

Artículo Original

Reducción de fumonisinas en cultivos de maíces nativos con manejo integrado en valles interandinos de Bolivia

Reduction of fumonisins in native maize crops through integrated management in the inter-Andean valleys of Bolivia

Walter Fuentes ^{1*}, Miguel Florido ² & Nora Medrano ³

*Autor de Correspondencia: wfuentes@fundacionvalles.org

^{1,2} Fundación Valles, Av. Salamanca #675, Edificio SISTECO, Cochabamba, Bolivia.

¹ Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Ciencias Agrarias, Calvo # 132, Sucre, Bolivia.

³ Universidad de San Simón, Departamento de Biología, Investigadora del Laboratorio de Chagas, Cochabamba, Bolivia.

Recibido: 01/11/2024 Aceptado para publicación: 01/12/2024

Resumen

El maíz (*Zea mays*) es un pilar fundamental en la dieta de las comunidades rurales de los valles interandinos de Bolivia, representando más del 75% de su base alimentaria y siendo consumido diariamente en diversas preparaciones. Sin embargo, este cereal es altamente susceptible a la contaminación por micotoxinas, las cuales pueden provocar enfermedades y trastornos tóxicos tanto en humanos como en animales. En 2016, tras la aplicación del Sistema de Prevención y Control de Micotoxinas en Maíz (SIPCMMA), se analizaron 174 muestras de maíz provenientes de pequeños productores ecológicos de los valles interandinos de Chuquisaca (Alcalá, Padilla, Icla y Villa Serrano) y Cochabamba (Mizque) mediante el método Fumonisin ELISA Assay. Los resultados del monitoreo evidenciaron que el SIPCMMA logró reducir significativamente la presencia de fumonisinas en el maíz, disminuyendo de un 100% a un 36%. A pesar de esta mejora, los niveles de contaminación aún superan el umbral permitido de 1 ppm, con Alcalá presentando la menor incidencia (27%) y Mizque la mayor (50%). Dada la persistente amenaza de fumonisinas en el maíz, resulta crucial continuar con la investigación y el ajuste continuo del sistema de prevención, adaptándolo a los diferentes contextos de intervención.

Palabras claves: fumonisinas, maíz, prevención, control de micotoxinas.

Abstract

Corn (*Zea mays*) is a fundamental pillar in the diet of rural communities in the inter-Andean valleys of Bolivia, representing more than 75% of their food base and being consumed daily in various preparations. However, this cereal is highly susceptible to contamination by mycotoxins, which can cause toxic diseases and disorders in both humans and animals. In 2016, following the application of the Mycotoxin Prevention and Control System in Corn (SIPCMMA), 174 corn samples from small-scale organic producers in the inter-Andean valleys of Chuquisaca (Alcalá, Padilla, Icla, and Villa Serrano) and Cochabamba (Mizque) were analyzed using the Fumonisin ELISA Assay method. The monitoring results showed that the SIPCMMA significantly reduced the presence of fumonisins in corn, decreasing from 100% to 36%. Despite this improvement, contamination levels still exceed the permitted threshold of 1 ppm, with Alcalá presenting the lowest incidence (27%) and Mizque the highest (50%). Given the persistent threat of fumonisins in corn, it is crucial to continue with research and the ongoing adjustment of the prevention system, adapting it to the different contexts of intervention.

Keywords: fumonisin, corn, prevention, mycotoxin control.

Introducción

El maíz es un cultivo fundamental en la seguridad alimentaria a nivel global, especialmente en regiones rurales como los valles interandinos de Bolivia. Sin embargo, este cereal está frecuentemente expuesto a contaminantes naturales como las micotoxinas, que representan un riesgo significativo para la salud humana y animal. Las fumonisinas, producidas principalmente por los hongos *Fusarium verticillioides* y *Fusarium proliferatum*, son micotoxinas comunes en el maíz y se han asociado con múltiples efectos adversos, como cáncer, enfermedades hepáticas y renales en humanos, además de ser perjudiciales para la producción agrícola (Ncube et al., 2017; Ostry et al., 2017). Estos contaminantes surgen a lo largo del ciclo del cultivo, durante la cosecha, almacenamiento y procesamiento, y son difíciles de eliminar debido a su resistencia térmica y estabilidad química (Oliveira et al., 2015; Omurtag, 2008).

La prevalencia de fumonisinas en el maíz no solo afecta la calidad del grano, sino también la seguridad alimentaria en comunidades rurales. En Malawi, por ejemplo, se reportó que más del 50% del maíz analizado contenía niveles preocupantes de fumonisinas, lo que subraya la necesidad de estrategias efectivas para mitigar este problema (Mwalwayo & Thole, 2016). En Brasil, estudios encontraron tanto fumonisinas libres como ocultas en muestras de maíz crudo, lo que evidencia que los métodos convencionales de detección podrían subestimar el nivel de contaminación real (Oliveira et al., 2015).

Diversos factores contribuyen a la incidencia de fumonisinas en el maíz, incluyendo condiciones climáticas, prácticas agrícolas inadecuadas y la presencia de plagas como *Busseola fusca*, que facilitan el desarrollo de infecciones fúngicas (Ncube et al., 2017; Nagy et al., 2006). Además, la falta de manejo adecuado en la cosecha y almacenamiento incrementa el riesgo de contaminación. Según investigaciones en Rumanía, las infecciones por *Fusarium* durante la floración y la maduración reducen tanto el rendimiento como la calidad del maíz (Nagy et al., 2006).

Frente a este desafío, las buenas prácticas agrícolas (BPA) y sistemas integrados de prevención son esenciales para controlar la presencia de micotoxinas. Estas estrategias incluyen una cosecha oportuna, un almacenamiento adecuado y la selección de granos saludables, lo que podría reducir significativamente los niveles de fumonisinas por debajo de los límites máximos permitidos (Ncube et al., 2017; Oliveira et al., 2015). Además, el monitoreo constante de las fumonisinas en el maíz es crítico para garantizar la inocuidad de los alimentos consumidos en comunidades vulnerables.

El presente estudio, determino la incidencia de fumonisinas en maíces nativos destinados al consumo familiar en los valles interandinos de Bolivia. Asimismo,

se evaluó la efectividad de un sistema integrado de prevención y control basado en Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) para mitigar los niveles de contaminación y proteger la seguridad alimentaria de las comunidades rurales.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El monitoreo del Sistema Integrado de Prevención y Control de Micotoxinas en maíz (SIPCMMA) se realizó en cinco municipios: Villa Serrano, Padilla, Alcalá e Icla (Chuquisaca) y Mizque (Cochabamba), situados en los valles interandinos de Bolivia (2.000-2.500 m s.n.m.). La región presenta una temperatura promedio de 18 °C, precipitación anual de 650 mm y suelos franco arenosos y franco arcillosos, adecuados para el cultivo de maíz (Figura 1).

Sistema integrado de prevención y control de micotoxinas en maíz (SIPCMMA)

El SIPCMMA es un sistema de aseguramiento de calidad de BPA, para la prevención y control de la incidencia de micotoxinas en puntos críticos como: cosecha, secado del maíz en mazorca, pelado y selección de mazorcas, desgranado y selección del grano y almacenamiento en la casa del agricultor. Las especies del género *Fusarium* infectan el grano antes de la cosecha, de ahí el importante papel de la prevención en campo durante el desarrollo del maíz, con unas prácticas agronómicas y de almacenamiento adecuadas (Recomendación 2006/583/CE). La Figura 2 muestra el flujograma del SIPCMMA que fue aplicado por los productores participantes de este estudio de monitoreo.

Diseño del muestreo

El estudio consideró una población de 241 familias productoras de maíz de cinco municipios en Chuquisaca y Cochabamba, todas registradas en la Lista de Productores Ecológicos (LPE) y participantes en la certificación orgánica. Para determinar el tamaño muestral, se utilizó la fórmula de Munch de poblaciones finitas ($N = 241$, $Z = 1,65$, $p = 0,5$, $q = 0,5$, $e = 0,1$), obteniendo una muestra de 174 familias. Se aplicó un muestreo estratificado por municipio, asignando proporcionalmente las muestras: 64 en Villa Serrano, 51 en Alcalá, 27 en Padilla, 26 en Mizque y 9 en Icla.

Muestreo

La recolección de muestras de maíz, en mazorca o grano, se realizó entre 2 y 3 meses después de la cosecha, directamente desde los almacenes familiares. Se aplicó un muestreo aleatorio simple para garantizar que cada unidad productiva tuviera la misma probabilidad de ser seleccionada. El volumen recolectado se subdividió en pequeñas porciones, combinadas para formar una muestra representativa ajustada al total producido.

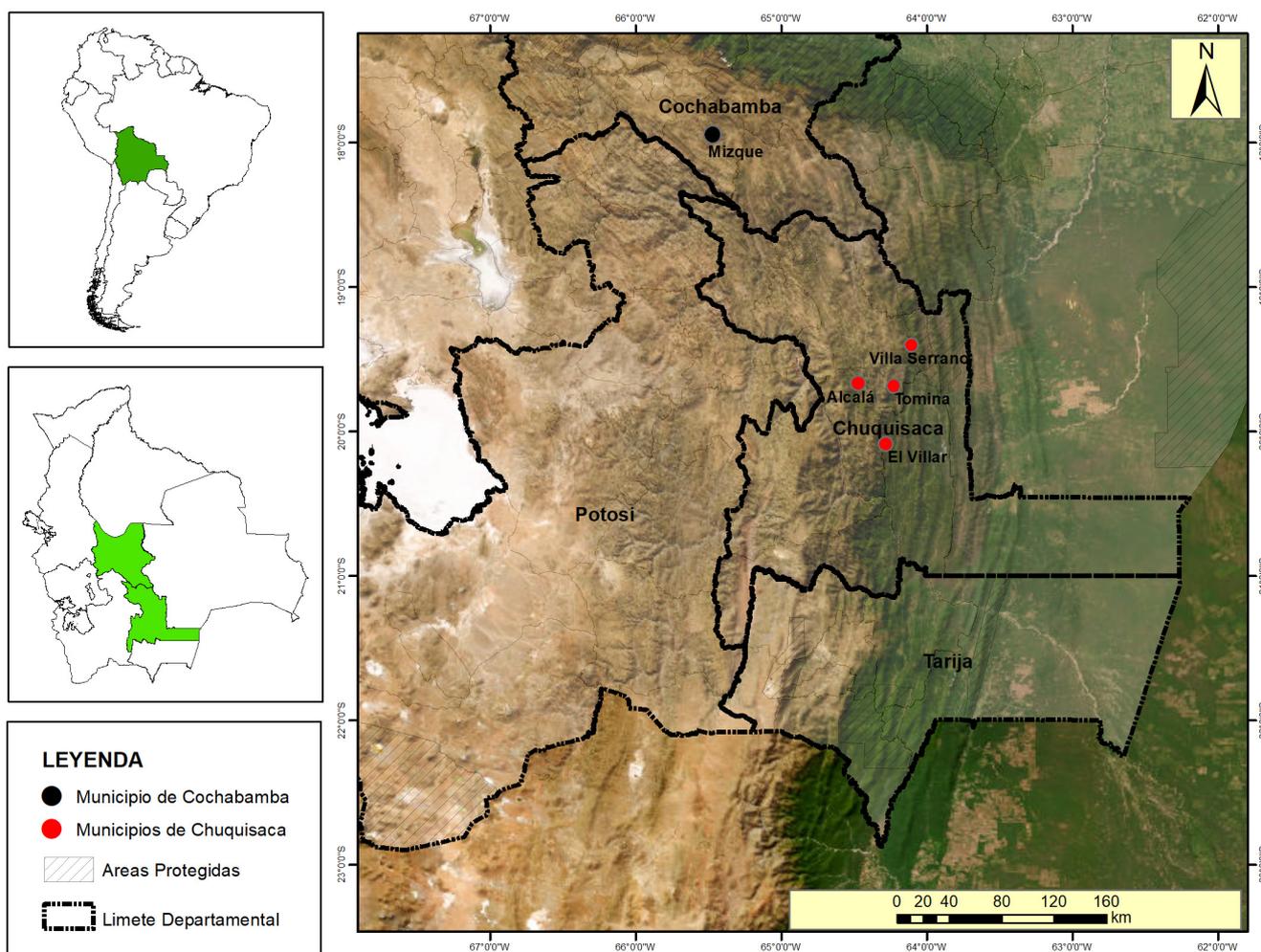


Figura 1. Mapa de ubicación de monitoreo en los municipios de estudio del SIPCMMMA

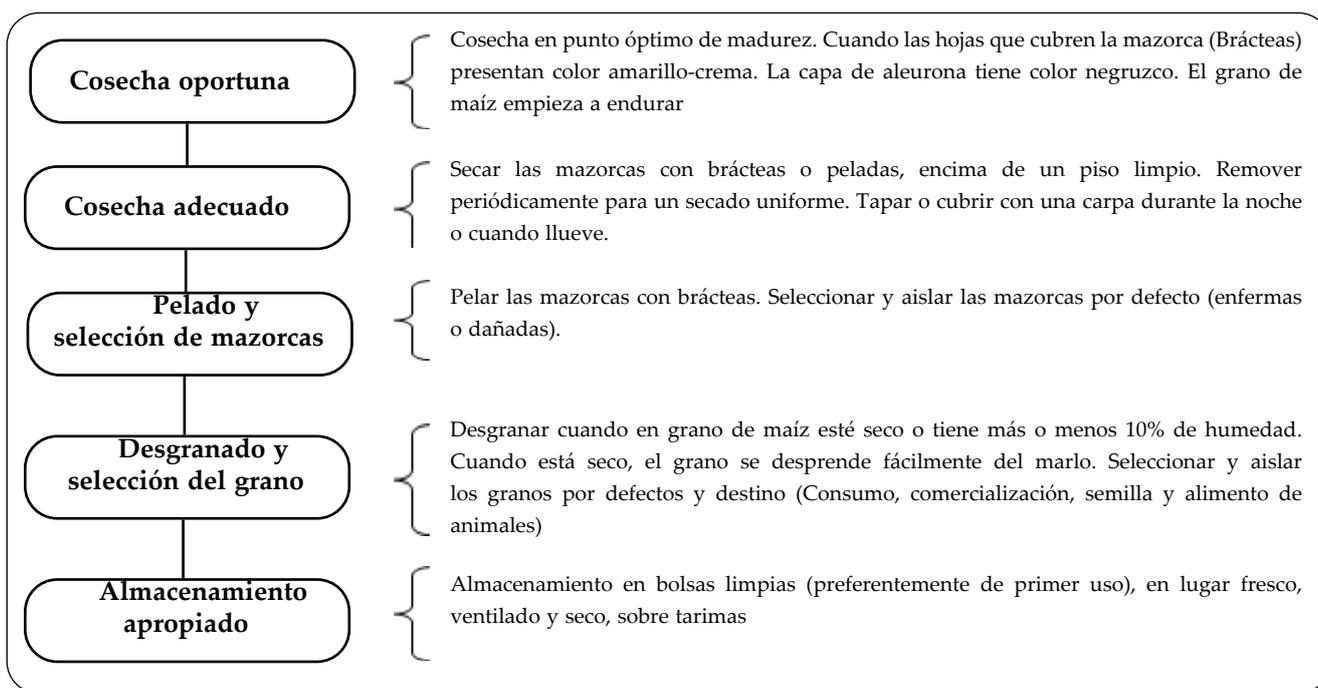


Figura 2. Flujo del sistema integrado de prevención y control de micotoxinas en maíz (SIPCMMMA)

Análisis de laboratorio

En el Laboratorio de Chagas e Inmunoparasitología del Departamento de Biología de la Universidad Mayor de San Simón (FCyT - UMSS), se analizó la incidencia de las fumonisinas B1, B2 y B3 mediante el método específico para maíz, utilizando el kit comercial Fumonisin ELISA Assay (Ensayo por Inmunoabsorción Ligado a Enzimas), siguiendo el protocolo validado y aprobado por HELICA BioSystems Inc., Santa Ana, California, EE. UU.

La absorbancia se midió a 450 nm utilizando un lector de microplacas (Stat Fax 303 Plus). Tanto los estándares como las muestras fueron analizados mediante un análisis de la relación dosis-respuesta, que corresponde a una sustancia tóxica, la cual puede graficarse a través de una curva. El punto donde se detecta la toxicidad corresponde al nivel de "dosis umbral". La pendiente de la curva dosis-respuesta es crucial para predecir la toxicidad de la sustancia a dosis específicas.

Análisis fumonisinas en laboratorio

Se pesaron 20 gramos de cada muestra de maíz previamente molida, a las cuales se les añadió etanol al 60% en una proporción de 1:2 para la extracción de fumonisinas. Las muestras fueron filtradas a través de papel de filtro Whatman N° 1 y luego diluidas con agua destilada deionizada. Tanto las muestras como los estándares fueron analizados por duplicado. Los pocillos de poliestireno fueron recubiertos con anticuerpos específicos de alta afinidad para la detección de fumonisinas B1, B2 y B3, optimizados para reaccionar de manera cruzada con los tres tipos de fumonisinas.

Las muestras extraídas y la fumonisina conjugada con la enzima Horseradish peroxidase (HRP) se mezclaron y se añadieron a los micropocillos recubiertos con los anticuerpos. En este proceso, tanto la fumonisina de la muestra como la conjugada con HRP compiten por unirse

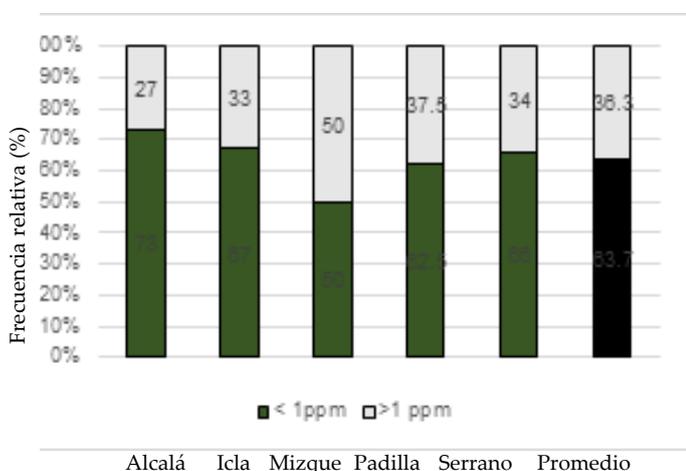


Figura 1. Frecuencia relativa de incidencia de Fumonisin en cinco municipios.

al anticuerpo adsorbido. Después de una incubación, los micropocillos fueron decantados y los reactivos no específicos se eliminaron mediante lavado. Se añadió un sustrato enzimático (TMB), lo que desarrolló un color azul cuya intensidad es inversamente proporcional a la concentración de fumonisina. Finalmente, se añadió una solución de parada ácida que cambió el color del cromógeno de azul a amarillo. La absorbancia a 450 nm (OD450) fue medida con un lector de microplacas, comparando las densidades ópticas con los estándares del kit para determinar la concentración de fumonisinas en ng/ml, ppb o ppm.

Análisis estadístico

El análisis de la incidencia de fumonisinas en el maíz destinado al consumo y comercialización se realizó en las unidades familiares monitoreadas, elaborando tablas de distribución de frecuencias por municipio y categorizando los datos en <1 ppm y >1 ppm según el Límite Máximo Permitido (LMP) de 1 ppm. Se utilizó Microsoft Excel 2019 para construir un diagrama de dispersión a partir de los datos organizados en una hoja de cálculo. Como indicador de precisión experimental, se consideró aceptable un valor menor o igual al 25% (García et al., 2020). Este enfoque metodológico permitió una evaluación sistemática de la contaminación por fumonisinas en la región, proporcionando información clave para la gestión del riesgo en la producción de maíz.

Resultados

Incidencia de fumonisinas

En base a los resultados de laboratorio, se hizo el análisis de datos para los cinco municipios en estudio, se construyó la tabla de distribución de frecuencias; donde se puntualiza la frecuencia relativa en porcentaje de la incidencia de fumonisinas por municipio, para ello se agruparon los datos < 1 ppm y > a 1ppm, considerando

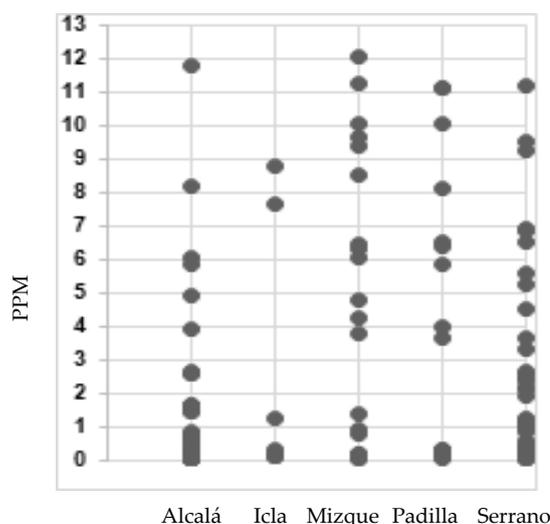


Figura 2. Distribución de fumonisinas en ppm, por municipio.

Tabla 1. Frecuencia relativa de incidencia de fumonisinas en los cinco municipios.

Municipios	Grupos	Frecuencia absoluta	Frecuencia Relativa (%)
Alcalá	<1 ppm	37	73
	>1 ppm	14	27
Icla	<1 ppm	6	67
	>1 ppm	3	33
Mizque	<1 ppm	13	50
	>1 ppm	13	50
Padilla	<1 ppm	15	62.5
	>1 ppm	9	37.5
V. Serrano	<1 ppm	42	66
	>1 ppm	22	34

que el límite máximo permisible (LMP) es de 1 ppm (Figura 1)

El análisis de frecuencias de incidencia de fumonisinas (Tabla 1), en los municipios de Alcalá (27%), Icla (33%), Villa Serrano (34%), Padilla (34.5%) y Mizque (50%), muestra porcentajes elevados de presencia de fumonisinas por encima del umbral permitido (1 ppm). Siendo Alcalá con 27% el municipio con menor incidencia y Mizque el municipio que con mayor incidencia con un 50%, respecto al límite máximo permisible (LMP). En base a estos resultados, la figura 3, nos permite observar la frecuencia relativa de la incidencia de fumonisinas en los municipios y su promedio.

Distribución y valores de fumonisinas

En la Figura 2, observamos los valores de incidencia de fumonisinas, en función al LMP (1 ppm), el valor máximo de incidencia es de 12.05 ppm, en el municipio de Mizque y el valor mínimo es de 0.05 ppm, en el municipio de Alcalá, con una amplitud de variación de 12.00 ppm, en los valores de incidencia de fumonisinas en los cinco municipios. Adema, se observa valores máximos de incidencia de fumonisinas, en los municipios de Alcalá (11.75 ppm), Icla (8.79 ppm), Mizque (12.05 ppm), Padilla (11.11 ppm) y V. Serrano (11.21 ppm), muy por encima del límite máximo permisible (LMP). Los valores por debajo de este LMP, por municipio son Alcalá (0.05 ppm), Icla (0.12 ppm), Mizque (0.07 ppm), Padilla (0.07 ppm) y V. Serrano (0.07 ppm). Con amplitudes de variación de 11.70 ppm, 8.67 ppm, 11.98 ppm, 11.04 ppm y 11.14 ppm, respectivamente.

Discusión

El estudio sobre la incidencia de fumonisinas muestra una reducción significativa en su presencia en el maíz gracias a la implementación del Sistema Integral de Producción y Control de Maíz para Mitigar Fumonisinas (SIPCMMA), pasando de un 100% a un 36% en la población estudiada. Sin embargo, aunque esta disminución es notable, los niveles promedio aún superan el umbral

permitido de 1 ppm. Este resultado pone en evidencia la necesidad de revisar la eficacia real del sistema, ya que, si bien reduce los riesgos, no logra eliminar completamente el problema. Esto es consistente con estudios previos que destacan que los sistemas integrados de manejo pueden reducir, pero no necesariamente erradicar, la contaminación por micotoxinas debido a factores ambientales y de implementación (Marasas et al., 2001).

La efectividad del SIPCMMA está condicionada por múltiples factores, incluyendo las decisiones de los productores y las condiciones naturales del entorno, como el clima, la fertilidad del suelo, y la incidencia de plagas. Estas variables pueden dificultar la adopción uniforme del sistema y, por ende, influir en su eficacia. Estudios han señalado que las variaciones climáticas pueden aumentar la susceptibilidad del maíz a *Fusarium* spp., el hongo productor de fumonisinas, lo que limita el impacto de las estrategias de mitigación (Munkvold, 2003). Además, factores como la asistencia técnica, las oportunidades de mercado y la disponibilidad de mano de obra también afectan la implementación efectiva del SIPCMMA. La literatura resalta que, para maximizar la reducción de fumonisinas, es crucial adaptar los sistemas de prevención al contexto local y realizar un monitoreo constante para ajustar las prácticas conforme a las necesidades del entorno (Logrieco et al., 2008).

Por último, la amenaza constante de la incidencia de fumonisinas en el maíz subraya la importancia de continuar con la investigación. Es necesario no solo mejorar los sistemas existentes, sino también desarrollar nuevas estrategias que consideren los cambios en los contextos ambientales y socioeconómicos. Investigaciones recientes han sugerido que la integración de biotecnología y agricultura de precisión podría ofrecer herramientas más efectivas para reducir las micotoxinas en cultivos clave como el maíz (Bennett & Klich, 2003).

Conclusiones

El estudio sobre la incidencia de fumonisinas muestra que la implementación del SIPCMMA ha reducido su presencia en el maíz del 100% al 36% en la población estudiada, aunque aún supera el umbral permitido de 1 ppm. La aplicación del sistema depende de decisiones de los productores y factores como clima, variedad de cultivo y asistencia técnica, lo que implica que la amenaza persiste. Es crucial seguir investigando y ajustando el sistema, difundiendo los resultados en diversos niveles, especialmente en salud pública, para fortalecer las acciones de mitigación y promover el SIPCMMA entre más productores, mejorando la calidad del maíz y los ingresos económicos.

Declaración de conflictos de interés

Los autores no tenemos conflictos de interés

Agradecimiento

Los autores agradecemos al M.Sc. Reinaldo Lozano, por generar el mapa de ubicación de los municipios

Referencias

Bennett, J. W., & Klich, M. (2003). Mycotoxins: Toxic secondary metabolites produced by fungi. *Clinical Microbiology Reviews*, 16(3), 497-516.

Logrieco, A., Battilani, P., & Moretti, A. (2008). Improving food safety by reducing mycotoxin contamination: A challenge for the mycotoxicology community. *Journal of Plant Pathology*, 90(2), 295-298.

Marasas, W. F. O., Miller, J. D., Riley, R. T., & Visconti, A. (2001). Mycotoxins – Problems remain but prevention is possible: The potential of fumonisins. *Journal of Toxicology – Toxin Reviews*, 20(2), 153-169.

Munkvold, G. P. (2003). Environmental factors influencing fumonisin contamination of maize: Implications for managing mycotoxins in developing countries. *Phytopathology*, 93(7), 685-693.

Mwalwayo, D. S., & Thole, B. (2016). Prevalence of aflatoxin and fumonisins (B1+ B2) in maize consumed in rural Malawi. *Toxicology Reports*, 3, 173-179.

Nagy, E., Voichița, H., & Kadar. (2006). The influence of *Fusarium* ear infection on the maize yield and quality (Transylvania-Romania). *Communications in Agricultural and Applied Biological Science*, 71(3 Pt B), 1147-1150.

Ncube, E., Flett, B. C., Van den Berg, J., Erasmus, A., & Viljoen, A. (2017). The effect of *Busseola fusca* infestation, fungal inoculation and mechanical wounding on *Fusarium* ear rot development and fumonisin production in maize. *Crop Protection*, 99, 177-183.

Oliveira, M. S., Diel, A. C., Rauber, R. H., Fontoura, F. P., Mallmann, A., Dilkin, P., & Mallmann, C. A. (2015). Free and hidden fumonisins in Brazilian raw maize samples. *Food Control*, 53, 217-221.

Ostry, V., Malir, F., Toman, J., & Grosse, Y. (2017). Mycotoxins as human carcinogens—the IARC Monographs classification. *Mycotoxin Research*, 33(1), 65-73.