de acción enzimática y el desarrollo de técnicas innovadoras de ingeniería enzimática podrían favorecer la creación de soluciones más eficientes y sostenibles para mitigar la contaminación por micotoxinas, lo que contribuiría al fortalecimiento de la seguridad alimentaria.

La biodegradación enzimática, aunque altamente efectiva para transformar micotoxinas en compuestos menos tóxicos, enfrenta varios retos significativos en su implementación práctica. Uno de los desafíos principales es la estabilidad de las enzimas bajo condiciones industriales variables, como cambios en el pH, la temperatura y la presencia de inhibidores, que pueden reducir drásticamente su actividad catalítica, (Lyagin et al., 2022). Además, la especificidad de las enzimas para ciertas micotoxinas puede limitar su aplicabilidad en matrices alimentarias complejas, donde coexisten múltiples toxinas. La producción a gran escala de enzimas purificadas y su integración en sistemas de tratamiento también representa un desafío económico y técnico, especialmente en términos de costos de producción, almacenamiento y transporte. Otro aspecto crítico es la posibilidad de generar productos secundarios durante la biodegradación, cuya toxicidad residual debe evaluarse rigurosamente para garantizar la inocuidad alimentaria (Ji et al., 2023). Superar estos retos requiere avances en ingeniería enzimática, como la inmovilización de enzimas para mejorar su estabilidad y reutilización, así como estrategias innovadoras para reducir los costos de producción y garantizar su viabilidad comercial.

Competencia biológica

La competencia biológica es un mecanismo indirecto, pero altamente efectivo, para reducir la contaminación por micotoxinas en los alimentos (Braun et al., 2018). Este proceso ocurre en cualquier ecosistema microbiano, donde los microorganismos compiten por recursos limitados, como nutrientes, espacio y condiciones físico-químicas óptimas. La competencia se produce cuando un microorganismo impide el desarrollo de otro al ocupar los nichos ecológicos disponibles y utilizar los recursos necesarios para su crecimiento (Spadola et al., 2022). Esta interacción no solo regula la dinámica microbiana, sino que también puede limitar la actividad de organismos indeseables en un ecosistema dado.

En el caso de los hongos toxigénicos, los microorganismos beneficiosos implementan diversos mecanismos para limitar la producción de micotoxinas. En primer lugar, consumen rápidamente los

nutrientes esenciales del entorno, dejando a los hongos productores de micotoxinas con recursos insuficientes para su desarrollo. Además, algunos de estos microorganismos generan metabolitos antimicrobianos, como ácidos orgánicos, compuestos volátiles o bacteriocinas, que inhiben directamente el crecimiento de los hongos toxigénicos. También tienen la capacidad de modificar las condiciones del medio ambiente, alterando parámetros como el pH, la actividad del agua o las concentraciones de oxígeno (Cesa-Luna et al., 2020). Creando un ambiente hostil para estos hongos. Por último, estos microorganismos beneficiosos colonizan las superficies de los alimentos o los sustratos, ocupando físicamente el espacio e impidiendo la adhesión y proliferación de los hongos toxigénicos, lo que constituye una barrera efectiva contra la contaminación.

Diversos microorganismos han demostrado ser altamente efectivos en la competencia biológica contra hongos productores de micotoxinas, entre ellos, las bacterias del género *Bacillus* destacan por su capacidad para secretar metabolitos antimicrobianos como surfactinas y fengicinas (Memenza Zegara, 2023), que inhiben el crecimiento de hongos toxigénicos como *Aspergillus* y *Fusarium*, como se plasma en la Tabla 5.

Tabla 5. *Microorganismos y Mecanismos de Acción para el Control de Hongos Toxigénicos*

Microorganismo	Mecanismos de Acción	Hongos Toxigénicos Inhibidos	Aplicaciones Relevantes	Referencias
Bacterias ácido lácticas (<i>Lactobacillus</i> spp.)	<ul style="list-style-type: none"> - Generan ácidos orgánicos (ácido láctico, ácido acético). - Disminuyen el pH del medio, creando un ambiente inhóspito. 	<i>Aspergillus</i> y <i>Fusarium</i> productores de ocratoxinas y zearalenona.	Conservación de productos lácteos y fermentados.	(Castillo Martínez, 2022)
Hongos (<i>Trichoderma</i> spp.)	<ul style="list-style-type: none"> - Compiten agresivamente por espacio y nutrientes. - Secretan enzimas antifúngicas (quitinasas, glucanasas). - Producen compuestos volátiles inhibidores. 	<i>Fusarium</i> y <i>Penicillium</i> .	Control biológico en cultivos agrícolas, como cereales y leguminosas.	(Moyano Guillin, 2024)
Levaduras (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorben micotoxinas a través de componentes de la pared celular. - Compiten por nutrientes y espacio. 	Diversos hongos toxigénicos.	Producción de alimentos fermentados y biocontrol en granos.	(Sánchez Zaletas, 2020)

Microorganismo	Mecanismos de Acción	Hongos Toxigénicos Inhibidos	Aplicaciones Relevantes	Referencias
Bacterias (<i>Bacillus</i> spp.)	<ul style="list-style-type: none"> - Producen lipopeptidos antimicrobianos como surfactina y fengicina. - Alteran las condiciones ambientales desfavorables para hongos. 	<i>Aspergillus</i> y <i>Fusarium</i> .	Conservación de granos y control de hongos en suelos agrícolas.	(Cabrera Joja, 2024)
Actinobacterias (<i>Streptomyces</i> spp.)	<ul style="list-style-type: none"> - Secretan antibióticos naturales. - Liberan enzimas capaces de degradar micotoxinas y compuestos lignocelulósicos. 	<i>Fusarium</i> y <i>Penicillium</i> .	Aplicaciones en suelos agrícolas y en bioprocesos industriales.	(Burraroni & Jeon, 2021)

Fuente: Elaboración propia

Los mecanismos de interacción microbiana en la competencia biológica pueden ser simples o complejos, dependiendo de los microorganismos y el entorno en el que operan, entre los principales mecanismos se encuentra la inhibición directa mediante metabolitos secundarios, como la producción de ácido láctico por *Lactobacillus* spp, que genera un pH bajo capaz de inhibir el crecimiento de hongos como *Aspergillus ochraceus*, otro mecanismo destacado es la colonización de superficies, en el cual hongos como *Trichoderma* spp, forman biopelículas en granos almacenados, impidiendo la adhesión de hongos toxigénicos, asimismo, algunos microorganismos producen compuestos volátiles antimicrobianos, como los generados por *Bacillus subtilis*, que interfieren con procesos críticos de los hongos, como la esporulación (Ajmal et al., 2023), reduciendo así la propagación y formación de micotoxinas, estos mecanismos subrayan la complejidad y eficacia de las interacciones microbianas en el control biológico de contaminantes alimentarios.

La competencia biológica es un mecanismo indirecto, pero altamente efectivo, para reducir la contaminación por micotoxinas en los alimentos. Este proceso ocurre en cualquier ecosistema microbiano, donde los microorganismos compiten por recursos limitados, como nutrientes, espacio y condiciones físico-químicas óptimas (Peles et al., 2021). La competencia se produce cuando un microorganismo impide el desarrollo de otro al ocupar los nichos ecológicos disponibles y utilizar los recursos necesarios para su crecimiento. Esta interacción no solo regula la dinámica microbiana, sino

que también puede limitar la actividad de organismos indeseables en un ecosistema dado.

La eficacia de la competencia biológica depende de diversos factores clave. Las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad relativa y la disponibilidad de nutrientes, afectan directamente la dinámica competitiva entre los microorganismos, favoreciendo o limitando el crecimiento de ciertos grupos. Además, la naturaleza del sustrato desempeña un papel crucial, ya que la composición del alimento o del medio define qué microorganismos tienen una ventaja competitiva en ese entorno. Otro factor relevante es la concentración inicial de microorganismos beneficiosos, donde una densidad alta incrementa la probabilidad de desplazar efectivamente a los hongos toxigénicos (Nji et al., 2023). Por último, la compatibilidad microbiana es esencial, ya que las interacciones sinérgicas entre diferentes microorganismos pueden potenciar la eficacia del biocontrol, creando un entorno aún más hostil para los hongos productores de micotoxinas.

La competencia biológica se ha convertido en una estrategia ampliamente utilizada en biocontrol dentro de la industria alimentaria y agrícola, ofreciendo soluciones sostenibles y efectivas para mitigar la contaminación por micotoxinas. Entre sus aplicaciones más destacadas se encuentra el tratamiento de granos almacenados, donde hongos como *Trichoderma spp.* son empleados para proteger los granos de la colonización por *Fusarium* y *Aspergillus*. Otra aplicación relevante es la fermentación controlada, en la cual bacterias ácido lácticas son introducidas durante la fermentación de productos como el ensilaje, previniendo así la proliferación de hongos toxigénicos (J. Li et al., 2021). Además, la producción de biopelículas protectoras mediante levaduras y bacterias en superficies de alimentos constituye una barrera efectiva contra la contaminación fúngica.

En conclusión, la competencia biológica representa una herramienta prometedora para controlar la producción de micotoxinas, al aprovechar las interacciones naturales entre microorganismos. Su desarrollo y optimización podrían transformar significativamente las prácticas actuales de manejo de micotoxinas en las cadenas alimentarias y los sistemas de producción agrícola.

Alteración del metabolismo del hospedador

La alteración del metabolismo del hospedador es un mecanismo indirecto que se diferencia de los enfoques directos como la adsorción física o la biodegradación enzimática, ya que no actúa directamente sobre las micotoxinas. Este mecanismo opera mediante la modificación de los procesos

metabólicos internos del hospedador (como plantas, animales o sustratos alimentarios) y las condiciones específicas del entorno en el que se desarrollan, dificultando así la proliferación de hongos toxigénicos y la síntesis de micotoxinas (Angioni et al., 2022). Estas alteraciones incluyen alteraciones en rutas bioquímicas del hospedador y ajustes en factores como el pH o la disponibilidad de nutrientes, que generan un entorno menos propicio para los hongos productores de toxinas. Este enfoque complementa las estrategias directas al prevenir la formación de micotoxinas en lugar de eliminarlas una vez que ya están presentes.

Los microorganismos juegan un papel clave en este mecanismo mediante diversos procesos que limitan la producción de micotoxinas. Por ejemplo, algunas bacterias del género *Bacillus* producen compuestos bioactivos como surfactinas y fengicinas, que interfieren directamente con rutas biosintéticas fúngicas responsables de la producción de micotoxinas, como las aflatoxinas en hongos del género *Aspergillus*. Otro mecanismo importante es la competencia por cofactores esenciales para la síntesis de micotoxinas, como NADPH (*Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato*) o grupos hemo, donde microorganismos competidores consumen estos recursos, limitando su disponibilidad para los hongos toxigénicos. En el contexto agrícola, microorganismos beneficiosos como micorrizas o rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) inducen cambios hormonales en las plantas hospedadoras, incrementando compuestos como el ácido salicílico o el etileno (Bukhat et al., 2020). Estos cambios fortalecen las defensas naturales de las plantas, dificultando la colonización por hongos toxigénicos y reduciendo la producción de micotoxinas. En conjunto, estos mecanismos subrayan el potencial de los microorganismos para controlar de manera efectiva la contaminación por micotoxinas a través de la alteración metabólica del hospedador.

La actividad microbiana puede modificar significativamente las condiciones ambientales del hospedador, desincentivando así la producción de micotoxinas por parte de hongos toxigénicos, una de las estrategias clave es la alteración del pH del medio, lograda por microorganismos como *Lactobacillus spp.*, que producen ácidos orgánicos como el ácido láctico y el ácido acético, estas sustancias disminuyen el pH del entorno, lo que no solo inhibe el crecimiento de hongos, sino que también afecta la expresión de genes involucrados en la síntesis de micotoxinas, otro mecanismo importante es la reducción de la actividad del agua (aw), ya que ciertos microorganismos, al metabolizar los nutrientes presentes en el sustrato, disminuyen la humedad relativa del ambiente inmediato, esta condición limita la capacidad de los hongos para sintetizar micotoxinas, dado que

muchos de ellos requieren niveles elevados de aw para su producción activa; algunos microorganismos, como *Bacillus subtilis* y ciertas levaduras, generan compuestos volátiles antimicrobianos, como acetaldehído y ácido propanoico, que afectan la viabilidad de los hongos productores de micotoxinas (Josselin, 2023). Estas modificaciones ambientales inducidas por la actividad microbiana constituyen un enfoque prometedor para el control de micotoxinas en sistemas alimentarios y agrícolas.

Diversos microorganismos han demostrado su capacidad para alterar el metabolismo del hospedador, contribuyendo de manera indirecta a la reducción de la producción de micotoxinas. Entre ellos, las bacterias ácido lácticas BAL, como *Lactobacillus plantarum* y *Lactobacillus rhamnosus*, destacan por su doble acción: no solo reducen el pH del entorno, creando condiciones desfavorables para los hongos toxigénicos, sino que también producen compuestos bioactivos capaces de interferir con la síntesis de micotoxinas como las ocratoxinas y la zearalenona, por su parte, hongos no toxigénicos como *Trichoderma spp.* son altamente eficaces en la colonización de plantas hospedadoras, estimulando sus defensas naturales y disminuyendo significativamente la susceptibilidad a infecciones por hongos toxigénicos como *Fusarium*; las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, pertenecientes a géneros como *Pseudomonas* y *Azospirillum*, inducen la producción de compuestos antioxidantes y fitoalexinas en las plantas (Estevez Navarro, 2022), fortaleciendo su resistencia y limitando el desarrollo de hongos patógenos. Estos microorganismos ejemplifican el papel crucial de la microbiota en la protección de los sistemas agrícolas frente a la contaminación por micotoxinas.

La alteración del metabolismo del hospedador como estrategia para inhibir micotoxinas enfrenta diversos retos técnicos y biológicos que limitan su efectividad y aplicación a gran escala. Uno de los principales desafíos es la variabilidad en la respuesta metabólica de los hospedadores, que puede depender de factores como la especie, el estado de salud o las condiciones ambientales (Islam et al., 2024). Esto dificulta la estandarización de la estrategia y su implementación en sistemas agrícolas y alimentarios diversos. Además, la interacción entre los microorganismos beneficiosos y el hospedador no siempre resulta en un efecto positivo, ya que en algunos casos puede haber efectos secundarios no deseados, como la producción de metabolitos que alteren la calidad del alimento o el ambiente circundante. Otro obstáculo es la necesidad de comprender y controlar los mecanismos precisos por los cuales los microorganismos inducen cambios metabólicos, lo que requiere investigaciones exhaustivas y tiempo. La escalabilidad de esta estrategia también representa un reto, ya que su éxito depende de condiciones ambientales específicas y del uso de microorganismos adaptados a dichas condiciones

(Trienens et al., 2023). Superar estos desafíos implica invertir en investigación que permita una mayor comprensión de las interacciones metabólicas y desarrollar tecnologías para optimizar y personalizar esta estrategia en diferentes contextos industriales.

Evidencias científicas de los mecanismos

Los mecanismos microbianos para la reducción de micotoxinas en sistemas agrícolas y alimentarios han demostrado ser altamente efectivos y diversos. Entre estos mecanismos se incluyen la adsorción de micotoxinas, la biodegradación enzimática, la competencia biológica y la alteración de las condiciones del medio. Cada uno de ellos presenta características únicas que dependen de los microorganismos involucrados y de las condiciones ambientales específicas. La Tabla 6 resume estos mecanismos, los microorganismos que los implementan y los factores que influyen en su eficacia:

Tabla 6. Mecanismos Microbianos para la Reducción de Micotoxinas

Mecanismo de Acción	Microorganismo s Involucrados	Eficiencia y Factores Clave	Referencia
Adsorción de Micotoxinas	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorbe aflatoxinas mediante β-glucanos y manoproteínas en la pared celular. - Eficiencia mejorada en pH ácido. - Reduce la biodisponibilidad y toxicidad de micotoxinas en alimentos fermentados y granos. 	(Pires et al., 2024; Yiannikouris et al., 2021)
Biodegradación Enzimática	<i>Trichoderma</i> spp., <i>Bacillus</i> spp.	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Trichoderma</i> produce hidrolasas específicas para zearalenona y fumonisinas. - <i>Bacillus subtilis</i> genera compuestos volátiles que inhiben la esporulación de hongos toxigénicos. - Requiere temperaturas moderadas para óptima actividad enzimática. 	(Hamad, Mehany, et al., 2023; Mironenka et al., 2021)
Competencia Biológica	<i>Trichoderma</i> spp., <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Bacillus</i> spp.	<ul style="list-style-type: none"> - Compiten agresivamente por nutrientes y espacio ecológico. - <i>Trichoderma</i> coloniza superficies de alimentos, impidiendo la proliferación de <i>Fusarium</i> y <i>Aspergillus</i>. - Interacciones sinérgicas con otros microorganismos mejoran la eficacia. 	(Hamad, Mehany, et al., 2023; J. Li et al., 2021)
Alteración de Condiciones del Medio	<i>Bacillus</i> spp., <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Lactobacillus</i> spp.	<ul style="list-style-type: none"> - Ajustan pH y actividad del agua, creando ambientes hostiles para hongos toxigénicos. - Reducen oxígeno disponible en el medio. 	(Bzducha-Wróbel et al., 2024; Cesa-Luna et al., 2020)

Mecanismo de Acción	Microorganismos Involucrados	Eficiencia y Factores Clave	Referencia
		- Mejora la estabilidad en alimentos fermentados.	
Producción de Biopelículas Protectoras	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Lactobacillus</i> spp.	- Forman capas físicas en superficies de alimentos que dificultan la adhesión de hongos toxigénicos. - Mejoran la conservación de frutas, vegetales y granos almacenados.	(J. Li et al., 2021)
Producción de Metabolitos Antimicrobianos	<i>Bacillus</i> spp., <i>Lactobacillus</i> spp., <i>Trichoderma</i> spp.	- Secretan compuestos como ácidos orgánicos, bacteriocinas y enzimas hidrolíticas. - Inhiben directamente el crecimiento de <i>Penicillium</i> , <i>Fusarium</i> y <i>Aspergillus</i> .	(Hamad, Mehany, et al., 2023; Mironenka et al., 2021)

Fuente: Elaboración Propia

Capítulo 2. Estrategias Biotecnológicas Aplicadas al Uso de Microorganismos en Alimentos Contaminados con Micotoxinas

La presencia de micotoxinas en los sistemas alimentarios representa un desafío significativo para la seguridad alimentaria global, debido a sus efectos perjudiciales en la salud humana y animal. A medida que crece la conciencia sobre las limitaciones de los métodos convencionales para controlar estos compuestos tóxicos, las estrategias biotecnológicas han surgido como alternativas sostenibles y eficientes. Al aprovechar las capacidades naturales de los microorganismos, como bacterias, levaduras y hongos, estos enfoques buscan reducir los niveles de micotoxinas en los sistemas agrícolas y alimentarios. Este cambio hacia soluciones biotecnológicas resalta su importancia práctica para garantizar una producción alimentaria más segura y mitigar los riesgos de contaminación.

Clasificación de Estrategias Biotecnológicas

Las estrategias biotecnológicas representan enfoques innovadores y sostenibles para mitigar la presencia de micotoxinas en sistemas alimentarios y agrícolas. Estas estrategias aprovechan las capacidades naturales de microorganismos para adsorber, degradar y prevenir la acumulación de toxinas, garantizando la seguridad alimentaria. Entre las principales categorías se encuentran el biocontrol en almacenamiento, los consorcios microbianos, las formulaciones bioprotectoras, la alteración metabólica y el biocontrol directo. Estas categorías integran diversos mecanismos de acción que pueden aplicarse individualmente o de manera combinada, maximizando su eficacia en diferentes contextos. Como se observa en la Figura 4, estas estrategias se clasifican según sus características y enfoques principales, proporcionando un marco integral para su comprensión y desarrollo.

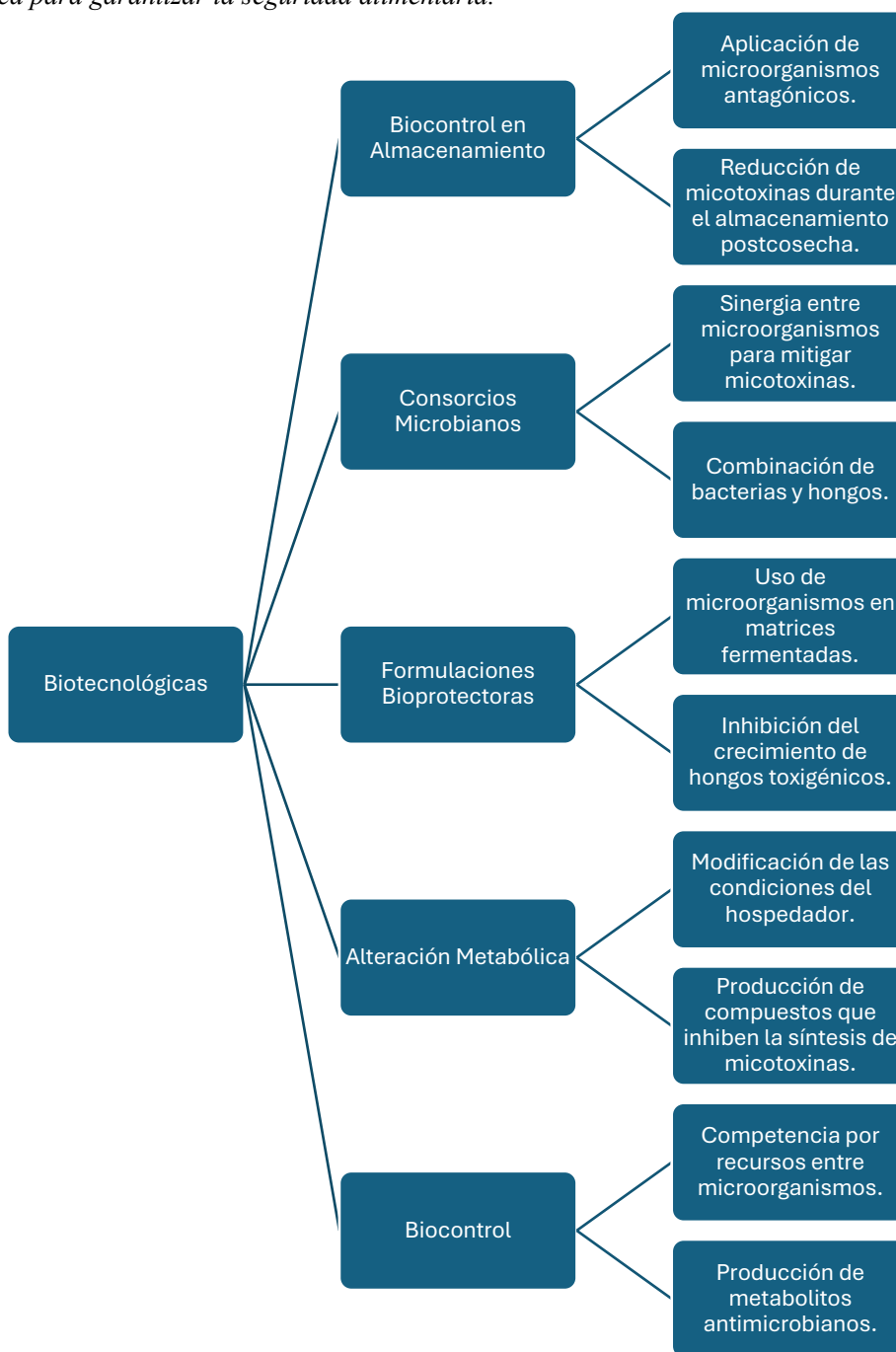


Figura 4. Clasificación de Estrategias Biotecnológicas Biocontrol en almacenamiento

Fuente: Elaboración propia

El biocontrol en almacenamiento se centra en la aplicación de microorganismos para crear condiciones desfavorables al desarrollo de hongos toxigénicos en los productos almacenados. Por ejemplo, *Bacillus subtilis* se utiliza en estrategias diseñadas específicamente para diferentes tipos de cultivos, ajustándose a factores como la duración del almacenamiento, los niveles de humedad y la

actividad del agua. Además, en muchos casos, estos microorganismos forman biopelículas protectoras que actúan como barreras físicas, bloqueando la colonización fúngica en la superficie de los alimentos. Estas aplicaciones permiten optimizar la eficacia del biocontrol en diversos escenarios, mejorando la inocuidad de los productos almacenados y reduciendo las pérdidas por contaminación fúngica (Coughlan et al., 2016).

También, puede combinarse con técnicas físicas o químicas para potenciar sus efectos. Por ejemplo, en sistemas de atmósfera controlada, donde el oxígeno se reduce al mínimo, la actividad de microorganismos como *Lactobacillus spp.* se ve favorecida, ya que producen ácidos orgánicos que disminuyen aún más el pH del entorno, inhibiendo el crecimiento de hongos. Esta estrategia también puede aplicarse a través de la encapsulación de microorganismos en matrices biodegradables, lo que permite una liberación controlada de agentes activos durante períodos prolongados. En estudios recientes como el de Maurya et al., (2024) estas combinaciones han demostrado ser especialmente efectivas en granos y frutas almacenadas a gran escala, minimizando las pérdidas económicas asociadas con la contaminación por micotoxinas.

Esta estrategia representa una manera sostenible y eficaz para mitigar la contaminación de granos y otros productos alimenticios por micotoxinas durante el almacenamiento postcosecha. Este enfoque aprovecha las propiedades antagónicas naturales de los microorganismos para inhibir el crecimiento de hongos toxigénicos, como *Fusarium* y *Aspergillus*, los cuales prosperan bajo condiciones de almacenamiento caracterizadas por alta humedad y fluctuaciones de temperatura (Habschied et al., 2021). A diferencia de los fungicidas químicos, el biocontrol ofrece una alternativa más segura, minimizando los riesgos ambientales y garantizando el cumplimiento de los estándares de seguridad alimentaria. La aplicación de microorganismos, ya sea de forma individual o en consorcios, ha demostrado un potencial significativo para mejorar la conservación de granos y reducir las pérdidas económicas asociadas con la contaminación por micotoxinas.

Entre los microorganismos clave involucrados en el biocontrol se encuentran *Trichoderma spp.* y *Bacillus spp.*, ambos con mecanismos de acción complementarios. *Trichoderma spp.* es particularmente efectivo debido a su capacidad para colonizar las superficies de los granos, compitiendo con los hongos toxigénicos por espacio y nutrientes (Shabeer et al., 2021). Además, secreta enzimas antifúngicas como quitinasas y glucanasas, que degradan las paredes celulares de los

hongos, limitando su capacidad de crecimiento y producción de micotoxinas. Por otro lado, *Bacillus spp.* contribuye mediante la producción de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y lipopeptidos que inhiben la germinación y el crecimiento de esporas fúngicas, así como mediante la modificación del entorno de almacenamiento para crear condiciones desfavorables para la proliferación fúngica (Al-Mutar et al., 2023).

La integración del biocontrol en las prácticas de almacenamiento ha demostrado su potencial para reducir significativamente la contaminación por micotoxinas, alineándose al mismo tiempo con los objetivos globales de sostenibilidad (Sellitto et al., 2021). Los estudios sugieren que el uso de consorcios microbianos, que combinan especies como *Trichoderma* y *Bacillus*, mejora la eficacia del biocontrol al dirigir un espectro más amplio de especies fúngicas y estabilizar parámetros ambientales como el pH y la actividad del agua (Govardhan Rao et al., 2024). Estos hallazgos destacan la viabilidad del biocontrol como un pilar de los sistemas de manejo postcosecha, ofreciendo una solución escalable y ecológica para mejorar la seguridad y la inocuidad alimentaria. La Tabla 7 presenta ejemplos concretos de la aplicación del biocontrol en almacenamiento y sus resultados en diferentes productos.

Tabla 7. Aplicaciones del Biocontrol en Almacenamiento en Diferentes Productos

Producto	Microorganismos Utilizados	Estrategia de Aplicación	Resultados Obtenidos	Referencias
Cereales (maíz)	<i>Trichoderma spp.</i>	Aplicación directa de esporas en los granos almacenados y tratamiento previo con formulaciones líquidas para mejorar la colonización.	Reducción significativa de <i>Fusarium</i> y sus micotoxinas, manteniendo la calidad del grano durante el almacenamiento.	(Al-Mutar et al., 2023)
Frutas frescas	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Pulverización de suspensiones celulares sobre la superficie de las frutas antes de la etapa de refrigeración.	Inhibición del crecimiento de <i>Penicillium spp.</i> y reducción de pérdidas postcosecha debido a hongos patógenos.	(J. Li et al., 2021)
Lácteos fermentados	<i>Lactobacillus plantarum</i>	Incorporación en el proceso de fermentación mediante cultivos iniciadores diseñados para competir con hongos toxigénicos.	Disminución de micotoxinas como la <i>Ocratoxina A</i> , manteniendo las propiedades sensoriales y nutricionales del producto.	(Farkas et al., 2022)

Producto	Microorganismos Utilizados	Estrategia de Aplicación	Resultados Obtenidos	Referencias
Granos almacenados	<i>Bacillus subtilis</i>	Introducción de esporas durante la etapa de almacenamiento, combinada con la reducción de humedad y control de temperatura en los silos.	Formación de biopelículas protectoras y reducción del desarrollo de <i>Aspergillus flavus</i> , mejorando la estabilidad del grano durante largos períodos.	(Habschied et al., 2021)

Fuente: Elaboración propia

Consortios Microbianos

Los consorcios microbianos representan una estrategia biotecnológica innovadora en la que se combinan diversos microorganismos, incluidas bacterias y hongos, para mitigar de manera sinérgica la presencia de micotoxinas en los sistemas agrícolas. Este enfoque aprovecha las interacciones naturales entre microorganismos para establecer ecosistemas resilientes que suprimen el crecimiento de hongos toxigénicos al tiempo que promueven la salud y productividad de las plantas. Al emplear consorcios microbianos, se pasa de mecanismos individuales a un sistema integrado que combina múltiples modos de acción, mejorando la efectividad general del control de micotoxinas (Piotrowska, 2021).

Los actores clave en los consorcios microbianos incluyen bacterias como *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp., que producen compuestos antimicrobianos y compiten por recursos, y hongos como *Trichoderma* spp., que secretan enzimas que degradan las paredes celulares fúngicas y colonizan los sistemas radiculares de las plantas (Efremenko et al., 2024). Estos microorganismos trabajan en conjunto para crear un entorno hostil para los hongos toxigénicos, como *Fusarium* y *Aspergillus*, compitiendo por espacio, nutrientes y otros nichos ecológicos. Cuando la estrategia se aplica en cultivos agrícolas, los consorcios microbianos se introducen en la rizosfera, donde modifican las condiciones del suelo, mejoran su estructura, optimizan la disponibilidad de nutrientes y fortalecen la resistencia de las plantas frente a factores de estrés (Y. Wang et al., 2023). Estas acciones reducen indirectamente la incidencia de hongos productores de micotoxinas en las etapas previas a la cosecha. Por otro lado, en alimentos almacenados, los consorcios se utilizan mediante la aplicación directa de microorganismos en las superficies o matrices alimentarias, formando biopelículas protectoras y compitiendo eficazmente con hongos toxigénicos para minimizar la contaminación. De este modo, la estrategia se adapta tanto al manejo de cultivos como al control postcosecha.

La eficacia de los consorcios microbianos radica en su capacidad para abordar múltiples aspectos del manejo de micotoxinas. Los estudios demuestran que la combinación de microorganismos con propiedades complementarias puede mejorar significativamente la estabilidad y eficacia de las medidas de biocontrol. Por ejemplo, los consorcios de *Bacillus spp.* y *Trichoderma spp.* han demostrado resultados superiores en la reducción del crecimiento fúngico y la acumulación de micotoxinas en cultivos como maíz y trigo (Poveda & Eugui, 2022). Este enfoque integrado no solo reduce la dependencia de fungicidas químicos, sino que también se alinea con prácticas agrícolas sostenibles, ofreciendo una solución ecológica y escalable para mitigar la contaminación por micotoxinas mientras se fomenta la resiliencia del ecosistema. La Tabla 8, muestra los resultados obtenidos con el uso de consorcios microbianos en distintos productos, destacando su efectividad y mecanismos de acción

Tabla 8. Aplicaciones de Consorcios Microbianos en Diferentes Productos

Producto	Microorganismos del Consorcio	Cómo Ayuda el Consorcio	Resultados Observados	Cómo se aplica la estrategia	Referencias
Maíz	<i>Trichoderma spp.</i> , <i>Bacillus spp.</i>	Competencia por nutrientes y producción de compuestos antifúngicos.	Reducción del 85% en fumonisinas y mejora en la calidad de almacenamiento.	Aplicación de esporas en el suelo durante el cultivo o en granos durante el almacenamiento.	(Poveda & Eugui, 2022)
Trigo	<i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Trichoderma spp.</i>	Degradación enzimática y colonización de superficies para inhibir hongos.	Inhibición del crecimiento de <i>Fusarium spp.</i> y reducción significativa de zearalenona.	Inoculación de cultivos en semillas o aplicación directa sobre las plantas durante el crecimiento.	(H. Liu et al., 2022)
Manzanas	<i>Lactobacillus spp.</i> , <i>Saccharomyces spp.</i>	Modificación del pH y secreción de metabolitos antimicrobianos.	Disminución del 70% en ocratoxinas mediante competencia biológica.	Pulverización de suspensiones microbianas sobre la superficie de las manzanas antes del almacenamiento.	(Mateo et al., 2023)
Alimentos fermentados	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Lactobacillus rhamnosus</i>	Adsorción de micotoxinas y mejora en la estabilidad microbiológica	Adsorción de micotoxinas y mejora en la estabilidad microbiológica del producto.	Inclusión de cultivos microbianos como parte del proceso de fermentación.	(Jiang et al., 2021)

Fuente: Elaboración Propia

Formulaciones Bioprotectoras

Las formulaciones bioprotectoras implican la aplicación de microorganismos beneficiosos en matrices alimenticias fermentadas para inhibir el crecimiento de hongos toxigénicos y reducir la contaminación por micotoxinas (Barbieri, 2023). Este enfoque biotecnológico aprovecha la capacidad de ciertas bacterias y levaduras para modificar el microambiente dentro de los sistemas alimentarios, creando condiciones hostiles para la proliferación de hongos. Al integrar estos microorganismos en el proceso de fermentación, las formulaciones bioprotectoras no solo mejoran la seguridad alimentaria, sino que también prolongan la vida útil de los productos perecederos.

Los microorganismos clave utilizados en formulaciones bioprotectoras incluyen *Lactobacillus spp.*, *Saccharomyces cerevisiae* y *Pediococcus spp.* Estos organismos desempeñan múltiples funciones dentro de las matrices alimenticias, como la producción de ácidos orgánicos (por ejemplo, ácido láctico y acético) que disminuyen el pH, creando condiciones desfavorables para el crecimiento de hongos (Mateo et al., 2023). Además, estos microorganismos liberan compuestos antimicrobianos, como bacteriocinas y VOCs, que inhiben directamente a hongos toxigénicos como *Aspergillus* y *Penicillium*. La presencia de estos microorganismos protectores también reduce la actividad del agua, limitando aún más la proliferación fúngica.

El éxito de las formulaciones bioprotectoras es evidente en diversas aplicaciones, como productos lácteos fermentados, cereales y ensilajes. Por ejemplo, la incorporación de *Saccharomyces cerevisiae* en matrices lácteas fermentadas ha demostrado reducir significativamente la acumulación de aflatoxinas (Jiang et al., 2021). De manera similar, el uso de *Lactobacillus plantarum* en la producción de ensilaje se realiza mediante la adición directa de cultivos vivos durante el proceso de ensilado. Este microorganismo se introduce en forma líquida o liofilizada y, en algunos casos, encapsulado para garantizar su estabilidad y liberación gradual. Su aplicación ayuda a promover un ambiente ácido que inhibe eficazmente el crecimiento de especies de *Fusarium*, preservando la calidad nutricional del alimento y prolongando su vida útil (Kumar et al., 2022).

Estudios como el de (Pinheiro et al., 2020), han demostrado el potencial de microorganismos

como *Saccharomyces cerevisiae* para adsorber aflatoxinas en matrices alimentarias contaminadas, por ejemplo, sistemas lácteos han mostrado que la adición de levaduras ricas en β -glucanos puede reducir la concentración de micotoxinas en hasta un 80%, asimismo, bacterias como *Lactobacillus rhamnosus* han demostrado una alta afinidad por fumonisinas, debido a sus ácidos lipoteicoicos, estos resultados subrayan la importancia de comprender los mecanismos específicos de adsorción física para optimizar su aplicación en la industria alimentaria y garantizar la seguridad de los productos consumidos por los seres humanos y los animales, a medida que la investigación avanza, es probable que se identifiquen nuevas estrategias y microorganismos capaces de maximizar la eficiencia de este mecanismo. *Saccharomyces cerevisiae* y *Lactobacillus rhamnosus* se destacan por su capacidad para adsorber aflatoxinas y fumonisinas respectivamente, utilizando componentes estructurales como β -glucanos y ácidos lipoteicoicos. Estos microorganismos han demostrado una eficacia significativa en matrices alimentarias, contribuyendo a la reducción de la toxicidad y a la mejora de la seguridad alimentaria. La Tabla 9 resume los microorganismos más relevantes utilizados en aplicaciones prácticas para la adsorción de micotoxinas, especificando las toxinas que pueden adsorber y los resultados observados en diferentes contextos alimentarios y agrícolas.

Tabla 9. Aplicaciones de Microorganismos en la Adsorción de Micotoxinas

Microorganismo	Micotoxinas Adsorbidas	Aplicación Práctica	Resultados Observados
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Aflatoxinas	Adición directa en sistemas lácteos fermentados para adsorber aflatoxinas presentes en la matriz alimentaria.	Reducción de hasta el 80% en la concentración de aflatoxinas sin alterar las propiedades organolépticas (Pinheiro et al., 2020).
<i>Lactobacillus rhamnosus</i>	Fumonisinias	Uso en ensilajes mediante cultivos vivos para capturar fumonisinas durante el proceso de fermentación.	Disminución significativa de los niveles de fumonisinas y preservación de la calidad nutricional del ensilaje.
<i>Lactobacillus plantarum</i>	Zearalenona	Incorporación en la fermentación de cereales para prevenir la acumulación de zearalenona en los productos finales.	Reducción del 70% en niveles de zearalenona en productos fermentados (Kumar et al., 2022).
<i>Bacillus subtilis</i>	Ocratoxinas y fumonisinas	Aplicación en granos almacenados mediante formulaciones de esporas para prevenir la contaminación por micotoxinas.	Mejora en la estabilidad microbiológica del grano y reducción de niveles de micotoxinas durante el almacenamiento.

Fuente: Elaboración propia

Las formulaciones bioprotectoras emplean microorganismos beneficiosos para preservar la calidad y seguridad de los alimentos, especialmente en productos fermentados y almacenados. Estos microorganismos actúan modificando las condiciones del medio, como el pH y la actividad del agua, además de producir compuestos antimicrobianos que inhiben el crecimiento de hongos toxigénicos. Esta estrategia no solo mejora la estabilidad microbiológica del producto, sino que también contribuye a la reducción de micotoxinas en las matrices alimentarias. La Tabla 10, detalla aplicaciones específicas de formulaciones bioprotectoras y los resultados obtenidos en diferentes productos.

Tabla 10. Aplicaciones de Formulaciones Bioprotectoras en Diferentes Productos

Producto	Microorganismos Utilizados	Cómo Ayuda el Microorganismo	Resultados Observados	Cómo se aplica la estrategia	Referencias
Yogurt fermentado	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Lactobacillus rhamnosus</i>	Producción de ácidos orgánicos y adsorción de micotoxinas.	Reducción de hasta el 80% en aflatoxinas sin alterar las propiedades organolépticas.	Adición directa de cultivos vivos durante el proceso de fermentación.	(Jiang et al., 2021)
Cereales	<i>Pediococcus spp.</i> , <i>Lactobacillus plantarum</i>	Modificación del pH y producción de bacteriocinas antimicrobianas.	Inhibición del crecimiento de <i>Fusarium spp.</i> y mejora en la calidad del producto.	Pulverización de suspensiones microbianas sobre los cereales antes del empaque.	(Kumar et al., 2022)
Ensilaje	<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Lactobacillus rhamnosus</i>	Reducción de actividad del agua y adsorción de fumonisinas.	Disminución del 70% en niveles de fumonisinas y preservación de valor nutricional.	Mezcla de cultivos vivos directamente en la masa del ensilaje antes de su compactación.	(Mateo et al., 2023)
Jugos de frutas	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Pediococcus spp.</i>	Adsorción de micotoxinas y producción de compuestos antimicrobianos.	Mejora en la estabilidad microbiológica y reducción de ocratoxinas.	Adición de cultivos microbianos en suspensiones líquidas durante el procesamiento del jugo.	(Pinheiro et al., 2020)

Fuente: Elaboración propia

Alteración metabólica y biocontrol

El conocimiento sobre la alteración del metabolismo del hospedador ha dado lugar al desarrollo de estrategias prácticas e innovadoras para el control de micotoxinas en sistemas agrícolas y alimentarios. Una de las aplicaciones más destacadas es el biocontrol en sistemas de almacenamiento, donde microorganismos productores de ácidos orgánicos, como *Lactobacillus plantarum* y *Bacillus subtilis*, se aplican directamente en forma de esporas o suspensiones líquidas sobre los granos almacenados. Este método ayuda a crear un ambiente ácido desfavorable para la formación de aflatoxinas y fumonisinas (J. Huang et al., 2024). Otra estrategia relevante es el uso de consorcios microbianos en cultivos agrícolas, los cuales se introducen al suelo mediante tratamientos previos a la siembra o se rocían directamente sobre las plantas durante su crecimiento, promoviendo la competencia biológica y la protección contra hongos toxigénicos (La Bella et al., 2024), donde la combinación de bacterias y hongos beneficiosos fomenta un ecosistema resiliente en las plantas hospedadoras, disminuyendo la incidencia de hongos toxigénicos, por último, las formulaciones bioprotectores en alimentos han demostrado ser altamente efectivas (Carrasco Arevalo, 2024); levaduras y bacterias incorporadas en matrices alimenticias fermentadas no solo previenen el crecimiento de hongos, sino que también limitan la acumulación de micotoxinas durante el almacenamiento y la distribución. Estas aplicaciones prácticas destacan el potencial de la alteración metabólica inducida por microorganismos como una herramienta sostenible para garantizar la inocuidad alimentaria.

El estudio de cómo los microorganismos alteran directamente el metabolismo del hospedador para limitar la formación de micotoxinas constituye una línea de investigación prometedora que se diferencia de los mecanismos que actúan sobre las micotoxinas ya formadas o el medio ambiente. Este enfoque se centra en inducir cambios metabólicos en el hospedador, como la producción de compuestos hormonales o antioxidantes, que refuerzan sus defensas naturales contra hongos toxigénicos. La integración de estas estrategias en sistemas agrícolas y alimentarios puede transformar las prácticas actuales de manejo de micotoxinas al abordar el problema desde su origen, promoviendo un enfoque sostenible y ecológicamente responsable. La Tabla 11 detalla cómo la alteración metabólica, facilitada por microorganismos, contribuye a reducir la formación de micotoxinas mediante la modificación de los procesos internos del hospedador.

Tabla 11. Aplicaciones de Alteración Metabólica en Diferentes Productos

Producto	Microorganismos Utilizados	Cómo Ayuda el Microorganismo	Resultados Observados	Cómo se Aplica la Estrategia	Referencias
Plantas de maíz	<i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Trichoderma spp.</i>	Incremento en la producción de compuestos hormonales en el hospedador.	Reducción significativa de fumonisinas al fortalecer las defensas naturales de las plantas.	Inoculación en la rizosfera durante el crecimiento del cultivo mediante suspensiones microbianas.	(Bukhat et al., 2020)
Cereales almacenados	<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	Producción de ácidos orgánicos que modifican el pH del entorno.	Inhibición de <i>Aspergillus flavus</i> y disminución de niveles de aflatoxinas.	Aplicación directa de esporas o cultivos líquidos sobre los granos almacenados.	(Guan et al., 2023)
Frutas	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Pediococcus spp.</i>	Producción de metabolitos volátiles que afectan la viabilidad de hongos toxigénicos.	Reducción del 65% en ocratoxinas y mejora en la calidad del almacenamiento.	Pulverización de suspensiones microbianas sobre las frutas antes del almacenamiento.	(Josselin, 2023)
Legumbres	<i>Trichoderma spp.</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	Alteración de las condiciones del medio y secreción de enzimas específicas.	Disminución del 70% en micotoxinas como zearalenona y ocratoxinas.	Inoculación de cultivos microbianos en el suelo o aplicación directa en semillas.	(Estevez Navarro, 2022)

Fuente: Elaboración propia

El biocontrol utiliza microorganismos beneficiosos para competir con hongos toxigénicos en diversas matrices alimentarias, impidiendo su proliferación y reduciendo la producción de micotoxinas. Esta estrategia aprovecha mecanismos como la competencia por nutrientes, la producción de metabolitos antimicrobianos y la formación de barreras físicas, como biopelículas, para proteger los productos alimenticios durante el almacenamiento o procesamiento. La Tabla 12, presenta ejemplos de la aplicación del biocontrol en diferentes productos y los resultados obtenidos.

Tabla 12. Aplicaciones del Biocontrol en Diferentes Productos

Producto	Microorganismos Utilizados	Cómo Ayuda el Microorganismo	Resultados Observados	Método de Detección	Referencias
Maíz	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Trichoderma spp.</i>	Competencia por recursos y secreción de metabolitos antimicrobianos.	Reducción del 85% en aflatoxinas y menor proliferación de <i>Aspergillus flavus</i> .	Cromatografía Líquida de Alta Precisión (HPLC)	(Braun et al., 2018)
Trigo	<i>Lactobacillus spp.</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	Modificación del pH y producción de compuestos volátiles.	Inhibición del crecimiento de <i>Fusarium spp.</i> y disminución de zearalenona.	Espectroscopía FTIR (Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier)	(Cesa-Luna et al., 2020)
Frutas	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Pediococcus spp.</i>	Formación de biopelículas y competencia biológica en superficies.	Reducción de ocratoxinas en un 70% y mejora en la vida útil del producto.	Ensayo ELISA (Ensayo de inmunoadsorción ligado a enzima)	(Mateo et al., 2023)
Legumbres	<i>Trichoderma spp.</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	Producción de enzimas antifúngicas y colonización de superficies.	Disminución significativa de micotoxinas como fumonisinas y aflatoxinas.	Cromatografía de Gases (GC)	(H. Liu et al., 2022)

Fuente: Elaboración propia

Estrategias Emergentes

Inactivación Enzimática de Micotoxinas

La inactivación enzimática de micotoxinas se basa en la capacidad de ciertas enzimas microbianas para transformar estas toxinas en compuestos menos tóxicos o no tóxicos, mediante la ruptura o modificación de enlaces químicos clave en sus estructuras moleculares. Este enfoque biotecnológico es altamente específico y eficaz, ya que las enzimas pueden ser diseñadas o seleccionadas para actuar sobre tipos específicos de micotoxinas presentes en alimentos o piensos. Un ejemplo destacado es el uso de lacasas y peroxidases, producidas por hongos como *Trametes versicolor*, que oxidan micotoxinas como las aflatoxinas y ocratoxinas, reduciendo significativamente

su toxicidad. De manera similar, las epóxido hidrolasas bacterianas han mostrado una alta efectividad en la detoxificación de fumonisinas al romper sus grupos epóxido responsables de la toxicidad (Lyagin & Efremenko, 2019). Este proceso enzimático no solo es preciso, sino también sostenible, ya que no requiere condiciones extremas de temperatura o pH.

Además, la implementación de esta estrategia se ha potenciado con avances en la inmovilización enzimática, lo que permite reutilizar las enzimas en múltiples ciclos de tratamiento. Esto ha demostrado ser particularmente beneficioso en entornos industriales, donde los procesos continuos requieren estabilidad y eficiencia a largo plazo. Por ejemplo, enzimas inmovilizadas en matrices biodegradables han logrado reducir la concentración de micotoxinas en alimentos procesados como granos y productos lácteos sin afectar su calidad organoléptica (Chalella Mazzocato & Jacquier, 2024). Por último, la inactivación enzimática de micotoxinas es una herramienta prometedora para fortalecer la seguridad alimentaria, ya que combina especificidad molecular con escalabilidad industrial. La investigación futura en ingeniería enzimática podría ampliar aún más las aplicaciones de esta estrategia, abarcando un espectro más amplio de micotoxinas y matrices alimentarias complejas. Actualmente, esta estrategia se aplica mediante la incorporación de enzimas purificadas o microorganismos productores de enzimas en sistemas de tratamiento de alimentos. Por ejemplo, en el caso de los cereales contaminados con fumonisinas, se han utilizado enzimas como las hidrolasas producidas por *Trichoderma spp.*, aplicadas directamente a los granos durante el almacenamiento para reducir los niveles de toxinas (Y. Zhang et al., 2023). En el sector lácteo, lacasas inmovilizadas han sido probadas en sistemas de flujo continuo para degradar aflatoxinas en leche procesada, logrando reducciones significativas en ensayos de laboratorio. Estos avances muestran el potencial de la ingeniería enzimática para optimizar procesos de descontaminación y garantizar la seguridad alimentaria, incluso en aplicaciones a pequeña escala.

Enfoque Holístico de Prevención-Protección-Resiliencia

El enfoque holístico de prevención, protección y resiliencia combina múltiples estrategias para abordar la contaminación por micotoxinas desde una perspectiva integral. Este enfoque busca prevenir la contaminación, proteger las cadenas alimentarias y aumentar la resiliencia de los sistemas agrícolas y alimentarios frente a la proliferación de hongos toxigénicos. En la fase de prevención, se implementan prácticas agrícolas sostenibles, como la rotación de cultivos, el manejo adecuado de la humedad en los campos y la aplicación de biocontrol mediante microorganismos beneficiosos (Habschied et al., 2021).

Estas acciones reducen la incidencia de hongos toxigénicos en las etapas iniciales del cultivo, limitando la generación de micotoxinas. Por ejemplo, el uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), como *Pseudomonas fluorescens*, mejora la salud del suelo y fortalece las defensas naturales de las plantas frente a hongos como *Fusarium* y *Aspergillus* (Syed et al., 2020).

La protección se centra en el manejo postcosecha, donde se implementan tecnologías como el biocontrol en almacenamiento, el uso de atmósferas controladas y la aplicación de compuestos bioactivos que inhiben la producción de micotoxinas. Estas intervenciones son especialmente eficaces en productos como granos y frutas almacenadas, donde las condiciones ambientales pueden favorecer la proliferación de hongos. Por último, la resiliencia se fomenta mediante la integración de tecnologías innovadoras, como la fortificación de alimentos con carbohidratos funcionales que mejoran la salud intestinal de los animales y limitan la absorción de micotoxinas (Vlaicu et al., 2023). Adicionalmente, se están desarrollando sistemas de monitoreo en tiempo real que permiten identificar rápidamente focos de contaminación y tomar medidas correctivas de manera proactiva.

Este enfoque holístico es particularmente relevante en un contexto de cambio climático, donde las fluctuaciones en la temperatura y la humedad pueden exacerbar la presencia de micotoxinas. La combinación de medidas preventivas y correctivas permite abordar el problema de manera sostenible y a largo plazo, fortaleciendo la seguridad alimentaria global. La colaboración interdisciplinaria y el apoyo de políticas públicas serán clave para maximizar el impacto de este enfoque y garantizar su implementación efectiva a gran escala.

Las estrategias emergentes para la mitigación de micotoxinas ofrecen enfoques innovadores que complementan y potencian las técnicas tradicionales. Estas metodologías no solo abordan la reducción directa de micotoxinas, sino que también mejoran la sostenibilidad, escalabilidad y efectividad en diversas aplicaciones. La Tabla 13, resume las principales estrategias, destacando sus objetivos, beneficios adicionales, limitaciones y ejemplos prácticos para ilustrar su impacto en la seguridad alimentaria.

Tabla 13. Estrategias Emergentes para la Mitigación de Micotoxinas

Estrategia	Objetivo Principal	Beneficios Adicionales	Limitaciones	Ejemplo de Aplicación
Inactivación Enzimática	Transformar micotoxinas en compuestos no tóxicos (Syed et al., 2020).	Alta especificidad, escalabilidad industrial.	Dependencia de condiciones óptimas de pH y temperatura.	Uso de lacasas inmovilizadas para detoxificar aflatoxinas en granos.
Adsorbentes Minerales	Adsorber físicamente micotoxinas y reducir su biodisponibilidad. (Vlaicu et al., 2023)	Bajo costo, fácil implementación en piensos animales.	Eficiencia variable según la matriz alimentaria.	Incorporación de esmectitas en dietas para ganado.
Análisis Rápido	Detectar micotoxinas en tiempo real para decisiones inmediatas. (Habschied et al., 2021).	Mejora el control de calidad, portabilidad de equipos.	Alto costo inicial de equipos avanzados.	Biosensores para monitoreo de aflatoxinas en alimentos procesados.
Prevención-Protección-Resiliencia	Integrar prácticas agrícolas sostenibles y tecnología para mitigar micotoxinas.	Aumenta la seguridad alimentaria, reduce el impacto climático.	Requiere coordinación intersectorial y regulaciones claras.	Uso de rizobacterias en cultivos para mejorar la resistencia a hongos.

Fuente: Elaboración propia

Factores que Influyen en las Estrategias

El éxito de las estrategias biotecnológicas para la reducción de micotoxinas depende de una variedad de factores ambientales y biológicos que moldean las interacciones entre los microorganismos, el medio y las micotoxinas objetivo. Las condiciones ambientales, como el pH, la temperatura y la composición del medio, afectan directamente la actividad metabólica y la eficacia de los microorganismos involucrados. De manera similar, la adaptabilidad y las propiedades intrínsecas de los microorganismos, incluidas sus capacidades estructurales y enzimáticas, son determinantes clave de su rendimiento. Una comprensión integral de estos factores es esencial para optimizar las intervenciones microbianas y garantizar su efectividad en diversos sistemas agrícolas y alimentarios. Las Tabla 14, explora estas influencias clave, centrándose en cómo modulan la eficiencia de las aplicaciones biotecnológicas.

Tabla 14. Factores y su influencia en la Mitigación de Micotoxinas.

Factor	Influencia	Ejemplos y Resultados Observados	Referencias
pH	Afecta la actividad metabólica y enzimática de los microorganismos.	Rango de pH 4-6 favorece la adsorción de aflatoxinas por <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .	(Guan et al., 2023; Hamad, Amer, et al., 2023)
	Niveles extremos de pH desestabilizan la actividad microbiana y reducen la eficacia de biodegradación.	En pH ácido, la ionización de β -glucanos mejora la afinidad por las micotoxinas.	(Guan et al., 2023)
Temperatura	Impacta la estabilidad y actividad de los microorganismos y las enzimas involucradas.	Rango óptimo de 25-37 °C mejora la biodegradación de fumonisinas por <i>Bacillus subtilis</i> .	(Perrone et al., 2020; Qin et al., 2021)
	Temperaturas extremas reducen la viabilidad microbiana y la actividad enzimática.	Temperaturas moderadas aseguran un desempeño sostenido en la reducción de micotoxinas.	(Perrone et al., 2020)
Composición del Medio	Influye en la disponibilidad de nutrientes, fuerza iónica, y presencia de compuestos competidores.	Nutrientes en exceso, como carbohidratos, pueden competir con micotoxinas por sitios de unión.	(Mgbeahuruike et al., 2021; Ndiaye et al., 2022)
	Iones como calcio y magnesio pueden interferir en la acción de enzimas microbianas.	Equilibrio óptimo de nutrientes mejora la biodegradación y adsorción de micotoxinas.	(Ndiaye et al., 2022)

Fuente: Elaboración propia

Adaptabilidad Microbiana

La adaptabilidad microbiana se refiere a las características únicas de ciertos microorganismos que les permiten desempeñar roles específicos dentro de diversas estrategias biotecnológicas para la mitigación de micotoxinas. Por ejemplo, *Saccharomyces cerevisiae* destaca en formulaciones bioprotectoras gracias a sus β -glucanos, que facilitan la adsorción de toxinas en productos fermentados (Guerre, 2020). De manera similar, *Lactobacillus rhamnosus* combina su alta actividad metabólica con la producción de ácidos orgánicos, haciéndolo ideal para estrategias de alteración metabólica. Cada microorganismo se adapta a condiciones ambientales y necesidades específicas de las estrategias implementadas, como el biocontrol o los consorcios microbianos, asegurando su eficacia en aplicaciones como la conservación de granos, la producción de ensilajes y la mejora de la seguridad alimentaria (Utama et al., 2021). La Tabla 15 detalla la relación entre los microorganismos y las estrategias biotecnológicas en las que participan.

Tabla 15. Adaptabilidad Microbiana y Eficiencia en la Reducción de Micotoxinas

Microorganismo	Características Clave	Estrategia Asociada	Mecanismo de Acción	Aplicación
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Rica en β -glucanos y manoproteínas en la pared celular	Formulaciones Bioprotectoras, Biocontrol.	Adsorción de aflatoxinas	Productos lácteos fermentados, granos
<i>Lactobacillus rhamnosus</i>	Alta actividad metabólica, producción de ácidos orgánicos	Formulaciones Bioprotectoras, Alteración Metabólica.	Adsorción de fumonisinas, modificación del pH	Alimentos fermentados, ensilaje
<i>Trichoderma</i> spp.	Secreción de enzimas (quitinasas, glucanasas)	Biocontrol, Consorcios Microbianos.	Biodegradación de zearalenona y fumonisinas	Almacenamiento de granos, biocontrol agrícola
<i>Bacillus subtilis</i>	Producción de compuestos orgánicos volátiles (VOCs)	Biocontrol, Alteración Metabólica.	Inhibición del crecimiento fúngico	Granos almacenados, remediación ambiental
<i>Pediococcus</i> spp.	Producción de bacteriocinas y biopelículas	Formulaciones Bioprotectoras.	Inhibición de la formación de esporas fúngicas	Verduras y bebidas fermentadas

Fuente: Adaptado de (J. Zhang et al., 2023)

Barreras prácticas y técnicas en el uso de estrategias biotecnológicas

A pesar de los avances en las estrategias biotecnológicas para la mitigación de micotoxinas, existen varias barreras prácticas y técnicas que limitan su implementación y eficacia a gran escala. Estas barreras incluyen desafíos relacionados con las propiedades de los microorganismos, las condiciones ambientales, y la integración de estas estrategias en los sistemas agrícolas e industriales, algunas de estas barreras se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Barreras Prácticas y Técnicas en el uso de estrategias biotecnológicas

Posibles barreras	Descripción	Referencias
Compatibilidad Microbiana y Especificidad	Uno de los principales desafíos es la compatibilidad entre microorganismos en consorcios microbianos y su especificidad para determinadas micotoxinas. Algunos microorganismos muestran alta	(Zadravec et al., 2022)

Posibles barreras	Descripción	Referencias
de las Estrategias	<p>eficacia en condiciones de laboratorio controladas, pero su rendimiento disminuye en entornos reales debido a la competencia con otros microorganismos presentes en el medio. Además, la acción específica de ciertos microorganismos puede limitar su aplicabilidad a un rango reducido de micotoxinas, dejando otras sin tratamiento adecuado.</p>	
Condiciones Ambientales Variables	<p>Las estrategias biotecnológicas dependen en gran medida de factores ambientales como el pH, la temperatura y la actividad del agua, que pueden variar significativamente en los sistemas agrícolas y de almacenamiento. Estas variaciones pueden reducir la viabilidad de los microorganismos o inhibir la actividad enzimática necesaria para la degradación o adsorción de micotoxinas, disminuyendo la eficacia general del proceso</p>	(Zapašnik et al., 2024).
Costos de Producción y Escalabilidad	<p>La producción a gran escala de microorganismos y sus formulaciones biotecnológicas representa un desafío económico. Los costos asociados con la fermentación, purificación y estabilización de microorganismos pueden ser prohibitivos, especialmente en sistemas agrícolas de países en desarrollo. Además, garantizar la estabilidad de las formulaciones durante el almacenamiento y transporte es un aspecto técnico crítico que requiere atención</p>	(Ganeshan et al., 2021).
Regulación y Aceptación del Mercado	<p>La aprobación regulatoria y la aceptación del mercado son barreras significativas para la adopción de estrategias biotecnológicas. Los microorganismos utilizados en la mitigación de micotoxinas deben cumplir con estrictos estándares de seguridad alimentaria, y la falta de normativas específicas en algunos países puede retrasar su implementación. Además, la percepción del consumidor sobre el uso de microorganismos en alimentos aún enfrenta cierta resistencia.</p>	(Gbashi et al., 2021)

Fuente: Elaboración propia

Abordar estas barreras requiere un enfoque multidisciplinario que combine avances en la investigación biotecnológica, la optimización de condiciones de aplicación, y la implementación de políticas regulatorias claras. Superar estas limitaciones permitirá un mayor impacto de las estrategias biotecnológicas en la reducción de micotoxinas, promoviendo sistemas alimentarios más seguros y sostenibles.

Perspectivas Futuras

El desarrollo de tecnologías avanzadas tiene el potencial de transformar las estrategias biotecnológicas para la mitigación de micotoxinas, mejorando tanto su eficacia como su aplicabilidad. Dos enfoques prometedores son la ingeniería genética de microorganismos y la inmovilización enzimática, los cuales ofrecen soluciones innovadoras para superar las limitaciones actuales.

La ingeniería genética permite modificar microorganismos para potenciar su capacidad de adsorción o biodegradación de micotoxinas. Mediante técnicas como la edición de genes con CRISPR-Cas9 (X. Huang et al., 2022) es posible mejorar la expresión de genes responsables de la producción de enzimas clave, como las quitinasas, glucanasas o epóxido hidrolasas, incrementando su especificidad y eficiencia. Además, la ingeniería genética puede introducir nuevas rutas metabólicas en microorganismos, permitiéndoles degradar micotoxinas que previamente no podían procesar. Por ejemplo, la modificación de *Saccharomyces cerevisiae* para optimizar la adsorción de múltiples micotoxinas simultáneamente podría revolucionar su uso en matrices alimentarias complejas. Este enfoque también facilita la creación de consorcios microbianos diseñados para trabajar en sinergia, abordando un espectro más amplio de micotoxinas.

La inmovilización enzimática, que consiste en fijar enzimas a soportes sólidos, ofrece ventajas significativas para la biodegradación de micotoxinas en entornos industriales y agrícolas (Ndiaye et al., 2022). Este método mejora la estabilidad de las enzimas frente a variaciones de pH y temperatura, aumentando su vida útil y eficacia en condiciones adversas. Además, las enzimas inmovilizadas pueden ser reutilizadas en múltiples ciclos de tratamiento, lo que reduce los costos operativos. Por ejemplo, enzimas como las lacasas inmovilizadas han mostrado resultados prometedores en la degradación de aflatoxinas en alimentos procesados como jugos, vinos, productos lácteos y derivados de cereales (Pires et al., 2022). Asimismo, este enfoque permite integrar enzimas directamente en sistemas de flujo continuo, facilitando la implementación en procesos industriales a gran escala.

La combinación de ingeniería genética e inmovilización enzimática puede maximizar los beneficios de ambas estrategias. Por ejemplo, microorganismos genéticamente diseñados para producir enzimas altamente eficientes pueden ser utilizados en conjunto con técnicas de inmovilización para crear soluciones robustas y económicas. Estos avances tecnológicos no solo mejorarán la eficacia de las estrategias actuales, sino que también abrirán nuevas oportunidades para abordar micotoxinas emergentes y garantizar la seguridad alimentaria en un contexto global.

La integración de estrategias combinadas para la mitigación de micotoxinas representa un enfoque holístico y efectivo que combina múltiples mecanismos de acción en un solo sistema. Esta metodología busca aprovechar las fortalezas individuales de cada estrategia biotecnológica, maximizando su eficacia en diversos escenarios agrícolas e industriales. Mediante la interacción sinérgica de técnicas como la adsorción, la biodegradación enzimática, y el biocontrol, es posible abordar un espectro más amplio de micotoxinas y superar las limitaciones asociadas con estrategias individuales (Nguyen et al., 2024).

Un sistema integrado puede incluir el uso de *Saccharomyces cerevisiae* para la adsorción de aflatoxinas junto con *Trichoderma* spp. para la biodegradación enzimática de fumonisinas. Mientras la levadura adsorbe eficazmente las micotoxinas en su pared celular, *Trichoderma* spp. actúa degradando los compuestos tóxicos restantes mediante enzimas como quitinasas y glucanasas (Dini et al., 2022). Este enfoque combinado no solo incrementa la eficiencia en la reducción de micotoxinas, sino que también mejora la estabilidad del sistema al combinar organismos con diferentes tolerancias a factores ambientales como el pH y la temperatura.

Entre las ventajas, se subraya la capacidad de abordar múltiples tipos de micotoxinas en un solo sistema, mejorando la eficiencia general y reduciendo la dependencia de métodos químicos. Además, la estabilidad del sistema en condiciones ambientales variables y la optimización de recursos hacen de este enfoque una solución sostenible y costo-efectiva. Sin embargo, se identifican desafíos importantes, como la compatibilidad entre microorganismos dentro de los consorcios y la necesidad de desarrollar protocolos específicos para diferentes entornos industriales y agrícolas. Estas perspectivas resaltan la importancia de la investigación futura para maximizar los beneficios de estas estrategias mientras se minimizan las limitaciones técnicas y operativas. La Tabla 17, destaca las principales ventajas y

desafíos asociados con la integración de estrategias combinadas para la mitigación de micotoxinas.

Tabla 17. Ventajas, Desafíos y Perspectivas de Estrategias Combinadas

Ventajas de la Integración	Desafíos y Perspectivas
<p>Reducción Integral de Micotoxinas: La combinación de microorganismos con diferentes especialidades permite abordar múltiples tipos de micotoxinas en un solo tratamiento.</p>	<p>Aunque las estrategias combinadas ofrecen múltiples ventajas, su implementación presenta desafíos, como la compatibilidad entre microorganismos y la necesidad de</p>
<p>Estabilidad en Entornos Variables: La integración de estrategias complementarias mejora la adaptabilidad del sistema frente a fluctuaciones ambientales.</p>	<p>desarrollar sistemas que permitan su coexistencia efectiva. La investigación futura debe enfocarse en diseñar consorcios</p>
<p>Sostenibilidad y Costo-Efectividad: Al combinar enfoques, se optimiza el uso de recursos, reduciendo la dependencia de insumos químicos y minimizando costos operativos (Cucina & Tacconi, 2022).</p>	<p>microbianos optimizados y protocolos de aplicación adaptados a las necesidades específicas de los sistemas agrícolas e industriales (Peles et al., 2021).</p>

Fuente: Elaboración propia

La optimización del uso de microorganismos en la industria alimentaria requiere un enfoque estratégico que abarque desde la selección de cepas hasta la implementación operativa en sistemas industriales.

La Tabla 18, resume acciones clave para optimizar el uso de microorganismos en la industria alimentaria, enfatizando la importancia de un enfoque integral que combine avances tecnológicos con capacitación y regulación. Estas recomendaciones no solo facilitan la implementación efectiva de estrategias biotecnológicas, sino que también fomentan la sostenibilidad y la innovación en la mitigación de micotoxinas, contribuyendo al fortalecimiento de los sistemas alimentarios globales.

Tabla 18. Áreas de Optimización en el uso de Microorganismos

Área de Optimización	Recomendación	Descripción	Referencias
Selección de Cepas Eficientes	Identificar y seleccionar cepas con alta capacidad de adsorción o biodegradación de micotoxinas.	Asegurar que las cepas sean específicas para las micotoxinas objetivo y efectivas en condiciones reales.	(Ndiaye et al., 2022)
Condiciones Operativas	Ajustar parámetros como temperatura, pH y composición del medio.	Diseñar procesos que potencien la actividad metabólica y enzimática de los microorganismos.	(Fernandes et al., 2020)
Consortios Microbianos	Desarrollar consorcios con mecanismos complementarios de acción.	Combinar microorganismos para ampliar el espectro de micotoxinas mitigadas y mejorar la estabilidad del sistema.	(Santoyo et al., 2021)
Capacitación Industrial	Proveer formación técnica a los profesionales sobre el uso de microorganismos.	Incluir la interpretación de resultados y la integración de estrategias biotecnológicas en procesos existentes.	(Clarke & Kitney, 2020)
Regulación y Certificación	Establecer normativas claras y estándares de certificación para el uso de microorganismos.	Facilitar la aprobación regulatoria y generar confianza en el mercado mediante estándares de seguridad y eficacia.	(De Oliveira Mota et al., 2021)
Investigación y Desarrollo	Invertir en ingeniería genética e inmovilización enzimática.	Mejorar las capacidades microbianas y garantizar su estabilidad y reutilización en sistemas industriales.	(Wikandari et al., 2021)

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3. Estrategias para Optimizar el Uso de Microorganismos en la Mitigación de Micotoxinas en Alimentos

Aunque los avances en biotecnología han permitido el desarrollo de estrategias efectivas para la reducción de la contaminación por micotoxinas, basadas en el uso de microorganismos, persisten limitaciones que restringen su aplicación a gran escala. Estas limitaciones incluyen la eficacia variable de los microorganismos bajo condiciones ambientales cambiantes, la falta de protocolos optimizados para diferentes matrices alimentarias y la interacción compleja entre múltiples micotoxinas en un solo sistema. Entre las estrategias actuales, destacan la adsorción física mediante componentes de la pared celular microbiana, la biodegradación enzimática, el biocontrol mediante competencia biológica y la alteración del metabolismo del hospedador. Si bien estas metodologías han demostrado eficacia en entornos controlados, su implementación en contextos industriales y agrícolas reales enfrenta barreras como la estabilidad microbiana, la compatibilidad en consorcios y la necesidad de tecnologías que monitoreen su desempeño en tiempo real.

En este contexto, se hace imprescindible plantear nuevas líneas de investigación que permitan superar estos desafíos. La optimización de microorganismos a través de herramientas avanzadas, como la ingeniería genética y la inmovilización enzimática, junto con la integración de tecnologías emergentes, puede abrir nuevas posibilidades para la mitigación efectiva de micotoxinas en alimentos. Esta sección se centra en identificar vacíos de conocimiento y proponer direcciones estratégicas para investigaciones futuras que fortalezcan el uso de microorganismos en el manejo de micotoxinas, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y seguridad alimentaria.

Identificación de Vacíos de Conocimiento

El uso de microorganismos en la mitigación de micotoxinas representa una de las estrategias más prometedoras en el ámbito de la biotecnología alimentaria. Sin embargo, a pesar de los avances en la investigación y aplicación, existen vacíos significativos que limitan la eficacia y escalabilidad de estas intervenciones. Estos vacíos no solo reflejan áreas donde el conocimiento es insuficiente, sino también oportunidades para innovar y optimizar el uso de microorganismos en sistemas alimentarios complejos. Las limitaciones actuales incluyen la necesidad de comprender mejor cómo factores

ambientales, como el pH, la temperatura y la composición del medio, afectan la actividad microbiana en condiciones reales de almacenamiento y procesamiento (L. Wang et al., 2023). Además, aunque los microorganismos han demostrado eficacia en entornos controlados, su desempeño en matrices alimentarias complejas, como productos fermentados o alimentos procesados, sigue siendo incierto. Otro desafío importante radica en la compatibilidad y estabilidad de consorcios microbianos, los cuales podrían ofrecer una solución integral, pero requieren mayor investigación para garantizar su efectividad y sostenibilidad.

Asimismo, ciertas áreas permanecen poco exploradas, como las micotoxinas emergentes y menos estudiadas, cuya incidencia en alimentos está en aumento. La adaptación de estrategias para productos alimentarios específicos, como lácteos y jugos, requiere considerar las características particulares de cada matriz alimentaria. Factores como el pH, la composición química y la actividad del agua influyen directamente en la eficacia de las estrategias aplicadas, lo que resalta la importancia de diseñar métodos ajustados a las condiciones específicas de cada producto. Finalmente, el desarrollo de tecnologías que mejoren la estabilidad y viabilidad de los microorganismos durante su almacenamiento y transporte es crucial para facilitar su implementación a gran escala. Identificar y abordar estos vacíos de conocimiento no solo es esencial para superar las barreras actuales, sino también para abrir nuevas posibilidades en la mitigación de micotoxinas. Este análisis servirá como base para plantear líneas de investigación que fortalezcan la seguridad alimentaria y promuevan el uso sostenible de microorganismos en la industria alimentaria, ver Tabla 19.

Tabla 19. Vacíos de Conocimiento en la Mitigación de Micotoxinas con Microorganismos

Categoría	Vacío de Conocimiento	Descripción
Factores Ambientales No Explorados	Evaluar cómo interactúan pH, temperatura y composición del medio en sistemas dinámicos.	Falta de estudios sobre su impacto combinado en entornos reales y matrices alimentarias complejas.
Eficiencia en Matrices Complejas	Comprender la eficacia de microorganismos en alimentos heterogéneos.	Insuficiente investigación en alimentos procesados o de alta densidad nutricional, como productos lácteos o fermentados.
Compatibilidad de Consorcios	Explorar interacciones entre microorganismos en consorcios.	Las interacciones pueden afectar negativamente la eficacia; falta de estudios sobre su optimización.
Áreas Poco Investigadas		
Micotoxinas Emergentes	Investigación limitada sobre micotoxinas como alternariol y enniatina.	Poca información sobre su incidencia, toxicidad y métodos específicos de mitigación.
Aplicación en Alimentos Procesados	Protocolos específicos para alimentos procesados o perecederos.	Escasez de estudios que adapten estrategias para jugos, productos horneados y alimentos fermentados.
Estrategias para Estabilidad	Desarrollar formulaciones para aumentar la viabilidad microbiana.	Falta de tecnologías como encapsulación para garantizar estabilidad en almacenamiento y transporte.

Fuente: Elaboración propia

Propuestas de Investigación

La mejora de los mecanismos de acción de los microorganismos es fundamental para optimizar su eficacia en la mitigación de micotoxinas. Dos enfoques destacados en esta área incluyen la ingeniería genética y la inmovilización en soportes biodegradables, los cuales ofrecen soluciones innovadoras para superar las limitaciones actuales.

Ingeniería Genética para Optimización Microbiana

La ingeniería genética se presenta como una herramienta revolucionaria en la optimización de microorganismos para la mitigación de micotoxinas, permitiendo superar barreras inherentes a las estrategias tradicionales. Al manipular directamente el material genético de los microorganismos, es posible rediseñar su metabolismo y potenciar la producción de enzimas clave involucradas en procesos como la biodegradación y la adsorción de micotoxinas (J. Wang & Xie, 2020). Herramientas avanzadas como CRISPR-Cas9 han facilitado la edición de genes específicos, acelerando el desarrollo de microorganismos con capacidades mejoradas. Por ejemplo, al introducir o regular genes responsables de la producción de lacasas, estas enzimas pueden oxidar micotoxinas como las aflatoxinas, reduciendo su toxicidad. De manera similar, la modificación de genes que codifican epóxido hidrolasas permite atacar grupos funcionales específicos en fumonisinas, transformándolas en compuestos inocuos (P. Li et al., 2020). Las quitinasas, por su parte, pueden descomponer estructuras de hongos toxigénicos, interrumpiendo su capacidad de producir micotoxinas.

Además de mejorar la funcionalidad enzimática, la ingeniería genética ofrece la posibilidad de adaptar los microorganismos a condiciones ambientales adversas que son comunes en matrices alimentarias. Por ejemplo, al modificar genes asociados con la tolerancia al estrés, como proteínas de choque térmico o bombas de protones, es posible optimizar microorganismos para operar en ambientes con pH extremo o altas temperaturas (Tan et al., 2022). Esto amplía significativamente el rango de aplicaciones, desde productos fermentados hasta granos almacenados en climas cálidos y húmedos. Otra innovación prometedora es el diseño de consorcios microbianos genéticamente optimizados. En estos sistemas, diferentes microorganismos son modificados para cumplir roles complementarios: algunos pueden especializarse en la adsorción física de micotoxinas, mientras que otros se centran en la biodegradación enzimática. Esta sinergia permite abordar simultáneamente múltiples tipos de micotoxinas presentes en una misma matriz alimentaria, maximizando la eficacia y estabilidad del sistema (Leslie et al., 2020).

La integración de la ingeniería genética con otras tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el modelado matemático, podría optimizar aún más el diseño de microorganismos y consorcios. Estas herramientas permiten predecir el comportamiento genético y metabólico en

diferentes condiciones, reduciendo los tiempos de experimentación y acelerando la implementación a gran escala. En este contexto, la ingeniería genética no solo transforma el enfoque hacia la mitigación de micotoxinas, sino que también posiciona a los microorganismos como actores clave en la seguridad alimentaria global y la sostenibilidad.

Inmovilización de Microorganismos y Enzimas en Soportes Biodegradables

La inmovilización de microorganismos y enzimas en soportes biodegradables es una estrategia biotecnológica que combina sostenibilidad y funcionalidad, siendo una solución innovadora para optimizar el manejo de micotoxinas en sistemas industriales. Este enfoque no solo mejora la estabilidad y la viabilidad de los microorganismos en condiciones adversas, sino que también promueve la reutilización y el ahorro de recursos, aspectos clave para su implementación a gran escala (Gao et al., 2024). Los soportes biodegradables, como alginatos, quitosano y nanocelulosa, ofrecen una plataforma versátil y ecológica para la inmovilización de microorganismos y enzimas. Estos materiales tienen propiedades únicas, como biocompatibilidad, flexibilidad y capacidad para retener la actividad biológica en ambientes con fluctuaciones de pH, temperatura o actividad del agua. Por ejemplo, el quitosano, derivado de la quitina, es un polímero con propiedades antimicrobianas naturales que, además de inmovilizar enzimas como lacasas, actúa como una barrera física contra contaminantes secundarios, fortaleciendo su eficacia en la degradación de aflatoxinas (Esparza-Flores et al., 2024).

Otro ejemplo destacado es la inmovilización en matrices de alginato, un polímero extraído de algas marinas, que se ha utilizado para encapsular microorganismos como *Lactobacillus spp.* en aplicaciones relacionadas con alimentos fermentados (Bi et al., 2022). Esta técnica no solo mejora la estabilidad de los microorganismos durante el almacenamiento y transporte, sino que también regula la liberación gradual de sus compuestos activos, aumentando la eficacia en la mitigación de micotoxinas. Además de mejorar la estabilidad, esta estrategia facilita la integración de los microorganismos en sistemas de flujo continuo, como líneas de procesamiento de alimentos, permitiendo la eliminación constante de micotoxinas a nivel industrial. La capacidad de reutilizar las matrices inmovilizadas en múltiples ciclos de tratamiento reduce significativamente los costos operativos, lo que la convierte en una opción económicamente viable para la industria alimentaria (Sharma et al., 2022). Esta técnica también es particularmente útil en productos líquidos, como jugos y lácteos, donde la inmovilización previene la dispersión del microorganismo y asegura su actividad sostenida durante el procesamiento.

El desarrollo de soportes biodegradables con propiedades adicionales, como capacidades antioxidantes o antimicrobianas, abre nuevas posibilidades para potenciar esta estrategia. Por ejemplo, la incorporación de nanopartículas de plata o compuestos fenólicos en las matrices de inmovilización puede proporcionar protección adicional frente a contaminantes microbianos y oxidativos, mejorando la estabilidad del sistema en condiciones más exigentes (Petcu et al., 2024). La combinación de esta tecnología con enfoques avanzados, como la ingeniería genética, puede maximizar su potencial. Los microorganismos genéticamente optimizados, cuando se inmovilizan en soportes biodegradables, ofrecen una solución integrada que aborda múltiples desafíos en la mitigación de micotoxinas (M. Liu et al., 2022). Además, la integración de herramientas como la inteligencia artificial para diseñar y modelar estas matrices podría acelerar la personalización de soluciones adaptadas a diferentes productos y procesos industriales.

En conclusión, la inmovilización en soportes biodegradables es una estrategia prometedora para transformar la eficacia y sostenibilidad de las intervenciones microbianas en la mitigación de micotoxinas. Las investigaciones futuras deben centrarse en optimizar los materiales y procesos de inmovilización, integrándolos con tecnologías emergentes para garantizar su implementación exitosa a escala industrial.

Adaptación a Escenarios Reales

La adaptación de las estrategias basadas en microorganismos a escenarios reales es crucial para garantizar su efectividad y viabilidad en entornos industriales y agrícolas. Este enfoque implica superar las barreras que surgen al trasladar las tecnologías de laboratorio a condiciones prácticas, como las variaciones ambientales, las limitaciones de infraestructura y la heterogeneidad de las matrices alimentarias. Para lograrlo, dos aspectos clave son la evaluación de eficacia en condiciones reales y el desarrollo de protocolos específicos.

Evaluación de Eficacia en Condiciones Reales

La evaluación de la eficacia de los microorganismos en condiciones reales de almacenamiento y producción industrial es un paso crítico para garantizar la viabilidad y efectividad de las estrategias biotecnológicas en la mitigación de micotoxinas. En entornos operativos reales, los microorganismos enfrentan desafíos adicionales que no siempre se replican en condiciones de laboratorio, lo que subraya

la necesidad de estudios específicos que evalúen su desempeño en escenarios complejos y dinámicos. Entre los factores ambientales que afectan la eficacia de los microorganismos destacan las fluctuaciones de temperatura y humedad, que pueden alterar su viabilidad y capacidad metabólica (Wolkoff et al., 2021). Por ejemplo, condiciones de alta humedad pueden favorecer la proliferación de hongos toxigénicos, lo que exige un desempeño más robusto de los microorganismos mitigadores, como *Trichoderma spp* (Cabral-Miramontes et al., 2022). La evaluación de su capacidad para reducir fumonisinas en granos almacenados bajo estas condiciones no solo valida su uso, sino que también permite identificar las condiciones óptimas para su implementación.

Otro factor relevante es la interacción con otras microbiotas presentes en los alimentos, que pueden competir o interferir con la actividad de los microorganismos utilizados en las estrategias biotecnológicas. En este contexto, los estudios piloto deben incluir la simulación de comunidades microbianas heterogéneas para evaluar cómo estas interacciones afectan la eficacia general del sistema. Por ejemplo, en frutas frescas, las microbiotas naturales pueden inhibir la formación de biopelículas protectoras por *Lactobacillus spp.*, reduciendo su capacidad para prevenir la producción de micotoxinas (Mgomi et al., 2023). El monitoreo en tiempo real es fundamental para evaluar la actividad de los microorganismos y la reducción efectiva de micotoxinas en condiciones reales. Tecnologías como los biosensores electroquímicos permiten medir parámetros como el pH, la actividad enzimática y la concentración de micotoxinas de manera simultánea. Por su parte, la espectrometría de masas, en combinación con cromatografía líquida de alta precisión (LC-MS/MS), ofrece una herramienta sensible y específica para cuantificar múltiples micotoxinas en diferentes matrices alimentarias (Nakhjavan et al., 2020). Estas tecnologías no solo validan la eficacia de los microorganismos, sino que también permiten realizar ajustes dinámicos en las estrategias implementadas.

La integración de estas evaluaciones con herramientas predictivas, como modelos matemáticos e inteligencia artificial, puede optimizar aún más el diseño y aplicación de estas estrategias en condiciones industriales. Por ejemplo, algoritmos de aprendizaje automático pueden analizar los datos recopilados en tiempo real para predecir el desempeño futuro de los microorganismos bajo diferentes escenarios, facilitando la toma de decisiones proactivas y la personalización de las intervenciones. En conclusión, la evaluación de eficacia en condiciones reales es indispensable para traducir las estrategias biotecnológicas del laboratorio al campo o la industria. Estos estudios no solo garantizan la consistencia y efectividad de las intervenciones, sino que también fortalecen la confianza en su

implementación a gran escala, contribuyendo a la mejora de la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de las cadenas de suministro.

Desarrollo de Protocolos para Aplicaciones Específicas

Cada tipo de alimento presenta características únicas que influyen en la implementación de estrategias basadas en microorganismos. El desarrollo de protocolos personalizados para aplicaciones específicas es esencial para maximizar la eficacia y garantizar la seguridad alimentaria. Un ejemplo destacado es el uso de biopelículas protectoras formadas por microorganismos como *Saccharomyces cerevisiae* y *Lactobacillus spp.* en frutas frescas. Estas biopelículas no solo actúan como barreras físicas contra hongos toxigénicos, sino que también liberan compuestos antimicrobianos que inhiben la producción de micotoxinas (Rabasco-Vílchez et al., 2024). Sin embargo, se necesita diseñar protocolos que definan las concentraciones óptimas de microorganismos, las condiciones de aplicación y las frecuencias de tratamiento para garantizar su funcionalidad durante el almacenamiento y transporte. A su vez, protocolos similares pueden adaptarse a otros productos, como lácteos fermentados y alimentos procesados, para abordar los desafíos específicos de cada matriz alimentaria. La integración de estas estrategias con tecnologías emergentes, como encapsulación de microorganismos en películas biodegradables, podría ampliar aún más su aplicabilidad.

La adaptación a escenarios reales permitirá una transición más eficiente de las estrategias basadas en microorganismos desde el laboratorio hasta la práctica industrial. Este enfoque no solo mejorará la eficacia de las intervenciones, sino que también aumentará la confianza en su implementación en sistemas alimentarios globales. Las investigaciones futuras deben centrarse en combinar la optimización técnica con la validación práctica, estableciendo estándares claros que faciliten su adopción a gran escala.

Innovación en Estrategias Combinadas

Las estrategias combinadas integran múltiples mecanismos de acción en un solo sistema para maximizar la eficacia en la mitigación de micotoxinas. Este enfoque innovador busca superar las limitaciones de las estrategias individuales, creando soluciones más robustas, sostenibles y adaptables a escenarios complejos. Dos componentes clave de esta innovación son la integración de mecanismos complementarios y el uso de tecnologías avanzadas para su monitoreo.

Integración de Adsorción Física y Biodegradación Enzimática en Consorcios Microbianos

La integración de adsorción física y biodegradación enzimática dentro de consorcios microbianos representa una de las estrategias más prometedoras para la mitigación efectiva de micotoxinas. Este enfoque combina mecanismos complementarios que no solo amplían el espectro de micotoxinas abordadas, sino que también mejoran la eficacia y estabilidad del sistema frente a variaciones ambientales y matrices alimentarias complejas. En este contexto, *Saccharomyces cerevisiae* juega un papel clave al adsorber micotoxinas como las aflatoxinas mediante los β -glucanos y manoproteínas presentes en su pared celular (Solovyov et al., 2020). Estos componentes ofrecen un mecanismo físico de retención de micotoxinas mediante interacciones electrostáticas e hidrofóbicas, limitando su biodisponibilidad. Simultáneamente, microorganismos como *Trichoderma spp.* aportan un enfoque enzimático, degradando fumonisinas y zearalenona mediante la acción de lacasas, quitinasas y peroxidasas. Esta combinación asegura un doble mecanismo de acción que ataca tanto la presencia física como la estructura química de las micotoxinas.

El diseño de consorcios microbianos efectivos requiere un enfoque estratégico para seleccionar microorganismos con mecanismos de acción sinérgicos y compatibles en términos de crecimiento y actividad metabólica. Por ejemplo, la compatibilidad metabólica asegura que un microorganismo no consuma nutrientes esenciales para otro, mientras que la compatibilidad ecológica previene interacciones negativas, como la inhibición mutua (Basile & Lepek, 2021). Estudios piloto en condiciones controladas, seguidos de pruebas en entornos reales, son esenciales para determinar las proporciones óptimas de cada microorganismo y las condiciones ambientales que maximizan su eficacia. Además de la mitigación de micotoxinas, esta estrategia ofrece beneficios colaterales significativos. Por un lado, mejora la estabilidad del sistema frente a fluctuaciones ambientales, como cambios en el pH y la temperatura, aumentando la robustez de los consorcios en condiciones industriales. Por otro lado, reduce la dependencia de tratamientos químicos, disminuyendo los costos asociados y el impacto ambiental (Chhaya et al., 2022). Este enfoque sostenible es particularmente relevante en sectores como la agricultura y la producción de alimentos, donde la reducción del uso de productos químicos es una prioridad global.

La integración de estos consorcios microbianos en sistemas agrícolas e industriales puede

revolucionar el manejo de micotoxinas. En granos almacenados, por ejemplo, la combinación de microorganismos adsorbentes y degradadores puede proteger simultáneamente la calidad nutricional y la seguridad del producto. En frutas frescas, los consorcios pueden formar biopelículas protectoras que inhiben el desarrollo de hongos toxigénicos, mientras degradan las micotoxinas ya presentes. A futuro, la integración de esta estrategia con tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el monitoreo en tiempo real mediante biosensores, podría optimizar aún más su diseño y aplicación. Estas herramientas permitirán predecir la interacción entre microorganismos y micotoxinas bajo diferentes condiciones, personalizando las intervenciones según las necesidades específicas de cada producto y entorno.

En conclusión, la combinación de adsorción física y biodegradación enzimática en consorcios microbianos no solo amplía las posibilidades de mitigación de micotoxinas, sino que también ofrece una solución más sostenible, económica y adaptable a las demandas de la industria alimentaria y agrícola.

Uso de Tecnologías como Biosensores para Monitoreo en Tiempo Real

El monitoreo en tiempo real es crucial para evaluar la actividad de los microorganismos y los niveles de micotoxinas durante los procesos de mitigación. Los biosensores electroquímicos y ópticos se destacan como herramientas innovadoras para este propósito, ya que combinan sensibilidad, precisión y rapidez. Estos dispositivos utilizan materiales biológicos, como anticuerpos o enzimas, que reaccionan específicamente con las micotoxinas, generando señales detectables. En un sistema de estrategia combinada, los biosensores pueden monitorear simultáneamente la reducción de micotoxinas y la viabilidad de los microorganismos en tiempo real (Pisoschi et al., 2024). Por ejemplo, un biosensor puede medir la actividad enzimática de *Bacillus subtilis* mientras rastrea la concentración de fumonisinas en un lote de maíz almacenado (Qu et al., 2024). Esta capacidad no solo mejora la toma de decisiones durante el proceso, sino que también garantiza la eficacia continua de las estrategias implementadas.

La integración de biosensores en plataformas digitales permite recopilar y analizar grandes cantidades de datos, facilitando la optimización de las condiciones operativas mediante inteligencia artificial (Flynn & Chang, 2024). Esto abre la puerta a sistemas de manejo automatizado que minimicen la intervención humana y maximicen la precisión del control. La combinación de adsorción

física, biodegradación enzimática y tecnologías de monitoreo avanzadas redefine el enfoque hacia la mitigación de micotoxinas. Este modelo integrado no solo mejora la eficacia y la escalabilidad de las estrategias, sino que también fortalece la sostenibilidad y la adaptabilidad a entornos dinámicos (Nguyen et al., 2024). Las investigaciones futuras deben centrarse en desarrollar consorcios microbianos optimizados y en perfeccionar los biosensores para su aplicación en sistemas industriales y agrícolas. Esta convergencia tecnológica tiene el potencial de revolucionar el manejo de micotoxinas y garantizar la seguridad alimentaria global.

Aplicación de Tecnologías Emergentes

La incorporación de herramientas avanzadas de monitoreo es esencial para optimizar las estrategias biotecnológicas en la mitigación de micotoxinas. Estas tecnologías permiten evaluar de manera precisa y en tiempo real la actividad microbiana y los niveles de micotoxinas, lo que facilita la toma de decisiones informadas durante los procesos de tratamiento. Entre las principales herramientas destacan los biosensores y los sistemas de análisis como LC-MS/MS (Cromatografía Líquida acoplada a Espectrometría de Masas).

Incorporación de Tecnologías de Análisis Rápido

Las tecnologías de análisis rápido, como los biosensores y LC-MS/MS, proporcionan métodos sensibles y específicos para detectar micotoxinas y evaluar la eficacia de los microorganismos.

- **Biosensores:** Estos dispositivos electroquímicos y ópticos utilizan materiales biológicos, como anticuerpos, enzimas o células microbianas, para detectar micotoxinas en tiempo real. Su portabilidad y rapidez los hacen ideales para monitorear la actividad microbiana en sistemas agrícolas e industriales. Por ejemplo, biosensores enzimáticos pueden rastrear la degradación de aflatoxinas por *Trichoderma spp.*, proporcionando datos inmediatos sobre el rendimiento del proceso (Luque, 2022).
- **LC-MS/MS:** Este sistema de análisis se ha convertido en el estándar de referencia para detectar múltiples micotoxinas simultáneamente. Su alta sensibilidad permite medir concentraciones en trazas, incluso en matrices alimentarias complejas. En investigaciones microbianas, LC-MS/MS puede evaluar cómo las enzimas producidas

por *Bacillus subtilis* reducen los niveles de fumonisinas, validando la eficacia del mecanismo en condiciones reales (Kamle et al., 2022).

La incorporación de estas tecnologías en investigaciones microbianas no solo valida los resultados en entornos controlados, sino que también ofrece información crítica para escalar estas estrategias a niveles industriales.

Evaluación de la Respuesta de Microorganismos en Tiempo Real

La respuesta de los microorganismos a diferentes condiciones ambientales y matrices alimentarias es un factor clave para el éxito de las estrategias biotecnológicas. Herramientas como los biosensores permiten evaluar en tiempo real variables como la viabilidad celular, la producción de enzimas y la actividad antimicrobiana. Por ejemplo, un sistema integrado de monitoreo puede registrar simultáneamente el pH del medio, la actividad enzimática y la concentración de micotoxinas, ajustando automáticamente las condiciones para optimizar la acción microbiana (Izquierdo-Bueno et al., 2024). Este enfoque dinámico mejora la eficacia del proceso y asegura resultados consistentes en diferentes lotes o entornos. Los datos recopilados en tiempo real pueden analizarse mediante inteligencia artificial para identificar patrones y mejorar la predictibilidad del rendimiento microbiano (Mishra et al., 2024). Este nivel de análisis facilita el diseño de protocolos más precisos y adaptados a las necesidades específicas de cada aplicación.

El uso de herramientas de monitoreo avanzadas transforma el manejo de micotoxinas al ofrecer un control más preciso y dinámico de las estrategias microbianas. Estas tecnologías no solo validan la eficacia de los microorganismos, sino que también mejoran la adaptabilidad y sostenibilidad de los procesos. Las investigaciones futuras deben centrarse en la integración de estas herramientas en plataformas digitales, permitiendo el monitoreo automatizado y la optimización continua de las estrategias de mitigación de micotoxinas.

Inteligencia Artificial y Modelado

La inteligencia artificial (IA) y los modelos matemáticos ofrecen herramientas poderosas para optimizar las estrategias biotecnológicas en la mitigación de micotoxinas. Estas tecnologías permiten predecir y simular el comportamiento de microorganismos en diversas condiciones, acelerando el

diseño de estrategias más efectivas y adaptables. Al combinar datos experimentales con capacidades de predicción, la IA y los modelos matemáticos mejoran la precisión y eficiencia de las intervenciones.

Uso de IA para Predecir la Eficacia de Microorganismos

La inteligencia artificial (IA) ha revolucionado diversos campos de la ciencia, y su aplicación en investigaciones microbianas no es una excepción. Su capacidad para analizar grandes volúmenes de datos con rapidez y precisión permite abordar problemas complejos y multidimensionales que serían difíciles de resolver con métodos tradicionales. En el contexto de la mitigación de micotoxinas, la IA ofrece herramientas innovadoras para predecir el comportamiento de microorganismos bajo diversas condiciones ambientales y en diferentes matrices alimentarias.

Una de las principales ventajas de la IA es su capacidad para identificar patrones en datos complejos y generar modelos predictivos que optimicen el diseño y la aplicación de estrategias biotecnológicas. Algoritmos avanzados de aprendizaje automático (*machine learning*) pueden analizar la interacción entre variables clave, como pH, temperatura, fuerza iónica y composición del medio, y determinar su impacto en la actividad microbiana (Andrade Foronda & Colinet, 2023). Esto no solo facilita la personalización de estrategias, sino que también mejora la comprensión de los factores que limitan o potencian el rendimiento microbiano en escenarios específicos.

Por ejemplo, un modelo de IA puede predecir la capacidad de adsorción de *Saccharomyces cerevisiae* en matrices alimentarias complejas, como productos fermentados, identificando las condiciones óptimas para maximizar la captura de micotoxinas (Izquierdo-Bueno et al., 2024). Asimismo, este tipo de modelos puede estimar la producción enzimática de *Trichoderma spp.* bajo fluctuaciones de temperatura, proporcionando datos clave para ajustar las estrategias en tiempo real durante el procesamiento de alimentos (Alrdahe et al., 2024). La IA también puede modelar el impacto de interacciones entre microorganismos en consorcios microbianos, identificando combinaciones que ofrezcan sinergias óptimas para la adsorción y degradación de múltiples micotoxinas.

Más allá de las predicciones individuales, la IA tiene la capacidad de integrar múltiples fuentes de datos y generar simulaciones que evalúen el rendimiento microbiano en sistemas dinámicos. Por ejemplo, en un sistema industrial, un modelo basado en IA puede analizar datos de monitoreo en

tiempo real, como la concentración de micotoxinas y la actividad enzimática, ajustando automáticamente las condiciones operativas para maximizar la eficacia de los microorganismos (Aggarwal et al., 2024). Esto permite una toma de decisiones más ágil y fundamentada, reduciendo la dependencia de ensayos experimentales extensivos y costosos.

Otro uso prometedor de la IA es la optimización del diseño de consorcios microbianos. A través del análisis de datos genéticos y metabólicos, la IA puede priorizar combinaciones de microorganismos que presenten mayor compatibilidad ecológica y metabólica. Por ejemplo, puede identificar qué microorganismos trabajan mejor juntos en términos de producción enzimática y consumo de nutrientes, reduciendo los efectos competitivos y maximizando la estabilidad del sistema (Mao et al., 2024). Esto acelera significativamente el desarrollo de estrategias optimizadas y mejora la adaptabilidad de los consorcios a condiciones variables. La integración de la IA con tecnologías avanzadas, como los biosensores y los sistemas de monitoreo en tiempo real, abre nuevas posibilidades para la personalización y escalabilidad de las intervenciones. Por ejemplo, la IA puede procesar datos generados por biosensores que monitorean continuamente el pH, la concentración de micotoxinas y la viabilidad microbiana, ajustando las condiciones operativas en tiempo real para mantener un rendimiento óptimo (Nath, 2024).

La inteligencia artificial no solo facilita el análisis y la predicción del comportamiento microbiano, sino que también transforma el diseño y la implementación de estrategias biotecnológicas. Su capacidad para optimizar procesos, personalizar intervenciones y acelerar el desarrollo de soluciones innovadoras la posiciona como una herramienta esencial en la mitigación de micotoxinas. A medida que se integren nuevas tecnologías y se generen más datos, la IA seguirá desempeñando un papel central en la mejora de la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los sistemas productivos.

Modelos Matemáticos para Optimizar Interacciones

Los modelos matemáticos permiten simular la interacción entre microorganismos y micotoxinas, proporcionando un marco teórico para comprender y predecir el desempeño de las estrategias biotecnológicas. Por ejemplo, modelos cinéticos pueden describir cómo las enzimas producidas por microorganismos degradan micotoxinas en función del tiempo y las condiciones del medio (Santos et al., 2023). Estos modelos ayudan a determinar las concentraciones óptimas de microorganismos y micotoxinas, así como las condiciones ambientales ideales para maximizar la

eficiencia del proceso. Otros enfoques, como los modelos de dinámica de sistemas, simulan la interacción en consorcios microbianos, evaluando cómo la competencia o cooperación entre microorganismos afecta la eficacia general (P. Xu, 2021). Esto permite diseñar estrategias más robustas y equilibradas, especialmente en aplicaciones complejas como biocontrol en almacenamiento o alimentos procesados.

La integración de IA y modelos matemáticos con estrategias microbianas transforma el enfoque hacia la mitigación de micotoxinas, proporcionando soluciones más rápidas, precisas y adaptables. Estas herramientas no solo optimizan el diseño de estrategias, sino que también facilitan su implementación en entornos reales. Las investigaciones futuras deben centrarse en desarrollar plataformas integradas que combinen IA, modelado y monitoreo en tiempo real, ofreciendo un control completo sobre las intervenciones biotecnológicas y fortaleciendo la seguridad alimentaria global.

Perspectivas de Aplicación

La aplicación de estrategias biotecnológicas para la mitigación de micotoxinas debe priorizar alimentos con alto riesgo de contaminación, como granos, frutas y productos lácteos, debido a su vulnerabilidad durante el cultivo, almacenamiento y procesamiento. Estos alimentos representan un desafío significativo en términos de seguridad alimentaria, ya que son susceptibles a la proliferación de hongos toxigénicos como *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*. Por esta razón, los esfuerzos deben centrarse en desarrollar estrategias específicas que respondan a las necesidades de cada tipo de producto, garantizando su eficacia y viabilidad. En el caso de los granos, las condiciones de almacenamiento, especialmente en regiones cálidas y húmedas, facilitan la acumulación de micotoxinas como aflatoxinas y fumonisinas (Alemayehu et al., 2023). La implementación de biocontrol mediante microorganismos como *Trichoderma spp.* y *Bacillus subtilis* ha demostrado ser una solución efectiva para inhibir el crecimiento de hongos toxigénicos, prolongando la vida útil de los granos y reduciendo pérdidas económicas (Szczygiel et al., 2024). Por otro lado, las frutas frescas, como las manzanas y las uvas, enfrentan un alto riesgo de contaminación por ocratoxinas y patulina. En estos casos, la formación de biopelículas protectoras con microorganismos como *Saccharomyces cerevisiae* y *Lactobacillus spp.* no solo inhibe la proliferación de hongos, sino que también mantiene las propiedades organolépticas y nutricionales de las frutas durante el almacenamiento y transporte (Avîrvarei et al., 2023).

Los productos lácteos fermentados, como el yogurt y el queso, también ofrecen oportunidades únicas para integrar estrategias de mitigación. Microorganismos como *Lactobacillus rhamnosus* no solo contribuyen al proceso de fermentación, sino que también adsorben micotoxinas como las aflatoxinas M1 presentes en la leche (Salem-Bekhit et al., 2023). Estas aplicaciones son especialmente relevantes en industrias donde la calidad y seguridad del producto son prioridades fundamentales.

La adopción de estas estrategias biotecnológicas ofrece beneficios significativos tanto en términos económicos como en la seguridad alimentaria. En el ámbito industrial, estas soluciones permiten reducir costos al disminuir la dependencia de tratamientos químicos y prevenir la eliminación de lotes contaminados. Además, su escalabilidad y sostenibilidad facilitan su integración en cadenas de suministro de alimentos a nivel global. Desde una perspectiva de salud pública, la reducción efectiva de micotoxinas en alimentos de alto consumo contribuye directamente a la mejora de la calidad de vida y al cumplimiento de regulaciones internacionales en inocuidad alimentaria (Mafe & Büsselberg, 2024). Este enfoque integral refuerza la confianza de los consumidores y promueve prácticas agrícolas e industriales más seguras y sostenibles.

Discusión regulatoria y normativa

En el ámbito internacional, organismos como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han establecido desde la década de 1990 lineamientos para el control de micotoxinas en alimentos y piensos, reconociendo sus efectos en la salud pública y el comercio mundial. La Unión Europea ha fijado límites máximos de aflatoxinas, ocratoxinas y fumonisinas en diferentes matrices alimentarias a través del Reglamento (CE) N.º 1881/2006, mientras que la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA) mantiene directrices actualizadas desde 2011 sobre tolerancias máximas en maíz y otros productos. Este marco regulatorio ha incentivado la investigación y validación de estrategias biotecnológicas para la reducción de micotoxinas, particularmente aquellas basadas en enzimas y microorganismos, que deben cumplir criterios de seguridad y eficacia antes de su aprobación comercial.

En América Latina, y particularmente en Colombia, la regulación de micotoxinas está enmarcada en la Resolución 4506 de 2013 del Ministerio de Salud y Protección Social, que establece los límites máximos permitidos de aflatoxinas en alimentos destinados al consumo humano. Asimismo,

el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) ha publicado lineamientos para la vigilancia de contaminantes en piensos y materias primas agrícolas. Sin embargo, la normatividad vigente aún no contempla de manera explícita el uso de biotecnología aplicada a la biodegradación o adsorción de micotoxinas, lo cual constituye una limitación para la incorporación de estas alternativas en la industria alimentaria nacional.

El principal desafío normativo consiste en armonizar la seguridad alimentaria con la innovación tecnológica, de modo que las soluciones biotecnológicas sean reconocidas como seguras, reproducibles y estandarizadas. A la vez, se generan oportunidades para el diseño de protocolos nacionales de evaluación que se homologuen con los estándares internacionales (FAO, 2021; EFSA, 2022), permitiendo la inclusión de estos avances en políticas públicas de inocuidad alimentaria. De este modo, Colombia podría fortalecer la competitividad de su sector agroalimentario y garantizar una mayor protección de la salud pública frente al riesgo de exposición a micotoxinas.

Futuras Directrices

Las líneas de investigación propuestas para optimizar el uso de microorganismos en la mitigación de micotoxinas abordan desafíos fundamentales en el ámbito de la biotecnología alimentaria. Entre las prioridades destacan la mejora de los mecanismos de acción microbiana mediante ingeniería genética y la inmovilización en soportes biodegradables, la adaptación de estrategias a escenarios reales, la integración de herramientas de monitoreo avanzadas y el desarrollo de modelos predictivos con inteligencia artificial (Volf et al., 2024). Estas líneas no solo buscan superar las limitaciones actuales, sino que también abren nuevas posibilidades para el manejo eficiente de micotoxinas en sistemas alimentarios complejos. Asimismo, la exploración de productos específicos, como granos, frutas y lácteos, garantiza que estas estrategias respondan a las necesidades más críticas en términos de inocuidad y calidad alimentaria.

La implementación de estas investigaciones requiere de un enfoque interdisciplinario que integre conocimientos de microbiología, biotecnología, ingeniería alimentaria y ciencias ambientales. La microbiología aporta la comprensión fundamental de los mecanismos de acción de los microorganismos, mientras que la biotecnología permite diseñar y optimizar estas estrategias mediante herramientas avanzadas como la edición genética y la síntesis de enzimas específicas (Govindasamy et al., 2022). Por su parte, la ingeniería alimentaria es clave para traducir estas estrategias en soluciones

prácticas, escalables y aplicables a nivel industrial. La colaboración interdisciplinaria garantiza un enfoque holístico que combina la innovación técnica con la viabilidad económica y operativa, asegurando que las soluciones sean sostenibles y efectivas en el contexto global.

El desarrollo y la implementación de estas estrategias están alineados con los objetivos de sostenibilidad y seguridad alimentaria establecidos por organismos internacionales. La mitigación de micotoxinas contribuye a reducir el desperdicio de alimentos, optimizar los recursos naturales y proteger la salud pública, especialmente en comunidades vulnerables donde la contaminación por micotoxinas representa un riesgo significativo. Además, estas investigaciones fortalecen la resiliencia de las cadenas de suministro frente a los desafíos del cambio climático, promoviendo prácticas agrícolas e industriales sostenibles. En este sentido, las líneas propuestas no solo responden a los retos actuales, sino que también posicionan a la biotecnología alimentaria como un pilar fundamental para garantizar un futuro alimentario seguro y sostenible.

Conclusiones

En relación con el primer objetivo específico, se logró identificar los mecanismos de acción mediante los cuales los microorganismos logran reducir la presencia de micotoxinas en los alimentos. Se evidenció que, entre los mecanismos más relevantes, se encuentran la adsorción física de micotoxinas a componentes estructurales de la pared celular, como polisacáridos, proteínas y lípidos; la biotransformación en la que las toxinas son convertidas en compuestos menos tóxicos o no tóxicos mediante rutas metabólicas específicas; y la degradación enzimática a través de enzimas producidas por microorganismos como *Lactobacillus*, *Saccharomyces* y *Trichoderma*. La eficacia de estos mecanismos está influenciada por múltiples factores como el pH, la temperatura, la concentración de micotoxina y la estabilidad de las interacciones microorganismo-toxina, lo que demuestra que la acción microbiana no es uniforme y depende de condiciones fisicoquímicas específicas.

Respecto al segundo objetivo, se determinaron diversas estrategias biotecnológicas que han sido desarrolladas y aplicadas para potenciar el uso de microorganismos en la mitigación de micotoxinas en alimentos. Entre ellas se destacan la selección y cultivo de cepas microbianas con alta capacidad adsorbente, la aplicación de consorcios microbianos que actúan de forma sinérgica, y la ingeniería genética que permite modificar microorganismos para incrementar la producción de enzimas específicas o mejorar su adaptabilidad a matrices alimentarias complejas. Además, el uso de soportes inmovilizantes biodegradables ha demostrado mejorar la estabilidad y reutilización de cepas en entornos industriales. Estas estrategias han permitido pasar del laboratorio a aplicaciones reales, evidenciando avances significativos en términos de inocuidad alimentaria y sostenibilidad biotecnológica.

En cuanto al tercer objetivo, se identificaron varias acciones clave que pueden fortalecer la aplicación de estrategias biotecnológicas para la mitigación de micotoxinas en alimentos. En primer lugar, es fundamental priorizar la selección de cepas microbianas con alta eficacia comprobada, tales como *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus rhamnosus*, *Trichoderma spp.* y *Bacillus subtilis*, ajustando su uso según la micotoxina predominante y el tipo de matriz alimentaria. Asimismo, resulta esencial estandarizar las condiciones de aplicación, como el pH, la temperatura y la composición del medio, con el fin de maximizar la actividad enzimática y adsorbente de los microorganismos

involucrados.

Finalmente, este trabajo permite concluir que la biotecnología alimentaria, aplicada al control de micotoxinas, representa una alternativa altamente prometedora para mejorar la inocuidad de los alimentos sin comprometer su calidad nutricional ni generar residuos tóxicos adicionales. La combinación de conocimientos microbiológicos, avances tecnológicos y un enfoque multidisciplinar permite no solo abordar un problema crítico de salud pública, sino también contribuir al cumplimiento de estándares internacionales en seguridad alimentaria. A medida que se continúe investigando e innovando en este campo, se fortalecerá la capacidad de respuesta de los sistemas alimentarios frente a contaminaciones naturales, fortaleciendo tanto la salud del consumidor como la sostenibilidad del sector productivo.

Recomendaciones

A partir del análisis realizado, se identifican diversos vacíos que pueden orientar futuras investigaciones en torno al uso de microorganismos para la mitigación de micotoxinas. En primer lugar, se hace necesario avanzar en estudios aplicados en matrices alimentarias reales, ya que la mayoría de los ensayos actuales han sido desarrollados bajo condiciones de laboratorio que no reflejan la complejidad de los sistemas alimentarios industriales.

Asimismo, es fundamental realizar evaluaciones toxicológicas de los metabolitos generados tras los procesos de biotransformación, con el fin de garantizar que los compuestos resultantes no representen nuevos riesgos para la salud. Por otro lado, la integración de tecnologías digitales como inteligencia artificial y modelos predictivos representa una línea prometedora para optimizar el uso de cepas microbianas y mejorar la toma de decisiones en tiempo real, aunque esta aún se encuentra poco explorada. Además, se evidencia la necesidad de trabajar en la estandarización de protocolos y en el desarrollo de marcos regulatorios que permitan una implementación segura, eficiente y legal de estas estrategias biotecnológicas.

Finalmente, se recomienda priorizar investigaciones que diseñen soluciones accesibles y de bajo costo para contextos rurales o sistemas de producción a pequeña escala, de forma que se garantice un impacto positivo más amplio y equitativo en la inocuidad alimentaria.

Referencias

- Aggarwal, A., Mishra, A., Tabassum, N., Kim, Y. M., & Khan, F. (2024). Detection of Mycotoxin Contamination in Foods Using Artificial Intelligence: A Review. En *Foods* (Vol. 13, Número 20). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/foods13203339>
- Ajmal, M., Hussain, A., Ali, A., Chen, H., & Lin, H. (2023). Strategies for Controlling the Sporulation in *Fusarium* spp. En *Journal of Fungi* (Vol. 9, Número 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/jof9010010>
- Alemayehu, S., Abera, F. A., Ayimut, K. M., Darnell, R., Mahroof, R., Harvey, J., & Subramanyam, B. (2023). Effects of Storage Duration and Structures on Sesame Seed Germination, Mold Growth, and Mycotoxin Accumulation. *Toxins*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/toxins15010039>
- Al-Mutar, D. M. K., Noman, M., Alzawar, N. S. A., Qasim, H. H., Li, D., & Song, F. (2023). The Extracellular Lipopeptides and Volatile Organic Compounds of *Bacillus subtilis* DHA41 Display Broad-Spectrum Antifungal Activity against Soil-Borne Phytopathogenic Fungi. *Journal of Fungi*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/jof9080797>
- Alrdahe, S. S., Moussa, Z., Alanazi, Y. F., Alrdahi, H., Saber, W. E. I. A., & Darwish, D. B. E. (2024). Optimization of Biodegradation of Common Bean Biomass for Fermentation Using *Trichoderma asperellum* WNZ-21 and Artificial Neural Networks. *Fermentation*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/fermentation10070354>
- Álvarez, M., Núñez, F., Delgado, J., Andrade, M. J., Rodríguez, M., & Rodríguez, A. (2021). Competitiveness of three biocontrol candidates against ochratoxigenic *Penicillium nordicum* under dry-cured meat environmental and nutritional conditions. *Fungal Biology*, 125(2), 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2020.03.006>

- Andrade Foronda, D., & Colinet, G. (2023). Prediction of Soil Salinity/Sodicity and Salt-Affected Soil Classes from Soluble Salt Ions Using Machine Learning Algorithms. *Soil Systems*, 7(2).
<https://doi.org/10.3390/soilsystems7020047>
- Angioni, A., Russo, M., La Rocca, C., Pinto, O., & Mantovani, A. (2022). Modified Mycotoxins, a Still Unresolved Issue. En *Chemistry (Switzerland)* (Vol. 4, Número 4, pp. 1498–1514). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/chemistry4040099>
- Avîrvarei, A. C., Salanță, L. C., Pop, C. R., Mudura, E., Pasqualone, A., Anjos, O., Barboza, N., Usaga, J., Dărab, C. P., Burja-Udrea, C., Zhao, H., Fărcaș, A. C., & Coldea, T. E. (2023). Fruit-Based Fermented Beverages: Contamination Sources and Emerging Technologies Applied to Assure Their Safety. En *Foods* (Vol. 12, Número 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/foods12040838>
- Awuchi, C. G., Ondari, E. N., Ogbonna, C. U., Upadhyay, A. K., Baran, K., Okpala, C. O. R., Korzeniowska, M., & Guiné, R. P. F. (2021). Mycotoxins affecting animals, foods, humans and plants: Types, occurrence, toxicities, action mechanisms, prevention and detoxification strategies-a revisit. En *Foods* (Vol. 10, Número 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/foods10061279>
- Bakshi, K., Mitra, S., Sharma, V. K., Jayadev, M. S. K., Sakai, V. G., Mukhopadhyay, R., Gupta, A., & Ghosh, S. K. (2020). Imidazolium-based ionic liquids cause mammalian cell death due to modulated structures and dynamics of cellular membrane. *Biochimica et Biophysica Acta - Biomembranes*, 1862(2). <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2019.183103>
- Barbieri, F. (2023). *Bio-preservation and bio-active compounds as sustainable strategies to improve quality and safety of fresh and fermented products* [Universidad de Granada].
<https://hdl.handle.net/10481/84463>
- Basile, L. A., & Lepek, V. C. (2021). Legume–rhizobium dance: an agricultural tool that could be improved? En *Microbial Biotechnology* (Vol. 14, Número 5, pp. 1897–1917). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13906>

Bi, D., Yang, X., Yao, L., Hu, Z., Li, H., Xu, X., & Lu, J. (2022). Potential Food and Nutraceutical Applications of Alginate: A Review. En *Marine Drugs* (Vol. 20, Número 9). MDPI.

<https://doi.org/10.3390/md20090564>

Braun, H., Woitsch, L., Hetzer, B., Geisen, R., Zange, B., & Schmidt-Heydt, M. (2018). *Trichoderma harzianum*: Inhibition of mycotoxin producing fungi and toxin biosynthesis. *International Journal of Food Microbiology*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.04.021>

Bukhat, S., Imran, A., Javaid, S., Shahid, M., Majeed, A., & Naqqash, T. (2020). Communication of plants with microbial world: Exploring the regulatory networks for PGPR mediated defense signaling. En *Microbiological Research* (Vol. 238). Elsevier GmbH.

<https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126486>

Burrage, S. G., & Jeon, J. (2021). Applications of endophytic microbes in agriculture, biotechnology, medicine, and beyond. En *Microbiological Research* (Vol. 245). Elsevier GmbH.

<https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126691>

Bzducha-Wróbel, A., Janowicz, M., Bryła, M., & Grzesiuk, I. (2024). Adsorption of Zearalenone by *Aureobasidium pullulans* Autolyzed Biomass Preparation and Its Detoxification Properties in Cultures of *Saccharomyces cerevisiae* Yeast. *Toxins*, 16(2).

<https://doi.org/10.3390/toxins16020105>

Cabral-Miramontes, J. P., Olmedo-Monfil, V., Lara-Banda, M., Zúñiga-Romo, E. R., & Aréchiga-Carvajal, E. T. (2022). Promotion of Plant Growth in Arid Zones by Selected *Trichoderma* spp. Strains with Adaptation Plasticity to Alkaline pH. *Biology*, 11(8).

<https://doi.org/10.3390/biology11081206>

Cabrera Joja, A. C. (2024). *Caracterización de la actividad lítica de lipopéptidos cíclicos producidos por Bacillus velezensis en sistemas modelo de membranas de Pseudomonas aeruginosa y eritrocitos*. Universidad de los Andes.

Carrasco Arevalo, H. (2024). *Microorganismos (Lactococcus lactis, Propionibacterium freudenreich y Debaryomyces hansenii) como alternativas a la bioconservación de alimentos.*

Castillo Martinez, J. F. (2022). *Diseño de un proceso de producción de ácido láctico utilizando bacterias ácido lácticas aisladas del proceso de extracción de sacarosa.*

Cesa-Luna, C., Baez, A., Quintero-Hernández, V., De La Cruz-Enríquez, J., Castañeda-Antonio, M. D., & Muñoz-Rojas, J. (2020). The importance of antimicrobial compounds produced by beneficial bacteria on the biocontrol of phytopathogens. *Acta Biologica Colombiana*, 25(1), 140–154.
<https://doi.org/10.15446/abc.v25n1.76867>

Chalella Mazzocato, M., & Jacquier, J. C. (2024). Recent Advances and Perspectives on Food-Grade Immobilisation Systems for Enzymes. En *Foods* (Vol. 13, Número 13). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/foods13132127>

Chen, J., Wen, J., Tang, Y., Shi, J., Mu, G., Yan, R., Cai, J., & Long, M. (2021). Research progress on fumonisin b1 contamination and toxicity: A review. En *Molecules* (Vol. 26, Número 17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules26175238>

Chhaya, R. S., O'Brien, J., & Cummins, E. (2022). Feed to fork risk assessment of mycotoxins under climate change influences - recent developments. En *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 126, pp. 126–141). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.040>

Clarke, L., & Kitney, R. (2020). Developing synthetic biology for industrial biotechnology applications. En *Biochemical Society Transactions* (Vol. 48, Número 1, pp. 113–122). Portland Press Ltd. <https://doi.org/10.1042/BST20190349>

Coughlan, L. M., Cotter, P. D., Hill, C., & Alvarez-Ordóñez, A. (2016). New weapons to fight old enemies: Novel strategies for the (bio)control of bacterial biofilms in the food industry. En *Frontiers in Microbiology* (Vol. 7, Número OCT). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01641>

- Cucina, M., & Tacconi, C. (2022). Recovery of Energy and Nutrients from Mycotoxin-Contaminated Food Products through Biological Treatments in a Circular Economy Perspective: A Review. En *Agronomy* (Vol. 12, Número 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123198>
- De Oliveira Mota, J., Boué, G., Prévost, H., Maillet, A., Jaffres, E., Maignien, T., Arnich, N., Sanaa, M., & Federighi, M. (2021). Environmental monitoring program to support food microbiological safety and quality in food industries: A scoping review of the research and guidelines. En *Food Control* (Vol. 130). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108283>
- Ding, L., Han, M., Wang, X., & Guo, Y. (2023). Ochratoxin A: Overview of Prevention, Removal, and Detoxification Methods. En *Toxins* (Vol. 15, Número 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/toxins15090565>
- Dini, I., Alborino, V., Lanzuise, S., Lombardi, N., Marra, R., Balestrieri, A., Ritieni, A., Woo, S. L., & Vinale, F. (2022). Trichoderma Enzymes for Degradation of Aflatoxin B1 and Ochratoxin A. *Molecules*, 27(12). <https://doi.org/10.3390/molecules27123959>
- Efremenko, E., Stepanov, N., Senko, O., Maslova, O., Lyagin, I., Domnin, M., & Aslanli, A. (2024). “Stop, Little Pot” as the Motto of Suppressive Management of Various Microbial Consortia. En *Microorganisms* (Vol. 12, Número 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081650>
- Envina Troncoso, G., & Stiglich Fuentealba, D. E. (2021). *Presencia de ocratoxina A en alimentos y uso de bacterias ácido lácticas como mecanismo de control*. Universidad Talca, Chile.
- Esparza-Flores, E. E., Hertz, P. F., & Rodrigues, R. C. (2024). Advancements and potential of chitosan-genipin complex in biotechnological applications: A comprehensive review. En *Journal of Applied Polymer Science*. John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/app.56250>
- Estevez Navarro, A. M. (2022). *Biofertilizantes microbianos en la agricultura*.

Farkas, Z., Országh, E., Engelhardt, T., Csorba, S., Kerekes, K., Zentai, A., Süth, M., Nagy, A.,

Miklós, G., Molnár, K., Rácz, C., Dövényi-Nagy, T., Ambrus, Á., Győri, Z., Dobos, A. C.,

Pusztahelyi, T., Pócsi, I., & Józwiak, Á. (2022). A Systematic Review of the Efficacy of

Interventions to Control Aflatoxins in the Dairy Production Chain—Feed Production and Animal Feeding Interventions. En *Toxins* (Vol. 14, Número 2). MDPI.

<https://doi.org/10.3390/toxins14020115>

Fernandes, I. de A. A., Pedro, A. C., Ribeiro, V. R., Bortolini, D. G., Ozaki, M. S. C., Maciel, G. M., &

Haminiuk, C. W. I. (2020). Bacterial cellulose: From production optimization to new applications.

En *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 164, pp. 2598–2611). Elsevier B.V.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.255>

Flynn, C. D., & Chang, D. (2024). Artificial Intelligence in Point-of-Care Biosensing: Challenges and

Opportunities. En *Diagnostics* (Vol. 14, Número 11). Multidisciplinary Digital Publishing

Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/diagnostics14111100>

Fruhauf, S., Pühringer, D., Thamhesl, M., Fajtl, P., Kunz-Vekiru, E., Höbartner-Gussl, A., Schatzmayr,

G., Adam, G., Damborsky, J., Djinovic-Carugo, K., Prokop, Z., & Moll, W. D. (2024). Bacterial

Lactonases ZenA with Noncanonical Structural Features Hydrolyze the Mycotoxin Zearalenone.

ACS Catalysis, 14(5), 3392–3410. <https://doi.org/10.1021/acscatal.4c00271>

Ganeshan, S., Kim, S. H., & Vujanovic, V. (2021). Scaling-up production of plant endophytes in

bioreactors: concepts, challenges and perspectives. En *Bioresources and Bioprocessing* (Vol. 8,

Número 1). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.

<https://doi.org/10.1186/s40643-021-00417-y>

Gao, B., An, W., Wu, J., Wang, X., Han, B., Tao, H., Liu, J., Wang, Z., & Wang, J. (2024).

Simultaneous Degradation of AFB1 and ZEN by CotA Laccase from *Bacillus subtilis* ZJ-2019-1

in the Mediator-Assisted or Immobilization System. *Toxins*, 16(10).

<https://doi.org/10.3390/toxins16100445>

Gautheron, J., & Jéru, I. (2021). The multifaceted role of epoxide hydrolases in human health and disease. En *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 22, Número 1, pp. 1–17). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijms22010013>

Gbashi, S., Adebo, O., Adebiyi, J. A., Targuma, S., Tebele, S., Areo, O. M., Olopade, B., Odukoya, J. O., & Njobeh, P. (2021). Food safety, food security and genetically modified organisms in Africa: a current perspective. En *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews* (Vol. 37, Número 1, pp. 30–63). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/02648725.2021.1940735>

Govardhan Rao, V., NEERAJA, B., CHALAPATHIRAO, N. B. V., RAJASHEKARAM, T., KIREETI, A., & ANOOSHA, V. (2024). In Vitro studies on the development of microbial consortia for the management of major diseases in coconut and citrus. *Journal of Biological Control*, 284–301. <https://doi.org/10.18311/jbc/2024/43762>

Govindasamy, R., Gayathiri, E., Sankar, S., Venkidasamy, B., Prakash, P., Rekha, K., Savaner, V., Pari, A., Thirumalaivasan, N., & Thiruvengadam, M. (2022). Emerging Trends of Nanotechnology and Genetic Engineering in Cyanobacteria to Optimize Production for Future Applications. En *Life* (Vol. 12, Número 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/life12122013>

Guan, Y., Lv, H., Wu, G., Chen, J., Wang, M., Zhang, M., Pang, H., Duan, Y., Wang, L., & Tan, Z. (2023). Effects of Lactic Acid Bacteria Reducing the Content of Harmful Fungi and Mycotoxins on the Quality of Mixed Fermented Feed. *Toxins*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/toxins15030226>

Guerre, P. (2020). Mycotoxin and Gut Microbiota Interactions. En *Toxins* (Vol. 12, Número 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/toxins12120769>

Habschied, K., Krstanović, V., Zdunić, Z., Babić, J., Mastanjević, K., & Šarić, G. K. (2021).

Mycotoxins biocontrol methods for healthier crops and stored products. En *Journal of Fungi* (Vol. 7, Número 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jof7050348>

Hamad, G. M., Amer, A., El-Nogoumy, B., Ibrahim, M., Hassan, S., Siddiqui, S. A., EL-Gazzar, A. M., Khalifa, E., Omar, S. A., Abd-Elmohsen Abou-Alella, S., Ibrahim, S. A., Esatbeyoglu, T., & Mehany, T. (2023). Evaluation of the Effectiveness of Charcoal, *Lactobacillus rhamnosus*, and *Saccharomyces cerevisiae* as Aflatoxin Adsorbents in Chocolate. *Toxins*, 15(1).

<https://doi.org/10.3390/toxins15010021>

Hamad, G. M., Mehany, T., Simal-Gandara, J., Abou-Alella, S., Esua, O. J., Abdel-Wahhab, M. A., & Hafez, E. E. (2023). A review of recent innovative strategies for controlling mycotoxins in foods. En *Food Control* (Vol. 144). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109350>

Han, X., Huangfu, B., Xu, T., Xu, W., Asakiya, C., He, X., & Huang, K. (2022). Research Progress of Safety of Zearalenone: A Review. En *Toxins* (Vol. 14, Número 6). MDPI.

<https://doi.org/10.3390/toxins14060386>

Huang, J., Yang, G., Chen, K., Du, M., Zalán, Z., Hegyi, F., & Kan, J. (2024). Anti-fungal effects of lactic acid bacteria from pickles on the growth and sterigmatocystin production of *Aspergillus versicolor*. *International Journal of Food Microbiology*, 422.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110809>

Huang, X., Yang, D., Zhang, J., Xu, J., & Chen, Y. E. (2022). Recent Advances in Improving Gene-Editing Specificity through CRISPR–Cas9 Nuclease Engineering. En *Cells* (Vol. 11, Número 14).

MDPI. <https://doi.org/10.3390/cells11142186>

Islam, M. M., Mahbub, N. U., & Islam, M. A. (2024). Gut Microorganism-Mediated Neutralization of Mycotoxins: A Promising Approach to Combat Fungal Toxicity. *Advanced Gut & Microbiome Research*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/8448547>

- Izquierdo-Bueno, I., Moraga, J., Cantoral, J. M., Carbú, M., Garrido, C., & González-Rodríguez, V. E. (2024). Smart Viniculture: Applying Artificial Intelligence for Improved Winemaking and Risk Management. En *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 14, Número 22). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/app142210277>
- Janusz, G., Pawlik, A., Świdorska-Burek, U., Polak, J., Sulej, J., Jarosz-Wilkołazka, A., & Paszczyński, A. (2020). Laccase properties, physiological functions, and evolution. En *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 21, Número 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijms21030966>
- Ji, J., Yu, J., Ye, Y., Sheng, L., Fang, J., Yang, Y., & Sun, X. (2023). Biodegradation methods and product analysis of zearalenone and its future development trend: A review. En *Food Control* (Vol. 145). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109469>
- Jiang, Y., Ogunade, I. M., Vyas, D., & Adesogan, A. T. (2021). Aflatoxin in dairy cows: Toxicity, occurrence in feedstuffs and milk and dietary mitigation strategies. *Toxins*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/TOXINS13040283>
- Josselin, L. (2023). *Unveiling the Link: Exploring the Relationship between Volatile Organic Compounds Emission and Mycotoxin Production in Aspergillus flavus and Fusarium verticillioides*.
- Juárez-Maldonado, A., Tortella, G., Rubilar, O., Fincheira, P., & Benavides-Mendoza, A. (2021). Biostimulation and toxicity: The magnitude of the impact of nanomaterials in microorganisms and plants. *Journal of Advanced Research*, 31, 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.12.011>
- Jurick, W. M. (2022). Biotechnology approaches to reduce antimicrobial resistant postharvest pathogens, mycotoxin contamination, and resulting product losses. En *Current Opinion in Biotechnology* (Vol. 78). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102791>
- Kamle, M., Mahato, D. K., Gupta, A., Pandhi, S., Sharma, B., Dhawan, K., Vasundhara, Mishra, S., Kumar, M., Tripathi, A. D., Rasane, P., Selvakumar, R., Kumar, A., Gamalath, S., & Kumar, P.

(2022). Deoxynivalenol: An Overview on Occurrence, Chemistry, Biosynthesis, Health Effects and Its Detection, Management, and Control Strategies in Food and Feed. En *Microbiology Research* (Vol. 13, Número 2, pp. 293–314). Page Press Publications.

<https://doi.org/10.3390/microbiolres13020023>

Kihal, A. (2022). *Evaluation of the capacity of different mycotoxin binders to adsorb mycotoxins and nutrients among different methodologies.*

Kumar, V., Bahuguna, A., Ramalingam, S., Lee, J. S., Han, S. S., Chun, H. S., & Kim, M. (2022). Aflatoxin Reduction and Retardation of Aflatoxin Production by Microorganisms in Doenjang during a One-Year Fermentation. *Journal of Fungi*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/jof8020190>

La Bella, E., Riolo, M., Luz, C., Baglieri, A., Puglisi, I., Meca, G., & Olga Cacciola, S. (2024). Fermentates of consortia of lactic acid bacteria and a cyanobacterium are effective against toxigenic fungi contaminating agricultural produces. *Biological Control*, 191.

<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105478>

Larsbrink, J., & Lo Leggio, L. (2023). Glucuronoyl esterases – enzymes to decouple lignin and carbohydrates and enable better utilization of renewable plant biomass. En *Essays in Biochemistry* (Vol. 67, Número 3, pp. 493–503). Portland Press Ltd. <https://doi.org/10.1042/EBC20220155>

Leslie, J., Poschmaier, B., van Egmond, H., Malachová, A., de Nijs, M., Bagi, F., Zhou, J., Jin, Z., Wang, S., Suman, M., Schatzmayr, G., & Krska, R. (2020). The MyToolbox EU–China Partnership—Progress and Future Directions in Mycotoxin Research and Management. *Toxins*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/toxins12110712>

Li, J., Wang, W., Chen, S., Shao, T., Tao, X., & Yuan, X. (2021). Effect of lactic acid bacteria on the fermentation quality and mycotoxins concentrations of corn silage infested with mycotoxigenic fungi. *Toxins*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/toxins13100699>

Li, P., Su, R., Yin, R., Lai, D., Wang, M., Liu, Y., & Zhou, L. (2020). Detoxification of mycotoxins through biotransformation. En *Toxins* (Vol. 12, Número 2). MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/toxins12020121>

Lima, P. C., Karimian, P., Johnston, E., & Hartley, C. J. (2024). The Use of *Trichoderma* spp. for the Bioconversion of Agro-Industrial Waste Biomass via Fermentation: A Review. *Fermentation*, 10(9), 442. <https://doi.org/10.3390/fermentation10090442>

Liu, H., Li, T., Li, Y., Wang, X., & Chen, J. (2022). Effects of *Trichoderma atroviride* SG3403 and *Bacillus subtilis* 22 on the Biocontrol of Wheat Head Blight. *Journal of Fungi*, 8(12).

<https://doi.org/10.3390/jof8121250>

Liu, M., Zhao, L., Gong, G., Zhang, L., Shi, L., Dai, J., Han, Y., Wu, Y., Khalil, M. M., & Sun, L. (2022). Invited review: Remediation strategies for mycotoxin control in feed. En *Journal of Animal Science and Biotechnology* (Vol. 13, Número 1). BioMed Central Ltd.

<https://doi.org/10.1186/s40104-021-00661-4>

Luque, Á. (2022). *Nuevos elementos de reconocimiento molecular selectivo y métodos de amplificación para el desarrollo de (bio)sensores ópticos.*

Lyagin, I., & Efremenko, E. (2019). Enzymes for detoxification of various mycotoxins: Origins and mechanisms of catalytic action. En *Molecules* (Vol. 24, Número 13). MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/molecules24132362>

Lyagin, I., Maslova, O., Stepanov, N., & Efremenko, E. (2022). Degradation of mycotoxins in mixtures by combined proteinous nanobiocatalysts: In silico, in vitro and in vivo. *International Journal of Biological Macromolecules*, 218, 866–877. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.179>

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.179>

Mabagala, F. S., & Mng'ong'o, M. E. (2022). On the tropical soils; The influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. En *Saudi Journal of Biological Sciences* (Vol. 29, Número 5, pp. 3635–3641). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.056>

Mafe, A. N., & Büsselberg, D. (2024). Mycotoxins in Food: Cancer Risks and Strategies for Control.

En *Foods* (Vol. 13, Número 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

<https://doi.org/10.3390/foods13213502>

Mao, S., Jiang, J., Xiong, K., Chen, Y., Yao, Y., Liu, L., Liu, H., & Li, X. (2024). Enzyme

Engineering: Performance Optimization, Novel Sources, and Applications in the Food Industry.

En *Foods* (Vol. 13, Número 23). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

<https://doi.org/10.3390/foods13233846>

Mateo, E. M., Tarazona, A., Aznar, R., & Mateo, F. (2023). Exploring the impact of lactic acid bacteria

on the biocontrol of toxigenic *Fusarium* spp. and their main mycotoxins. *International Journal of*

Food Microbiology, 387. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.110054>

Maurya, A., Yadav, A., Soni, M., Paul, K. K., Banjare, U., Jha, M. K., Dwivedy, A. K., & Dubey, N.

K. (2024). Nanoencapsulated Essential Oils for Post-Harvest Preservation of Stored Cereals: A

Review. *Foods*, 13(24), 4013. <https://doi.org/10.3390/foods13244013>

Memenza Zegara, M. E. (2023). Estudio de la actividad antifungica de bacterias promotoras del

crecimiento vegetal y sus metabolitos contra fitopatogenos del cultivo de frijol. *Microbial Cell*

Factories, 12(1). <https://doi.org/10.1186/1475-2859-12-29>

Meneau Hernández, R. I., Morales, K. B., Liva Garrido, M., & Fariñas Piñera, T. (2021).

Inmovilización una mirada a los métodos, soportes y retos. Immobilization a look at the methods, supports and challenges. *Rev. CENIC Cienc. Biol*, 52(1).

Mgbeahuruike, A. C., Ejiofor, T. E., Ashang, M. U., Ojiako, C., Obasi, C. C., Ezema, C., Okoroafor,

O., Mwanza, M., Karlsson, M., & Chah, K. F. (2021). Reduction of the adverse impacts of fungal

mycotoxin on proximate composition of feed and growth performance in broilers by combined

adsorbents. *Toxins*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/TOXINS13060430>

- Mgomi, F. C., Yang, Y. ran, Cheng, G., & Yang, Z. quan. (2023). Lactic acid bacteria biofilms and their antimicrobial potential against pathogenic microorganisms. En *Biofilm* (Vol. 5). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.bioflm.2023.100118>
- Mironenka, J., Różalska, S., Soboń, A., & Bernat, P. (2021). Trichoderma harzianum metabolites disturb Fusarium culmorum metabolism: Metabolomic and proteomic studies. *Microbiological Research*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126770>
- Mishra, A., Tabassum, N., Aggarwal, A., Kim, Y. M., & Khan, F. (2024). Artificial Intelligence-Driven Analysis of Antimicrobial-Resistant and Biofilm-Forming Pathogens on Biotic and Abiotic Surfaces. En *Antibiotics* (Vol. 13, Número 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/antibiotics13080788>
- Moyano Guillin, G. S. (2024). *Aplicación de tres cepas Trichoderma spp. como medio sostenible y ambientalmente adecuados para mejorar las características físicas del sustrato para granadilla (Passiflora ligularis) bajo condiciones de vivero.*
- Nakhjavan, B., Ahmed, N. S., & Khosravifard, M. (2020). Development of an improved method of sample extraction and quantitation of multi-mycotoxin in feed by LC-MS/MS. *Toxins*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/toxins12070462>
- Nath, S. (2024). Advancements in food quality monitoring: integrating biosensors for precision detection. En *Sustainable Food Technology* (Vol. 2, Número 4, pp. 976–992). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d4fb00094c>
- Navale, V., Vamkudoth, K. R., Ajmera, S., & Dhuri, V. (2021). Aspergillus derived mycotoxins in food and the environment: Prevalence, detection, and toxicity. En *Toxicology Reports* (Vol. 8, pp. 1008–1030). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2021.04.013>

Ndiaye, S., Zhang, M., Fall, M., Ayessou, N. M., Zhang, Q., & Li, P. (2022). Current Review of

Mycotoxin Biodegradation and Bioadsorption: Microorganisms, Mechanisms, and Main Important Applications. En *Toxins* (Vol. 14, Número 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/toxins14110729>

Nguyen, T., Chen, X., Ma, L., & Feng, Y. (2024). Mycotoxin Biodegradation by Bacillus Bacteria—A Review. En *Toxins* (Vol. 16, Número 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/toxins16110478>

Nji, Q. N., Babalola, O. O., & Mwanza, M. (2023). Soil Aspergillus Species, Pathogenicity and Control Perspectives. En *Journal of Fungi* (Vol. 9, Número 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jof9070766>

Patel, S. K. S., Kalia, V. C., & Lee, J. K. (2023). Laccase Immobilization on Copper-Magnetic Nanoparticles for Efficient Bisphenol Degradation. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(1), 127–134. <https://doi.org/10.4014/jmb.2210.10032>

Peles, F., Sipos, P., Kovács, S., Gyori, Z., Pócsi, I., & Pusztahelyi, T. (2021). Biological control and mitigation of aflatoxin contamination in commodities. En *Toxins* (Vol. 13, Número 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/toxins13020104>

Perrone, G., Ferrara, M., Medina, A., Pascale, M., & Magan, N. (2020). Toxigenic fungi and mycotoxins in a climate change scenario: Ecology, genomics, distribution, prediction and prevention of the risk. En *Microorganisms* (Vol. 8, Número 10, pp. 1–20). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101496>

Petcu, G., Ciobanu, E. M., Paun, G., Neagu, E., Baran, A., Trica, B., Neacsu, A., Atkinson, I., Bucuresteanu, R., Badaluta, A., Ditu, L. M., & Parvulescu, V. (2024). Hybrid Materials Obtained by Immobilization of Biosynthesized Ag Nanoparticles with Antioxidant and Antimicrobial Activity. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(7). <https://doi.org/10.3390/ijms25074003>

Pinheiro, R. E. E., Rodrigues, A. M. D., Lima, C. E., Santos, J. T. O., Pereyra, C. M., Torres, A. M.,

Cavaglieri, L. R., Lopes, J. B., & Muratori, M. C. S. (2020). *Saccharomyces cerevisiae* as a

probiotic agent and a possible aflatoxin B1 adsorbent in simulated fish intestinal tract conditions.

Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinaria e Zootecnia, 72(3), 862–870.

<https://doi.org/10.1590/1678-4162-11280>

Piotrowska, M. (2021). Microbiological decontamination of mycotoxins: Opportunities and limitations.

En *Toxins* (Vol. 13, Número 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/toxins13110819>

Pires, R. C., da Costa Calumby, J., Rosim, R. E., Pires, R. D., Borowsky, A. M., Ali, S., de Paiva, E.

L., Silva, R., Pimentel, T. C., da Cruz, A. G., de Oliveira, C. A. F., & Corassin, C. H. (2024).

Evaluation of Ability of Inactivated Biomasses of *Lactobacillus rhamnosus* and

Saccharomyces cerevisiae to Adsorb Aflatoxin B1 In Vitro. *Foods*, 13(20).

<https://doi.org/10.3390/foods13203299>

Pires, R. C., Portinari, M. R. P., Moraes, G. Z., Khaneghah, A. M., Gonçalves, B. L., Rosim, R. E.,

Oliveira, C. A. F., & Corassin, C. H. (2022). Evaluation of Anti-Aflatoxin M1 effects of heat-

killed cells of *Saccharomyces cerevisiae* in Brazilian commercial yogurts. *Quality Assurance and*

Safety of Crops and Foods, 14(1), 75–81. <https://doi.org/10.15586/QAS.V14I1.1006>

Pisoschi, A. M., Iordache, F., Stanca, L., Mitranescu, E., Bader Stoica, L., Geicu, O. I., Bilteanu, L., &

Serban, A. I. (2024). Biosensors for Food Mycotoxin Determination: A Comparative and Critical

Review. En *Chemosensors* (Vol. 12, Número 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute

(MDPI). <https://doi.org/10.3390/chemosensors12060092>

Poveda, J., & Eugui, D. (2022). Combined use of *Trichoderma* and beneficial bacteria (mainly *Bacillus*

and *Pseudomonas*): Development of microbial synergistic bio-inoculants in sustainable

agriculture. En *Biological Control* (Vol. 176). Academic Press Inc.

<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105100>

- Qin, X., Su, X., Tu, T., Zhang, J., Wang, X., Wang, Y., Wang, Y., Bai, Y., Yao, B., Luo, H., & Huang, H. (2021). Enzymatic degradation of multiple major mycotoxins by dye-decolorizing peroxidase from bacillus subtilis. *Toxins*, *13*(6). <https://doi.org/10.3390/TOXINS13060429>
- Qu, Z., Ren, X., Du, Z., Hou, J., Li, Y., Yao, Y., & An, Y. (2024). Fusarium mycotoxins: The major food contaminants. En *mLife* (Vol. 3, Número 2, pp. 176–206). John Wiley & Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/mlf2.12112>
- Rabasco-Vílchez, L., Bolívar, A., Morcillo-Martín, R., & Pérez-Rodríguez, F. (2024). Exploring the microbiota of tomato and strawberry plants as sources of bio-protective cultures for fruits and vegetables preservation. En *Future Foods* (Vol. 9). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100344>
- Ramos Girona, A. J., Marín Sillué, S., Molino Gahete, F., Vila Donat, P., & Sanchis Almenar, V. (2020). Mycotoxins: The silent enemy. *Arbor*, *196*(795), 1–13. <https://doi.org/10.3989/arbor.2020.795n1004>
- Rodríguez, J., De Moya, Y., García, A., Palma, M. F., & Torres, F. (2023). Dectin 1a orquesta respuestas complejas en linajes inmunocompetentes: hacia β -Glucanos de origen fúngico. *Biociencias*, *18*(2), 53–72. <https://doi.org/10.18041/2390>
- Romera Garcia, E. (2021). *Síntesis y caracterización de biodisolventes supramoleculares y desarrollo de estrategias innovadoras para la extracción y determinación de contaminantes*. Universidad de Cordoba.
- Salem-Bekhit, M. M., Riad, O. K. M., Selim, H. M. R. M., Tohamy, S. T. K., Taha, E. I., Al-Suwayeh, S. A., & Shazly, G. A. (2023). Box–Behnken Design for Assessing the Efficiency of Aflatoxin M1 Detoxification in Milk Using *Lactobacillus rhamnosus* and *Saccharomyces cerevisiae*. *Life*, *13*(8). <https://doi.org/10.3390/life13081667>

Sánchez Zaletas, J. O. (2020). *Efecto de las variables de fermentación sobre la remoción de micotoxinas por acción de levaduras comerciales utilizadas en la producción de cerveza artesanal*. www.veracruz.tecnm.mx

Santos, J., Castro, T., Venâncio, A., & Silva, C. (2023). Degradation of ochratoxins A and B by lipases: A kinetic study unraveled by molecular modeling. *Heliyon*, 9(9).

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19921>

Santoyo, G., Guzmán-Guzmán, P., Parra-Cota, F. I., de los Santos-Villalobos, S., Orozco-Mosqueda, M. D. C., & Glick, B. R. (2021). Plant growth stimulation by microbial consortia. En *Agronomy* (Vol. 11, Número 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020219>

Sellitto, V. M., Zara, S., Fracchetti, F., Capozzi, V., & Nardi, T. (2021). Microbial biocontrol as an alternative to synthetic fungicides: Boundaries between pre-and postharvest applications on vegetables and fruits. En *Fermentation* (Vol. 7, Número 2). MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/fermentation7020060>

Shabeer, S., Asad, S., Jamal, A., & Ali, A. (2022). Aflatoxin Contamination, Its Impact and Management Strategies: An Updated Review. En *Toxins* (Vol. 14, Número 5). MDPI.

<https://doi.org/10.3390/toxins14050307>

Shabeer, S., Tahira, R., & Jamal, A. (2021). Fusarium spp. Mycotoxin Production, Diseases and their Management: An Overview. En *Pakistan Journal of Agricultural Research* (Vol. 34, Número 2, pp. 278–293). ResearchersLinks Ltd. <https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2021/34.2.278.293>

Sharma, V., Tsai, M. L., Nargotra, P., Chen, C. W., Kuo, C. H., Sun, P. P., & Dong, C. Di. (2022). Agro-Industrial Food Waste as a Low-Cost Substrate for Sustainable Production of Industrial Enzymes: A Critical Review. En *Catalysts* (Vol. 12, Número 11). MDPI.

<https://doi.org/10.3390/catal12111373>

- Solanki, P., Putatunda, C., Kumar, A., Bhatia, R., & Walia, A. (2021). Microbial proteases: ubiquitous enzymes with innumerable uses. En *3 Biotech* (Vol. 11, Número 10). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02928-z>
- Solovyov, V. V., Marhunova, A. M., Permiakova, O. L., Voblikova, T. V., & Semenova, Y. O. (2020). Yeast cell walls adsorption capacity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *613*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012143>
- Spadola, G., Giannelli, G., Magagnoli, S., Lanzoni, A., Albertini, M., Nicoli, R., Ferrari, R., Burgio, G., Restivo, F. M., & Degola, F. (2022). Validation and Ecological Niche Investigation of a New Fungal Intraspecific Competitor as a Biocontrol Agent for the Sustainable Containment of Aflatoxins on Maize Fields. *Journal of Fungi*, *8*(5). <https://doi.org/10.3390/jof8050425>
- Subagia, R., Schweiger, W., Kunz-Vekiru, E., Wolfsberger, D., Schatzmayr, G., Ribitsch, D., & Guebitz, G. M. (2024). Detoxification of aflatoxin B1 by a *Bacillus subtilis* spore coat protein through formation of the main metabolites AFQ1 and epi-AFQ1. *Frontiers in Microbiology*, *15*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1406707>
- Sun, H., He, Z., Xiong, D., & Long, M. (2023). Mechanisms by which microbial enzymes degrade four mycotoxins and application in animal production: A review. En *Animal Nutrition* (Vol. 15, pp. 256–274). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.09.003>
- Syed, S., Tollamadugu, N. V. K. V. P., & Lian, B. (2020). *Aspergillus* and *Fusarium* control in the early stages of *Arachis hypogaea* (groundnut crop) by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) consortium. *Microbiological Research*, *240*. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126562>
- Szczygiel, T., Kosirog, A., & Otlweska, A. (2024). Synthetic and Natural Antifungal Substances in Cereal Grain Protection: A Review of Bright and Dark Sides. *Molecules*, *14*(2), 738–754. <https://doi.org/10.3390/molecules>

- Tan, Y. S., Zhang, R. K., Liu, Z. H., Li, B. Z., & Yuan, Y. J. (2022). Microbial Adaptation to Enhance Stress Tolerance. En *Frontiers in Microbiology* (Vol. 13). Frontiers Media S.A.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.888746>
- Tian, Y., Zhang, D., Cai, P., Lin, H., Ying, H., Hu, Q. N., & Wu, A. (2022). Elimination of Fusarium mycotoxin deoxynivalenol (DON) via microbial and enzymatic strategies: Current status and future perspectives. En *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 124, pp. 96–107). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.002>
- Trienens, M., Kurtz, J., & Wertheim, B. (2023). Rapid but narrow – Evolutionary adaptation and transcriptional response of *Drosophila melanogaster* to toxic mould. *Molecular Ecology*, 32(11), 2784–2797. <https://doi.org/10.1111/mec.16885>
- Urlacher, V. B., & Koschorreck, K. (2021). Peculiarities and applications of aryl-alcohol oxidases from fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11337-4>/Published
- Utama, G. L., Dio, C., Sulistiyo, J., Yee Chye, F., Lembong, E., Cahyana, Y., Kumar Verma, D., Thakur, M., Patel, A. R., & Singh, S. (2021). Evaluating comparative β -glucan production aptitude of *Saccharomyces cerevisiae*, *Aspergillus oryzae*, *Xanthomonas campestris*, and *Bacillus natto*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(12), 6765–6773.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.07.051>
- Valdivia Aranda, N. (2023). *Fumonisin B1: Problemática y Métodos de análisis para su determinación en maíz y derivados*. Universidad de Jaén.
- Vargas Peralvo, E. A., Moreano Teran, N. F., Cardenas Bonifa, M. J., & Montoya Vizueté, S. N. (2024). Presencia de Micotoxinas y sus metabolitos, efecto del consumo de cereales. *Reciena Edición Especial*, 4(1), 87–98. <https://reciena.esPOCH.edu.ec/index.php/reciena/index>

- Vlaicu, P. A., Untea, A. E., Varzaru, I., Saracila, M., & Oancea, A. G. (2023). Designing Nutrition for Health—Incorporating Dietary By-Products into Poultry Feeds to Create Functional Foods with Insights into Health Benefits, Risks, Bioactive Compounds, Food Component Functionality and Safety Regulations. En *Foods* (Vol. 12, Número 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/foods12214001>
- Volf, M., Vučemilović, A., & Dobrović, Ž. (2024). Enhancing Environmental and Human Health Management Through the Integration of Advanced Revitalization Technologies Utilizing Artificial Intelligence. *Toxics*, 12(12), 847. <https://doi.org/10.3390/toxics12120847>
- Wang, J., Wang, J., Gu, Q., Ma, Y., Yang, Y., Zhu, J., & Zhang, Q. (2020). The biological function of m6A demethylase ALKBH5 and its role in human disease. En *Cancer Cell International* (Vol. 20, Número 1). BioMed Central. <https://doi.org/10.1186/s12935-020-01450-1>
- Wang, J., & Xie, Y. (2020). Review on microbial degradation of zearalenone and aflatoxins. *Grain & Oil Science and Technology*, 3(3), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2020.05.002>
- Wang, L., Dekker, M., Heising, J., Zhao, L., & Fogliano, V. (2023). Food matrix design can influence the antimicrobial activity in the food systems: A narrative review. En *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2205937>
- Wang, Y., Yang, L., Xu, J., Xin, F., & Jiang, L. (2023). Applications of synthetic microbial consortia in biological control of mycotoxins and fungi. En *Current Opinion in Food Science* (Vol. 53). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2023.101074>
- Wikandari, R., Manikharda, Baldermann, S., Ningrum, A., & Taherzadeh, M. J. (2021). Application of cell culture technology and genetic engineering for production of future foods and crop improvement to strengthen food security. En *Bioengineered* (Vol. 12, Número 2, pp. 11305–11330). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2003665>

Wolkoff, P., Azuma, K., & Carrer, P. (2021). Health, work performance, and risk of infection in office-like environments: The role of indoor temperature, air humidity, and ventilation. En *International Journal of Hygiene and Environmental Health* (Vol. 233). Elsevier GmbH.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113709>

Xu, P. (2021). Dynamics of microbial competition, commensalism, and cooperation and its implications for coculture and microbiome engineering. *Biotechnology and Bioengineering*, 118(1), 199–209. <https://doi.org/10.1002/bit.27562>

Xu, R., Yiannikouris, A., Shandilya, U. K., & Karrow, N. A. (2023). Comparative Assessment of Different Yeast Cell Wall-Based Mycotoxin Adsorbents Using a Model- and Bioassay-Based In Vitro Approach. *Toxins*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/toxins15020104>

Yiannikouris, A., Apajalahti, J., Siikanen, O., Dillon, G. P., & Moran, C. A. (2021). *Saccharomyces cerevisiae* Cell Wall-Based Adsorbent Reduces Aflatoxin B1 Absorption in Rats. *Toxins*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/TOXINS13030209>

Zadravec, M., Markov, K., Lešić, T., Frece, J., Petrović, D., & Pleadin, J. (2022). Biocontrol Methods in Avoidance and Downsizing of Mycotoxin Contamination of Food Crops. En *Processes* (Vol. 10, Número 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/pr10040655>

Zapašnik, A., Bryła, M., Sokołowska, B., & Waśkiewicz, A. (2024). *Pleurotus* spp.—an effective way in degradation mycotoxins? A comprehensive review. En *Mycotoxin Research*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s12550-024-00572-z>

Zhang, J., Tang, X., Cai, Y., & Zhou, W. W. (2023). Mycotoxin Contamination Status of Cereals in China and Potential Microbial Decontamination Methods. En *Metabolites* (Vol. 13, Número 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/metabo13040551>

Zhang, Y., Ouyang, B., Zhang, W., Guang, C., Xu, W., & Mu, W. (2023). An overview of chemical, physical and biological methods for zearalenone elimination: Recent advances and future

Uso de microorganismos como agentes adsorbentes para la mitigación de Micotoxinas en alimentos: una estrategia Biotecnológica para garantizar la seguridad alimentaria.
prospective. En *Food Control* (Vol. 154). Elsevier Ltd.

101

<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110011>