

Las aflatoxinas en el sector agropecuario y el potencial de los adsorbentes derivados de plantas

Aflatoxins in the agricultural sector and the potential of plant-derived adsorbents

María de Jesús Nava-Ramírez*✉, Alma Vázquez-Durán*, Abraham Méndez-Albores*

Nava-Ramírez, M. J., Vázquez-Durán, A., & Méndez-Albores, A. (2021). Las aflatoxinas en el sector agropecuario y el potencial de los adsorbentes derivados de plantas. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 29(84), e2912, <https://doi.org/10.33064/iycuaa2021842912>

RESUMEN

Diversas especies de hongos filamentosos producen metabolitos secundarios altamente tóxicos denominados micotoxinas. Dentro del grupo de las micotoxinas están las aflatoxinas, las cuales son ubicuas en los alimentos y extremadamente tóxicas para los seres vivos. Por esta razón se han investigado y desarrollado estrategias de descontaminación basadas en procedimientos físicos, químicos y biológicos. Generalmente, las estrategias físicas son altamente efectivas, principalmente con el uso de adsorbentes. Los adsorbentes son compuestos con capacidad de unir a las micotoxinas, por lo que limitan su absorción en el tracto gastrointestinal de los animales. Sin embargo, una de las desventajas de los adsorbentes inorgánicos es la sorción de micronutrientes de la dieta y/o liberación de componentes tóxicos. Consecuentemente, esta revisión tiene como objetivo proporcionar algunas generalidades de las aflatoxinas y sus efectos en los animales, así como la efectividad de algunos materiales derivados de las plantas para su adsorción. Finalmente, se presentan las conclusiones y las necesidades futuras de investigación.

Palabras clave: micotoxinas; aflatoxina B₁; bioadsorbentes; adsorción; inocuidad; alimentos.

Recibido: 30 de octubre de 2020 Aceptado: 23 de julio de 2021

*Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Unidad de Investigación Multidisciplinaria L14 (Alimentos, Micotoxinas, y Micotoxicosis), Universidad Nacional Autónoma de México. Carretera Cuautitlán-Teoloyucan km 2.5, San Sebastián Xhala, C. P. 54714, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México. Correo electrónico: mari_551293@comunidad.unam.mx; almavazquez@comunidad.unam.mx; albores@unam.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5168-1684>; <https://orcid.org/0000-0001-5978-2375>; <https://orcid.org/0000-0002-6403-5216>

✉Autora para correspondencia

ABSTRACT

Several species of filamentous fungi have the ability to synthesize highly toxic secondary metabolites named mycotoxins. Within this group there are aflatoxins, which are ubiquitous in food and extremely toxic to both humans and animals. For this reason, decontamination strategies based on physical, chemical, and biological procedures have been investigated and developed. Generally, physical strategies are highly effective, mainly with the use of adsorbent materials. Adsorbents are compounds with the ability to bind mycotoxins, thus limiting their absorption in the gastrointestinal tract of animals. However, one of the disadvantages of inorganic adsorbents is the sorption of micronutrients from the diet and/or the release of toxic components. Consequently, this review provides an overview of the aflatoxins and their effects on animals, as well the effectiveness of certain plant-derived materials for their adsorption. Finally, conclusions and future research needs are presented.

Keywords: mycotoxins; aflatoxin B₁; biosorbents; adsorption; feed safety; feed.

INTRODUCCIÓN

Algunas especies de hongos filamentosos como *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Claviceps* y *Alternaria* sintetizan metabolitos secundarios de bajo peso molecular altamente tóxicos llamados micotoxinas (Huwig, Freimund, Käppeli, & Dutler, 2001). Dichos géneros producen micotoxinas como las aflatoxinas (*Aspergillus*), las fumonisinas (*Fusarium*), la ocratoxina A (*Aspergillus* y *Penicillium*), los tricotecenos (*Fusarium*), y la zearalenona (*Fusarium*) (Bhat, Rai, & Karim, 2010).

Se ha investigado la presencia de micotoxinas en los granos y raciones a nivel mundial y se ha reportado que generalmente el contenido de micotoxinas es bajo y frecuentemente está presente más de una. Las micotoxinas pueden encontrarse en los alimentos y son tóxicas para humanos y animales, originando enfermedades y trastornos denominados micotoxicosis. Además, suelen causar pérdidas económicas significativas en la producción animal. La presencia de las aflatoxinas (AF) en los alimentos es muy común. Diversos análisis de muestras de alimentos revelan que la cantidad contenida de aflatoxina B₁ (AFB₁) es 10 veces mayor en comparación con otras como la aflatoxina B₂ (AFB₂), la aflatoxina G₁ (AFG₁), y la aflatoxina G₂ (AFG₂) (Marín, Ramos, Cano-Sancho, & Sanchis, 2013).

Se han propuesto estrategias de descontaminación de AF de carácter integral a lo largo de toda la cadena de producción (Vila-Donat, Marín, Sanchis, & Ramos, 2018). Los métodos de control incluyen pueden ser físicos, químicos y biológicos. Las estrategias físicas son consideradas las más efectivas, principalmente con el uso de adsorbentes (Díaz, 2008). Existen dos tipos de adsorbentes: inorgánicos y orgánicos (también llamados bioadsorbentes). Los más usados en la producción animal son los inorgánicos; sin embargo, se ha reportado que éstos también son capaces de adsorber micronutrientes de la dieta y/o liberar compuestos tóxicos para los animales, como las dioxinas y ciertos metales pesados (Zavala-Franco et al., 2018). Recientemente se ha mostrado interés en el estudio de los adsorbentes orgánicos (derivados de plantas) que son seguros, rentables y altamente efectivos (Bueno, Salvano, Silva, González, & Oliver, 2001).

Antecedentes en el estudio de las aflatoxinas

Existe un grupo ampliamente estudiado que forma parte de las micotoxinas: las AF, un conjunto de metabolitos relacionados estructuralmente, sintetizados principalmente por hongos del género *Aspergillus flavus*, *A. parasiticus*, *A. pseudotamarii* y *A. nomius* (Bhat et al., 2010). Las principales AF están subdivididas en los grupos B (*blue*) y G (*green*), debido a la fluorescencia azul o verde que éstas presentan con la luz ultravioleta ($\lambda = 365 \text{ nm}$) y se denominan como AFB₁, AFB₂, AFG₁ y AFG₂.

Por otra parte, la aflatoxina M₁ (AFM₁) y la aflatoxina M₂ (AFM₂) son derivados metabólicos hidroxilados (de ahí su designación M, *milk*), los cuales se eliminan en la leche de los animales que ingieren raciones contaminadas con AFB₁ y AFB₂, respectivamente (Méndez-Albores & Martínez-Moreno, 2009). Los subíndices 1 y 2 refieren a la movilidad que éstas presentan en la cromatografía de capa fina (según su peso molecular) (Carvajal, 2013). El orden de toxicidad de las aflatoxinas, de mayor a menor es: AFB₁ < AFM₁ < AFG₁ < AFM₂ < AFB₂ < AFG₂; de las cuales, la AFB₁ es la sustancia tóxica de mayor frecuencia y la que se presenta en mayor contenido en los productos alimenticios, seguida por la AFG₁ (Méndez-Albores & Martínez-Moreno, 2009).

Estructura química de las aflatoxinas

En la figura 1 se ilustra la estructura química de las AF, formada por un núcleo cumarínico, otro bifurano y se dividen en dos grupos: el primero, conformado con una ciclopentenona como la AFB₁, AFB₂, el aflatoxicol, la AFM₁, y la AFM₂ y el segundo grupo, conformado con lactonas (AFG₁ y AFG₂). El núcleo bifurano ocasiona que la molécula tenga mayor rigidez. Además, la AFB₁ y la AFG₁ tienen un enlace insaturado en la posición 8,9 en el anillo de furano terminal (Boudergue et al., 2009).

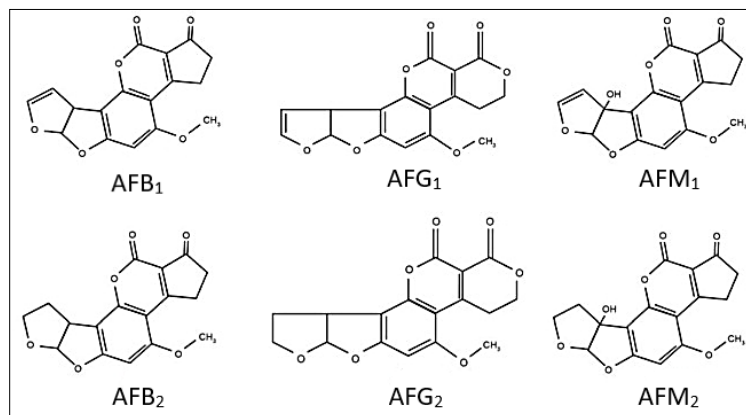


Figura 1. Estructura química de las aflatoxinas.
Imagen tomada de Carvajal (2013).

Condiciones para el crecimiento del hongo *Aspergillus*

Existen factores que influyen en el crecimiento fúngico y la posterior producción de micotoxinas en los alimentos: los factores físicos incluyen condiciones ambientales para la colonización del hongo y la producción de las AF (humedad del grano, humedad relativa del ambiente, actividad de agua, temperatura, y la integridad física de los granos). Los factores químicos incluyen el pH, el dióxido de carbono, el oxígeno, la composición del sustrato y los micronutrientes disponibles. Finalmente, los factores biológicos se basan en las interacciones entre hongo y sustrato (presencia de insectos, carga de esporas, variedad de

plantas y condiciones de estrés, entre otros) (Zain, 2011). En la tabla 1 se muestran las condiciones óptimas para el crecimiento del hongo *Aspergillus*.

Tabla 1
Condiciones óptimas para el crecimiento de Aspergillus

Factor	Rango	Óptimo
Temperatura (°C)	12 – 43	27 – 30
Humedad relativa (%)	62 – 99	85
pH	2.2 – 8	5 – 6
Actividad de agua (a_w)	0.77 – 0.88	0.82 – 0.99
Humedad del grano (%)	13 – 20	18

Nota: Adaptada de Denli y Pérez (2006) y Villers (2014).

Ocurrencia de las aflatoxinas

Se estima que entre 25% y 40% de los cereales producidos a nivel mundial están contaminados con una o varias micotoxinas (Sarrocco, Mauro, & Battilani, 2019). Distintos países han establecido regulaciones para proteger a su población de la exposición a las AF; en la tabla 2 se muestran los límites de tolerancia de las AF en los cereales.

Tabla 2
Límite de tolerancia de aflatoxinas en cereales

País	Materia prima	Límite de tolerancia ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
Unión Europea	Todos los cereales excepto maíz y arroz (total)	4
	Maíz y arroz para procesamiento (total)	10
	Todos los cereales (AFB ₁)	2
Estados Unidos	Todos los cultivos alimentarios (total)	20
México	Todos los cereales	20
Japón	Todos los cultivos alimentarios	10
China	Maíz	20
	Trigo, cebada, otros cereales (sin arroz)	5

Nota: Total: AFB₁, AFB₂, AFG₁ y AFG₂.

Adaptada de Méndez-Albores y Martínez-Moreno (2009), Ndagijimana et al. (2020) y Sarrocco et al. (2019).

Existe la Norma Oficial Mexicana NOM-188-SSA1-2002, Productos y servicios. Control de aflatoxinas en cereales para consumo humano y animal. Especificaciones Sanitarias (Secretaría de Salud, 15 de octubre de 2002), de observancia obligatoria en el territorio nacional que establece el límite máximo permisible de AF en cereales para consumo animal, así como su correcto transporte y almacenamiento. En el Apéndice A de la misma, de los límites permitidos para el consumo animal, se señala que los cereales con un contenido mayor de 20 $\mu\text{g}/\text{kg}$ serán destinados al consumo animal y deberán ajustarse a lo dispuesto en la tabla 3 (NOM-188-SSA1-2002). La regulación para AFM₁ en productos lácteos según la Unión Europea permite hasta 0.05 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en leche líquida; mientras que en México según la NOM-243-SSA1-2010 (Secretaría de Salud, 27 de septiembre de 2010) se permite hasta 0.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en leche líquida y 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en leche en polvo.

Tabla 3

Límites permitidos de aflatoxinas en cereales para consumo animal

Especie/etapa de producción	Límite máximo (µg/kg)
Aves (excepto pollos de engorda)	100
Cerdos en engorda:	
Entre 25 y 45 kg	100
>45 kg	200
Maduros destinados a la reproducción	100
Rumiantes:	
Maduros destinados a la reproducción	100
De engorda en etapa de finalización	300

Nota: Tomada de SSA (15 de octubre de 2002).

Metabolismo de las aflatoxinas

Se ha reportado que la AFB₁ no es una molécula tóxica *per se*; sin embargo, cuando es metabolizada su resultado determina la toxicidad (Moss, 2002). Cuando es ingerida se absorbe en el tracto gastrointestinal (TGI) mediante difusión pasiva, posteriormente pasa al torrente sanguíneo, ahí se une a ciertas proteínas plasmáticas, las cuales evitan su difusión, otro porcentaje queda libre en la circulación para atravesar las membranas de los capilares y así llega a algunos órganos, además es transportada vía porta al hígado, su órgano blanco, para ser metabolizada. Las principales reacciones involucradas en el metabolismo de la AFB₁ son la hidroxilación, oxidación y desmetilación (Campagnollo et al., 2016). Cuando la AFB₁ sufre una oxidación es activada y metabolizada por enzimas microsomales de la superfamilia del citocromo P450 (CYP450) de las células del hígado al compuesto reactivo AFB₁-8,9-epóxido (AFBO), el cual es tóxico y cancerígeno.

La enzima CYP3A4 interviene para formar exo-epóxido y el metabolito AFQ₁ (hidroxilación) y la CYP1A2 interviene formando endo-epóxido y AFM₁ (hidroxilación) (Ornelas-Aguirre & Fimbres-Morales, 2015). El mecanismo de acción de AFBO es el de inhibir la síntesis de proteínas a través de las interacciones con el ARN y con el ADN formando aductos, los cuales inducen daño celular y, posteriormente, muerte celular. La enzima glutatión-S-transferasa (GST) puede mediar la reacción entre la AFBO y el glutatión (GSH) (denominada conjugación) para formar el conjugado AFB₁-SG; esta conjugación de tipo competitivo neutraliza la toxicidad de la AFBO, lo cual representa el paso de detoxificación más relevante e importante en comparación con otros tipos de biotransformación (Campagnollo et al., 2016).

Dicha vía de detoxificación puede dar como resultado la formación de AFB₁-8,9-dihidrodiol, o puede ser hidrolizada por un epóxido hidrolasa para generar un dihidrodiol (dhd-AFB₁), el cual puede reaccionar con las proteínas y tener efectos citotóxicos (Ornelas-Aguirre & Fimbres-Morales, 2015). Los estudios han evidenciado que la eficiente conjugación de la AFBO con el GSH mediante una GST es el principal determinante de la susceptibilidad de las especies ante la toxicidad de la AFB₁, independientemente de la activación mediada por el CYP450. La deficiencia o falta de GST funcional es una de las principales razones por las que ciertos individuos son extremadamente susceptibles a la toxicidad inducida por la AFB₁ (Rawal, Kim, & Coulombe, 2010).

Efectos de las aflatoxinas en los animales

Según la Agencia Internacional para la Investigación en Cáncer (IARC) la AFB₁ está clasificada en el grupo 1, como una sustancia con alto poder cancerígeno en humanos y la AFM₁ en el grupo 2B, como una sustancia posiblemente cancerígena (IARC, 1995). Los efectos de las aflatoxinas mostrados en la tabla 4 son similares en la mayoría de los animales; sin embargo, la susceptibilidad varía entre especie, edad, raza, sexo y estado nutricional y es posible categorizar una aflatoxicosis como aguda o crónica (Magnoli et al., 2011).

Tabla 4

Efectos negativos en los animales que consumen alimento contaminado con AFB₁

Especie	Algunos efectos negativos de la AFB ₁
Aves	Daño hepático (hepatomegalia, hemorragias, palidez, degeneración hidrópica, proliferación y dilatación de los conductos biliares, fibrosis periportal), alteración en la digestión, aumento de la morbilidad y la mortalidad, cambios en ciertos parámetros bioquímicos, inmunosupresión, anorexia, disminución del crecimiento, baja postura y palidez de las mucosas y las patas, y daños en la integridad intestinal
Cerdos	Daño hepático (edema, congestión, hígado friable, petequias, infiltración grasa, necrosis centrolobulillar e hiperplasia de los conductos biliares), baja tasa de crecimiento, problemas gastrointestinales, anorexia, diarrea, cambios en la reproducción, inmunosupresión y muerte
Caballos	Anorexia, depresión, claudicación, ictericia, necrosis hepática centrolobulillar, hepatomegalia, hemosiderina fagocitada en las células de Kupffer, hiperplasia de los conductos biliares, hemorragia entérica, lesiones miocárdicas y congestión renal
Rumiantes	Ictericia, pérdida rápida de peso, reducción de la ingesta de alimento, escasa producción de leche, fibrosis con proliferación de conductos biliares, proliferación de tejido conectivo, degeneración de los hepatocitos, inmunosupresión y muerte

Nota: Adaptada de Hernández-Ramírez et al. (2020) y Vila-Donat et al. (2018).

Estrategias de descontaminación

Los métodos para el control de la exposición a hongos y micotoxinas son principalmente preventivos a lo largo de la cadena productiva de alimentos (planta, crecimiento, cosecha, almacenamiento y distribución) (Vila-Donat et al., 2018). Los métodos de control y prevención de micotoxinas incluyen estrategias físicas, químicas y biológicas. Las físicas son consideradas las más efectivas, principalmente con el uso de adsorbentes.

Adsorbentes

Los agentes descontaminantes se dividen en adsorbentes y biotransformantes; a su vez, los adsorbentes se dividen en orgánicos e inorgánicos. Los adsorbentes son compuestos de elevado peso molecular con capacidad de unir a las micotoxinas. En la figura 2 se esquematiza su modo de acción, los cuales limitan la absorción de la AFB₁ en el TGI de los animales y previenen sus efectos tóxicos (Kolosova & Stroka, 2011).

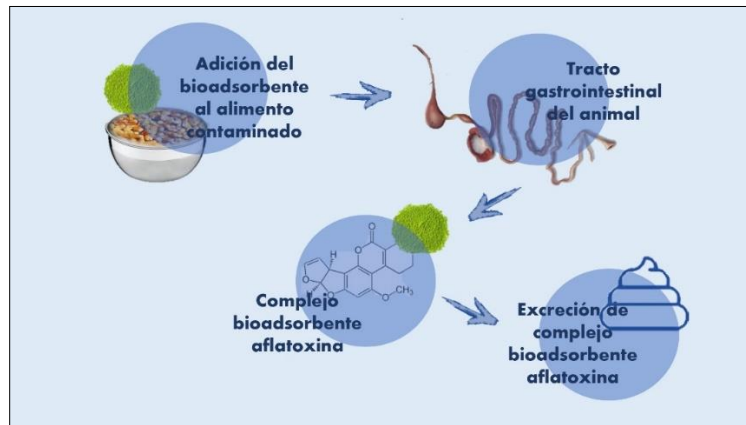


Figura 2. Modo de acción de los adsorbentes.
Elaboración propia.

Las micotoxinas se unen a los adsorbentes por mecanismos como puentes de hidrógeno, uniones hidrofóbicas, atracción electrostática, intercambio iónico, complejación, quelación y precipitación; los cuales llevan a su inmovilización. Algunos adsorbentes están compuestos por polisacáridos, proteínas, lípidos y grupos funcionales: carboxilo, carboxilato, hidroxilo, fosfato y amino; así como sitios de adsorción hidrofóbica: cadenas de carbono alifáticas y anillos aromáticos (Méndez-Albores et al., 2020).

La adsorción física o fisorción normalmente es un fenómeno reversible, como lo son las interacciones de Van der Waals y las interacciones de atracción electrostática, las cuales incluyen interacciones de polarización, dipolo y cuadrupolo. Estas interacciones son importantes en el caso de los adsorbentes con una estructura iónica como la de las zeolitas (Di Gregorio et al., 2014). En la adsorción química o quimisorción existe un intercambio de electrones entre el adsorbente y el adsorbato, con lo que se forma una capa sobre superficie sólida de manera irreversible, lo que implica una considerable cantidad de energía (Di Gregorio et al., 2014).

Las interacciones fisicoquímicas entre la superficie del adsorbente y la toxina como la adsorción física, el intercambio iónico y la complejación, son rápidos y también pueden ser reversibles. Así se forma un complejo relativamente estable micotoxina-adsorbente, aún en pH variable a través de todo el TGI del animal, hasta ser eliminado en las heces. La estabilidad del complejo está influenciada por las propiedades físicas del adsorbente como carga total y distribución de carga, tamaño de los poros, área superficial accesible y propiedades fisicoquímicas de las toxinas: polaridad, solubilidad, peso molecular y forma; en el caso de compuestos ionizados también es importante la distribución de carga y las constantes de disociación (Vila-Donat et al., 2018).

Adsorbentes orgánicos de aflatoxinas

Se han realizado estudios con adsorbentes inorgánicos [aluminosilicatos, aluminosilicato de calcio y sodio hidratado (HSCAS), arcillas de esmectita, y tectosilicatos] para comprobar su eficacia al adsorber micotoxinas; sin embargo, muchos de ellos presentan algunas desventajas, ya que además de adsorber AF adsorben indiscriminadamente micronutrientes de la dieta y además tienen la posibilidad de liberar componentes tóxicos,

como ciertos metales pesados y dioxinas (Zavala-Franco et al., 2018). Es por esto que en los últimos años se ha mostrado un gran interés en el estudio de los adsorbentes orgánicos, ya que son seguros, rentables y efectivos. Existen numerosos adsorbentes orgánicos (fibras de plantas, extractos de paredes celulares de levadura y bacterias) que han sido prometedores en su eficacia de adsorción de AF (en modelos *in vitro* e *in vivo*), aunque pocos han sido investigados en modelos *in vivo* (Bueno et al., 2001).

Los compuestos principales de las paredes celulares de levadura (YCW) son carbohidratos, pertenecientes al grupo de oligosacáridos presentes en 85-90% y son principalmente β -glucanos y mananoligosacáridos (MOS); el 10-15% restante son proteínas. Las YCW tienen diversos mecanismos de unión, como enlaces de hidrógeno, interacciones iónicas e hidrofóbicas, los cuales interaccionan con las AF. Se ha sugerido que la estructura tridimensional de la YCW, que consiste mayormente en oligosacáridos, es capaz de reaccionar con las AF (Gómez Verduzco et al., 2009). El carbón activado es un polvo no soluble y es formado por la pirólisis de ciertos materiales orgánicos. Su capacidad de adsorción de AF está determinada por su alta área superficial, su distribución de tamaño de poro y de la materia prima de la cual proviene (Kolosova & Stroka, 2011).

Los resultados variables de diversos grupos de investigación ante el uso del carbón activado sugieren que puede ser no tan eficaz en la unión de AF (Jard, Liboz, Mathieu, Guyonvarc'h, & Lebrhi, 2011). Los ácidos húmicos son compuestos químicos ubicuos que derivan de materia orgánica del suelo o humus, que se forma mediante la descomposición de plantas y material animal. Los ácidos húmicos tienen alta afinidad para unir compuestos, entre ellos las AF. Además, se han obtenido hallazgos de estudios *in vitro* de ácidos húmicos procedentes de la descomposición natural de materiales orgánicos vegetales, los cuales también tienen la capacidad de adsorber AFB₁ (Santos, Vermuelen, Haritova, & Fink-Gremmels, 2011).

Los componentes de las plantas incluyen los fenólicos, flavonoides, cumarinas, clorofila y derivados como la clorofilina. Todos estos tienen propiedades quimioprotectoras contra compuestos cancerígenos como la AFB₁ (Boudergue et al., 2009). La clorofila y su derivado soluble en agua, la clorofilina, se han estudiado como antígenotóxicos, antioxidantes y anticancerígenos. Se hipotetiza que el efecto antígenotóxico de la clorofilina está mediado por el anillo de porfirina, ya sea eliminando radicales libres o formando complejos estables con carcinógenos como la AFB₁; bloqueando su biodisponibilidad, impidiendo su adsorción y mejorando su eliminación en las heces, lo cual conduce a una reducción del daño al ADN (Nagini, Palitti, & Natarajan, 2015). Algunos autores han demostrado los efectos positivos de la clorofila, que incluyen propiedades quimiopreventivas, antimutágenas, inducen la producción de enzimas depurativas de la fase II y reducen la biodisponibilidad de la AFB₁ (Nava-Ramírez et al., 2021; Simonich et al., 2007).

La tecnología de la bioadsorción se ha considerado una alternativa óptima con alta eficiencia, costos bajos, niveles mínimos de inclusión, sin la reducción del valor nutricional de las dietas contaminadas y con un tratamiento sostenible de los biomateriales, generalmente considerados desecho. Los biomateriales agrícolas de desecho como paja, cáscaras de nueces, avellanas, almendras y coco; las semillas y la pulpa de frutas; los olotes de maíz, los guisantes y las fibras micronizadas obtenidas del trigo; la cebada, la alfalfa, la avena y las cáscaras de guisantes están formados principalmente por celulosa, lignina, hemicelulosa, pectina, lípidos, entre otros compuestos que son ricos en diferentes grupos

funcionales responsables de la unión con los contaminantes (Aoudia, Callu, Grosjean, & Larondelle, 2009).

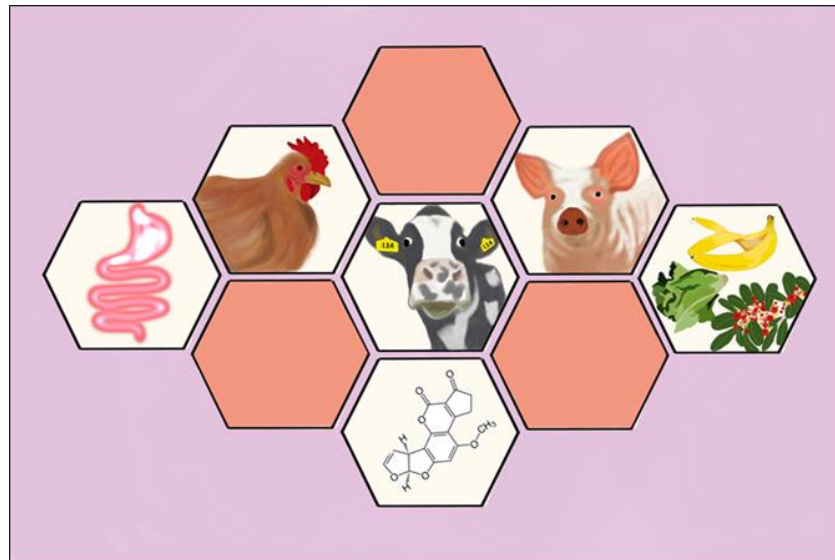


Figura 3. Importancia de los adsorbentes derivados de plantas en el sector agropecuario. Imagen tomada de Nava-Ramírez et al. (2021).

En general, los bioadsorbentes tienen una estructura porosa, con cavidades y canales que proporcionan gran volumen por unidad de superficie, lo que es altamente favorable en el proceso de adsorción; en la figura 3 puede observarse una ilustración alusiva. El diámetro medio de los poros ($< 1 \mu\text{m}$) podría favorecer significativamente la difusión y la adsorción de las micotoxinas. Los mecanismos de biosorción son simples o múltiples intercambios iónicos, complejas construcciones, adsorción, interacciones electrostáticas y formación de complejos de quelato (Bočarov-Stančić et al., 2018). En este sentido, algunos estudios reportan porcentajes de adsorción altos de AF en el orujo de uva (82%), algarrobo (100%), orujo de oliva (74%), los tallos de uva micronizados (96%), las hojas+bayas de *Pyracantha koidzumii* (82%) y algunas ligninas de plantas aromáticas (80%) (Avantaggiato, Greco, Damascelli, Solfrizzo, & Visconti, 2014, Fernandes & Baeyens, 2019, Greco, D'Ascanio, Santovito, Logrieco, & Avantaggiato, 2019, Ramales-Valderrama, Vázquez-Durán, & Méndez-Albores, 2016).

El presente grupo de trabajo ha realizado diversos estudios in vitro e in silico para conocer la capacidad de adsorción de AFB_1 de la cáscara de plátano (28%), las hojas de *Pyracantha* (46%) y el polvo de Aloe vera (69%) (Méndez-Albores et al., 2020; Zavala-Franco et al., 2018). Recientemente, el grupo de trabajo realizó estudios in vitro usando lechuga (*Lactuca sativa* L.), cola de caballo (*Equisetum arvense* L.) y hojas de *Pyracantha* a niveles bajos de inclusión (0.1% y 0.5% p/p), en un modelo que simula ciertas condiciones del TGI de las aves (pollos de engorda). En estos experimentos, el bioadsorbente a base de lechuga a un nivel de inclusión de 0.1%, en un pH de 7, presentó el mejor porcentaje de adsorción de AFB_1 (95%); lo que sugiere que la lechuga tiene una capacidad significativa para adsorber AFB_1 en algunos compartimentos del TGI de las aves (Nava-Ramírez et al., 2021). Por su alta eficiencia a niveles bajos de inclusión la lechuga promete ser un candidato ideal para la adsorción de AFB_1 en modelos in vivo. La investigación en esta dirección está en progreso en los laboratorios del presente grupo de trabajo.

CONCLUSIONES

Debido al carácter ubicuo de las AF y a los efectos negativos que provocan en los animales se han desarrollado diversas tecnologías para su eliminación. Recientemente se ha demostrado que los bioadsorbentes son eficientes, baratos y renovables. Debido a su abundancia, estabilidad y efectividad para la adsorción de las AF en un amplio rango de pH y temperatura, y sobre todo por los niveles bajos de inclusión, los bioadsorbentes, podrían ser altamente efectivos para la remoción de la AFB₁ presente en los alimentos.

Necesidades futuras de investigación

Las investigaciones futuras se podrían enfocar en realizar más estudios in vitro que simulen las condiciones del TGI de los animales y evaluar los bioadsorbentes con niveles bajos de inclusión (hasta 0.5% p/v) y con desafío a contenidos reales de AF y/o múltiples micotoxinas. Sería conveniente realizar otros estudios in vivo para demostrar la efectividad de los bioadsorbentes en la reducción de AFB₁ sin comprometer la biodisponibilidad de los micronutrientes de la dieta. De esta manera, se consideraría a estos biomateriales como competitivos en el mercado de los adsorbentes comerciales.

REFERENCIAS

- Aoudia, N., Callu, P., Grosjean, F., & Larondelle, Y. (2009). Effectiveness of mycotoxin sequestration activity of micronized wheat fibres on distribution of ochratoxin A in plasma, liver and kidney of piglets fed a naturally contaminated diet. *Food and Chemical Toxicology*, 47(7), 1485-1489. doi: 10.1016/j.fct.2009.03.033
- Avantaggiato, G., Greco, D., Damascelli, A., Solfrizzo, M., & Visconti, A. (2014). Assessment of multi-mycotoxin adsorption efficacy of grape pomace. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(2), 497-507. doi: <https://doi.org/10.1021/jf404179h>
- Bhat, R., Rai, R. V., & Karim, A. A. (2010). Mycotoxins in food and feed: Present status and future concerns. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(1), 57-81. doi: 10.1111/j.1541-4337.2009.00094.x
- Bočarov Stančić, A. S., Lopičić, Z. R., Bodroža Solarov, M. I., Stanković, S. Ž., Janković, S. M., Milojković, J. V., & Krulj, J. A. (2018). In vitro removing of mycotoxins by using different inorganic adsorbents and organic waste materials from Serbia. *Food and Feed Research*, 45(2), 87-96. doi: 10.5937/FFR1802087B
- Boudergue, C., Burel, C., Dragacci, S., Favrot, M.-C., Freymy, J.-M., Massimi, C., ... Avantaggiato, G. (2009). Review of mycotoxin-detoxifying agents used as feed additives: Mode of action, efficacy and feed/food safety. *EFSA Journal*, 6(9), 22E. doi: 10.2903/sp.efsa.2009.EN-22
- Bueno, D. J., Salvano, M., Silva, J. O., González, S. N., & Oliver, G. (2001). Micotoxinas: Diagnóstico y prevención en aves de corral. *Boletín Micológico*, 16, 23-36. doi: 10.22370/bolmicol.2001.16.0.457

- Campagnollo, F. B., Ganev, K. C., Khaneghah, A. M., Portela, J. B., Cruz, A. G., Granato, D., ... Sant'Ana, A. S. (2016). The occurrence and effect of unit operations for dairy products processing on the fate of aflatoxin M1: A review. *Food Control*, 68(C), 310-329. doi: 10.1016/j.foodcont.2016.04.007
- Carvajal, M. (2013). Transformación de la aflatoxina B₁ de alimentos, en el cancerígeno humano, aducto AFB₁-ADN. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 16(2), 109-120. doi: 10.1016/S1405-888X(13)72082-5
- Denli, M., & Pérez, J. F. (2006). Contaminación por micotoxinas en los piensos: efectos, tratamiento y prevención. XXII Curso de Especialización. FEDNA, 1-18.
- Di Gregorio, M. C., de Neeff, D. V., Jager, A. V., Corassin, C. H., de Pinho Carão, Á. C., Albuquerque, R., ... Fernandes Oliveira, C. A. (2014). Mineral adsorbents for prevention of mycotoxins in animal feeds. *Toxin Reviews*, 33(3), 125-135. doi: 10.3109/15569543.2014.905604
- Diaz, D. E. (2008). A review on the use of mycotoxin sequestering agents in agricultural livestock production. *Food Contaminants*, 1001. 125-150. doi: 10.1021/bk-2008-1001.ch007
- Fernandes, M. M., & Baeyens, B. (2019). Cation exchange and surface complexation of lead on montmorillonite and illite including competitive adsorption effects. *Applied Geochemistry*, 100, 190-202. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.11.005>
- Gómez Verduzco, G., Cortés Cuevas, A., López Coello, C., Arce Menocal, J., Vázquez Pelaez, C., & Ávila González, E. (2009). Comportamiento productivo y respuesta inmune de pollos alimentados con dietas sorgo-soya con y sin aflatoxina y paredes celulares de levadura (*Saccharomyces cerevisiae*). *Técnica Pecuaria en México*, 47(3), 285-297. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61312111005>
- Greco, D., D'Ascanio, V., Santovito, E., Logrieco, A. F., & Avantaggiato, G. (2019). Comparative efficacy of agricultural by-products in sequestering mycotoxins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(4), 1623-1634. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9343>
- Hernández-Ramírez, J. O., Nava-Ramírez, M. J., Merino-Guzmán, R., Téllez-Isaías, G., Vázquez-Durán, A., & Méndez-Albores, A. (2020). The effect of moderate-dose aflatoxin B1 and *Salmonella* Enteritidis infection on intestinal permeability in broiler chickens. *Mycotoxin research*, 36(1), 31-39. doi: <https://doi.org/10.1007/s12550-019-00367-7>
- Huwig, A., Freimund, S., Käppeli, O., & Dutler, H. (2001). Mycotoxin detoxication of animal feed by different adsorbents. *Toxicology Letters*, 122(2), 179-188. doi: 10.1016/s0378-4274(01)00360-5
- International Agency for Research in Cancer. (IARC). (1995). IARC Activities in mycotoxin research. *Natural Toxins*, 3 (4), 327-331.
- Jard, G., Liboz, T., Mathieu, F., Guyonvarc'h, A., & Lebrihi, A. (2011). Review of mycotoxin reduction in food and feed: From prevention in the field to detoxification by adsorption

or transformation. *Food Additives & Contaminants: Part A: Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment*, 28(11), 1590-1609. doi: 10.1080/19440049.2011.595377

- Kolosova, A., & Stroka, J. (2011). Substances for reduction of the contamination of feed by mycotoxins: A review. *World Mycotoxin Journal*, 4(3), 225-256. doi: 10.3920/WMJ2011.1288
- Magnoli, A. P., Monge, M. P., Miazzo, R. D., Cavaglieri, L. R., Magnoli, C. E., Merkis, C. I., ... Chiacchiera, S. M. (2011). Effect of low levels of aflatoxin B₁ on performance, biochemical parameters, and aflatoxin B₁ in broiler liver tissues in the presence of monensin and sodium bentonite. *Poultry Science*, 90(1), 48-58. doi: 10.3382/ps.2010-00971
- Marin, S., Ramos, A. J., Cano-Sancho, G., & Sanchis, V. (2013). Mycotoxins: Occurrence, toxicology, and exposure assessment. *Food and Chemical Toxicology*, 60, 218-237. doi: 10.1016/j.fct.2013.07.047
- Méndez-Albores, A., Escobedo-González, R., Aceves-Hernández, J. M., García-Casillas, P., Nicolás-Vázquez, M. I., & Miranda-Ruvalcaba, R. (2020). A theoretical study of the adsorption process of B-aflatoxins using *Pyracantha koidzumii* (Hayata) Rehder biomasses. *Toxins*, 12(5), 283.
- Méndez-Albores, & Martínez-Moreno (2009). Las Micotoxinas contaminantes naturales de los alimentos. *Revista Ciencia*, 7(1). Recuperado de <https://docplayer.es/601742-Las-micotoxinascontaminantes-naturales-de-los-alimentos-abraham-mendez-albores-y-ernestomoreno-martinez.html>
- Moss, M. O. (2002). Risk assessment for aflatoxins in foodstuffs. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 50(3-4), 137-142. doi: 10.1016/S0964-8305(02)00078-1
- Nagini, S., Palitti, F., & Natarajan, A. T. (2015). Chemopreventive potential of chlorophyllin: A review of the mechanisms of action and molecular targets. *Nutrition and Cancer*, 67(2), 203-211. doi: 10.1080/01635581.2015.990573
- Nava-Ramírez, M. J., Salazar, A. M., Sordo, M., López-Coello, C., Téllez-Isaías, G., Méndez-Albores, A., & Vázquez-Durán, A. (2021). Ability of low contents of biosorbents to bind the food carcinogen aflatoxin B₁ *in vitro*. *Food Chemistry*, 345, 128863. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128863
- Ndagijimana, R., Shahbaz, U., & Sun, X. (2020). Aflatoxin B₁ in food and feed: An overview on prevalence, determination and control tactics. *JAIR*, 8, 144.
- Ornelas-Aguirre, J. M., & Fimbres-Morales, A. (2015). Aflatoxinas y su asociación con el desarrollo de carcinoma hepatocelular. *CIMEL*, 20(1), 33-39. Recuperado de <https://www.cimel.felsocem.net/index.php/CIMEL/article/view/579/740>
- Ramales-Valderrama, R. A., Vázquez-Durán, A., & Méndez-Albores, A. (2016). Biosorption of B-aflatoxins using biomasses obtained from formosa firethorn [*Pyracantha koidzumii* (Hayata) Rehder]. *Toxins*, 8(7), 218. doi: <https://doi.org/10.3390/toxins8070218>

- Rawal, S., Kim, J. E., & Coulombe, R., Jr. (2010). Aflatoxin B₁ in poultry: Toxicology, metabolism and prevention. *Research in Veterinary Science*, 89(3), 325-331. doi: 10.1016/j.rvsc.2010.04.011
- Santos, R. R., Vermeulen, S., Haritova, A., & Fink-Gremmels, J. (2011). Isotherm modeling of organic activated bentonite and humic acid polymer used as mycotoxin adsorbents. *Food Additives & Contaminants: Part A: Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment*, 28(11), 1578-1589. doi: 10.1080/19440049.2011.595014
- Sarrocco, S., Mauro, A., & Battilani, P. (2019). Use of competitive filamentous fungi as an alternative approach for mycotoxin risk reduction in staple cereals: State of art and future perspectives. *Toxins*, 11(12), 701. doi: 10.3390/toxins11120701
- Secretaría de Salud. (15 de octubre de 2002). Norma Oficial Mexicana NOM-188-SSA1-2002, Productos y Servicios. Control de aflatoxinas en cereales para consumo humano y animal. Especificaciones sanitarias. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperada de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nomssa.html>
- _____ (27 de septiembre de 2010). Norma Oficial Mexicana NOM-243-SSA1-2010, Productos y servicios. Leche, fórmula láctea, producto lácteo combinado y derivados lácteos. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Métodos de prueba. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperada de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5160755&fecha=27/09/2010#gsc.tab=0
- Simonich, M. T., Egner, P. A., Roebuck, B. D., Orner, G. A., Jubert, C., Pereira, C., ... Bailey, G. S. (2007). Natural chlorophyll inhibits aflatoxin B₁-induced multi-organ carcinogenesis in the rat. *Carcinogenesis*, 28(6), 1294-1302. doi: 10.1093/carcin/bgm027
- Vila-Donat, P., Marín, S., Sanchis, V., & Ramos, A. J. (2018). A review of the mycotoxin adsorbing agents, with an emphasis on their multi-binding capacity, for animal feed decontamination. *Food and Chemical Toxicology*, 114, 246-259. doi: 10.1016/j.fct.2018.02.044
- Villers, P. (2014). Aflatoxins and safe storage. *Frontiers in Microbiology*, 5, 158. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.0015>
- Zain, M. E. (2011). Impact of mycotoxins on humans and animals. *Journal of Saudi Chemical Society*, 15(2), 129-144. doi: 10.1016/j.jscs.2010.06.006
- Zavala-Franco, A., Hernández-Patlán, D., Solís-Cruz, B., López-Arellano, R., Tellez-Isaias, G., Vázquez-Durán, A., & Méndez-Albores, A. (2018). Assessing the aflatoxin B₁ adsorption capacity between biosorbents using an in vitro multicompartmental model simulating the dynamic conditions in the gastrointestinal tract of poultry. *Toxins*, 10(11), 484. doi: 10.3390/toxins10110484



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Usted es libre de Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.

CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.