



Artículo de Revisión

Manejo postcosecha de fitopatógenos micotoxigénicos en maíz: Métodos convencionales y alternativas naturales

Estefanía Martínez-Batista¹, Surelys Ramos-Bell¹, Edson Rayón-Díaz¹, Gerónimo Díaz-Cayetano¹, Cyndia González-Arias², Juan Antonio Herrera-González³, Javier Ireta-Moreno⁴, Porfirio Gutiérrez-Martínez^{1*}, ¹Instituto Tecnológico de Tepic, Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos, Avenida Tecnológico 2595, Col. Lagos del Country, CP 63175, Tepic, Nayarit, México. ²Universidad Autónoma de Nayarit, Laboratorio de Contaminación y Toxicología Ambiental, Los Fresnos s/n., C.P. 63175, Tepic, Nayarit México. ³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo experimental Uruapan, Av. Latinoamericana 1101, Col. Revolución, CP 60150, Uruapan, Michoacán, México, ⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo experimental Centro Altos de Jalisco, CP 2470, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.

*Autor de Correspondencia:
Porfirio Gutiérrez-Martínez
pgutierrez@itepic.edu.mx

Sección:
Edición periódica

Recibido:
17 Marzo, 2025
Aceptado:
17 Noviembre, 2025
Publicado:
27 Noviembre, 2025
Adelantada 2026

Cita:
Martínez-Batista E, Ramos-Bell S, Rayón-Díaz E, Díaz-Cayetano G, González-Arias C, et al. 2026. Manejo postcosecha de fitopatógenos micotoxigénicos en maíz: Métodos convencionales y alternativas naturales. Revista Mexicana de Fitopatología 44(1): 101.
<https://doi.org/10.18781/R.ME.X.FIT.2503-2>

RESUMEN

Justificación. Las semillas son el insumo básico para la agricultura y elaboración de alimentos. Recientemente se ha observado un incremento en la demanda de producción en grano de maíz; sin embargo, las cifras de pérdidas anuales en la etapa postcosecha rondan entre el 10 al 40 %. El objetivo de esta revisión es dar a conocer los principales (géneros/especies) hongos productores de micotoxinas asociados al grano de maíz durante el almacenamiento, así como analizar los métodos de control convencionales y las alternativas naturales que han sido aplicadas hasta la actualidad.

Marco teórico y experimental. Se recopiló información bibliográfica sobre los principales patógenos fúngicos que se desarrollan en el grano de maíz y los métodos de control más empleados. Los principales géneros de hongos que se detectan en grano de maíz son *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*, importantes hongos micotoxigénicos. Se han utilizado métodos de control tradicionales, físicos y químicos; no obstante, su aplicación suele no garantizar su efectividad y bioseguridad. El uso de alternativas naturales, así como su combinación, han demostrado tener efectos positivos en el control de estos fitopatógenos, además de inhibir la producción de micotoxinas.

Conclusiones y Perspectivas. Una de las principales causas en pérdidas y daño a la calidad del grano de maíz es el desarrollo de hongos productores de micotoxinas y con ello, la generación de metabolitos secundarios altamente tóxicos. Para prevenir el deterioro del grano almacenado, se han empleado prácticas tradicionales como limpieza del grano, aireación con temperaturas bajas, así como el uso de tratamientos físicos y químicos (fungicidas de síntesis). Actualmente, el desarrollo de alternativas eco amigables es uno de los principales objetivos para reducir el uso de agroquímicos en las semillas y granos, con el fin de promover sistemas agrícolas más sostenibles.

Palabras clave: Maíz, Hongos, Micotoxinas, Almacenamiento, Control alternativo



INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays*), es el segundo cereal más cultivado en todo el mundo, con una producción anual de 1,230,241 toneladas. México ocupa el octavo lugar como productor, con un total de 24,000 toneladas (United States Department of Agriculture-USDA, 2024). En México, el maíz tiene gran relevancia por ser el principal cereal agrícola y un componente importante en la alimentación de las personas por su gran aporte de nutrientes como los ácidos grasos esenciales, carbohidratos y proteínas principalmente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAOSTAT, 2023). Además, es una notable fuente de ingresos debido a la comercialización de alimento para ganado, productos industriales y biocombustibles.

El maíz después de la cosecha está expuesto a condiciones ambientales variables que ponen en riesgo la calidad del grano desde el almacenamiento hasta el procesamiento y producción de alimentos (Abdullahi y Dandago, 2021; Fleurat-Lessard, 2017). Las pérdidas en el almacenamiento pueden llegar a ser considerables y suelen ser ocasionadas por diferentes factores como es el deterioro fisiológico, daño mecánico, malas prácticas de manejo e higiene en postcosecha, así como la presencia de plagas (Moumni *et al.*, 2023; Odjo *et al.*, 2022).

Los granos constituyen un entorno propicio, como fuente de energía y hábitat, para la colonización de organismos heterótrofos incluyendo hongos, bacterias, insectos y ácaros. El principal problema en el deterioro de los granos de maíz en almacenamiento suele deberse al ataque de insectos, a pesar de ello, la presencia de hongos fitopatógenos ocasiona mayores pérdidas en postcosecha (SAGARPA *et al.*, 2016).

Una de las principales preocupaciones por la incidencia de patógenos fúngicos en el grano, radica en su impacto sobre la inocuidad (Carvajal-Moreno, 2022). Adicionalmente, la seguridad alimentaria se ve comprometida por la capacidad que tienen algunas cepas de producir micotoxinas, estos metabolitos se han asociado a intoxicaciones agudas y enfermedades crónicas que afectan órganos vitales como el riñón, hígado y pulmones; así mismo, alteraciones en el sistema inmunológico, sistema nervioso, genotoxicidad y carcinogénesis (Abrehame *et al.*, 2023); por este motivo, a nivel mundial existen legislaciones y normativas que favorecen la disminución a su exposición, a través de límites máximos permisibles en los alimentos (USDA, 2024; Reglamento (UE) 2023/915; NOM 188; NOM 247).

Las tecnologías tradicionales, físicos y químicos se han empleado con el propósito de conservar la calidad del grano durante el almacenamiento. Sin embargo, investigaciones recientes han centrado su atención en el desarrollo y aplicación de tecnologías limpias y de origen natural, orientadas tanto para el control de especies fúngicas en el grano como la prevención de la síntesis de micotoxinas (Hamad *et al.*, 2023; Fleurat-Lessard, 2017). Esta revisión, tiene el objetivo de indicar cuales son los principales géneros de hongos fitopatógenos asociados al grano de maíz durante su almacenamiento en México, con capacidad potencial para producir micotoxinas. Asimismo, se presenta un análisis bibliométrico de los tratamientos convencionales (químicos y físicos) y alternativos que se han aplicado para el control fúngico, y la reducción o eliminación de micotoxinas, con el fin de conocer y fortalecer la identificación de especies micotoxigénicas, sus implicaciones en salud humana y las estrategias de manejo

integrado que reduzcan las problemáticas que presenta el maíz en la etapa postcosecha en México.

Principales géneros fúngicos asociados al grano de maíz

Los principales hongos filamentosos que se desarrollan en el maíz tienen una amplia distribución y se distinguen por su papel en la naturaleza, relacionados con la descomposición de la materia orgánica en suelo por su alta capacidad saprofítica (Pitt *et al.*, 2012). Dentro de los principales géneros identificados como patógenos de maíz se encuentra *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium* (Erasto *et al.*, 2023; Qi *et al.*, 2023).

Estos hongos tienen la capacidad de generar pérdidas de materia seca e inhibir la germinación en la semilla, provocando un alza en la temperatura de la corteza del grano, además de una disminución en su valor nutricional (Fleurat-Lessard, 2017). Por otro lado, algunas especies fúngicas tienen la capacidad de producir metabolitos secundarios altamente tóxicos, llamados micotoxinas, las cuales son biosintetizadas y excretadas a través de un conjunto de vías metabólicas que no son esenciales para el crecimiento o la supervivencia del microorganismo (García-Cela *et al.*, 2022; Bartholomew *et al.*, 2021).

Las especies de *Aspergillus* presentan un crecimiento rápido y una gran diversidad de colores en sus colonias, que pueden variar desde tonos blanquecinos, amarillentos-verdosos, hasta marrón-negruzcos y presentar texturas y aspectos granulares (Figura 1A-D). Una característica relevante es su capacidad de desarrollarse con bajo contenido de humedad (mínimo 13 % en cereales) y humedad relativa de 78 a 80 %, así como un amplio intervalo de temperaturas, que oscila desde los 0 hasta los 55 °C (Pérez *et al.*, 2021; Pitt *et al.*, 2012).

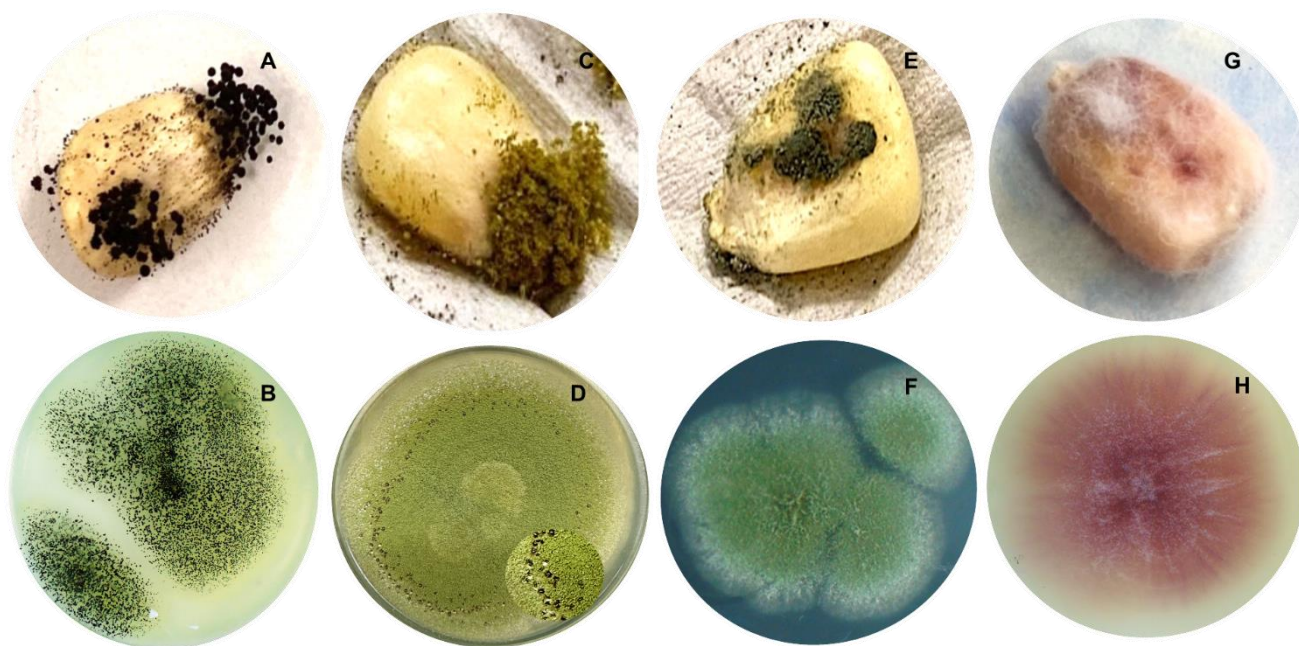


Figura 1. Características miceliales en medio PDA y en grano de maíz de hongos postcosecha; **A-D)** Género *Aspergillus*; **E-F)** Género *Penicillium*; **G-H)** Género *Fusarium*.

Del mismo modo las especies de *Penicillium* tienen un crecimiento rápido, desarrollando colonias con tonalidades verdes, azuladas o grises y texturas algodonosas, aterciopeladas y funiculosas (Figura 1E-F). Su crecimiento óptimo es a temperaturas entre -2 a 50 °C, con una humedad relativa de 85 a 90 % y un contenido de humedad del 16 % (Pérez *et al.*, 2021; Pitt *et al.*, 2012). Especies como *A. flavus*, *A. parasiticus*, *P. funiculosum* y *Penicillium verrucosum* son llamados hongos de almacén por desarrollarse en condiciones a baja actividad de agua. Al contrario de algunas especies de *Fusarium* son clasificadas como hongos de campo (*F. graminearum* y *F. verticillioides*), ya que estos invaden a los granos de maíz antes de la cosecha (Krnjaja *et al.*, 2021; Adeniji y Babalola, 2018), además de requerir condiciones más húmedas para su desarrollo, humedad relativa de 90 a 95 %, contenidos de humedad en el grano de 20 a 22 % y un rango de temperatura de 5-35 °C (Akbar y Alam, 2019). *Fusarium* es característico por presentar micelio con coloraciones que pueden ser blanco, beige, anaranjado, rojo, rojizo, púrpura rosa, entre otros; además de tener texturas aéreas algodonosas (Figura 1 G-H) (Torre-Hernández *et al.*, 2014; Pitt *et al.*, 2012).

Micotoxinas

Las micotoxinas son metabolitos químicos potencialmente tóxicos que pueden causar efectos adversos en la salud humana y animal, la presencia de uno o más metabolitos puede generar efectos sinérgicos o aditivos (Carvajal-Moreno, 2022; International Agency for Research on Cancer [IARC], 2002). Existen 5 grupos de micotoxinas (1, 2A, 2B, 3, 4) que generan un importante impacto económico y toxicológico en la producción de granos y cereales, así como en la salud (IARC, 2002). Las principales micotoxinas son aflatoxinas (AFL), ocratoxinas (OTA), tricotecenos (deoxinivalenol y nivalenol), zearalenona (ZEA) y fumonisinas (Wang *et al.*, 2024; Krnjaja *et al.*, 2022; IARC, 2002). Específicamente, aflatoxina B1 (AFL B1) está clasificada como carcinógena para humanos debido a su efecto mutagénico y carcinogenicidad en los seres vivos (grupo 1), al unirse al ADN, ARN y proteínas. A diferencia de OTA y fumonisina B1 (FB1) se encuentran clasificadas como probablemente carcinógenas para humanos (grupo 2B) (Carvajal-Moreno, 2022; IARC, 2002). La presencia de estos metabolitos en los alimentos consumidos por humanos y animales han generado gran preocupación y problemáticas, es por ello que se han implementado diversas regulaciones gubernamentales para disminuir y evitar el riesgo de contaminación en el procesamiento de cereales (USDA, 2024; Reglamento (UE) 2023/915; NOM 188; NOM 247).

Las principales especies con capacidad de sintetizar micotoxinas pertenecen a los géneros de *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*, siendo las principales *A. flavus*, *A. parasiticus* y *A. nomius* para la producción de AFL B1; *P. verrucosum* produce OTA; y *F. verticillioides* así como *F. proliferatum* producen FB1 (Wang *et al.*, 2024; Carvajal-Moreno, 2022; IARC, 2002). Sin embargo, un mismo tipo de micotoxinas puede ser sintetizada por diferentes especies y una determinada cepa puede producir diferentes micotoxinas (Carvajal-Moreno, 2022; García-Cela *et al.*, 2022). Factores como el tipo de sustrato (maíz, trigo, sorgo), diseminación del inóculo fúngico por insectos y ácaros, el tiempo transcurrido entre la cosecha de cereales húmedos y el proceso de secado, el contenido de humedad inicial de los granos en la cosecha, el periodo de tiempo de almacenamiento (meses), rehidratación accidental o ambiental del grano en almacenamiento, el rango de impurezas y otros materiales húmedos en el grano; así como las interacciones y estado fisiológico de los patógenos (variabilidad de cepa, edad, etc.), influyen

en el desarrollo de hongos y producción de micotoxinas; no obstante, el factor principal es el agua (García-Cela *et al.*, 2022; Akbar y Alam, 2019; Fleurat-Lessard, 2017). Es por ello, que un manejo adecuado de los factores antes mencionados, previo y durante la cosecha, pueden prevenir la presencia de fitopatógenos y la contaminación de sus metabolitos tóxicos.

Métodos de control

Durante muchos años se ha utilizado como método tradicional, el uso de fungicidas de síntesis, para el control de hongos, siendo esta práctica muy común a nivel mundial. No obstante, se ha demostrado que diversos patógenos generan resistencia a estos compuestos, además de los riesgos significativos que ocasiona en la seguridad alimentaria y el medio ambiente, al contaminar cuerpos de agua y suelos (Fleurat-Lessard, 2017; IARC, 2002). Paralelamente, los métodos físicos se han implementado con frecuencia durante la postcosecha, destacando la limpieza del grano; y el control de la humedad y temperatura con aireación a temperaturas bajas. Sin embargo, estas estrategias no son suficientes para mitigar el deterioro del grano de maíz (Fleurat-Lessard, 2017).

En cuanto a una detección temprana del desarrollo de hongos micotoxigénicos, durante el almacenamiento se han utilizado dispositivos como son los microsensors de CO₂, como una alternativa efectiva para detectar el inicio de un deterioro en el grano, aunque su elevado costo limita su accesibilidad (Vijaykumar *et al.*, 2024; Fleurat-Lessard, 2017). Hoy en día el uso de agentes de biocontrol con microorganismos benéficos y sustancias básicas como aceites esenciales, extractos de plantas y sales, se utilizan frecuentemente, ya que se ha demostrado la eliminación de patógenos fúngicos y evitar los problemas toxicológicos que presentan los plaguicidas convencionales (Zhang *et al.*, 2024; Hamad *et al.*, 2023).

En este sentido, se realizó un análisis bibliométrico con el objetivo de explorar las tendencias recientes en los tratamientos aplicados para el control postcosecha de fitopatógenos potenciales productores de micotoxinas en granos de maíz. La recopilación de información se realizó a través de la base de datos ScienceDirect abarcando un período de años del 2019-2024. Para la búsqueda se emplearon las palabras claves: “maize, chitosan, biological control y essential oils” arrojando un total de 3,132 publicaciones. Posteriormente, con el uso del paquete VOSviewer® versión 1.6.19 se realizó un mapeo bibliométrico a partir de los datos obtenidos. Como resultado, se generó un mapa de visualización de red (Figura 2) que permitió identificar siete grupos temáticos o clústeres de investigación relacionados. Cada grupo se representa con diferente color y su tamaño es relativo en relación a la información que existe al respecto; a mayor tamaño del círculo mayor es la información, mientras que la distancia entre un grupo y otro indica cuánta relación existe entre ellos.

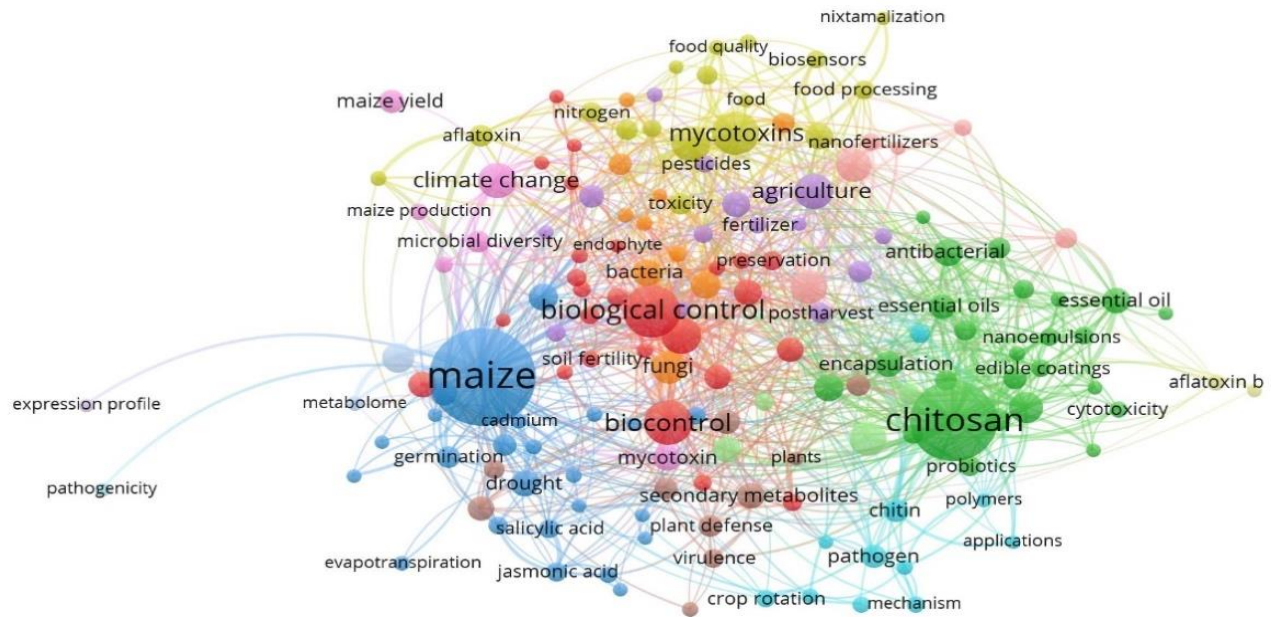


Figura 2. Visualización de red del análisis bibliométrico (VOSviewer ® versión 1.6.19) utilizando palabras claves “maize”, AND, “biological control”, OR, “chitosan”, OR, “essential oil”.

El análisis bibliométrico muestra que, aún existe una limitada cantidad de estudios relacionados con el maíz y el uso de tratamientos alternativos. En el caso de los grupos “quitosano” y “maíz” existe un gran número de información; sin embargo, éstos no se encuentran conectados directamente; esto se debe a que la información bibliográfica que se reporta está enfocada al tratamiento en campo y no durante el almacenamiento. De manera similar las investigaciones relacionadas con los aceites esenciales y microorganismos no muestran una relación directa dentro de la red, lo que sugiere realizar más estudios enfocados a la aplicación de gentes de biocontrol en postcosecha para el control fúngico y la producción de micotoxinas en grano de maíz.

Métodos físicos

La aplicación de los métodos físicos implica desde procedimientos simples como la limpieza del grano mediante el cepillado, abrasión y perlado, hasta el uso de equipos sofisticados que pueden ayudar a controlar variables como es la temperatura y la humedad (Fleurat-Lessard, 2017). Si bien, se llega alcanzar condiciones favorables para el almacenamiento de los granos, el mantener un grano seco, sano y limpio durante el tiempo representa un desafío (Wang *et al.*, 2024).

Entre los métodos físicos más utilizados para el control de fitopatógenos durante el almacenamiento de granos destacan la aireación a bajas temperaturas, los tratamientos térmicos con la aplicación de agua o aire caliente y la irradiación (Moumni *et al.*, 2023). En particular los tratamientos de irradiación (rayos gamma, ultravioleta) han demostrado ser efectivos en la reducción e incluso inhibición de patógenos, al inducir daños en el material genético y su consecuente muerte celular; lo cual reduce significativamente la producción de micotoxinas (Moumni *et al.*, 2023; Tiwari *et al.*, 2022; Khalil *et al.*, 2021). Sin embargo, su aplicación se

ha visto limitada debido a los posibles efectos adversos sobre la calidad del grano, ya que su mecanismo de acción puede afectar también a las células viables del maíz, comprometiendo así sus propiedades nutricionales y funcionales (Tiwari *et al.*, 2022; Khalil *et al.*, 2021).

Por otra parte, los métodos físicos pueden ir acompañados de otras tecnologías como el uso de atmósferas modificadas, con la aplicación de gases como dióxido de carbono, nitrógeno, ozono, gases nobles (argón y helio), hidrógeno, entre otros (Odjo *et al.*, 2022; Riudavets *et al.*, 2018). La aplicación de ozono ha evidenciado tener una reducción en el desarrollo de *Aspergillus* spp., *Fusarium* spp. y *Penicillium* spp. del 98 al 99 % respectivamente (Tiwari *et al.*, 2022). A pesar de esto, su uso se ha visto afectado debido a las alteraciones provocadas en las propiedades sensoriales y nutricionales del grano, como cambios en color, sabor y contenido nutricional, además del elevado costo asociado a la implementación de este tipo de tratamientos para una adaptación a gran escala (Moumni *et al.*, 2023; Romanazzi *et al.*, 2022).

Métodos químicos

La aplicación de compuestos químicos, como los fungicidas de síntesis, continúa siendo una de las principales prácticas en agricultura debido a su fácil acceso y efectividad inicial (Bartholomew *et al.*, 2021). No obstante, su uso indiscriminado a dosis elevadas ha ocasionado principalmente la resistencia de los patógenos, contaminación en los granos por residuos tóxicos y efectos adversos para la salud y el medio ambiente. Además, otra desventaja de estos tratamientos es que requieren el uso de equipo especializado para su aplicación y personal capacitado, lo cual puede llegar a ser costoso (Pereira *et al.*, 2024; Costa-Becheleni *et al.*, 2020).

Los productos químicos regularmente cambian su nombre comercial, pero su ingrediente activo es el mismo o bien, algunos tienen el mismo efecto fungicida. Entre los compuestos más empleados para el control del desarrollo de fitopatógenos en el grano de maíz durante la postcosecha son el captan, thiram, carboxin, benomyl, quintozeno y cloroneb (Dell'Olmo *et al.*, 2023; Hollomon, 2015; Hernández y Carballo, 2017). En México, se ha reportado que los fungicidas más utilizados son benomyl, iprodione, captan y fungicidas del grupo carbamato (Godínez *et al.*, 2023; Ruíz *et al.*, 2022).

Los fungicidas pueden clasificarse por distintos criterios, uno de los más comunes es por su modo de acción. En este sentido se distingue tres tipos principales: los fungicidas de contacto, sistémicos y translaminares (Hollomon, 2015; Hernández y Carballo, 2017). Los fungicidas sistémicos presentan una toxicidad mayor al tener una actividad de amplio espectro, tras ser absorbidos por el tejido vegetal, estos compuestos alcanzan estructuras internas de las células, lo que les confiere capacidad de actuar contra una amplia variedad de organismos, desde microorganismo hasta organismos superiores. Los principales mecanismos de acción incluyen la alteración de la membrana celular, inactivación de enzimas, alteración de procesos respiratorios y alteración del material genético o estructuras relacionadas. Por ejemplo, benomyl, es un fungicida sistémico y su modo de acción se lleva a cabo con la inhibición de la mitosis celular a través del enlace a la tubulina, afectando así la división celular y nuclear, que conduce finalmente a la muerte celular (Hollomon, 2015; Hernández y Carballo, 2017).

Cabe mencionar que la toxicidad declarada en los envases de fungicidas se basa en estudios de dosis letal 50 (DL50) por vía oral (OMS, 2019), esta medida refleja únicamente la toxicidad aguda, sin considerar los posibles efectos de toxicidad crónica reportados en la literatura.

Además de ello, el uso de mezclas de ingredientes activos debe ser cuidadosamente considerado, ya que estos compuestos pueden interactuar entre sí y potenciar los efectos tóxicos a largo plazo (Godínez *et al.*, 2023; Ruíz *et al.*, 2022).

Métodos Biológicos

El control con métodos biológicos es una estrategia importante para disminuir la prevalencia de enfermedades fúngicas en diferentes cultivos. Este método se basa en la aplicación de microorganismos benéficos o compuestos derivados de estos, con el propósito de inhibir el desarrollo de fitopatógenos y evitar pérdidas económicas (Ali *et al.*, 2024; Heliyon *et al.*, 2024). Además de ser una alternativa segura frente al uso de fungicidas sintéticos ya que estos agentes pueden actuar directamente sobre los patógenos o contribuir a la degradación de las micotoxinas (Vijaykumar *et al.*, 2024; Dell'Olmo *et al.*, 2023; Orzali *et al.*, 2023; Romero *et al.*, 2022; Bartholomew *et al.*, 2021).

Microorganismos benéficos. Los agentes de biocontrol se han utilizado como métodos de control alternativos durante las etapas de pre cosecha y post cosecha. En México, los microorganismos benéficos más empleados corresponden principalmente a hongos del género *Trichoderma*; y dentro de las bacterias, especies como *Bacillus subtilis*, *B. pumilus*, *B. thuringiensis*, entre otras (Cuadro 1). Actualmente, se encuentran disponibles aproximadamente 230 bioproductos con registro ante COFEPRIS en el mercado nacional; sin embargo, a pesar del avance significativo en la identificación y desarrollo de nuevos agente de control biológico, su adopción en campo continúa limitada debido a factores como la escasa información sobre la eficiencia real de los bioproductos, o la poca disponibilidad de los productos, asociados al limitado número de ingredientes activos desarrollados para cada grupo taxonómico. Estas limitaciones contribuyen al desconocimiento y la baja aceptación de los agricultores hacia el uso de bioproductos (Lahlali *et al.*, 2022; Córdova-Albores *et al.*, 2021). En el Cuadro 1, se muestra los diferentes microorganismos que se han utilizado recientemente en el control de fitopatógenos transmitidos por granos de maíz, tales como los microorganismos (hongos, bacterias y levaduras).

Sustancias básicas. Numerosos estudios plantean la acción antifúngica de sustancias que provienen de fuentes naturales como es el quitosano, sales, aceites esenciales o extractos de plantas; para prolongar la vida útil de diversos productos hortofrutícolas (Minozzo *et al.*, 2023; Terefe *et al.*, 2023; Chrapacienne *et al.*, 2022; Ghule *et al.*, 2021). Sin embargo, en el almacenamiento del grano de maíz, la aplicación de estos compuestos es más limitada y la información es escasa (Figura 2).

Cuadro 1. Microorganismos utilizados para inhibir el crecimiento de fitopatógenos transmitidos en grano de maíz.

Microorganismos	Inhibición del hongo	Resultado	Referencia
Hongos			
<i>Trichoderma</i> sp.	<i>F. oxysporum</i> <i>A. niger</i>	Inhibición micelial de 73-87 %	Vijaykumar <i>et al.</i> , 2024; Prasad <i>et al.</i> , 2020
<i>T. gamsi</i>	<i>F. verticillioides</i>	Inhibición micelial del 72 % Disminución del contenido de fumonisinas	Galletti <i>et al.</i> , 2020
<i>T. asperellum</i>	<i>F. verticillioides</i>	Inhibición micelial de 88.71-100 %	Cuervo-Parra <i>et al.</i> , 2022
<i>Aspergillus flavus</i> (Cepas atoxigénicas)	<i>A. flavus</i>	Reducción de AF del 80 %	Zhang <i>et al.</i> , 2024; Fleurat-Lessard, 2017
Bacterias			
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Talaromyces funiculosus</i> <i>P. oxalicum</i> <i>F. verticillioides</i>	Disminución de fumonisinas	Yang <i>et al.</i> , 2020 Yang <i>et al.</i> , 2020; Guimaraes <i>et al.</i> , 2020
Levaduras			
<i>Cyberlindnera jadinii</i>	<i>A. flavus</i> y <i>A. niger</i>	Reducción del crecimiento y esporulación	Alkuwari <i>et al.</i> , 2022
<i>Debaryomyces hansenii</i>	<i>Aspergillus</i> sp. <i>F. proliferatum</i> y <i>F. subglutinans</i>	Disminución de fumonisinas del 59.8 %	Medina-Córdova <i>et al.</i> , 2016

Los aceites esenciales son extraídos de plantas aromáticas y se componen de ingredientes bioactivos como los alcaloides, fenoles, terpenos y ácidos orgánicos, a los cuales se les ha atribuido su actividad antifúngica (Chen *et al.*, 2023). La composición y concentración de estos fitoquímicos pueden variar en cada aceite esencial, por lo general suelen tener dos o tres compuestos mayoritarios y decenas de compuestos minoritarios; sin embargo, se ha demostrado que al aplicar todos los compuestos del aceite esencial se potencia el efecto inhibitorio contra el desarrollo de los patógenos en comparación de usar un solo compuesto (Taheri *et al.*, 2023; Romero *et al.*, 2022). Del mismo modo, los aceites esenciales han sido efectivos para inhibir la producción de micotoxinas (Chen *et al.*, 2023; Minozzo *et al.*, 2023; Qi *et al.*, 2023; Gwiazdowska *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2020). Terefe *et al.* (2023) evaluaron el efecto antifúngico de diferentes extractos de plantas, *Artemisia glacialis*, *Cymbopogon citratus*, *Punica granatum*, *Rosmerinus officinalis*, *Ruta chalepensis* y *Thymus vulgaris*, los cuales mostraron inhibición del crecimiento micelial, esporulación y germinación contra *F. verticillioides*. Así mismo, Iwayemi *et al.* (2024) probaron aceites esenciales de canela (*Cinnamomum verum*), clavo (*Syzygium aromaticum*), orégano (*Origanum vulgare*) y tomillo (*Thymus vulgaris*) con los hongos micotoxigénicos *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*. Los resultados indicaron que la inhibición de la actividad antifúngica y reducción en la producción de aflatoxinas fue dependiente conforme al incremento de las concentraciones, hasta alcanzar un efecto inhibitorio del 100 % en el grano de maíz almacenado a 25 °C durante 42 días.

En los últimos años, en México se han desarrollado y registrado fungicidas botánicos de amplio espectro para uso agrícola, basados en aceites esenciales. Un ejemplo es el fungicida Sporan (Registro: RSCO-MEZC-FUNG-0910Q-X0073-009-38.00), el cual contiene una mezcla de bioflavonoides de los aceites esenciales de clavo, romero (*Salvia rosmarinus*), tomillo y menta (*Mentha piperita*). El registro y comercialización de este fungicida botánico responde a la necesidad de buscar el desarrollo de alternativas seguras y ecológicas.

Otro compuesto que destaca como un agente de control alternativo al uso de fungicidas sintéticos en maíz es el quitosano, se ha comprobado su eficacia en diversos cultivos como aguacate (*Persea americana*), mango (*Mangifera indica*), arándano (*Vaccinium corymbosum*), cereales, entre otros (Rayón-Díaz *et al.*, 2025; Romanazzi *et al.*, 2024; Ramos-Bell *et al.*, 2023; Herrera-González *et al.*, 2022; Ghule *et al.*, 2021). Su aplicación no solo contribuye al control e inhibición de hongos fitopatógenos, sino que además mejora la calidad de las semillas, induce mecanismos de defensa, favorece la germinación y el vigor de las plántulas (Martínez-Batista *et al.*, 2024; Saberi *et al.*, 2024; Carvalho *et al.*, 2020; Gutiérrez-Martínez *et al.*, 2020). El quitosano es un biopolímero que está compuesto por cadenas largas de N-acetil-glucosamina y D-glucosamina, se obtiene a partir de la desacetilación parcial de la quitina, un polisacárido presente en el exoesqueleto de insectos y crustáceos, así como en la pared celular de los hongos (Mukarram *et al.*, 2023; Debnath *et al.*, 2022). Este compuesto se caracteriza por ser biodegradable, biocompatible, no tóxico, con capacidad de formar películas semipermeables. Además, de presentar actividad antimicrobiana tanto por su interacción directa con los fitopatógenos como por su capacidad de estimular rutas metabólicas y la expresión de genes relacionados con los mecanismos de defensa en frutos y granos. Su eficacia antimicrobiana está asociada principalmente a sus características fisicoquímicas como es el grado de desacetilación y el peso molecular, aunque también pueden influir otros factores como el tipo de quitosano (nativo o modificado), el hospedero, el pH del medio y las condiciones climáticas (Saberi *et al.*, 2024; Mukarram *et al.*, 2023; Debnath *et al.*, 2022). La estructura molecular del quitosano es versátil, lo que permite su modificación química para generar ciertos derivados del quitosano, gracias a la presencia de grupos funcionales activos como los hidroxilos y aminos (Saberi *et al.*, 2024; Mukarram *et al.*, 2023). Estas modificaciones representan una forma eficaz para optimizar sus características fisicoquímicas, sin comprometer sus propiedades biológicas únicas (Jiménez-Gómez y Cecilia, 2020). En la actualidad el estudio del quitosano ha sido extenso, por lo tanto, se buscan nuevas técnicas de aplicación, así como la combinación con otros aditivos como microorganismos benéficos, aceites esenciales y otros compuestos naturales, con el objetivo de lograr un control más eficaz durante el almacenamiento de granos (Vijaykumar *et al.*, 2024; Godana *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2019).

Mecanismo de acción de agentes de biocontrol

La aplicación previa de agentes de biocontrol ha demostrado impedir el crecimiento, esporulación y germinación de las esporas de patógenos como *Fusarium*, *Aspergillus* y *Penicillium*, debido a que se involucran directamente en la actividad antifúngica e indirectamente en la activación del sistema de defensa del grano, lo que permite reducir la infección con un alto efecto tóxico (Figura 3) (Chen *et al.*, 2023; Sharma *et al.*, 2023).

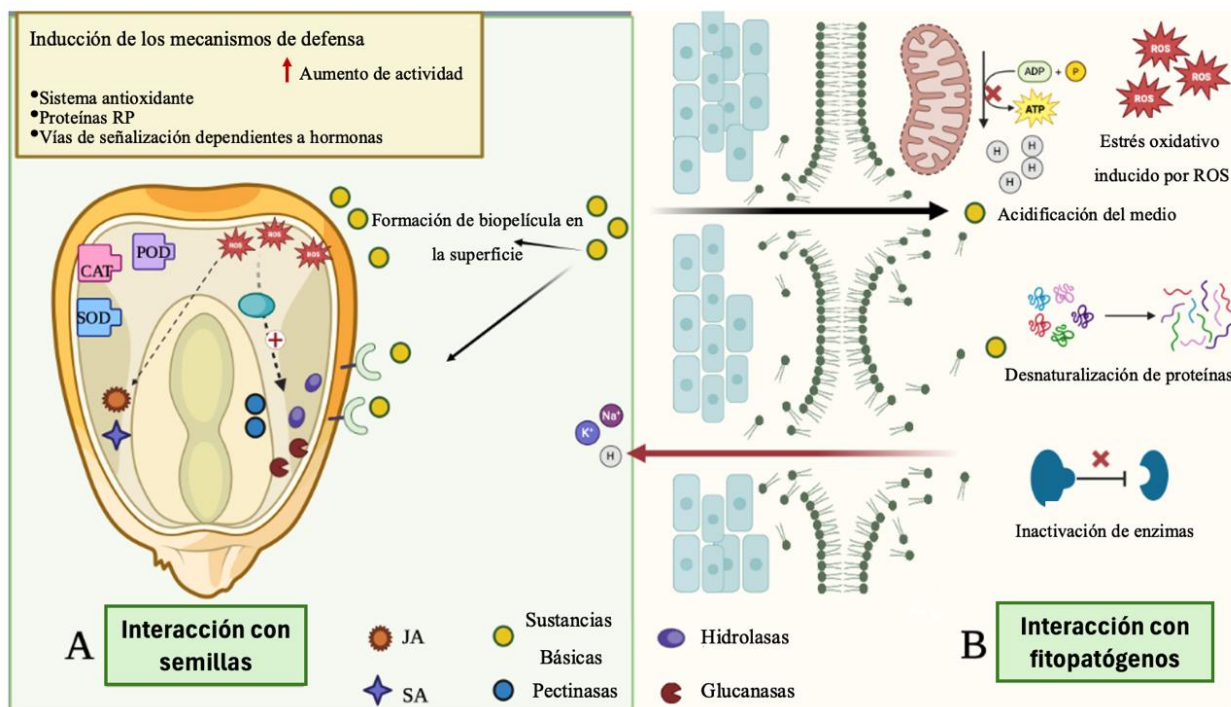


Figura 3. Mecanismos de acción de sustancias básicas. **A)** Interacción con semillas: Activación de los mecanismos de defensa y formación de biopelícula. **B)** Interacción con fitopatógenos: efectos antifúngicos ocasionados principalmente por la interacción de las sustancias básicas con la pared y membrana celular del patógeno. RP (Relacionadas con Patógenos), JA (ácido jasmónico), SA (ácido salicílico), ROS (especies reactivas de oxígeno, por sus siglas en inglés «Reactive Oxygen Species»), POD (Peroxidasa), CAT (Catalasa), SOD (Superóxido dismutasa). Imagen propia creada con el programa BioRender.

La actividad antifúngica se da principalmente por la interacción entre el compuesto y el fitopatógeno. En el caso de los compuestos fitoquímicos, al presentar características liposolubles, tienen la capacidad de unirse y generar daño a la pared y membrana celular del patógeno (Minozzo *et al.*, 2023; Qi *et al.*, 2023; Shabir *et al.*, 2023). De manera similar, el quitosano debido a su naturaleza policatiónica, a través de su grupo amino, puede interactuar con los grupos de la pared celular, cargados negativamente (glucanos, quitina) o en la membrana celular (fosfolípidos) del patógeno (Vijaykumar *et al.*, 2024). Esta interacción ocasiona permeabilidad de la membrana afectando el transporte de iones y absorción de nutrientes (Figura 3). Los daños en la forma e integridad de las células fúngicas como contracción severa, superficie rugosa y colapso parcial de la membrana pueden tener un efecto en cascada sobre otras estructuras celulares tales como vacuolización del citoplasma, desactivación de enzimas, desnaturalización de proteínas celulares, cambios en el retículo endoplásmico y las mitocondrias (Vijaykumar *et al.*, 2024; Terefe *et al.*, 2023; Ghule *et al.*, 2021; Saberi *et al.*, 2014). En particular, los compuestos fitoquímicos se han relacionado con la mitocondria por ser la principal estructura blanco, con efectos como disfunción mitocondrial, lo que provoca una disminución de la actividad de ATPasa acumulando protones dentro de la célula y una acidificación intracelular (Figura 3) (Taheri *et al.*, 2023; Terefe *et al.*, 2023; Gwiazdowska *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2020; Boukaew *et al.*, 2017). El quitosano, una vez que logra entrar a la célula, puede interactuar con el núcleo del patógeno y unirse al ADN y

de esta manera afectar su replicación y por consiguiente la síntesis de proteínas y ARNm. Todas estas afectaciones finalmente llevan a la muerte celular del patógeno (Saber *et al.*, 2024; Mukarram *et al.*, 2023). En cuanto a microorganismos benéficos, el principal mecanismo de inhibición en el desarrollo de fitopatógenos se debe a la competencia de espacio-nutrientes (Figura 4A) (Oztekin *et al.*, 2023; Romero *et al.*, 2022).

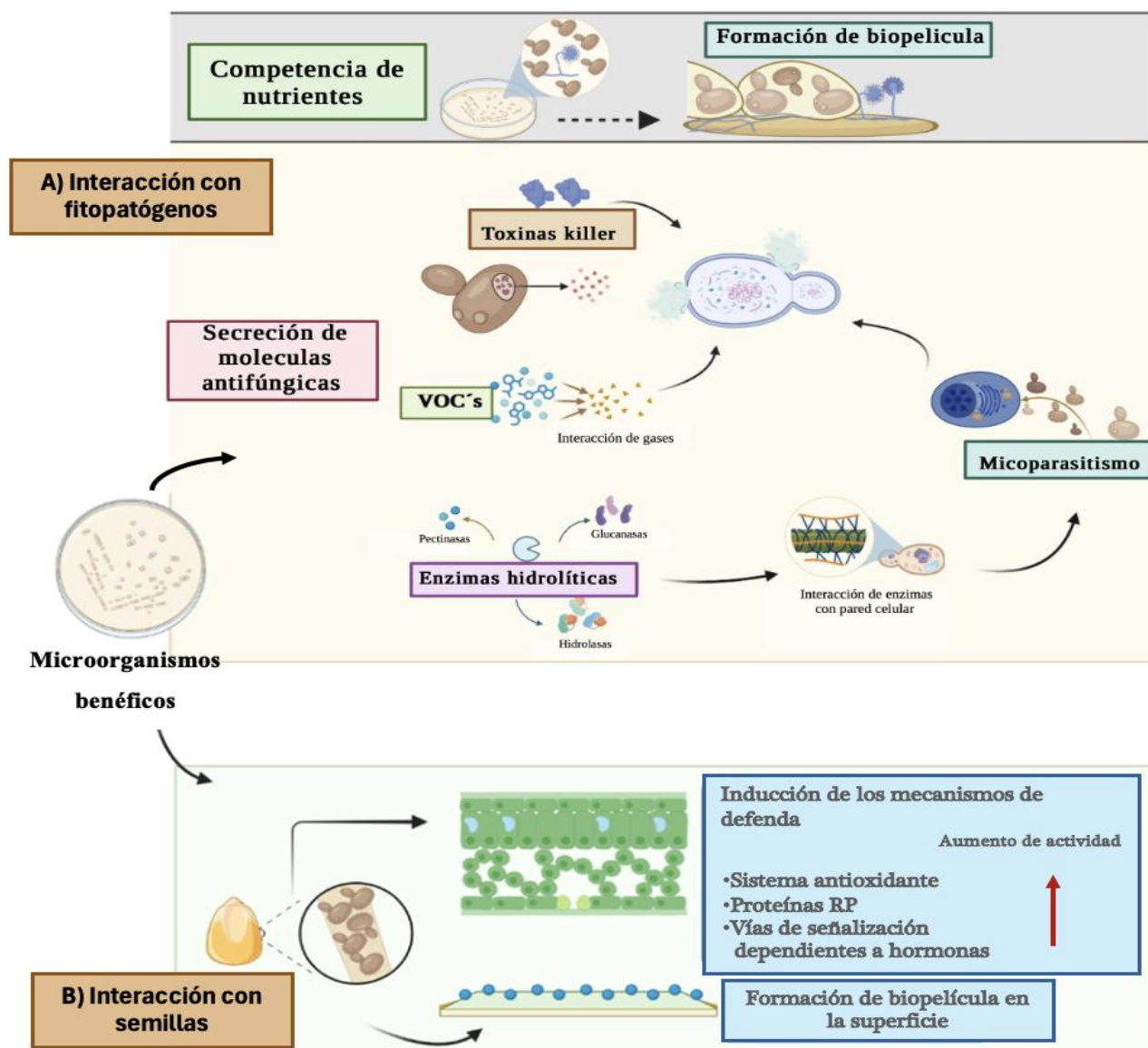


Figura 4. Mecanismos de acción Microorganismos benéficos. **A)** Interacción con fitopatógenos. **B)** Interacción con semillas. Imagen creada con el programa BioRender.

Así mismo, la secreción de moléculas antimicrobianas como toxinas killer, compuestos orgánicos volátiles (COV's) y enzimas hidrolíticas (pectinasas, glucanasas y quitinasas) es considerada como otro mecanismo importante de los microorganismos benéficos (Figura 4A)

(Oztekin *et al.*, 2023; Sharma *et al.*, 2023). Los COV's se están estudiando ampliamente por su capacidad para inhibir el desarrollo de patógenos fúngicos, incluso a bajas concentraciones. Su naturaleza volátil, les permite difundirse fácilmente en distintos ambientes, sin requerir contacto directo con el patógeno (Vijaykumar *et al.*, 2024). Los COVs son producidos como una estrategia de competencia y su actividad antimicrobiana se asocia a su fácil absorción o interacción en la membrana celular del patógeno (Figura 4A). Esta interacción aumenta la permeabilidad de la membrana, difusión de iones y metabolitos que da como resultado la pérdida del homeostasis (Vijaykumar *et al.*, 2024; Oztekin *et al.*, 2023). Del mismo modo, las enzimas hidrolíticas secretadas por microorganismos benéficos actúan directamente sobre la pared celular del patógeno, provocando daños estructurales irreversibles que resultan en lisis celular (Figura 4A) (Sharma *et al.*, 2023). La producción de estas enzimas, también están asociadas al micoparasitismo (Figura 4A), mecanismo por el cual el microorganismo benéfico logra colonizar e invadir las hifas del patógeno, utilizándolas como fuente de nutrientes (Vijaykumar *et al.*, 2024; Oztekin *et al.*, 2023; Sharma *et al.*, 2023).

Por otro lado, algunos agentes de biocontrol puede actuar como un recubrimiento o formar biopelículas en la superficie del grano (Figura 3A y 4B). Este mecanismo afecta el desarrollo del fitopatógeno al limitar la disponibilidad de nutrientes, así como impedir la entrada o su establecimiento en el grano (Debnath *et al.*, 2022). Un ejemplo es la aplicación de levaduras, las cuales pueden formar biopelículas en corto tiempo, favoreciendo la colonización y capacidad de absorber eficazmente las fuentes de carbono presentes en el medio, de esta manera, logran limitar la disposición de nutrientes para el desarrollo óptimo de patógenos fúngicos (Vijaykumar *et al.*, 2024). Así mismo, los recubrimientos provocan una barrera física en el grano que controla la humedad al disminuir la pérdida de agua, reduce la tasa de respiración regulando el intercambio de gases (baja disponibilidad de oxígeno) y activa los mecanismos de defensa (Saber *et al.*, 2024; Debnath *et al.*, 2022). En cuanto a la activación de los mecanismos de defensa en el grano de maíz, la aplicación de agentes de biocontrol mejoran la resistencia contra fitopatógenos (Prusky y Romanazzi, 2023). A nivel sistemático, la interacción del agente con la superficie del grano desencadena múltiples vías de señalización que regulan positivamente la expresión de genes relacionados con la resistencia inducida (Figura 3A y 4B) (Sharma *et al.*, 2023). Durante este mecanismo se genera la síntesis de metabolitos secundarios con función protectora, entre los cuales se incluye las proteínas relacionadas con la patogénesis (PR) como quitinasa y glucanasas, fitoalexinas, fitohormonas (ácido jasmónico [JA], etileno [ET], ácido salicílico [SA]), así como antioxidantes enzimáticos (superóxido dismutasa [SOD], peroxidasa [POD], catalasa [CAT], polifenol oxidasa [PPO] y fenilalanina amonio liasa [PAL]) que ayudan a mejorar el estrés oxidativo (Chen *et al.*, 2023; Shabir *et al.*, 2023; Taheri *et al.*, 2023). Estos cambios fisiológicos le confieren al grano la protección contra un amplio espectro de patógenos y la conservación de su calidad durante el almacenamiento (Prusky y Romanazzi, 2023; Lahlali *et al.*, 2022).

El efecto en la producción de micotoxinas se ha asociado a efectos coadyuvantes relacionados con la inhibición del fitopatógeno; sin embargo, investigaciones demuestran que no siempre los efectos en el crecimiento fúngico se correlacionan con la inhibición de la síntesis de micotoxinas (Haggag *et al.*, 2023; Jian *et al.*, 2022). También puede relacionarse su disminución con una baja expresión de genes relacionados con la biosíntesis, activación de procesos metabólicos como la generación de ROS (por sus siglas en ingles reactive oxygen

species) o el catabolismo de carbohidratos que están asociados con la biosíntesis de micotoxinas (Zhang *et al.*, 2024). Jian *et al.* (2022) comprobaron que los aceites esenciales pueden inhibir completamente la producción de micotoxinas inhibiendo muy poco el crecimiento micelial.

Otra manera de lograr una descontaminación de micotoxinas en el grano de maíz mediante la aplicación de los agentes de biocontrol, es con su degradación, esto quiere decir que la interacción de algunos compuestos puede degradar o modificar la estructura de las micotoxinas, generando metabolitos menos tóxicos (Wachowska *et al.*, 2023). Por ejemplo, Anjum *et al.* (2020) reportan que algunos compuestos bioactivos al interaccionar con aflatoxina pueden eliminar el doble enlace del anillo de furano y modificar su estructura, lo que provocará nuevos compuestos sin toxicidad. En particular, con microorganismos benéficos, la inhibición de micotoxinas también puede lograrse con la adhesión de toxina a través de los componentes de la pared celular de los antagonistas (Oztekin *et al.*, 2023). La adsorción es un proceso fisicoquímico reversible pero su efectividad depende en gran medida de la integridad estructural, morfología física y composición de la pared celular (Zhang *et al.*, 2024; Oztekin *et al.*, 2023; Papp *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El deterioro del grano de maíz durante su almacenamiento, especialmente por la acción de hongos y la producción de micotoxinas, continúa representando un desafío para la seguridad alimentaria. Los principales hongos asociados a esta problemática pertenecen a los géneros *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*, los cuales se distinguen por su capacidad para sintetizar micotoxinas, y algunas de éstas son clasificadas por la IARC, por su importancia toxicológica. Entre ellas, la aflatoxina B1 es especialmente relevante por su elevada toxicidad y clasificación como carcinógeno humano. A pesar de los esfuerzos dirigidos por garantizar una producción y conservación inocua del maíz en México, incluyendo la implementación de normas oficiales, donde se establecen las disposiciones y especificaciones sanitarias que deben de cumplirse en la etapa postcosecha y los límites permisibles de concentraciones de micotoxinas, además de llevar a cabo los Análisis de Peligros y de Puntos Críticos en los Sistemas de Control, las afectaciones por contaminación fúngica y micotoxinas son recurrentes. Las tecnologías convencionales empleadas para mitigar estos efectos muestran limitaciones derivadas de factores como la resistencia microbiana, persistencia de residuos químicos e impacto ambiental. En este contexto, las tecnologías de control alternativas, particularmente aquellas basadas en agentes de biocontrol, han cobrado relevancia como enfoques innovadores y prometedores. Estas tecnologías no solo ofrecen un control efectivo de los fitopatógenos, sino que también contribuyen a la prevención de la síntesis de micotoxinas, sin comprometer la inocuidad y calidad nutricional del grano de maíz. El análisis bibliométrico demuestra que las investigaciones acerca de esta área están enfocadas en la etapa precosecha y muy pocas en postcosecha. De manera similar, las investigaciones que integran la combinación de diferentes agentes de biocontrol para encontrar un método de control más eficiente son muy escasas. Por ello, el entendimiento sistémico e integral de estrategias agrobiotecnológicas, así como la identificación de las especies micotoxigénicas más prevalentes en México debe fortalecerse, con el fin de mejorar la sanidad vegetal y garantizar la seguridad alimentaria de forma sostenible. El avance en este campo constituye una línea prioritaria de investigación,

especialmente hacia el diseño de sistemas de manejo integrado que combinen diferentes métodos y ofrecer un control más eficaz de los fitopatógenos, así como la reducción de la contaminación por micotoxinas en el grano de maíz.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo otorgado y a los integrantes del Laboratorio de Biotecnología de Alimentos del Instituto Tecnológico de Tepic.

REFERENCIAS

- Abdullahi N and Dandago M. 2021. Postharvest losses in food grains – A Review. Turkish Journal of Food and Agriculture Sciences 3(2): 25–36. <https://doi.org/10.53663/turjfas.958473>
- Abrehame S, Manoj VR, Hailu M, Chen YY, Lin YC, *et al.* 2023. Aflatoxins: Source, Detection, Clinical Features and Prevention. Processes, 11, 204: 1-20. <https://doi.org/10.3390/pr11010204>
- Adeniji A and Babalola O. 2018. Tackling maize fusariosis: in search of *Fusarium graminearum* biosuppressors. Archives of Microbiology 200(8): 1239–1255. <https://doi.org/10.1007/s00203-018-1542-y>
- Alkuwari A, Hassan ZU, Zeidan R, Al-Thani R and Jaoua S. 2022. Occurrence of Mycotoxins and Toxigenic Fungi in Cereals and Application of Yeast Volatiles for Their Biological Control. Toxins 14(6). <https://doi.org/10.3390/toxins14060404>
- Ali Md, Ahmed T, Ibrahim E, Rizwan M, Chong KP, *et al.* 2024. A review on mechanisms and prospects of endophytic bacteria in biocontrol of plant pathogenic fungi and their plant growth-promoting activities. Heliyon 10: 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31573>
- Anjum T, Iram W, Iqbal M, Ghaffar A and Abbas, M. 2020. Identification of degradation products of aflatoxin B1 and B2 resulting after their biodegradation by aqueous extracts of *Acacia nilotica*. World Mycotoxin Journal 13(4). <https://doi.org/10.3920/WMJ2018.2411>
- Bartholomew HP, Bradshaw M, Jurick WM and Fonseca JM. 2021. The Good, the Bad, and the Ugly: Mycotoxin Production During Postharvest Decay and Their Influence on Tritrophic Host–Pathogen–Microbe Interactions. Frontiers in Microbiology 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.611881>
- Boukaew S, Prasertsan P and Sattayasamitsathit S. 2017. Evaluation of antifungal activity of essential oils against aflatoxigenic *Aspergillus flavus* and their allelopathic activity from fumigation to protect maize seeds during storage. Industrial Crops and Products 97: 558-566. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.005>
- Carvajal M. 2022. Mycotoxin challenges in maize production and possible control methods in the 21st century. Journal of Cereal Science 103. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103293>
- Carvalho T, Costa M, Rosa LH, de Oliveira AM and de Oliveira EN. 2020. *Penicillium citrinum* and *Penicillium mallochii*: New phytopathogens of orange fruit and their control using chitosan. Carbohydrate Polymers 234: 1–31. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115918>
- Chen Y, Xing M, Chen T, Tian S and Li B. 2023. Effects and mechanisms of plant bioactive compounds in preventing fungal spoilage and mycotoxin contamination in postharvest fruits: A review. Food Chemistry 415. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135787>
- Chrapačienė S, Rasiukevičiūtė N, and Valiuškaitė A. 2022. Control of Seed-Borne Fungi by Selected Essential Oils. Horticulturae 8(3). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030220>
- Cordova-Albores LC, Zelaya-Molina LX., Ávila-Alistac N, Valenzuela-Ruiz V, Cortés-Martínez NE, *et al.* 2021. Potencial de las ciencias ómicas en la bioprospección de agentes microbianos de control biológico: en el caso de la agro-biotecnología mexicana. Revista Mexicana de Fitopatología 39: 147-184. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2009-3>
- Costa FR, Del Toro CL, Wong FJ, Robles MDR, Cárdenas JL and Borboa J. 2020. Aceites esenciales para el control de *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae) y efecto sobre la calidad del grano de maíz *Zea mays* Linnaeus (Poales: Poaceae). Revista Chilena de Entomología 46: 639–652. <https://doi.org/10.35249/rche.46.4.20.10>
- Cuervo JA, Pérez VH, Zavala EA, Peralta M, Aparicio JE and Romero T. 2022. *Trichoderma asperellum* strains as potential biological control agents against *Fusarium verticillioides* and *Ustilago maydis* in maize. Biocontrol Science and Technology 32. <https://doi.org/10.1080/09583157.2022.2042196>

- Debnath D, Samal I, Mohapatra C, Routray S, Kesawat MS and Labanya R. 2022. Chitosan: An Autocidal Molecule of Plant Pathogenic Fungus. *Life* 12. <https://doi.org/10.3390/life12111908>
- Dell'Olmo E, Tiberini A and Sigillo L. 2023. Leguminous Seedborne Pathogens: Seed Health and Sustainable Crop Management 12: 1-42. <https://doi.org/10.3390/plants12102040>
- Erasto R, Kilasi N and Madege RR. 2023. Prevalence and Management of Phytopathogenic Seed-Borne Fungi of Maize. *Seeds* 2: 30-42. <https://doi.org/10.3390/seeds2010003>
- Fleurat F. 2017. Integrated management of the risks of stored grain spoilage by seedborne fungi and contamination by storage mould mycotoxins – An update. *Journal of Stored Products Research* 71: 22-40. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.10.002>
- Galletti S, Paris R and Cianchetta S. 2020. Selected isolates of *Trichoderma gamsii* induce different pathways of systemic resistance in maize upon *Fusarium verticillioides* challenge. *Microbiological Research* 233. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126406>
- García E, Sulyok M, Verheeecke C, Medina A, Krska R and Magan N. 2022. Interacting Environmental Stress Factors Affect Metabolomics Profiles in Stored Naturally Contaminated Maize. *Microorganisms* 10(5). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10050853>
- Ghule MR, Ramteke PK, Ramteke SD, Kodre PS, Langote A, Gaikwad AV, Holkar SK and Jambhekar H. 2021. Impact of chitosan seed treatment of fenugreek for management of root rot disease caused by *Fusarium solani* under *in vitro* and *in vivo* conditions. *Biotech* 11. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02843-3>
- Godana EA, Yang Q, Wang K, Zhang H, Zhang X, Zhao L, Abdelhai MH and Guillaume NN. 2020. Bio-control activity of *Pichia anomala* supplemented with chitosan against *Penicillium expansum* in postharvest grapes and its possible inhibition mechanism. *LWT-Food Science and Technology* 124. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109188>
- Godínez BM, Schilman A, Lagunas A, Escamilla C, Burguete AI, Aguilar C, Blanco J and Lacasaña M. 2023. Pesticide use patterns and their association with cytokine levels in Mexican flower workers. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 97: 291-302. <https://doi.org/10.1007/s00420-023-02043-x>
- Guimarães RA, Pherez PE, Müller H, Berg G, Medeiros FH and Cernava T. 2020. Microbiome-guided evaluation of *Bacillus subtilis* BIOUFLA2 application to reduce mycotoxins in maize kernels. *Biological Control* 150. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104370>
- Ramos A, González RR, Romanazzi G, Landi L and Gutierrez P. 2020. Effects of chitosan in the control of postharvest anthracnose of sour sop (*Annona muricata*) Fruit. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica* 19: 99-108. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio527>
- Gwiazdowska D, Marchwińska K, Juś K, Uwineza PA, Gwiazdowski R, Waśkiewicz A and Kierzek R. 2022. The concentration-dependent effects of essential oils on the growth of *Fusarium graminearum* and mycotoxins biosynthesis in wheat and maize grain. *Applied Sciences (Switzerland)* 12. <https://doi.org/10.3390/app12010473>
- Hamad GM, Mehany T, Simal-Gandara J, Abou-Alella S, Esua OJ, Abdel-Wahhab MA and Hafez EE. 2022. A review of recent strategies for controlling mycotoxins in foods. *Food Control* 144. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109350>
- Hernández AJ and Carballo A. 2017. Almacenamiento y conservación de granos y semillas. <http://somossemilla.org/wp-content/uploads/2017/06/Almacenamiento-de-semillas.pdf>
- Herrera JA, Hernández DA, Bueno DA, Ramos S, Velázquez RM, *et al.* 2022. Effect of commercial chitosan on *in vitro* inhibition of *Colletotrichum siamense*, fruit quality and elicitor effect on postharvest avocado fruit. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica* 21. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio2706>
- Hollomon DW. 2015. Fungicide resistance: 40 years on and still a major problem. *Fungicide Resistance in Plant Pathogens*: 3-11. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55642-8_1
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans., International Agency for Research on Cancer., & World Health Organization. (2002). Some traditional herbal medicines, some mycotoxins, naphthalene and styrene. International Agency for Research on Cancer.
- Iwayemi EF, Yu J, Rehrah D, Davis SS and Williams LL. 2024. Inhibitory effects of essential oils on the growth of grain storage molds and the formation of aflatoxin in stored organic corn grains. *JSFA Reports*: 1-14. <https://doi.org/10.1002/jsf2.210>
- Jiang N, Wang L, Jiang D, Wang M, Liu H, *et al.* 2022. Transcriptomic analysis of inhibition by eugenol of ochratoxin A biosynthesis and growth of *Aspergillus carbonarius*. *Food Control* 135. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108788>
- Jiménez C and Cecilia JA. 2020. Chitosan: A natural biopolymer with a wide and varied range of applications. *Molecules* 25 (17): 2-43. <https://doi.org/10.3390/molecules25173981>
- Khalil OA, Hammad AA and Sebaei AS. 2021. *Aspergillus flavus* and *Aspergillus ochraceus* inhibition and reduction of aflatoxins and ochratoxin A in maize by irradiation. *Toxicon* 198: 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2021.04.029>

- Krnjaja V, Mandić V, Bijelić Z, Stanković S, Obradović A, Petrović T, Vasić T and Radović Č. 2021. Influence of nitrogen rates and *Fusarium verticillioides* infection on *Fusarium* spp. and fumonisin contamination of maize kernels. Crop Protection 144. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105601>
- Krnjaja V, Mandić V, Stanković S, Obradović A, Vasić, T, *et al.* 2019. Influence of plant density on toxigenic fungal and mycotoxin contamination of maize grains. Crop Protection, 116: 126–131. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.10.021>
- Lahlali R, Ezrari S, Radouane N, Kenfaoui J, Esmaeel Q, *et al.* 2022. Biological control of plant pathogens: A global perspective. Microorganisms 10. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030596>
- Martínez E, González C, Velázquez RM, Herrera JA and Gutiérrez P. 2024. *In vitro* and *in vivo* antifungal activity of chitosan and identification of potentially toxigenic fungi in stored maize of Nayarit, Mexico. Revista Mexicana de Ingeniería Química 23: 1–15. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio24223>
- Medina N, López R, Ascencio F, Castellanos T, Campa A I, *et al.* 2016. Biocontrol activity of the marine yeast *Debaryomyces hansenii* against phytopathogenic fungi and its ability to inhibit mycotoxins production in maize grain (*Zea mays* L.). Biological Control 97: 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2016.03.006>
- Minozzo M, de Souza MA, Bernardi JL, Puton BMS, Valduga E, *et al.* 2023. Antifungal activity and aroma persistence of free and encapsulated *Cinnamomum cassia* essential oil in maize. International Journal of Food Microbiology 394. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110178>
- Moumni M, Brodal G and Romanazzi G. 2023. Recent innovative seed treatment methods in the management of seedborne pathogens. Food Security 15: 1365–1382. <https://doi.org/10.1007/s12571-023-01384-2>
- Mukarram M, Ali J., Dadkhah H, Kurjak D, Kačik F and Đurković, J. 2023. Chitosan-induced biotic stress tolerance and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules. Frontiers in Plant Science 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1217822>
- Odjo S, Alakonya AE, Rosales A, Molina AL, Muñoz C, *et al.* 2022. Occurrence and postharvest strategies to help mitigate aflatoxins and fumonisins in maize and their co-exposure to consumers in Mexico and Central America. Food Control 138. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108968>
- Oliveira RC, Carvajal M, Mercado P, Rojo F and Correa B. 2020. Essential oils trigger an antifungal and anti-aflatoxigenic effect on *Aspergillus flavus* via the induction of apoptosis-like cell death and gene regulation. Food Control 110. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107038>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2023. Cultivos y productos de ganadería. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- OMS, Organización Mundial de la Salud. 2009. The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification: 2009. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44271/9789241547963_eng.pdf?sequence=1
- Orzali L, Allagui MB, Chaves C, Molina JB, Moumni, M., *et al.* 2023. Basic Substances and Potential Basic Substances: Key Compounds for a Sustainable Management of Seedborne Pathogens. Horticulturae, 9: 1220. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9111220>
- Oztekin S, Dikmetas DN, Devecioglu D, Acar EG and Karbancioglu F. 2023. Recent Insights into the Use of Antagonistic Yeasts for Sustainable Biomanagement of Postharvest Pathogenic and Mycotoxigenic Fungi in Fruits with Their Prevention Strategies against Mycotoxins. Journal of Agricultural and Food Chemistry 71: 9923–9950. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c00315>
- Papp LA, Horváth E, Peles F, Pócsi I and Miklós I. 2021. Insight into yeast–mycotoxin relations. Agriculture (Switzerland) 11. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121291>
- Pereira R, Braccini A, Da Silva B, Fuentes M, Volpato J, *et al.* 2024. Physiological potential of soybean seeds subjected to industrial treatment and storage time. Australian Journal of Crop Science 18: 45–49. <https://doi.org/10.21475/ajcs.24.18.01.p4048>
- Pérez MCJ, Sánchez G, Garza JL and Espinosa J. 2021. Mohos productores de micotoxinas. https://masam.cuautitlan.unam.mx/mohos_toxigenos_unigras/generalidades.html
- Pitt JI, Wild CP, Baan RA, Gelderblom WCA, Miller DJ, *et al.* 2012. Improving public health through mycotoxin control. International Agency for Research on Cancer, Lyon, France. ISBN: 978-92-832-2214-9
- Prasad RD, Chandrika KSV and Godbole V. 2020. A novel chitosan biopolymer-based *Trichoderma* delivery system: Storage stability, persistence and bio efficacy against seed and soil borne diseases of oilseed crops. Microbiological Research 237. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126487>
- Prusky D and Romanazzi, G. 2023. Induced Resistance in Fruit and Vegetables: A Host Physiological Response Limiting Postharvest Disease Development. Annual Reviews 12: 1–22. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021722>

- Qi X, Zhong S, Schwarz P, Chen B and Rao J. 2023a. Mechanisms of antifungal and mycotoxin inhibitory properties of *Thymus vulgaris* L. essential oil and their major chemical constituents in emulsion-based delivery system. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116575>
- Qi Z, Tian L, Zhang H, Lei Y and Tang F. 2023b. Fungal community analysis of hot spots in bulk maize under different storage conditions. LWT 182. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114819>
- Ramos S, Montiel LG, Estrada RM, Hernández CL and Gutierrez P. 2023. Chitosan and salicylic acid as alternatives for the control of postharvest fungal diseases in blueberries (*Vaccinium corymbosum*). International Food Research Journal 30: 992–1000. <https://doi.org/10.47836/ifrj.30.4.16>
- Rayón-Díaz E, Hernández-Montiel LG, Zamora-Gasga VM, Sánchez-Burgos JA, Ramos-Bell S, *et al.* 2025. Antifungal and Toxicological Evaluation of Natural Compounds Such as Chitosan, Citral and Hexanal Against *Colletotrichum asianum*. Horticulturae, 11: 474. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11050474>
- Reglamento (UE) 2023/915 de la comisión, de 08 de febrero de 1993, relativo a los límites máximos de determinados contaminantes en los alimentos nº 1881/2006. Diario Oficial de la Unión Europea, L119, de 25 de abril de 2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915>
- Riudavets J, Pons MJ, Messeguer J and Gabarra R. 2018. Effect of CO2 modified atmosphere packaging on aflatoxin production in maize infested with *Sitophilus zeamais*. Journal of Stored Products Research 77: 89–91. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.03.005>
- Romanazzi G, Orçonneau Y, Moumni M, Davillerd Y and Marchand PA. 2022. Basic Substances, a Sustainable Tool to Complement and Eventually Replace Synthetic Pesticides in the Management of Pre and Postharvest Diseases: Reviewed Instructions for Users. Molecules 27. <https://doi.org/10.3390/molecules27113484>
- Romanazzi G, Piantatelli S, Potentini R, D'Ignazi G and Moumni M. 2024. Applications of chitosan alone, alternated or combined with copper for grapevine downy mildew management in large scale trials. Journal of Cleaner Production, 451. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142131>
- Romero J, Albertos I, Díez A and Poveda J. 2022. Control of postharvest diseases in berries through edible coatings and bacterial probiotics. Scientia Horticulturae 304. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111326>
- Ruiz MA, Medina IM, Bernal YY, Agraz JM, González CA, *et al.* 2022. Hematological indices as indicators of inflammation induces by exposure to pesticides. Environmental Science and Pollution Research 30: 19466-19476. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23509-4>
- Saberi R, Vatankhah M, Hassanisaadi M, Shafiei Z and Kennedy JF. 2024. Advancements in coating technologies: Unveiling the potential of chitosan for the preservation of fruits and vegetables. International Journal of Biological Macromolecules 254. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127677>
- SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2016. Claridades agropecuarias: almacenamiento en México 271: 1-50. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/185452/revista_271.pdf
- Shabir S, Aftab H, Tehmina A, Waheed A, Saddam H, *et al.* 2023. Biological evaluation, GC–MS profiling, and molecular docking studies of some essential oils against postharvest pathogens of maize. Arabian Journal of Chemistry 16. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105339>
- Sharma I, Raina A, Choudhary M, Kaul S and Dhar M. 2023. Fungal endophyte bioinoculants as a green alternative towards sustainable agriculture. Heliyon, 9: 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31573>
- SSA, Secretaría de Salud. 2002. NOM-188-SSA1-2002: Norma Oficial Mexicana, productos y servicios. Control de aflatoxinas en cereales para consumo humano y animal. Especificaciones sanitarias. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=719385&fecha=15/10/2002#gsc.tab=0
- SSA, Secretaría de Salud. 2008. NOM-247-SSA1-2008: Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5100356&fecha=27/07/2009#gsc.tab=0
- Taheri P, Soweizy M and Tarighi S. 2023. Application of essential oils to control some important fungi and bacteria pathogenic on cereals. Journal of Natural Pesticide Research 6. <https://doi.org/10.1016/j.napere.2023.100052>
- Terefe H, Yitayih G and Mengesha GG. 2023. Phytochemicals reduced growth, sporulation and conidial dimensions of *Fusarium verticillioides*, cause of fumonisin contamination in maize grains. Biotechnology Reports 40. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2023.e00819>

- Tiwari S, Singh BK, Kishore V and Dubey NK. 2022. Boosting modern technologies with emphasis on biological approaches to potentiate prevention and control of aflatoxins: recent advances. *Toxin Reviews* 41: 1007–1017. <https://doi.org/10.1080/15569543.2021.1933534>
- Torre ME, De Sánchez D, Galeana E y Plasencia J. 2014. Fumonisin –Síntesis y función en la interacción *Fusarium verticilloides* - maíz. *Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas* 17: 77–91. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tip/v17n1/v17n1a6.pdf>
- USDA, United States Department of Agriculture. 2024. National Agricultural Statistics Service. <https://quickstats.nass.usda.gov> (Consulta, junio 2024).
- Vecchi B, Orella G and Miotto E. 2022. Micotoxinas: Prevalencia en Latinoamérica, monitoreo de materias primas y alimentos balanceados. 1-23. <https://www.vetanco.com/mx/wp-content/uploads/sites/9/2023/03/e-Book-Micotoxinas-Vetanco-prevalencia-2022.pdf>
- Vijaykumar S, Rajeswari B, Kavya M, Chandrika KS, Prasad RD, *et al.* 2024. Programmable chitosan-based double layer seed coating for biotic and abiotic-stress tolerance in groundnut. *International Journal of Biological Macromolecules* 275. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133586>
- Wu D, Lu J, Zhong S, Schwarz P, Chen B and Rao J. 2019. Effect of chitosan coatings on physical stability, antifungal and mycotoxin inhibitory activities of lecithin stabilized cinnamon oil-in-water emulsions. *Lwt*, 106: 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.029>
- Wang J, Sufar EK, Bernhoft A, Seal C, Rempelos L, *et al.* 2024. Mycotoxin contamination in organic and conventional cereal grain and products: A systematic literature review and meta-analysis. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23: 1-43. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13363>
- Yang F, Zhang R, Wu X, Xu T, Ahmad S, *et al.* 2020. An endophytic strain of the genus *Bacillus* isolated from the seeds of maize (*Zea mays* L.) has antagonistic activity against maize pathogenic strains. *Microbial Pathogenesis* 142. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104074>
- Zhang C, Qu Z, Hou J and Yao Y. 2024. Contamination and Control of Mycotoxins in Grain and Oil Crops. *Microorganisms* 12. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12030567>