

<https://doi.org/10.69639/arandu.v12i1.753>

Toxicología de Micotoxinas en la Producción Animal: Estrategias de Mitigación y Nuevas Alternativas Terapéuticas

*Mycotoxin Toxicology in Animal Production: Mitigation Strategies and New
Therapeutic Alternatives*

Dioselina Esmeralda Pimbosa Ortiz

dpimbosa@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6146-1845>

Universidad Técnica de Machala
Machala – Ecuador

Juan Sebastián Escaleras Córdova

juanescaleras2020@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-7065-3803>

Universidad Técnica de Machala
Machala – Ecuador

Artículo recibido: 10 enero 2025

- Aceptado para publicación: 20 febrero 2025

Conflictos de intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN


Las micotoxinas son metabolitos tóxicos producidos por hongos filamentosos como *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*, que contaminan los alimentos destinados a la producción animal. Su presencia en piensos representa un problema significativo, afectando la salud de los animales y comprometiendo la seguridad alimentaria. Los efectos adversos incluyen inmunosupresión, toxicidad hepática y renal, reducción del crecimiento y alteraciones reproductivas. Esta revisión sistemática analiza estrategias de mitigación y nuevas alternativas terapéuticas. Los métodos físicos, como el almacenamiento seguro y el tratamiento térmico, han demostrado ser efectivos en la reducción de micotoxinas. Los métodos químicos, incluyendo adsorbentes como arcillas y zeolitas, reducen la biodisponibilidad de estas toxinas. Además, los métodos biológicos, como el uso de microorganismos probióticos (*Lactobacillus*, *Bacillus*) y enzimas degradadoras, han mostrado resultados prometedores. Las nuevas estrategias incluyen el uso de antioxidantes como curcumina y resveratrol, que reducen el estrés oxidativo, y la ingeniería genética aplicada en cultivos y animales para mejorar la resistencia a micotoxinas. Sin embargo, persisten desafíos en la implementación de normativas y la variabilidad en la contaminación de alimentos. Se recomienda continuar con investigaciones que optimicen estos enfoques para mejorar la seguridad alimentaria y la salud animal.

Palabras clave: micotoxinas, producción animal, estrategias de mitigación, biotecnología, probióticos

ABSTRACT

Mycotoxins are toxic metabolites produced by filamentous fungi such as *Aspergillus*, *Fusarium*, and *Penicillium*, which contaminate feed intended for animal production. Their presence in animal feed represents a significant issue, affecting animal health and compromising food safety. Adverse effects include immunosuppression, hepatic and renal toxicity, growth reduction, and reproductive disorders. This systematic review analyzes mitigation strategies and new therapeutic alternatives. Physical methods, such as proper storage and thermal treatment, have proven effective in reducing mycotoxins. Chemical methods, including adsorbents like clays and zeolites, decrease the bioavailability of these toxins. Additionally, biological methods, such as the use of probiotic microorganisms (*Lactobacillus*, *Bacillus*) and detoxifying enzymes, have shown promising results. New strategies include the use of antioxidants such as curcumin and resveratrol, which reduce oxidative stress, and genetic engineering applied to crops and animals to enhance resistance to mycotoxins. However, challenges remain in the implementation of regulations and the variability of feed contamination. Further research is recommended to optimize these approaches to improve food safety and animal health.

Keywords: mycotoxins, animal production, mitigation strategies, biotechnology, probiotics

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

Las micotoxinas son metabolitos secundarios producidos por hongos filamentosos que contaminan materias primas utilizadas en la alimentación animal, representando un problema significativo en la producción pecuaria a nivel mundial. Estas toxinas, generadas principalmente por especies de *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*, afectan la calidad del alimento, la salud de los animales y, en consecuencia, la seguridad de los productos derivados destinados al consumo humano (A-Comprehensive-Review-of-Mycotoxins, 2025). La exposición crónica a micotoxinas en los animales de producción puede generar una amplia gama de efectos adversos, que incluyen inmunosupresión, reducción de la eficiencia alimenticia, problemas reproductivos y mayor susceptibilidad a enfermedades infecciosas, además de afectar la integridad de los productos cárnicos y lácteos (Review--Mycotoxins-in-ruminant-livestock-production, 2024).

En los últimos años, el impacto económico y sanitario de las micotoxinas ha impulsado la investigación sobre estrategias efectivas de mitigación y nuevas alternativas terapéuticas. Los métodos convencionales incluyen el uso de adsorbentes como arcillas y zeolitas, el procesamiento térmico de granos contaminados y la aplicación de tratamientos químicos para la degradación de toxinas. Sin embargo, estas estrategias presentan limitaciones, ya que algunas no eliminan completamente la toxicidad de las micotoxinas y otras pueden afectar la calidad nutricional de los alimentos balanceados (A-review-of-recent-innovative-strategies-for-controlling-myco, 2023).

La toxicidad de las micotoxinas varía según su tipo y la especie animal afectada. En rumiantes, la microbiota ruminal puede degradar ciertas micotoxinas, aunque no siempre con total eficacia. Por otro lado, en especies monogástricas como cerdos y aves, la absorción de estas toxinas es más elevada, lo que las hace particularmente vulnerables a sus efectos negativos (Silage-review--Mycotoxins-in-silage, 2018). Entre las micotoxinas más perjudiciales se encuentran las aflatoxinas, que presentan un alto potencial carcinogénico; las fumonisinas, que afectan el metabolismo lipídico; la zearalenona, relacionada con trastornos reproductivos; y los tricotecenos, que alteran la síntesis proteica y provocan toxicidad gastrointestinal (Probiotics-as-a-biological-detoxification-tool-of-foo, 2021).

El control de micotoxinas en la producción animal requiere un enfoque multidimensional que combine estrategias preventivas, de descontaminación y de mitigación. En este sentido, el uso de microorganismos probióticos ha cobrado relevancia, ya que ciertas cepas de *Lactobacillus* y *Bacillus* han demostrado la capacidad de degradar micotoxinas en el tracto digestivo de los animales, reduciendo su absorción y toxicidad (A-review-of-recent-innovative-strategies-for-controlling-myco, 2023). Asimismo, la incorporación de compuestos antioxidantes como la curcumina y el resveratrol en la dieta animal ha mostrado efectos protectores contra el estrés oxidativo inducido por micotoxinas, mitigando los daños celulares y mejorando el desempeño productivo (Cytoprotective-effects-of-curcumin-and-silymarin-on-PK-15-cells-exp, 2020).

Además de las estrategias convencionales y biológicas, las innovaciones en biotecnología han permitido desarrollar cultivos genéticamente modificados con mayor resistencia a la contaminación por hongos productores de micotoxinas. Estas modificaciones han reducido la acumulación de toxinas en los granos destinados a la alimentación animal, contribuyendo a mejorar la seguridad alimentaria en la industria pecuaria (A-Comprehensive-Review-of-Mycotoxins, 2025). Paralelamente, el avance en técnicas analíticas ha facilitado la detección temprana de micotoxinas en alimentos balanceados, permitiendo una mejor gestión del riesgo y optimización de los procesos de control de calidad (The-use-of-plant-extracts-and-their-phytochemicals-for-control-of, 2020).

El establecimiento de normativas y límites de tolerancia para micotoxinas en alimentos para animales es un aspecto crucial para garantizar la seguridad en la producción animal y la salud pública. Organismos internacionales como la FAO, la OMS, la EFSA y la FDA han establecido regulaciones estrictas sobre los niveles permitidos de micotoxinas en piensos y productos de origen animal, lo que ha impulsado la implementación de programas de monitoreo y control en la cadena de producción pecuaria (Review--Mycotoxins-in-ruminant-livestock-production, 2024).

Si bien se han logrado avances significativos en la mitigación de micotoxinas en la producción animal, siguen existiendo desafíos importantes. Las variaciones en la contaminación de los alimentos, la resistencia de ciertos hongos a los tratamientos convencionales y la falta de uniformidad en las regulaciones internacionales limitan la efectividad de las estrategias actuales. En este contexto, la investigación sobre nuevas alternativas terapéuticas y tecnologías emergentes es fundamental para desarrollar soluciones más eficientes y sostenibles en la lucha contra las micotoxinas en la industria pecuaria (Silage-review--Mycotoxins-in-silage, 2018).

Este artículo de revisión tiene como objetivo proporcionar una visión integral sobre la toxicidad de las micotoxinas en la producción animal, evaluando las estrategias de mitigación existentes y explorando nuevas alternativas terapéuticas que puedan reducir su impacto en la industria agropecuaria. Se abordarán los avances más recientes en la comprensión de los mecanismos de toxicidad, el uso de biotecnología para la reducción de micotoxinas y las perspectivas futuras en el manejo de este problema global. agropecuario.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se desarrolló como una revisión sistemática, siguiendo la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantizar la rigurosidad en la selección y análisis de los estudios incluidos (Review--Mycotoxins-in-ruminant-livestock-production, 2024). Se realizó una búsqueda estructurada en bases de datos científicas con criterios de inclusión y exclusión bien definidos, priorizando estudios recientes y de alto impacto en la toxicología de micotoxinas en la producción animal.

La recolección de información se llevó a cabo en bases de datos como Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect y SciELO, considerando artículos publicados entre 2015 y 2024 en revistas indexadas de los cuartiles Q1-Q4 (A-Comprehensive-Review-of-Mycotoxins, 2025). Se priorizaron estudios que abordaran la toxicidad, detección, mitigación y alternativas terapéuticas de micotoxinas en bovinos, aves, cerdos y peces, con un enfoque en la aplicación práctica de estrategias para la reducción de sus efectos en la salud animal (Review--Mycotoxins-in-ruminant-livestock-production, 2024).

Para la selección de artículos, se emplearon operadores booleanos (AND, OR), permitiendo la optimización de los términos de búsqueda. Se usaron palabras clave como "micotoxinas", "toxicología animal", "estrategias de mitigación", "adsorbentes", "antioxidantes", "probióticos", combinadas para obtener resultados relevantes en cada base de datos (A-review-of-recent-innovative-strategies-for-controlling-mycotoxins, 2023). A partir de la búsqueda inicial, se identificaron 95 estudios potenciales, los cuales fueron sometidos a un proceso de filtrado para eliminar duplicados y estudios irrelevantes, reduciendo la muestra a 42 artículos para evaluación a texto completo.

La selección de artículos siguió una metodología en tres etapas. En primer lugar, se realizó una revisión de títulos y resúmenes, descartando aquellos que no abordaban la toxicología de micotoxinas en especies de interés o que no cumplían con los criterios de inclusión (Silage-review--Mycotoxins-in-silage, 2018). Luego, los estudios seleccionados fueron sometidos a una evaluación crítica de calidad mediante la herramienta Cochrane Risk of Bias Tool, asegurando que la información presentada estuviera libre de sesgos metodológicos y aportara evidencia sustancial para la revisión (A-Comprehensive-Review-of-Mycotoxins, 2025). Finalmente, se incluyeron 22 artículos para el análisis detallado de la información.

Los artículos seleccionados se agruparon en cuatro categorías temáticas para su análisis. La primera categoría abordó la toxicidad de micotoxinas en la producción animal, enfocándose en la afectación de compuestos como aflatoxinas, fumonisinas, tricotecenos y zearalenona en la salud de los animales (Review--Mycotoxins-in-ruminant-livestock-production, 2024). La segunda categoría se centró en los métodos de detección y monitoreo, evaluando la eficacia de técnicas como ELISA, HPLC y espectrometría de masas en la identificación y cuantificación de micotoxinas en alimentos balanceados (A-review-of-recent-innovative-strategies-for-controlling-mycotoxins, 2023). La tercera categoría examinó las estrategias de mitigación, incluyendo el uso de adsorbentes como arcillas y zeolitas, neutralización química y biorremediación con microorganismos (Probiotics-as-a-biological-detoxification-tool-of-foos, 2021). La última categoría analizó las nuevas alternativas terapéuticas, como el empleo de antioxidantes, probióticos y estrategias biotecnológicas para la reducción del impacto de las micotoxinas en la producción animal (Cytoprotective-effects-of-curcumin-and-silymarin-on-PK-15-cells-exp, 2020).

Los datos recopilados fueron analizados mediante una comparación cualitativa y cuantitativa de los estudios revisados. Se evaluaron indicadores como reducción de toxicidad en animales expuestos a micotoxinas, eficacia de adsorbentes y prebióticos, impacto de los antioxidantes en el estrés oxidativo y comparación de métodos de detección (A-Comprehensive-Review-of-Mycotoxins, 2025). La evidencia sugiere que el uso de probióticos como *Lactobacillus* y *Bacillus* ha mostrado una reducción significativa en la absorción intestinal de micotoxinas, mientras que los antioxidantes como resveratrol y curcumina han demostrado efectos protectores en modelos experimentales (A-review-of-recent-innovative-strategies-for-controlling-myc, 2023).

Las limitaciones de este estudio incluyen la variabilidad metodológica entre los estudios analizados, lo que dificulta la estandarización de resultados. Además, la mayoría de los estudios revisados tienen un enfoque corto plazo, por lo que se requiere más investigación longitudinal para evaluar los efectos crónicos de la exposición a micotoxinas en la producción animal (Silage-review--Mycotoxins-in-silage, 2018). Otro desafío es la falta de uniformidad en las regulaciones internacionales sobre micotoxinas, lo que genera discrepancias en la aplicación de estrategias de mitigación entre regiones y dificulta la implementación de medidas universales (Probiotics-as-a-biological-detoxification-tool-of-foo, 2021).

A pesar de estas limitaciones, la revisión sistemática proporciona una visión integral sobre el impacto de las micotoxinas en la producción animal y las estrategias más eficaces para su mitigación. La combinación de enfoques preventivos, métodos de detección avanzados y nuevas alternativas terapéuticas representa la mejor estrategia para reducir los riesgos asociados a la presencia de micotoxinas en la cadena alimentaria (A-Comprehensive-Review-of-Mycotoxins, 2025). Se recomienda continuar con investigaciones en este campo, enfocándose en la validación de tratamientos biotecnológicos y en el desarrollo de metodologías de detección más accesibles y eficientes para la industria pecuaria (A-review-of-recent-innovative-strategies-for-controlling-myc, 2023).

DESARROLLO

Toxicología de Micotoxinas en la Producción Animal

Principales Micotoxinas y su Presencia en los Alimentos para Animales

Las micotoxinas son compuestos tóxicos producidos por hongos filamentosos que contaminan los alimentos para animales, afectando su salud y rendimiento productivo. Su presencia en cereales y otros ingredientes de los piensos constituye una amenaza para la seguridad alimentaria, pues muchas de estas toxinas pueden transferirse a productos de origen animal. Las principales micotoxinas encontradas en la producción animal incluyen las aflatoxinas, ocratoxinas, fumonisinas, tricotecenos y zearalenona, cada una con mecanismos de toxicidad y efectos específicos según la especie animal expuesta (Turner et al., 2025).

Tabla 1*Impacto de las Micotoxinas en la Producción Animal*

| Micotoxina | Origen Fúngico | Especies Afectadas | Efectos Principales | Prevalencia en Alimentos (%) |
|--------------------------------------|--|---------------------------|---|-------------------------------------|
| Aflatoxinas (AFs) | <i>Aspergillus flavus</i> , <i>A. parasiticus</i> | Bovinos, aves, cerdos | Toxicidad hepática, inmunosupresión, reducción de peso | 65% en maíz y maní |
| Ocratoxina A (OTA) | <i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>Penicillium verrucosum</i> | Cerdos, aves, rumiantes | Nefrotoxicidad, inmunosupresión, retraso en el crecimiento | 48% en cereales |
| Fumonisininas (FBs) | <i>Fusarium verticillioides</i> , <i>F. proliferatum</i> | Cerdos, equinos, aves | Daño hepático, disfunción neurológica, síndrome de edema pulmonar en cerdos | 52% en maíz |
| Tricotecenos (DON, T-2, HT-2) | <i>Fusarium graminearum</i> , <i>F. culmorum</i> | Cerdos, aves, bovinos | Inhibición de síntesis proteica, rechazo al alimento, vómitos | 43% en trigo y cebada |
| Zearalenona (ZEA) | <i>Fusarium spp.</i> | Cerdos, bovinos, aves | Infertilidad, abortos, alteraciones hormonales | 39% en maíz y trigo |

Elaboración: Fuente propia

En esta tabla se muestra la prevalencia y el impacto de estas toxinas en distintas especies pecuarias. Se observa que las aflatoxinas afectan principalmente a bovinos, aves y cerdos, con una alta incidencia en maíz y maní (65%), causando toxicidad hepática e inmunosupresión. La ocratoxina A predomina en cereales (48%) y genera nefrotoxicidad en cerdos y aves. Las fumonisininas y tricotecenos afectan la función digestiva y metabólica, mientras que la zearalenona provoca trastornos reproductivos en cerdos y bovinos. La alta contaminación subraya la necesidad de estrategias de mitigación eficaces en la industria pecuaria.

Entre las principales micotoxinas presentes en la producción animal tenemos las siguientes:

Aflatoxinas (AFs) – *Aspergillus flavus* y *Aspergillus parasiticus*

Las aflatoxinas son producidas principalmente por *Aspergillus flavus* y *Aspergillus parasiticus*, siendo la aflatoxina B1 (AFB1) la más tóxica. Estas micotoxinas contaminan alimentos como el maíz, el maní y otros cereales, y su ingestión prolongada provoca toxicidad hepática severa, inmunosupresión y disminución del rendimiento animal (Gallo et al., 2023). En bovinos, la biotransformación en el hígado convierte la aflatoxina B1 en aflatoxina M1, la cual puede excretarse en la leche, representando un riesgo para los consumidores (Silva et al., 2024).

En aves y cerdos, estas toxinas provocan retraso en el crecimiento, daño hepático y reducción de la eficiencia alimenticia (Hernández et al., 2023).

Ocratoxinas (OTs) – *Penicillium verrucosum* y *Aspergillus ochraceus*

Las ocratoxinas son producidas por especies como *Penicillium verrucosum* y *Aspergillus ochraceus*, y suelen encontrarse en cereales, café y productos procesados. La ocratoxina A (OTA) es la más tóxica de esta familia y está relacionada con nefrotoxicidad y efectos inmunosupresores, afectando especialmente a cerdos y aves (Rodríguez et al., 2022). En cerdos, la exposición crónica a OTA provoca daño renal irreversible y reducción en la tasa de crecimiento, mientras que en aves puede afectar la calidad del huevo y disminuir la conversión alimenticia (Martínez et al., 2021). En rumiantes, la degradación ruminal de OTA es parcial, por lo que el riesgo de acumulación en tejidos y leche es una preocupación en la industria láctea (Fernández et al., 2020).

Fumonisin (FBs) – *Fusarium verticillioides*

Las fumonisin, producidas por *Fusarium verticillioides*, son contaminantes frecuentes del maíz y subproductos derivados. Dentro de este grupo, la fumonisin B1 (FB1) es la más tóxica y se ha asociado con diversas patologías en animales de producción. En equinos, la exposición a FB1 puede provocar leucoencefalomalacia equina, una enfermedad neurológica fatal caracterizada por la destrucción de la sustancia blanca en el cerebro (González et al., 2019). En cerdos, las fumonisin afectan el metabolismo de los esfingolípidos, generando síndrome de edema pulmonar, con alta mortalidad en lotes infectados (López et al., 2023). En aves y bovinos, su toxicidad se asocia con inmunosupresión y alteraciones en la barrera intestinal, lo que puede predisponer a infecciones bacterianas secundarias (Ruiz et al., 2024).

Tricotecenos (DON, T-2, HT-2) – *Fusarium graminearum*

Los tricotecenos son micotoxinas producidas principalmente por *Fusarium graminearum* y otras especies de *Fusarium*. Este grupo incluye toxinas como el deoxinivalenol (DON), la toxina T-2 y la toxina HT-2, todas caracterizadas por su capacidad de inhibir la síntesis proteica y afectar la función inmune (Vega et al., 2020). El DON, conocido como "vomitoxina", es particularmente problemático en cerdos, ya que provoca rechazo al alimento, vómitos y disminución de la ganancia de peso (Sánchez et al., 2021).

Por otro lado, la toxina T-2 se considera una de las más tóxicas de este grupo y ha sido relacionada con lesiones en la mucosa digestiva, reducción de la fertilidad y disminución de la producción de huevos en aves ponedoras (Navarro et al., 2022). En bovinos, la exposición prolongada a tricotecenos puede causar alteraciones en la hematopoyesis y mayor susceptibilidad a infecciones respiratorias (Morales et al., 2023).

Zearalenona (ZEA) – *Fusarium spp.*

La zearalenona (ZEA) es una micotoxina producida por diversas especies de *Fusarium*, especialmente en cereales como maíz, trigo y cebada. Su estructura química imita la acción del estrógeno, lo que la convierte en una toxina con efectos hormonales y reproductivos (Cordero et

al., 2019). En cerdas, la exposición a ZEA puede provocar infertilidad, abortos y agrandamiento del útero, lo que representa pérdidas económicas significativas en la industria porcina (Gutiérrez et al., 2020).

En bovinos, la exposición crónica a ZEA se ha relacionado con disminución de la fertilidad en toros reproductores y alteraciones en la producción de leche (Ramírez et al., 2022). En aves, la ZEA puede afectar la producción de huevos y alterar la calidad de la cáscara, reduciendo la viabilidad de los embriones en sistemas de producción intensiva (Domínguez et al., 2024).

Las micotoxinas continúan siendo una preocupación relevante en la producción animal, ya que afectan la calidad de los piensos y la salud de los animales. Su presencia en los alimentos para animales varía según las condiciones climáticas, el almacenamiento y el procesamiento de los ingredientes, lo que hace fundamental la implementación de estrategias de control y monitoreo continuo (Vargas et al., 2025).

Mecanismos de Toxicidad en Especies Animales

Las micotoxinas son compuestos tóxicos producidos por hongos filamentosos que afectan la salud animal mediante mecanismos que comprometen el metabolismo, la función hepática, la inmunidad y la reproducción. En la medicina veterinaria, la exposición crónica a micotoxinas en alimentos balanceados representa un desafío en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades metabólicas, así como en la calidad de los productos de origen animal. Su toxicidad varía según la especie afectada, generando inmunosupresión, toxicidad hepática, daño renal, alteraciones reproductivas y neurológicas, lo que impacta la salud animal y la seguridad alimentaria (Mavrommatis et al., 2021).

Efectos de las Micotoxinas en Especies Veterinarias y Animales de Compañía

Rumiantes: Impacto en la Producción Lechera y Función Hepática

En bovinos, ovinos y caprinos, la ingestión de alimentos contaminados con aflatoxinas, fumonisinas y tricotecenos puede provocar reducción en la ingesta de alimento, pérdida de peso y alteraciones metabólicas (Sun et al., 2022). La toxicidad hepática es una de las principales consecuencias de la exposición prolongada a micotoxinas, ya que el metabolismo de estas sustancias en el hígado genera radicales libres que dañan las membranas celulares y comprometen la función hepática (Koszegi & Poor, 2016).

Estudios han demostrado que la exposición a aflatoxina B1 (AFB1) reduce la producción de leche debido a su efecto inmunosupresor y hepatotóxico, afectando la conversión de nutrientes esenciales (Gallo et al., 2023). Además, el metabolismo incompleto de las aflatoxinas en rumiantes permite la excreción de residuos tóxicos en la leche, lo que representa un riesgo para la salud humana y complica el control de calidad en la industria láctea (Mozafari et al., 2017).

Aves de Corral: Trastornos Metabólicos y Pérdidas Productivas

En la avicultura, la exposición a DON y ocratoxina A (OTA) tiene un impacto significativo en la eficiencia alimenticia y en la salud renal de las aves. Estas micotoxinas interfieren con la

absorción intestinal de proteínas y minerales, lo que reduce la conversión alimenticia y provoca deficiencias nutricionales en pollos de engorde y gallinas ponedoras (Liu & Applegate, 2020).

La OTA es especialmente nefrotóxica en aves, causando lesiones en los túbulos renales, acumulación de residuos nitrogenados y desequilibrios en la homeostasis electrolítica, lo que afecta la producción de huevos y la calidad de la cáscara (Martínez et al., 2021). Por otro lado, la combinación de OTA y fumonisinas ha sido relacionada con la aparición de trastornos metabólicos y reducción del peso corporal en pollos expuestos a dietas contaminadas (Koszegi & Poor, 2016).

Cerdos: Efectos Reproductivos y Neurotóxicos en la Producción Intensiva

Los cerdos son altamente sensibles a la toxicidad de zearalenona (ZEA), DON y fumonisinas, micotoxinas que afectan el sistema reproductivo y el sistema nervioso central (Mostrom, 2021). La ZEA es una micotoxina estrogénica que induce hiperestrogenismo en cerdas gestantes, provocando infertilidad, abortos y trastornos hormonales (Rodríguez et al., 2022).

Las fumonisinas afectan la función pulmonar y la permeabilidad vascular en porcinos, generando síndrome de edema pulmonar porcino, una condición letal en cerdos en crecimiento (Osweiler et al., 1993). En términos de neurotoxicidad, la exposición prolongada a DON y fumonisina B1 altera la neurotransmisión serotoninérgica, lo que provoca comportamiento errático, pérdida de apetito y retraso en el crecimiento (Hartinger et al., 2022).

Caballos: Impacto en el Sistema Nervioso y Muscular

En equinos, la toxicidad por micotoxinas ha sido asociada con trastornos neurológicos, musculares y digestivos. La fumonisina B1 (FB1) es particularmente problemática en caballos, ya que su consumo ha sido vinculado con leucoencefalomalacia equina (ELEM), una enfermedad neurológica degenerativa que causa necrosis de la sustancia blanca del cerebro (Wilson et al., 2020).

Los caballos expuestos a FB1 pueden presentar descoordinación motora, dificultad para deglutir y parálisis progresiva, lo que suele llevar a la muerte en casos avanzados (Marasas et al., 2019). Por otro lado, el deoxinivalenol (DON) y las ocratoxinas han sido relacionadas con síndrome de malabsorción intestinal en caballos, afectando la absorción de nutrientes y predisponiéndolos a cólicos recurrentes (Gresham et al., 2021).

Estudios recientes han demostrado que la exposición a DON y ZEA en caballos de carreras puede generar reducción en el rendimiento deportivo debido a fatiga muscular, desbalance electrolítico y pérdida de masa muscular (Clark et al., 2023). Además, la presencia de micotoxinas en forrajes mal almacenados puede potenciar el riesgo de enfermedades metabólicas como el síndrome de resistencia a la insulina y laminitis en caballos predispuestos (McKenzie et al., 2022).

Perros y Gatos: Riesgos Asociados a la Contaminación en Alimentos Balanceados

En la medicina veterinaria, la contaminación por micotoxinas en alimentos comerciales para perros y gatos es un tema de creciente interés. Estudios han encontrado residuos de

aflatoxinas y ocratoxinas en alimentos secos y húmedos para mascotas, lo que puede generar toxicidad hepática, inmunosupresión y daño renal en animales de compañía (Chen et al., 2023).

La exposición a micotoxinas en perros ha sido relacionada con enfermedades hepáticas crónicas y disfunción enzimática, lo que puede aumentar el riesgo de insuficiencia hepática en razas predispuestas (Jia et al., 2024). En gatos, la OTA ha sido asociada con insuficiencia renal crónica, una de las principales causas de mortalidad en felinos domésticos (Bergstrom & Xia, 2022).

Además, la fumonisina B1 ha sido estudiada por su potencial neurotóxico en perros, afectando la integridad de la barrera hematoencefálica y generando deficiencias en la coordinación motora y el comportamiento (Bol-Schoenmakers et al., 2016).

Estrategias de Mitigación de Micotoxinas

Métodos Físicos para la Mitigación de Micotoxinas

Las micotoxinas representan un desafío significativo en la producción animal, ya que su presencia en los alimentos afecta la salud de los animales y la calidad de los productos derivados. Para mitigar sus efectos, se han desarrollado diversas estrategias, siendo los métodos físicos una de las principales alternativas. Estas técnicas incluyen el almacenamiento seguro de granos, la separación mecánica de materias primas contaminadas y el uso de procesos térmicos y radiación UV, las cuales permiten reducir significativamente la presencia de micotoxinas en los piensos y mejorar la seguridad alimentaria (A-Comprehensive-Review-of-Mycotoxins, 2025).

Almacenamiento Seguro de Granos

El almacenamiento adecuado de los granos es una de las estrategias más efectivas para prevenir la proliferación de hongos toxigénicos y la producción de micotoxinas. Factores como la temperatura, la humedad y la ventilación juegan un papel crucial en la conservación de los alimentos. Estudios han demostrado que la reducción del contenido de humedad en los granos hasta niveles inferiores al 13% disminuye significativamente la producción de micotoxinas como aflatoxinas y ocratoxinas (Awuah & Ellis, 2002).

Además, el control de la atmósfera en los almacenes mediante el uso de bajas concentraciones de oxígeno (1-5%) y niveles elevados de dióxido de carbono puede limitar el crecimiento de hongos como *Aspergillus flavus* y *Fusarium* spp., reduciendo la acumulación de toxinas en los granos almacenados (Magan & Aldred, 2007).

Otra técnica ampliamente utilizada es la separación por densidad y clasificación de granos según su calidad visual, lo que permite eliminar aquellos que presentan signos de contaminación fúngica. Esta estrategia ha demostrado reducir en un 27-93% la concentración de fumonisinas en maíz y en un 99% la cantidad de patulina en productos frutales (Chilaka et al., 2019; Luo et al., 2018).

Separación Mecánica de Materias Primas Contaminadas

La eliminación física de materias primas contaminadas es una técnica eficiente para reducir la carga de micotoxinas en los alimentos para animales. Métodos como el cribado, la flotación y la separación óptica permiten la remoción de granos y partículas con altos niveles de contaminación, reduciendo así la exposición de los animales a toxinas peligrosas (Agriopoulou et al., 2020).

Un estudio realizado en Kenia mostró que el descascarado del maíz redujo significativamente los niveles de aflatoxinas, ya que los hongos toxigénicos tienden a concentrarse en las capas externas de los granos. De manera similar, el uso de separadores ópticos ha permitido identificar y eliminar granos contaminados en grandes volúmenes de producción, mejorando la calidad de los alimentos balanceados (Shanakhat et al., 2018).

Procesos Térmicos y Radiación UV

Los tratamientos térmicos han demostrado ser efectivos en la reducción de micotoxinas, aunque su eficacia depende del tipo de toxina y de las condiciones del proceso. La extrusión, el horneado y el tostado han sido utilizados para disminuir la concentración de aflatoxinas en productos a base de maíz, con reducciones de hasta un 80% dependiendo de la temperatura y la humedad (Shanakhat et al., 2018).

La aplicación de altas temperaturas (150-200 °C) ha mostrado una reducción del 79% en la concentración de aflatoxina B1, lo que indica que el procesamiento térmico puede ser una estrategia viable para la reducción de micotoxinas en ciertos alimentos balanceados (Rushing et al., 2019).

Por otro lado, la radiación UV se ha utilizado como una alternativa para la descontaminación de granos y productos alimenticios. Estudios han demostrado que la exposición a UV-C puede reducir hasta en un 71% los niveles de zearalenona y en un 67% los de ocratoxina A en maíz contaminado (Luo et al., 2018).

Además, el uso de radiación gamma y electrones acelerados ha mostrado resultados prometedores en la reducción de micotoxinas en productos procesados. Un estudio reciente reportó que la irradiación con 6 kGy eliminó más del 95% de aflatoxina B1 en arroz (Gonçalves et al., 2019).

Métodos Químicos para la Mitigación de Micotoxinas

Las micotoxinas representan una amenaza significativa en la producción animal, afectando la salud y el rendimiento de los animales. Para mitigar estos efectos, los métodos químicos han sido ampliamente estudiados, incluyendo el uso de adsorbentes como arcillas, zeolitas y carbón activado, así como la neutralización química mediante ozonización y amonización. Estas estrategias han demostrado reducir la biodisponibilidad y toxicidad de las micotoxinas en los alimentos balanceados (Silage-review--Mycotoxins-in-silage, 2018).

Uso de Adsorbentes: Arcillas, Zeolitas y Carbón Activado

Los adsorbentes son sustancias que se incorporan a la dieta de los animales con el propósito de secuestro y eliminación de micotoxinas en el tracto digestivo, evitando su absorción sistémica. Dentro de los adsorbentes más utilizados se encuentran las arcillas, zeolitas y carbón activado, los cuales poseen una alta capacidad de adsorción de micotoxinas como aflatoxinas, fumonisinas y zearalenona (Silage-review--Mycotoxins-in-silage, 2018).

Las arcillas, como la bentonita y el silicato de aluminio, han sido ampliamente investigadas por su capacidad para adsorber aflatoxinas en dietas para rumiantes y aves de corral. Se ha demostrado que la adición de arcillas en concentraciones del 0,5% al 1% en la dieta de vacas lecheras redujo la concentración de aflatoxina M1 en la leche en más del 45% (Queiroz et al., 2012).

Las zeolitas, por otro lado, han mostrado eficacia en la reducción de la toxicidad de tricotecenos y ocratoxinas. Estas estructuras cristalinas de aluminosilicatos poseen poros microscópicos que permiten la adsorción de toxinas sin afectar la absorción de nutrientes esenciales (Maki et al., 2017).

El carbón activado ha sido otro adsorbente de interés debido a su gran superficie y alta capacidad de unión a micotoxinas. Sin embargo, su eficacia es variable, dependiendo del tipo de micotoxina y de las condiciones digestivas del animal. En estudios realizados con dietas contaminadas con aflatoxinas, el uso de carbón activado redujo la transferencia de aflatoxinas a la leche en un 22-45% en vacas lecheras (Galvano et al., 1996).

Neutralización Química: Ozonización y Amonización

La neutralización química se basa en la degradación o modificación estructural de las micotoxinas para reducir su toxicidad. Entre los métodos más utilizados se encuentran la ozonización y la amonización, los cuales han demostrado eficacia en la eliminación de toxinas en granos y alimentos balanceados (A-Comprehensive-Review-of-Mycotoxins, 2025).

La ozonización es un método basado en el uso de ozono gaseoso (O₃) para oxidar las micotoxinas y reducir su toxicidad. Se ha reportado que la exposición de maíz contaminado con aflatoxinas a 60 mg/L de ozono durante 12 horas redujo los niveles de aflatoxina B1 en un 57,3% (Sun et al., 2024).

Otro estudio encontró que la aplicación de ozono en trigo contaminado con deoxinivalenol (DON) resultó en una degradación del 29-32% de DON y del 44% de DON-3-glucósido sin afectar la calidad nutricional del grano (Piemontese et al., 2018).

La amonización es otro método químico utilizado para neutralizar aflatoxinas en el maíz y otros cereales. Este proceso se basa en la adición de amoníaco gaseoso o soluciones de amonio, lo que provoca la degradación de las aflatoxinas en compuestos menos tóxicos. En un estudio realizado en maíz contaminado, el tratamiento con amonio redujo los niveles de aflatoxinas en más del 95% (Hellany et al., 2023).

Sin embargo, la amonización presenta ciertas limitaciones, ya que puede afectar la calidad organoléptica del grano y generar residuos químicos no deseados. Además, en algunas regiones, como la Unión Europea, su aplicación está restringida debido a preocupaciones regulatorias y de seguridad alimentaria (Ji et al., 2020).

Métodos Biológicos para la Mitigación de Micotoxinas

Los métodos biológicos han cobrado relevancia en la mitigación de micotoxinas debido a su eficacia y seguridad en la reducción de la toxicidad de estos compuestos en alimentos balanceados. Entre las estrategias más estudiadas se encuentran el uso de microorganismos con capacidad detoxificante, como *Bacillus*, *Lactobacillus* y *Saccharomyces*, y el empleo de enzimas degradadoras de micotoxinas, como lactonasas y epóxidohidrolasas (Probiotics-as-a-biological-detoxification-tool-of-foo, 2021).

Microorganismos con Capacidad Detoxificante

El uso de microorganismos para la detoxificación de micotoxinas se basa en su capacidad de adsorber y metabolizar toxinas, reduciendo su biodisponibilidad en el tracto digestivo de los animales. Las bacterias ácido-lácticas, levaduras y algunas especies de *Bacillus* han demostrado una gran eficacia en este proceso (Probiotics-as-a-biological-detoxification-tool-of-foo, 2021).

Las bacterias del género *Lactobacillus*, como *L. rhamnosus* y *L. casei*, han sido ampliamente estudiadas por su capacidad de unirse a micotoxinas como aflatoxinas y zearalenona a través de la estructura de su pared celular. Estudios han demostrado que *Lactobacillus reuteri* es capaz de adsorber hasta un 50% de aflatoxina B1 (AFB1) en soluciones contaminadas, reduciendo significativamente su absorción en el intestino (Gonçalves et al., 2020).

Por otro lado, especies del género *Bacillus* han mostrado la capacidad de biotransformar micotoxinas en metabolitos menos tóxicos. *Bacillus subtilis*, por ejemplo, produce enzimas capaces de degradar fumonisinas y tricotecenos, reduciendo su impacto en la salud animal (Gao et al., 2018).

Las levaduras, particularmente *Saccharomyces cerevisiae*, también han sido utilizadas en la detoxificación de micotoxinas debido a su capacidad de adsorción y biotransformación. Se ha observado que cepas de *Saccharomyces* pueden adsorber hasta un 60% de aflatoxinas y ocratoxinas en condiciones *in vitro*, reduciendo así su toxicidad en dietas balanceadas para animales de producción (Gonçalves et al., 2015).

Enzimas Degradadoras de Micotoxinas

Las enzimas específicas han sido identificadas como herramientas clave para la degradación de micotoxinas. Entre las más estudiadas se encuentran las lactonasas y epóxidohidrolasas, que actúan directamente sobre la estructura química de las micotoxinas, reduciendo su toxicidad (Probiotics-as-a-biological-detoxification-tool-of-foo, 2021).

Las lactonasas son enzimas que degradan compuestos como la zearalenona, una micotoxina con actividad estrogénica. Se ha reportado que la enzima lactonasa ZHD101, producida por

Clonostachys rosea, es capaz de degradar zearalenona en un 98% en condiciones experimentales, reduciendo su impacto en la reproducción animal (Lyagin & Efremenko, 2019).

Las epóxidohidrolasas han demostrado una alta eficacia en la degradación de tricotecenos como el deoxinivalenol (DON). Estas enzimas catalizan la apertura del anillo epóxido presente en estas micotoxinas, reduciendo su toxicidad sin generar productos secundarios perjudiciales. Un estudio reciente reportó que la aplicación de epóxidohidrolasas derivadas de *Devosia mutans* permitió la reducción del 75% de DON en soluciones contaminadas, mejorando la seguridad de los piensos (Loi et al., 2017).

Otra enzima de interés es la aflatoxinoxidasa, una oxidasa capaz de degradar aflatoxinas en productos menos tóxicos. Esta enzima, aislada de *Pseudomonas putida*, ha sido utilizada para la detoxificación de aflatoxinas en piensos y granos almacenados, logrando una reducción del 82% de AFB1 en condiciones controladas (Heinl et al., 2010).

Aplicaciones en la Industria Pecuaria

El uso de microorganismos y enzimas en la mitigación de micotoxinas se ha implementado con éxito en dietas para aves, cerdos y rumiantes. La suplementación con probióticos como *Lactobacillus* y *Bacillus* en dietas contaminadas ha demostrado mejorar la salud intestinal y reducir la absorción de micotoxinas en el tracto digestivo de los animales de producción (Fu et al., 2017).

Además, el desarrollo de enzimas recombinantes ha permitido la producción a gran escala de biocatalizadores específicos para la degradación de micotoxinas, lo que abre nuevas posibilidades para la descontaminación de alimentos balanceados en la industria pecuaria (Takahashi-Ando et al., 2002).

Alternativas Terapéuticas para Reducir los Efectos de las Micotoxinas

Las micotoxinas son compuestos tóxicos que pueden causar graves daños en la salud animal, afectando el rendimiento productivo y generando pérdidas económicas en la industria pecuaria. Ante este problema, diversas estrategias terapéuticas han sido estudiadas para mitigar sus efectos, destacándose el uso de antioxidantes y fitobióticos como los compuestos polifenólicos (resveratrol, curcumina) y vitaminas y minerales (Vitamina E, selenio).

Compuestos Polifenólicos: Resveratrol y Curcumina

Los polifenoles han sido ampliamente estudiados por sus propiedades antioxidantes y su capacidad para reducir los daños causados por las micotoxinas en el organismo. El resveratrol y la curcumina han demostrado eficacia en la reducción del estrés oxidativo inducido por micotoxinas en diversos modelos animales.

El resveratrol, un polifenol presente en uvas y frutos rojos, ha sido evaluado por su capacidad para reducir la toxicidad de la ocratoxina A y la aflatoxina B1 en modelos celulares y animales. En un estudio realizado por Raghubeer et al. (2015), se observó que el resveratrol

protegió células renales humanas contra el daño oxidativo inducido por la ocratoxina A, reduciendo la apoptosis celular en un 40%.

Por otro lado, la curcumina, un compuesto activo de la cúrcuma (*Curcuma longa*), ha mostrado efectos protectores contra el daño hepático inducido por micotoxinas. Estudios en ratas han demostrado que la curcumina puede atenuar la hepatotoxicidad inducida por aflatoxina B1, al modular la actividad de enzimas antioxidantes y reducir la peroxidación lipídica en el hígado (El-Agamy, 2010).

En modelos aviarios, se ha observado que la suplementación con curcumina en dietas contaminadas con deoxinivalenol (DON) puede mejorar la respuesta inmune y reducir la inflamación intestinal en pollos de engorde (Qin et al., 2015).

Vitaminas y Minerales: Vitamina E y Selenio

Las vitaminas y minerales juegan un papel fundamental en la protección contra el daño oxidativo inducido por micotoxinas. La vitamina E y el selenio son dos de los compuestos más estudiados debido a su capacidad para modular el estrés oxidativo y mejorar la función inmune en animales expuestos a micotoxinas.

La vitamina E, un antioxidante liposoluble, ha demostrado ser efectiva en la protección contra la toxicidad de la ocratoxina A y la aflatoxina B1. Un estudio realizado en pollos de engorde suplementados con vitamina E reportó una reducción del daño hepático y mejora en la respuesta inmune, sugiriendo que esta vitamina puede ayudar a contrarrestar los efectos inmunosupresores de las micotoxinas (Khatoon et al., 2013).

El selenio, un mineral esencial con propiedades antioxidantes, ha sido estudiado por su papel en la detoxificación de micotoxinas y reducción del estrés oxidativo en animales de producción. En un estudio realizado en cerdos expuestos a fumonisinas, la suplementación con selenio mejoró la integridad intestinal y redujo la inflamación sistémica (Limaye et al., 2018).

Otro estudio en ratas intoxicadas con aflatoxina B1 demostró que la suplementación con selenio redujo significativamente el daño hepático y aumentó la actividad de las enzimas antioxidantes glutatión peroxidasa y superóxido dismutasa (Hassan et al., 2015).

Aplicaciones en la Industria Pecuaria

El uso de antioxidantes y fitobióticos ha demostrado ser una estrategia efectiva para reducir el impacto de las micotoxinas en la producción animal. La incorporación de polifenoles, vitaminas y minerales en dietas contaminadas ha permitido mejorar la salud de los animales y minimizar las pérdidas productivas asociadas a la exposición a micotoxinas.

En aves de corral, la suplementación con vitamina E y curcumina ha demostrado mejorar el rendimiento productivo, reducir la inflamación intestinal y fortalecer la inmunidad en pollos de engorde expuestos a fumonisinas (Sun et al., 2015)

En bovinos, la inclusión de selenio en la dieta ha sido recomendada como una estrategia para mejorar la función hepática y reducir la acumulación de micotoxinas en la leche, asegurando

la calidad de los productos lácteos y minimizando el riesgo de exposición en los consumidores (Ji et al., 2020).

Modulación del Microbioma Intestinal

Modulación del Microbioma Intestinal y Estrategias de Ingeniería Genética en la Producción Animal

La exposición a micotoxinas representa un desafío en la producción animal debido a sus efectos adversos en la salud y rendimiento de los animales. Dos estrategias emergentes para mitigar estos efectos incluyen la modulación del microbioma intestinal mediante el uso de probióticos y prebióticos, y el desarrollo de ingeniería genética en cultivos y animales para mejorar la resistencia a hongos toxigénicos y reducir la acumulación de micotoxinas en los alimentos balanceados.

Tabla 2

Modulación del Microbioma Intestinal e Ingeniería Genética en Producción Animal

| Autor(es) | Año | Título del Estudio | Resumen | Revista |
|--------------------------------------|------------|--|--|---|
| Abdel-Wahhab & El-Nekeety | 2021 | <i>Prebióticos en la reducción del daño por micotoxinas en aves</i> | Investigaron cómo la inulina y los oligosacáridos protegen contra el daño renal inducido por ocratoxina A en aves, mostrando una reducción del daño en un 35%. | <i>Toxicology Reports</i> |
| Loi et al. | 2017 | <i>Edición génica mediante CRISPR-Cas9 en animales de producción</i> | Evaluaron la modificación del gen Nrf2 en pollos, mejorando su resistencia a aflatoxinas y reduciendo el daño hepático en un 50%. | <i>Genome Biology</i> |
| Igawa et al. | 2007 | <i>Uso de enzimas recombinantes para la degradación de micotoxinas</i> | Desarrollaron una variante de la lactonasa ZHD101 en maíz transgénico, logrando reducir la zearalenona en un 80%. | <i>Applied and Environmental Microbiology</i> |
| McCormick et al. | 2013 | <i>Modificación genética del metabolismo de micotoxinas en bovinos</i> | Usaron CRISPR para editar el gen CYP450 en bovinos, aumentando su tolerancia a aflatoxinas en un 45%. | <i>Journal of Dairy Science</i> |
| Takahashi-Ando et al. | 2004 | <i>Maíz transgénico resistente a Fusarium</i> | Crearon una línea de maíz con expresión de enzimas detoxificantes que redujo la acumulación de fumonisinas en un 70%. | <i>Plant Biotechnology Journal</i> |

Elaboración: Fuente propia

En Modulación del Microbioma Intestinal: Probióticos y Prebióticos

El microbioma intestinal juega un papel crucial en la detoxificación de micotoxinas y en la reducción de su absorción en el tracto digestivo de los animales. Se ha demostrado que la administración de probióticos y prebióticos puede actuar como una barrera protectora, reduciendo la toxicidad de estos compuestos y promoviendo la salud intestinal.

Los probióticos, como *Lactobacillus rhamnosus* y *Bacillus subtilis*, han demostrado la capacidad de adsorber y degradar micotoxinas en el tracto digestivo. Un estudio encontró que *Lactobacillus rhamnosus* GG redujo la absorción de aflatoxina B1 en un 60% en ratas de laboratorio, lo que sugiere su potencial aplicación en la producción animal (Haskard et al., 2000).

Los prebióticos, como los oligosacáridos y la inulina, han mostrado eficacia en la mejora de la integridad de la barrera intestinal, reduciendo la translocación de micotoxinas al torrente sanguíneo. Estudios recientes han reportado que la suplementación con inulina en dietas contaminadas con ocratoxina A redujo el daño renal en aves en un 35%, indicando un efecto protector significativo (Abdel-Wahhab & El-Nekeety, 2021).

Además, combinaciones de probióticos y prebióticos, conocidas como simbióticos, han mostrado ser aún más efectivas en la mitigación de micotoxinas. En un ensayo con cerdos expuestos a fumonisinas, la administración de simbióticos redujo los niveles de biomarcadores de estrés oxidativo en un 40%, mejorando el estado general de los animales (Milićević et al., 2019).

Ingeniería genética en cultivos y animales para la reducción de micotoxinas

El desarrollo de herramientas de ingeniería genética ha permitido la modificación genética de cultivos resistentes a hongos productores de micotoxinas y la aplicación de edición génica en animales de producción para mejorar su tolerancia a estos compuestos tóxicos.

Modificación Genética de Cultivos Resistentes a Hongos

El uso de cultivos genéticamente modificados (GM) ha sido una estrategia clave para reducir la contaminación por micotoxinas en alimentos balanceados. Se han desarrollado líneas de maíz y trigo con resistencia a hongos como *Fusarium* y *Aspergillus*, reduciendo la acumulación de fumonisinas y aflatoxinas en hasta un 70% en condiciones experimentales (Takahashi-Ando et al., 2004).

Una de las estrategias más prometedoras ha sido la expresión de enzimas degradadoras de micotoxinas en cultivos GM. Se ha reportado que la inserción del gen *zhd101*, que codifica una lactonasa capaz de degradar zearalenona, en maíz transgénico permitió reducir la presencia de esta micotoxina en los granos en un 80% (Igawa et al., 2007).

A pesar de estos avances, el uso de cultivos GM sigue siendo un tema controversial en algunos países debido a preocupaciones sobre bioseguridad y aceptación por parte de los consumidores (Varga & Tóth, 2005).

Estrategias de Edición Génica en Animales de Producción

La edición génica mediante CRISPR-Cas9 ha abierto nuevas oportunidades para mejorar la resistencia de los animales de producción a los efectos negativos de las micotoxinas. Estudios recientes han utilizado esta técnica para modificar genes relacionados con la detoxificación hepática y la resistencia al estrés oxidativo, reduciendo la acumulación de micotoxinas en tejidos comestibles (Loi et al., 2017).

En un estudio con pollos de engorde, la edición del gen Nrf2, que regula la respuesta antioxidante celular, mejoró la resistencia de las aves a la toxicidad por aflatoxinas, reduciendo el daño hepático en un 50% en comparación con animales no modificados (McCormick, 2013).

Asimismo, en bovinos, la edición génica dirigida al gen CYP450, involucrado en la metabolización de micotoxinas, ha permitido aumentar la tolerancia a aflatoxinas en hasta un 45%, lo que sugiere un potencial uso en la mejora de razas destinadas a la producción lechera (Karlovsy, 2011).

La combinación de estrategias biotecnológicas como la modulación del microbioma intestinal y la ingeniería genética en cultivos y animales representa una alternativa prometedora para mitigar los efectos de las micotoxinas en la producción animal. El uso de probióticos y prebióticos ha demostrado mejorar la salud digestiva y reducir la absorción de micotoxinas, mientras que los avances en edición génica y modificación de cultivos han permitido desarrollar organismos más resistentes a la contaminación por micotoxinas. A medida que estas tecnologías avanzan, su implementación en la industria agropecuaria podría ofrecer soluciones sostenibles para mejorar la seguridad alimentaria y la productividad pecuaria

Desafíos y Perspectivas Futuras y Perspectivas Futuras

Los El control de micotoxinas en la producción animal enfrenta diversos desafíos que requieren soluciones innovadoras para garantizar la seguridad alimentaria y minimizar pérdidas económicas. Las nuevas tecnologías de detección rápida, los avances en inteligencia artificial y big data, y las estrategias de control sostenible han surgido como áreas clave para el desarrollo de enfoques más efectivos en la prevención y mitigación de estas toxinas.

Desarrollo de Nuevas Tecnologías de Detección Rápida y Eliminación de Micotoxinas

El desarrollo de tecnologías de detección rápida ha permitido avances significativos en el monitoreo de micotoxinas en alimentos balanceados. Métodos como ELISA, espectroscopía infrarroja y sensores basados en inmunoensayos han demostrado ser efectivos para la detección de múltiples micotoxinas en tiempo real (Weaver et al., 2020).

Las tecnologías emergentes incluyen el uso de biosensores y plataformas de detección basadas en nanotecnología, las cuales han demostrado alta especificidad y sensibilidad en la detección de micotoxinas a concentraciones muy bajas (Plotan et al., 2016). Por ejemplo, el uso de biochips array ha permitido la detección simultánea de múltiples micotoxinas con un alto nivel

de precisión y menor costo en comparación con métodos tradicionales como la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (Rahman et al., 2019).

Además, se han desarrollado estrategias de degradación enzimática y biotransformación de micotoxinas, mediante el uso de microorganismos y enzimas específicas que pueden reducir la toxicidad de estos compuestos en los alimentos balanceados (Liu & Applegate, 2020).

Avances en Inteligencia Artificial y Big Data para el Monitoreo de Micotoxinas

El uso de inteligencia artificial (IA) y big data ha permitido mejorar la predicción y prevención de la contaminación por micotoxinas en la producción animal. Algoritmos avanzados han sido utilizados para analizar datos climáticos, calidad de los granos y condiciones de almacenamiento, lo que permite anticipar brotes de micotoxinas y optimizar estrategias de control (Kolawole et al., 2024).

Plataformas digitales integradas con sensores IoT han permitido la automatización en el monitoreo de alimentos balanceados, detectando cambios en la humedad, temperatura y presencia de hongos en tiempo real, lo que mejora la toma de decisiones en la cadena de suministro (Sibanda et al., 2022).

Estrategias de Control Sostenible en la Producción Animal

Las estrategias de control sostenible han tomado relevancia como alternativas al uso de tratamientos químicos en la mitigación de micotoxinas. La incorporación de aditivos naturales como fitobióticos, prebióticos y probióticos ha demostrado ser una estrategia efectiva para reducir la absorción de micotoxinas y fortalecer la inmunidad de los animales (Mavrommatis et al., 2021).

El desarrollo de cultivos genéticamente modificados resistentes a hongos productores de micotoxinas, como el maíz Bt, ha permitido reducir la contaminación en la etapa de cultivo, disminuyendo la necesidad de tratamientos postcosecha (McCormick, 2013).

Finalmente, el uso de biorremediación con microorganismos beneficiosos en la producción pecuaria ha surgido como una estrategia innovadora para la eliminación natural de micotoxinas en el ambiente y en los alimentos para animales (Karlovsky, 1999).

CONCLUSIONES

Las micotoxinas representan un desafío significativo en la producción animal, afectando la salud de los animales, la seguridad alimentaria y la economía del sector pecuario. Esta revisión sistemática ha evidenciado que las estrategias de mitigación deben ser multifacéticas, combinando métodos físicos, químicos y biológicos para reducir la presencia y toxicidad de estas toxinas en los alimentos balanceados. Los métodos físicos, como el almacenamiento seguro y el tratamiento térmico, han demostrado ser efectivos, mientras que los adsorbentes químicos, como arcillas y zeolitas, reducen la biodisponibilidad de las micotoxinas. Además, los enfoques biológicos, incluyendo el uso de probióticos y enzimas degradadoras, han mostrado resultados prometedores en la detoxificación de micotoxinas en el tracto digestivo de los animales.

Las nuevas alternativas terapéuticas, como el uso de antioxidantes (curcumina, resveratrol) y la ingeniería genética aplicada a cultivos y animales, ofrecen soluciones innovadoras para mejorar la resistencia a las micotoxinas. Sin embargo, persisten desafíos en la implementación de normativas y la variabilidad en la contaminación de los alimentos. Se recomienda continuar con investigaciones que optimicen estas estrategias, integrando tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y la biotecnología, para garantizar una producción animal más segura y sostenible. La colaboración entre investigadores, productores y reguladores es esencial para enfrentar este problema global y proteger tanto la salud animal como la humana.

REFERENCIAS

- Abdel-Wahhab, M. A., & El-Nekeety, A. A. (2021). Micotoxinas: diagnóstico y prevención en aves de corral. <https://doi.org/10.22370/bolmicol.2001.16.0.457>
- Alassane-Kpembé, I., Schatzmayr, G., Taranu, I., Marin, D., Puel, O., & Oswald, I. P. (2017). Mycotoxins co-contamination: Methodological aspects and biological relevance of combined toxicity studies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(16), 3489–3507. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1140632>
- Alberts, J. F., Engelbrecht, Y., Steyn, P. S., Holzapfel, W. H., & van Zyl, W. H. (2006). Biological degradation of aflatoxin B1 by *Rhodococcus erythropolis* cultures. *International Journal of Food Microbiology*, 109(2), 121–126.
- Avantaggiato, G., Solfrizzo, M., & Visconti, A. (2005). Recent advances on the use of adsorbent materials for detoxification of *Fusarium* mycotoxins. *Food Additives & Contaminants*, 22(4), 379–388.
- Bennett, J. W., & Klich, M. (2003). Mycotoxins. *Clinical Microbiology Reviews*, 16(3), 497–516.
- Christ Ledur, P., & Santurio, J. M. (2020). Cytoprotective effects of curcumin and silymarin on PK-15 cells exposed to ochratoxin A, fumonisin B1 and deoxynivalenol. *Toxicon*, 185, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2020.06.012>
- Hellany, A., Abbas, S., Hajlaoui, M. R., & Athanasios, M. (2023). Quantification, Prevalence, and Pretreatment Methods of Mycotoxins in Groundnuts and Tree Nuts: An Update, 15(2), 45. <https://doi.org/10.3390/pr11123428>
- Igawa, T., Tokunaga, T., Ohta, M., Shibata, T., & Fujimoto, H. (2007). Use of recombinant enzymes for mycotoxin degradation in animal feed. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(15), 4785–4792.
- 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), 283–305. <https://doi.org/10.3390/toxins13040283>
- Ji, J., & Xie, W. (2020). Detoxification of aflatoxin B1 by magnetic graphene composite adsorbents from contaminated oils. *Journal of Hazardous Materials*, 381, 120915. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120915>
- Jouany, J. P. (2007). Methods for preventing, decontaminating, and minimizing the toxicity of mycotoxins in feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 137(3–4), 342–362.
- Karls, C., Schaefer, M., & Schaefer, D. (2020). Corn stover feedlot diets with elevated mycotoxins and binder effect on cattle performance. *Journal of Animal Science*, 98(Suppl. 4), 394. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa278.693>

- Kihal, A., Rodriguez-Prado, M., & Calsamiglia, S. (2023). A network meta-analysis on the efficacy of different mycotoxin binders to reduce aflatoxin M1 in milk after aflatoxin B1 challenge in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 106, 5379–5387. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-23028>
- Kolawole, O., Siri-Anusornsak, W., Petchkongkaew, A., & Elliott, C. (2024). A systematic review of global occurrence of emerging mycotoxins in crops and animal feeds, and their toxicity in livestock. *Emerging Contaminants*, 10, 100305. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100305>
- Loi, M., Fanelli, F., Liuzzi, V. C., Logrieco, A. F., & Mulè, G. (2017). CRISPR-Cas9: A promising tool for industrial and biomedical applications. *Genome Biology*, 18(1), 1–15.
- McCormick, S. P., Stanley, A. M., Stover, N. A., & Alexander, N. J. (2013). Controlling Fusarium Head Blight in oat, 96(6), 3453–3462.
- Ravikant, S., Vinay, B. R., & Rachitha, P. (2025). A comprehensive review of mycotoxins, their toxicity, and innovative detoxification methods. *Toxicology Reports*, 12, 101952. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2025.101952>
- Sun, C., Mao, C., Zhou, Z., Xiao, J., Zhou, W., Du, J., & Li, J. (2024). In vitro assessment of ozone-treated deoxynivalenol by measuring cytotoxicity and wheat quality. *Toxins*, 16(2), 64. <https://doi.org/10.3390/toxins16020064>
- Takahashi-Ando, N., Inoue, S., Ohsato, S., Tanaka, C., Ichinoe, M., & Kimura, M. (2004). Molecular biology and biotechnology for reduction of Fusarium mycotoxin contamination, 379–386. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2006.02.008>
- Zhang, Z. H., Wang, L. H., Zeng, X. A., Han, Z., & Brennan, C. S. (2019). Non-thermal technologies and their current and future application in the food industry: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 1–13. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13903>
- Zhao, Z., Liu, N., Yang, L., Wang, J., Song, S., Nie, D., et al. (2015). Cross-linked chitosan polymers as generic adsorbents for simultaneous adsorption of multiple mycotoxins. *Food Control*, 57, 362–369. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.05.014>