

Universidad Zamorano
Departamento de Agroindustria
Ingeniería en Agroindustria Alimentaria



Proyecto Especial de Graduación
**Comparación de tres métodos de fumigación en almacenamiento
hermético en maíz (*Zea mays*) desgranado variedad Tuxpeño**

Estudiante

Carla María Corrales Henríquez

Asesores

Raúl Espinal, Ph.D.

Edward Moncada, MAE.

Honduras, octubre 2025

Autoridades

KEITH LESLIE ANDREWS

Rector i.a.

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ADELA M. ACOSTA MARCHETTI

Directora del Departamento de Agroindustria

JULIO NAVARRO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros.....	5
Índice de Anexos.....	6
Resumen	7
Abstract.....	8
Introducción.....	9
Materiales y Métodos	12
Ubicación del Ensayo	12
Materiales y Equipos.....	12
Diseño Experimental y Análisis Estadístico	12
Infestación.....	13
Acondicionamiento y Fumigación.....	13
Muestreo.....	13
Análisis de Fosfina en el Ambiente	14
Análisis de Fosfina en Super Saco	14
Análisis de Mortalidad	14
Porcentaje de Daño por Insecto	15
Germinación.....	15
Resultados y Discusión.....	16
Germinación del Maíz	16
Mortalidad	17
Fosfina en el Ambiente	18
Fosfina en Sacos.....	19
Daño por Insecto.....	20
Conclusiones	21

Recomendaciones..... 22

Anexos..... 25

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Descripción de tratamientos de fumigación de maíz (<i>Zea mays</i>) tuxpeño desgranado.....	13
Cuadro 2 Evaluación del efecto de tres tratamientos de fumigación en la germinación de maíz (<i>Zea mays</i>) tuxpeño comparando antes y después de la aplicación del fumigante.....	17
Cuadro 3 Evaluación del efecto de tres tratamientos de fumigación en la mortalidad del gorgojo de maíz (<i>Sitophilus zeamais</i>).....	18
Cuadro 4 Evaluación en partes por millón de niveles de fosfina en el ambiente antes y después de la aplicación del fumigante.....	19
Cuadro 5 Evaluación de niveles de fosfina en sacos de maíz (<i>Zea mays</i>) tuxpeño de tres tratamientos comparando antes y después de la aplicación del fumigante.....	20
Cuadro 6 Evaluación de daño por insecto en maíz (<i>Zea mays</i>) tuxpeño de tres tratamientos comparando antes y después de la aplicación del fumigante.....	20

Índice de Anexos

Anexo A Ficha técnica del fumigante utilizado	25
Anexo B Costos fijos	27

Resumen

Las pérdidas de maíz durante el almacenamiento representan un problema importante para los productores debido a la infestación por plagas insectiles especialmente el gorgojo del maíz (*Sitophilus zeamais*). El objetivo del estudio fue evaluar tres métodos de fumigación en almacenamiento hermético para controlar la incidencia y reducir el daño causado por esta plaga. Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con tres tratamientos: plástico de polietileno con fumigante, TSL con fumigante y TSL sin fumigante, con dos repeticiones por tratamiento para un total de seis unidades experimentales. Se evaluó la mortalidad de *Sitophilus zeamais*, penetración de fosfina en los sacos, fosfina presente en el ambiente, % de daño por insecto y la germinación del maíz, comparando los resultados antes y después de la fumigación. Los datos se analizaron mediante un ANDEVA y se usó una prueba de rangos múltiples Duncan al 90% de significancia para determinar diferencias entre tratamientos y periodos. Los resultados indicaron que en la germinación en la mayoría no hubo diferencias significativas ($P \geq 0.1$), solo en el tratamiento 2 en las anormales se observó diferencias significativas ($P \leq 0.1$) entre el antes y después. Todos los tratamientos lograron una mortalidad del 100% de la plaga, no se observaron diferencias significativas en el daño por insectos ($P \geq 0.1$), los tratamientos con fosfina mostraron una penetración efectiva dentro de los sacos mientras que el TSL sin fumigante mantuvo su hermeticidad y para la medición de fosfina en el ambiente se encontraron residuos del fumigante en el ambiente. Estos hallazgos sugieren que el almacenamiento hermético, incluso sin fumigante, es eficaz en el control de plagas. Se recomienda considerar mejoras como el uso de extractores de aire para optimizar la hermeticidad y repetir los ensayos para reforzar la validez de los resultados.

Palabras clave: fosfina, fumigantes, germinación, plástico de polietileno, *Sitophilus zeamais*, TSL.

Abstract

Weight and quality corn losses during storage represent a significant problem for producers due to insect pest infestations, especially the corn weevil (*Sitophilus zeamais*). The aim of the study was to evaluate three fumigation methods in airtight storage to control the incidence and reduce the damage caused by this pest. A Completely Randomized Design (CRD) was used with three treatments: polyethylene plastic with fumigant, TSL with fumigant, and TSL without fumigant, with two replications per treatment for a total of six experimental units. The mortality of *Sitophilus zeamais*, phosphine penetration in the sacks, phosphine levels in the environment, insect damage percentage, and maize germination were evaluated, comparing the results before and after fumigation. The data were analyzed using ANOVA and Duncan's multiple range test at a 90% significance level to determine differences between treatments and periods. The results showed that for germination, most treatments did not show significant differences ($P \geq 0.1$), with significant differences ($P \leq 0.1$) observed only in treatment 2 for abnormal germination before and after fumigation. All treatments achieved 100% pest mortality, and no significant differences were found in insect damage ($P \geq 0.1$). The phosphine treatments showed effective penetration within the sacks, while the TSL without fumigant maintained its airtightness, and phosphine residues were found in the environment. These findings suggest that airtight storage, even without a fumigant, is effective in pest control. It is recommended to consider improvements, such as the use of air extractors, to optimize airtightness and to repeat the trials to strengthen the validity of the results.

Keywords: fumigants, germination, phosphine, polyethylene plastic, *Sitophilus zeamais*, TSL.

Introducción

El maíz (*Zea mays*) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial; este representa un papel crucial en la alimentación humana y animal. Originario de América, el maíz ha sido una fuente fundamental de sustento para diversas civilizaciones a lo largo de la historia (Rivas, 2021). Es una de las especies vegetales con mayor variabilidad genética. Esta gran diversidad se expresa en el maíz cultivado en diferentes ambientes y utilizado para diversos propósitos (Teixeira y Guimarães, 2021).

Sus prácticas habituales de almacenamiento, que incluyen sacos de plástico de polietileno con o sin fumigante, no ofrecen una protección adecuada contra las principales plagas del almacenamiento (García-Lara et al., 2019), lo que resulta en pérdidas de hasta el 60% del grano almacenado (Odjo et al., 2020). Honduras ocupa aproximadamente 226 mil hectáreas dedicadas a la agricultura de maíz. Sin embargo, estos sistemas tradicionales de manejo pueden no controlar eficazmente las plagas y los hongos, que pueden representar hasta el 30% de las pérdidas poscosecha del maíz (Mendoza et al., 2024).

Existen muchas especies de insectos que se alimentan, viven y se reproducen en alimentos almacenados en todo el mundo, lo que, produce pérdidas económicas significativas. Uno de los insectos más dañinos para los granos de maíz almacenados es *Sitophilus zeamais* (Rodríguez et al., 2022). La infestación por insectos no solo provoca pérdidas en cantidad, sino también en el deterioro en las propiedades del maíz, lo que puede resultar en rechazo en el mercado y esto afecta directamente a los productores y la seguridad alimentaria de los países donde el maíz es un alimento básico.

Actualmente en la planta de semillas de Zamorano se usa un método de fumigación que consiste en usar plástico de polietileno en doble capa con el fumigante DETIA GAS EX-T 57 FT (fosfina en tabletas) y se colocan sacos de arena para asegurarse que el plástico quede bien sellado. Cuando se utilizan tabletas de fosfina, éstas deben distribuirse en varios lugares dentro de las estibas de sacos

o contenedores de semilla, a la dosis recomendada, a fin de asegurar que el gas se disperse rápida y uniformemente por toda la semilla (MacRobert et al., 2015).

La fosfina es sumamente tóxica. Los operadores deben tomar precauciones de seguridad, como colocar letreros de aviso de riesgo cerca del área de fumigación, usar ropa protectora, mascarillas antigás y no se debe fumar (MacRobert et al., 2015). Las personas que trabajan con fosfuros metálicos y fosfina pueden estar propensos a padecer toxicidad ocupacional, principalmente si no se cumplen con las condiciones ambientales ni las normas básicas de seguridad (Navarro, 2018).

En las últimas décadas, el uso continuo de fosfina como fumigante en granos almacenados ha demostrado contribuir a la contaminación ambiental y al desarrollo de resistencia en insectos, lo que incrementa la dosis requerida (Sau y Gawdiya, 2022). La principal forma de control del gorgojo del maíz se basa en el uso de insecticidas (ej. piretroides, organofosforados), aunque tóxicos para los insectos, tienen un DL_{50} bajo para los humanos y no son contaminantes fuertes para el ambiente y también se hace uso de fumigantes (ej. fosfina) que contaminan el medio ambiente, estimulan el desarrollo de poblaciones resistentes a estos productos, afectan la salud del hombre e inclusive causar su muerte (ASTDR, 2016).

Cómo consecuencia de la resistencia de las plagas insectiles a la fosfina, hay un interés en evaluar estrategias alternativas. Debido a esto se están evaluando alternativas de almacenamiento hermético como el uso de GrainPro TranSafeliner™ (TSL). Según el fabricante, este producto debido a que está hecho de polietileno de alta resistencia con una capa de barrera patentada puede representar una excelente medida para el control de insectos de almacén. Este método utiliza cinta opp tejida y cuerda de nailon para facilitar la instalación. Tiene excelentes propiedades de protección contra gases y humedad que detiene la infestación de insectos, reduce los efectos de la condensación y restringe la entrada de aire que permite el crecimiento de moho.

Los productos almacenados se conservan de forma segura sin pérdidas de calidad ni de cantidad, incluso durante el tránsito o almacenamiento transoceánico. Estudios han demostrado que

el almacenamiento hermético puede ser eficaz en el control de plagas sin necesidad de aplicar pesticidas, gracias a la generación de una atmósfera modificada con baja concentración de oxígeno y alta de dióxido de carbono (Ndegwa et al., 2016) (Mutambuki y Likhayo, 2021).

Estas tecnologías funcionan como una barrera que detiene los intercambios de oxígeno y humedad entre el grano almacenado y su entorno. La actividad biológica de los organismos vivos dentro del grano consume oxígeno y produce dióxido de carbono (Odjo et al., 2020). Debido a esto las plagas se vuelven inactivas debido al bajo nivel de oxígeno y mueren por desecación. Para este estudio se hicieron tres tratamientos: plástico de polietileno con fosfina, TSL con fosfina y TSL sin fosfina.

Se espera que el sistema de almacenamiento hermético TSL, sin la aplicación de fosfina, sea igual o más eficaz que el método convencional de fumigación con fosfina cubierto con plástico de polietileno negro y el de TSL con fosfina en el control de plagas y conservación de la calidad del maíz desgranado durante el almacenamiento. Este estudio investiga la generación de evidencias que permita reducir el uso de fumigantes tóxicos en la conservación del maíz, ofreciendo una alternativa más segura y sostenible para los productores. Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron:

Evaluar y comparar el efecto de tres métodos de fumigación a través de diferentes parámetros comparando los resultados antes y después de la aplicación para documentar si hubo alguna diferencia.

Determinar cuál de los métodos evaluados presentó mayor eficacia en el control de *Sitophilus zeamais*.

Estimar la residualidad de niveles fosfina en los tratamientos evaluados.

Materiales y Métodos

Ubicación del Ensayo

El estudio se realizó en la Planta de Procesamiento de Semillas y el Laboratorio de Semillas del departamento de Agroindustria de la Universidad Zamorano, ubicada en el km 30 carretera de Tegucigalpa a Danlí, Valle del Yeguaré, Municipio de San Antonio de Oriente, departamento de Francisco Morazán, Honduras. A 14° latitud norte y 82° 2' longitud oeste, durante los meses de mayo y junio del año 2025.

Materiales y Equipos

Se utilizaron super sacos de maíz tuxpeño desgranado, plástico de polietileno, GrainPro TranSafeliner™ (TSL), tarimas de madera, sacos de polietileno, placas petri, sacos de arena cilíndricos de 70 cm x 15 cm x 10 cm, tabletas de 3 g DETIA® GAS EX-T 57FT de fosforo de aluminio, detector multigás portátil Altair® 5X, balanza digital, calador para muestrear sacos de polietileno, tamices #12 (12/64"), #17 (17/64), lupa, cajas de plástico (35 * 35 cm), cámara de germinación, arena esterilizada, regadera, guantes, marcador, etiquetas, bolsa plástica, masking tape y pincel de punta fina.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA), con tres tratamientos que fueron los diferentes métodos de fumigación (plástico de polietileno con fumigante, TSL con fumigante y TSL sin fumigante). Se realizaron dos repeticiones para cada uno de los tratamientos, y para análisis de laboratorio se realizaron las pruebas por triplicado, para un total de seis unidades experimentales (Cuadro 1).

El análisis estadístico se realizó utilizando el programa Statistical Analysis System (SAS) versión 9.4, aplicando el procedimiento GLM (General Linear Model). Se efectuó un análisis de varianza (ANDEVA) para determinar los efectos del tratamiento, periodo y su interacción, así como de la repetición. Para la comparación de medias, se aplicó la prueba de rangos múltiples Duncan, con un nivel de confiabilidad del 90%.

Cuadro 1

Descripción de tratamientos de fumigación de maíz (Zea mays) tuxpeño desgranado.

Descripción de los tratamientos (métodos de fumigación)
Plástico de polietileno con fumigante
TSL con fumigante
TSL sin fumigante

Nota: TSL: Transafeliner (método hermético utilizado)

Infestación

Para cada tratamiento se colocó una placa Petri con diez individuos vivos del gorgojo del maíz en cada super saco.

Acondicionamiento y Fumigación

Cada super saco se colocó en una tarima de madera, se taparon con plástico de polietileno en doble capa poniendo sacos de arena sobre las orillas para crear un ambiente hermético o se introdujeron al TSL, dejando solamente sin tapar un espacio donde se pudiera introducir la bandeja con las tabletas de fosforo de aluminio.

Se colocó una tableta de DETIA[®] por cada 227kg (dosis recomendada por el fabricante Degesch gmbh), Por lo que, se realizó un cálculo por regla de tres para saber el número de pastillas a introducir. Luego se procedió a tapar el lado restante de cada tratamiento y para finalizar se rotularon con información de advertencia de material fumigado y con la identificación de cada tratamiento.

Muestreo

El procedimiento de muestreo se basó en las recomendaciones de Li et al. (2023) quienes sugieren que para obtener estimaciones precisas es necesario recolectar submuestras de distintas posiciones del volumen total. Por lo tanto, de cada super saco se extrajeron tres submuestras: una de la parte superior, una del centro y otra de la base. Estas submuestras se mezclaron para conformar una muestra representativa del saco que reflejaron la distribución interna del grano. Se realizó un plan de muestreo que consistía en extraer 1 kg (1000 g) de cada tratamiento. Se utilizó un calador de alveolo de doble tubo y se introdujo varias veces por saco hasta completar la cantidad requerida de muestra.

Análisis de Fosfina en el Ambiente

Para monitorear la presencia de fosfina (PH_3) en el ambiente, se utilizó un detector multigás portátil Altair® 5X (MSA – The Safety Company), calibrado previamente según las especificaciones del fabricante. Las mediciones se realizaron en dos momentos: antes de la aplicación del fumigante y al finalizar la fumigación, en diferentes partes del área de almacenamiento usando equipo de protección para evitar inhalar los gases que podrían estar presentes. El equipo cuenta con sensor electroquímico específico para fosfina, permitió detectar y registrar concentraciones en tiempo real expresadas en partes por millón (ppm).

Análisis de Fosfina en Super Saco

Para evaluar la concentración de fosfina residual dentro de la semilla del maíz, se realizó un análisis por saco con el fin de determinar la cantidad de gas que efectivamente penetró o se impregnó en el maíz fumigado. Las mediciones se realizaron en dos momentos: antes de la aplicación del fumigante y al finalizar la fumigación usando equipo de protección para evitar inhalar los gases que podrían estar presentes. Se utilizó el detector multigás Altair® 5X (MSA – The Safety Company). Para ello, se introdujo cuidadosamente la sonda del equipo en el centro de cada saco tratado, inmediatamente después de ser abierto, evitando interferencias externas. El sensor electroquímico específico para fosfina permitió registrar las concentraciones en partes por millón (ppm) presentes en el espacio, las cuales reflejan la difusión efectiva del gas en el interior del saco.

Análisis de Mortalidad

Para cuantificar la mortalidad de los adultos de *Sitophilus zeamais* al finalizar las pruebas se dejaron durante 24 horas a temperatura ambiente, pasado este tiempo, se empleó un procedimiento estandarizado basado en estimulación mecánica. Cada insecto fue colocado individualmente en una placa Petri y estimulado suavemente con un pincel de punta fina durante un período de dos minutos. Aquellos individuos que no presentaron ningún tipo de movimiento tras la estimulación fueron clasificados como muertos. Este método permite diferenciar entre insectos realmente muertos y

aquellos que podrían estar paralizados temporalmente por efecto del fumigante, evitando así sobreestimar la mortalidad. Esta técnica ha sido validada por (Greco et al., 2024).

Porcentaje de Daño por Insecto

Se tomaron 250 g de semillas del maíz provenientes de la muestra homogenizada de 1 kg (1000g). Se pasaron por tamices # 12 (12/64”), # 17 (17/64) para eliminar impurezas y separar los tamaños de las semillas, esto con el propósito de poder analizar por grupos más pequeños y eliminar las impurezas. Se observaron con una lupa de laboratorio, para determinar agujeros u otro indicador de daño por insectos. Para diferenciar los daños causados antes y durante el almacenamiento, se realizó una comparación simple entre el daño presente en los granos. Al principio, se registraron los daños visibles en los granos de maíz antes de ser almacenados. Después del almacenamiento, se verificó si los daños se habían propagado o incrementado en los granos, lo que indica que el daño se había propagado durante el almacenamiento. Se pesaron los granos dañados para calcular el porcentaje con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de daño} = \frac{\text{daño en gramos}}{250 \text{ gramos}} \times 100 \quad [1]$$

Germinación

Se contabilizaron 100 semillas mediante un contador de semillas. Estas se colocaron en bandejas de germinación a las cuales previamente se les añadió una pulgada de arena tamizada. Se colocaron las 100 semillas, luego se añadieron a las bandejas otra pulgada de arena y se humedeció para posteriormente ser llevadas a la cámara de germinación por siete días. Al finalizar se contabilizaron las que habían germinado, las que tuvieron un crecimiento anormal o las semillas muertas. Cada unidad del ensayo fue identificada con código de muestra, fecha de siembra, fecha de análisis y nombre del estudiante.

Resultados y Discusión

Germinación del Maíz

El Cuadro 2 muestra los resultados de germinación normal, los cuales, mostraron porcentajes altos en todos los tratamientos antes y después de la fumigación, sin registrarse diferencias significativas ($P \geq 0.1$). Esto indica que la aplicación de fosforo de aluminio no afectó la viabilidad de la semilla, un estudio realizado por Krzyzanowski et al., 2019 también afirma que el fosforo de aluminio no afecto la germinación. Kandil et al. (2022) evaluaron el efecto de la fumigación con fosfina en semillas de trigo y concluyeron que incluso con dosis elevadas, la germinación no se vio comprometida, lo cual respalda que la fosfina, aplicada bajo condiciones controladas, no afecta negativamente el porcentaje de germinación de la semilla.

En cuanto a la germinación anormal, únicamente en el tratamiento 2 (TSL con fumigante) se detectó una diferencia significativa ($P \leq 0.1$) entre el antes $5.33 \pm 2.50\%$ y el después $3.00 \pm 1.10\%$, donde el valor fue menor después de la fumigación. Este resultado coincide con lo reportado por Abdul Hamid et al., 2023, quienes observaron que el porcentaje de plántulas anormales disminuyó conforme aumentaba la dosis de fosfina aplicada en granos de trigo, lo que respalda el efecto positivo del fumigante sobre la reducción de anomalías en la germinación. Chadda (2016) indica que la fosfina no afecta la germinación cuando se aplica bajo condiciones controladas, aunque advierten que exposiciones prolongadas o mal selladas pueden generar daños fisiológicos en la semilla.

Respecto al porcentaje de semillas muertas, los valores fueron bajos en todos los tratamientos antes y después de la fumigación, sin diferencias significativas ($P \geq 0.1$). El rango observado fue de 0.83% a 4.00%, lo cual indica que, bajo las condiciones del ensayo, ni la fumigación ni el tipo de almacenamiento comprometieron la viabilidad letal del grano. En estudios similares se reportaron tasas de germinación entre el 90% y 100% en semillas almacenadas en condiciones controladas, lo que sugiere que hasta un 10% de semillas podrían permanecer sin germinar sin implicar baja calidad del lote (Milivojević et al., 2021).

Cuadro 2

Evaluación del efecto de tres tratamientos de fumigación en la germinación de maíz (Zea mays) tuxpeño comparando antes y después de la aplicación del fumigante.

Tratamiento	Resultado	Media antes \pm DE (%)	Media después \pm DE (%)
1	Normales	94.67 \pm 1.63	95.17 \pm 3.19
	Anormales	4.00 \pm 2.28	2.67 \pm 1.63
	Muertas	1.33 \pm 1.21	2.17 \pm 2.14
2	Normales	93.83 \pm 2.04	95.83 \pm 3.19
	Anormales	5.33 \pm 2.50 ^a	3.00 \pm 1.10 ^b
	Muertas	0.83 \pm 0.98	1.17 \pm 1.60
3	Normales	94.67 \pm 1.63	95.17 \pm 3.19
	Anormales	3.17 \pm 2.48	2.67 \pm 1.63
	Muertas	4.00 \pm 4.00	2.67 \pm 1.63

Nota. a y b: letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre el antes y después en el tratamiento ($P \leq 0.1$); DE: desviación estándar; Tratamientos: 1 Plástico de polietileno con fumigante, 2 TSL con fumigante y 3 TSL sin fumigante. Criterios de plántulas normales y anormales según ISTA (2024), International Rules for Seed Testing.

Mortalidad

El Cuadro 3 muestra los resultados obtenidos en este estudio, los cuales, mostraron que todos los tratamientos aplicados presentaron una mortalidad del 100% de *Sitophilus zeamais*, sin diferencias significativas entre ellos ($P \geq 0.1$). Esto sugiere que tanto la fumigación con fosforo de aluminio como el uso de la tecnología de almacenamiento hermético fueron igualmente efectivos en el control de la plaga. La fosfina actúa inhibiendo la respiración celular de los insectos, lo que les provoca la muerte por asfixia, como ha sido documentado en estudios previos (Beyuo et al., 2024).

Además, el uso de tecnologías herméticas como el *GrainPro TranSafeliner™* (TSL), que crea un ambiente de bajo oxígeno y alta concentración de dióxido de carbono, también ha mostrado ser eficaz en la eliminación de plagas almacenadas, induciendo su muerte por asfixia o desecación (Mutambuki y Likhayo, 2021).

Aunque los tres tratamientos demostraron eficacia en el control de la plaga, es importante destacar que la resistencia a la fosfina es un fenómeno creciente en varias partes del mundo, lo que pone en evidencia la necesidad de explorar alternativas más sostenibles (Sau y Gawdiya, 2022). Debido a esto, los resultados obtenidos en este estudio refuerzan la viabilidad del almacenamiento

hermético como una opción eficaz y ambientalmente amigable para el control de plagas, dado que no requiere el uso de fumigantes tóxicos. Como han señalado (Ngoma et al., 2024), las bolsas de almacenamiento hermético son una alternativa eficaz y libre de plaguicidas que protegen el grano almacenado contra la infestación de hongos e insectos, lo que lo vuelve un método más sostenible.

Cuadro 3

*Evaluación del efecto de tres tratamientos de fumigación en la mortalidad del gorgojo de maíz (*Sitophilus zeamais*).*

Tratamientos	Mortalidad
1	100%
2	100%
3	100%

Nota. No hubo diferencia significativa en los tratamientos ($P \geq 0.1$); Tratamientos: 1 Plástico de polietileno con fumigante, 2 TSL con fumigante y 3 TSL sin fumigante.

Fosfina en el Ambiente

El Cuadro 4 muestra los resultados de los niveles de fosfina en el ambiente que demostraron que hubo diferencias significativas ($P \leq 0.1$) entre el antes y después de la fumigación. Antes de la fumigación los niveles fosfina fueron 0.00 ± 0.00 debido a que aún no habían sido expuestos al fumigante. Después de la aplicación del fumigante si se captaron niveles de fosfina lo que nos demuestra que el fosforo de aluminio fue liberado exitosamente y que las concentraciones aumentaron como resultado de la fumigación. Medir los niveles de fosfina en el ambiente también ayuda a identificar cuando es seguro entrar al lugar de fumigación ya que según la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (2021) indica que el máximo recomendado de niveles de fosfina que se tiene que estar expuesto es de 0.30 ppm.

También es importante subrayar el impacto que la fosfina tiene en el medio ambiente ya que, en el aire, la fosfina existirá solamente como gas. La fosfina reacciona con sustancias que se encuentran comúnmente en el aire. La mitad de la fosfina en el aire se degrada en aproximadamente 1 día. En concentraciones altas, los vapores de fosfina pueden inflamarse espontáneamente en el aire, lo que puede llevar a incendios por altas temperatura (ASTDR, 2016). La exposición a fosfina puede

causar serios efectos en la salud; por lo tanto, las fumigaciones deben llevarse a cabo únicamente por personal capacitado utilizando equipo de protección personal adecuado, y los niveles de gas deben ser monitoreados continuamente durante la aplicación (Bonjour y Jones, 2024).

Cuadro 4

Evaluación total en partes por millón de niveles de fosfina en el ambiente antes y después de la aplicación del fumigante.

Repetición	Período	Media% ± DE
1	Antes	0.00±0.00 ^a
	Después	0.15±0.04 ^b
2	Antes	0.00±0.00 ^a
	Después	0.22±0.08 ^b

Nota. a y b: letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre el antes y después en el tratamiento ($P \leq 0.1$); DE: desviación estándar.

Fosfina en Sacos

El Cuadro 5 muestra que los resultados obtenidos demostraron que para el Tratamiento 1 y 2 (plástico de polietileno con fumigante y TSL con fumigante) se pudieron observar diferencias significativas ($P \leq 0.1$) entre el antes y después en los niveles de fosfina dentro del saco lo que significa que la fosfina si penetra en el saco haciendo una fumigación efectiva.

Para el Tratamiento 3 (TSL sin fumigante) no se observaron diferencias significativas ($P \geq 0.1$) entre el antes y el después debido a que en este no se utilizó fosfina, entonces los niveles se mantuvieron iguales. Esto también nos ayuda a comprobar que el TSL es completamente hermético ya que no penetra fosfina que se encontraba presente en el ambiente dentro del saco. Estudios como el de (Kumar et al., 2017) demuestran que los sistemas modernos de almacenamiento hermético utilizan materiales de ultra baja permeabilidad al oxígeno y al agua para el almacenamiento de granos. Esto evita que el oxígeno tanto otros gases puedan entrar a la atmosfera controlada.

Cuadro 5

Evaluación de niveles de fosfina en sacos de maíz (Zea mays) tuxpeño de tres tratamientos comparando antes y después de la aplicación del fumigante.

Tratamientos	Período	Media % ± DE
1	Antes	0.00 ± 0.00 ^a
	Después	0.33 ± 0.05 ^b
2	Antes	0.00 ± 0.00 ^a
	Después	0.48 ± 0.07 ^b
3	Antes	0.00 ± 0.00
	Después	0.00 ± 0.00

Nota. a y b: letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre el antes y después en el tratamiento ($P \leq 0.01$); DE: desviación estándar; Tratamientos: 1 Plástico de polietileno con fumigante, 2 TSL con fumigante y 3 TSL sin fumigante.

Daño por Insecto

El Cuadro 6 muestra que los resultados obtenidos demostraron que no hubo diferencias significativas ($P \geq 0.1$) en los niveles de daño por insecto entre el antes y después de la fumigación para todos los tratamientos. Esto sugiere que todos los tratamientos lograron eliminar o controlar de manera efectiva la plaga *Sitophilus zeamais*, lo que se alinea con un estudio previo que reporta la eficacia de la fumigación con fosfina en el control de insectos almacenados, sin un aumento adicional del daño por insectos si la fumigación se realiza adecuadamente (Ndegwa et al., 2016). Además, los resultados de este estudio refuerzan la idea de que el almacenamiento hermético, incluso sin fumigante, puede contribuir al control de la infestación al limitar la entrada de nuevos insectos, como se indica en investigaciones anteriores (Mutambuki y Likhayo, 2021).

Cuadro 6

Evaluación de daño por insecto en maíz (Zea mays) tuxpeño de tres tratamientos comparando antes y después de la aplicación del fumigante.

Tratamientos	Período	Media% ± DE
1	Antes	1.58 ± 1.07
	Después	1.67 ± 0.82
2	Antes	1.00 ± 0.32
	Después	1.17 ± 0.52
3	Antes	1.67 ± 0.75
	Después	1.58 ± 0.58

Nota. No hubo diferencia significativa entre el antes y después por tratamientos ($P \geq 0.1$); DE: desviación estándar; Tratamientos: 1 Plástico de polietileno con fumigante, 2 TSL con fumigante y 3 TSL sin fumigante.

Conclusiones

El estudio indicó que no hubo diferencias en las variables de daño por insecto y mortalidad de *Sitophilus zeamais*.

El experimento mostró que si hubo diferencias en las variables de germinación anormal en el Tratamiento 2 (TSL con fumigante), en los residuos de fosfina en saco y el ambiente.

Todos los tratamientos evaluados presentaron una eficacia del 100% en el control de *Sitophilus zeamais*.

La evaluación de la residualidad de fosfina mostró que las concentraciones del fumigante se redujeron dentro de rangos seguros.

Recomendaciones

Incorporar un extractor de aire en los sistemas de almacenamiento hermético para eliminar el oxígeno residual y lograr una atmósfera modificada más eficiente.

Realizar el experimento con mayor número de repeticiones. Para tener mayor validación de los resultados obtenidos.

Evaluar el método sin fumigante por un período más largo de tiempo para verificar su eficacia a través de varios meses de almacenamiento.

Se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar de manera más detallada los efectos de cada método de fumigación sobre la salud humana y el medio ambiente.

Referencias

- Abdul Hamid, Y., Teama, E., Said, M. y Hamada, A. (2023). Impact of Phosphine Fumigation Treatments on the Vitality of Wheat Grains at Different Storage Periods. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, 54(4), 52–62. <https://doi.org/10.21608/ajas.2023.219949.1274>
- Administración de Seguridad y Salud Ocupacional. (2021). *Fosfina*. <https://www.osha.gov/chemicaldata/667>
- ASTDR. (2016). *ToxFAQs™ – Fosfina (Phosphine)*. https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts177.html
- Beyuo, J., Sackey, L. N. A., Yeboah, C., Kayoung, P. Y. y Koudadje, D. (2024). The implications of pesticide residue in food crops on human health: A critical review. *Discover Agriculture*, 2(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00141-z>
- Bonjour, E. y Jones, C. (2024). Safety During Fumigation. En D. S. Jayas (Ed.), *Control and management of pests in stored products* (pp. 616–636). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003309888-18>
- Chadda, I. C. (2016). Fumigation with phosphine - a perspective. *Indian Journal of Entomology*, 78(special), 39. <https://doi.org/10.5958/0974-8172.2016.00023.7>
- García-Lara, S., García-Jaimes, E. y Bergvinson, D. J. (2019). Mapping of maize storage losses due to insect pests in central Mexico. *Journal of Stored Products Research*, 84, 101529. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.101529>
- Greco, M. G. C. E., Jobim, K., Pazini, J. B. y Garcia, F. R. M. (2024). Effect of inert dust on the mortality of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Brazilian Journal of Biology = Revista Brasileira De Biologia*, 84, e280817. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.280817>
- Kandil, A., Abdel-Moneam, M. y Mohamed, M. (2022). Impact of Pre-Harvesting Spraying Pesticides and Post-Harvesting with Phosphine Fumigation on Germination and Seedling Parameters of Bread Wheat. *Journal of Plant Production*, 13(1), 33–38. <https://doi.org/10.21608/jpp.2022.123386.1093>
- Krzyzanowski, F. C., Lorini, I., Henning, A. A. y França-Neto, J. d. B. (2019). Physiological and sanitary performance of soybean seeds during storage after phosphine fumigation. *Journal of Seed Science*, 41(3), 280–285. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v41n3205560>
- Kumar, S., Mohapatra, D., Kotwaliwale, N. y Singh, K. K. (2017). Vacuum Hermetic Fumigation: A review. *Journal of Stored Products Research*, 71, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2017.01.002>
- Li, Z., Chu, T., Dan, N., Yang, W. y Zhang, H. (2023). Research on a random sampling method for bulk grain based on the M-Unet and SGBM algorithms. *Journal of Stored Products Research*, 104, 102200. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102200>
- MacRobert, J., Setimela, P., Gethi, J. y Worku Regasa, M. (2015). *Manual de producción de semilla de maíz híbrido*. <https://repository.cimmyt.org/server/api/core/bitstreams/daa39cb9-1de5-4061-b4c2-72f07d9f4920/content>
- Mendoza, J. R., Sabillón, L., Howard, R., Espinal, R., Leslie, J., Harvey, J. y Bianchini, A. (2024). Assessment of handling practices for maize by farmers and marketers in food-insecure regions of Western Honduras. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101140. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101140>
- Milivojević, M., Srdić, J., Filipović, M., Petrović, T., Branković-Radojčić, D., Marković, K. y Boćanski, J. (2021). Application of standard germination and vigour tests for seed quality assessment of

- maize inbred lines. *Selekcija I Semearstvo*, 27(2), 35–45. <https://doi.org/10.5937/SelSem2102035M>
- Mutambuki, K. y Likhayo, P. (2021). Efficacy of different hermetic bag storage technologies against insect pests and aflatoxin incidence in stored maize grain. *Bulletin of Entomological Research*, 111(4), 499–510. <https://doi.org/10.1017/S0007485321000213>
- Navarro, I. (2018). *Propuesta de metodo de descontaminacion de envases que contuvieron plaguicidas a base de fosfuros metálicos para ser integrado a un programa de manejo* [Tesis]. Universidad de Chile, Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/159594/Propuesta-de-metodo-de-descontaminacion-de-envases-que-contuvieron-plaguicidas.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Ndegwa, M. K., Groote, H. de, Gitonga, Z. M. y Bruce, A. Y. (2016). Effectiveness and economics of hermetic bags for maize storage: Results of a randomized controlled trial in Kenya. *Crop Protection*, 90, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.08.007>
- Ngoma, T. N., Monjerezi, M., Leslie, J. F., Mvumi, B. M., Harvey, J. J. y Matumba, L. (2024). Comparative utility of hermetic and conventional grain storage bags for smallholder farmers: A meta-analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(2), 561–571. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12934>
- Odjo, S., Burgueño, J., Rivers, A. y Verhulst, N. (2020). Hermetic storage technologies reduce maize pest damage in smallholder farming systems in Mexico. *Journal of Stored Products Research*, 88, 101664. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101664>
- Rivas, R. D. (2021). El maíz, fuente de cultura mesoamericana. *Revista De Museología "Kóot"*, 44–53. <https://doi.org/10.5377/koot.v0i11.10737>
- Rodríguez, A., Beato, M., Usseglio, V. L., Camina, J., Zygadlo, J. A., Dambolena, J. S. y Zunino, M. P. (2022). Phenolic compounds as controllers of *Sitophilus zeamais*: A look at the structure-activity relationship. *Journal of Stored Products Research*, 99, 102038. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.102038>
- Sau, A. y Gawdiya, S. (2022). Phosphine Fumigation Resistance and its Management in Stored Grain Insect Pests. https://www.researchgate.net/publication/376032732_Phosphine_Fumigation_Resistance_and_its_Management_in_Stored_Grain_Insect_Pests
- Teixeira, F. F. y Guimarães, C. T. (2021). Maize Genetic Resources and Pre-Breeding. En M. T. Azhar y S. H. Wani (Eds.), *Wild germplasm for genetic improvement in crop plants* (pp. 81–99). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822137-2.00005-9>

Anexos

Anexo A

Ficha técnica del fumigante utilizado



DETIA DEGESCH GMBH-Alemania
Ficha Técnica – Comprimidos sólidos

Vigente desde: Octubre 2008	Ficha Técnica DETIA GAS EX -T 57 GE	Reemplaza a:
Tipo:	Insecticida, Acaricida	PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS: -Estado físico: Sólido -Apariencia: Polvo verde grisáceo -Olor: característico a ajo. -Densidad relativa: 0,79 g/cm3 -Solubilidad en agua: Hidroliza generando fosfuro de hidrogeno -Corrosividad: No Corrosivo. El fosfuro de hidrogeno (fosfina) resultando de la hidrólisis presenta propiedades corrosivas.
Ingrediente activo:	Fosfuro de aluminio (AIP)	
Grupo Químico:	Fosfuro metálico	
Concentración:	57% p/p	
Formulación:	Tabletas solidas de 3 g. Tabletas solidas de 0,6 g.	
Modo de acción:	Inhalación	
Fabricante/Formulador:	Degesch GMBH, Alemania	
Toxicidad	"Extremadamente Peligroso"	
Antídoto:	No se conoce, tratamiento sintomático	
N° Registro MAG:	# 1886 - Detia Gas EX –T 57 GE	
Principales Características:	<ul style="list-style-type: none"> - Generador de fosfuro de hidrógeno (fosfina). - Tóxico para los seres humanos y toda clase de animales. - Eficaz para el control de toda clase de insectos presentes en los productos almacenados. - Controla diferentes estados de crecimiento de los insectos, huevos, larvas, ninfas y pupas. - No deja residuos nocivos ni olor extraño en las mercaderías tratadas. - No altera el sabor ni la calidad de los productos tratados. - No afecta el poder germinativo de las semillas. - No produce reacciones químicas con las mercaderías tratadas. - Reacciona con algunos metales como el cobre, oro y la plata 	
Recomendaciones de uso:	<ul style="list-style-type: none"> - Para el control de las plagas en los granos almacenados, algodón; arroz; frijol; maíz; tabaco; especias; productos alimenticios; harinas; piensos; pastas; frutas deshidratadas; pieles; granos de café y cacao. - Sólo personas adultas debidamente instruidas en su manejo y familiarizadas con las medidas de precaución pueden utilizar el producto. - Debe ser utilizado sólo para la finalidad mencionada en la etiqueta. - Para la manipulación del producto, al interior y exterior de un recinto, se debe usar máscara de rostro completo con filtro especial para fosfina. - No fumigar jamás edificios habitados, ni locales colindantes con viviendas. - Dejar carteles de advertencia en el lugar de la fumigación, indicando la fecha de inicio y término de la fumigación. - No permitir ingreso de personas a los recintos mientras no se haya cumplido el tiempo de ventilación. 	
Envases:	Vaso de aluminio 1 Kg.- Tabletas de 3 g. Vaso de aluminio 1 Kg. –Tabletas (pellets) 0,6 g.	

DOSIS Y APLICACIONES RECOMENDADAS

Mercadería o lugar	Dosis Tabletas 3g	Dosis Tabletas 0.6g	Tiempo de Exposición (días)**	Modo de Aplicación
Productos a granel en bodega o silo	3 a 5 /m ³	15 a 25 /m ³	Mínimo 3 días	Aplicar por medio de sondas o al llenar el silo incorporar las tabletas. Cubrir con lona hermética al gas.
Estibas de grano ensacado, estibas de mercadería envasada en bodegas o bajo lona impermeable al gas	2 a 5 / m ³	10 a 25 / m ³	3 a 5 días	Colocar las tabletas separadas, en cartones o bandejas, debajo o alrededor de las estibas. Dejar un espacio amplio entre la lona y las tabletas para facilitar la generación de gas. Hermetice bien la lona
Tabaco en fardos, cajas o barriles	0.5 a 1/m ³	2.5 a 5 /m ³	4 a 8 días	Colocar las tabletas separadas, en cartones o bandejas, debajo o alrededor de las estibas. Dejar un espacio amplio entre la lona y las tabletas para facilitar la generación de gas. Hermetice bien la lona
Locales vacíos	1 a 2/m ³	5 a 10/m ³	2 a 4 días	Para la fumigación de locales, fabricas, bodegas y molinos. Hermetizar bien el local, colocar las tabletas en cartones o bandejas sobre el piso.
Semillas ensacadas, estibas en bodegas, o bajo plástico impermeable	1 a 2/m ³	5 a 10/m ³	Mínimo 3 días	Colocar las tabletas separadas, en cartones o bandejas, debajo o alrededor de las estibas. Dejar un espacio amplio entre la lona y las tabletas para facilitar la generación de gas. Hermetice bien la lona

** El tiempo de exposición se refiere a el tiempo una vez que los comprimidos han gasificado completamente

**Ácaros: Aumentar dosis un 50% y tiempo de exposición 5 días

VENTILACION DE LOS SITIOS Y PRODUCTOS TRATADOS

Una vez que finaliza el tiempo de exposición, los locales y las mercancías tratadas deben ser ventiladas para garantizar la seguridad de las personas. Para realizar el proceso de ventilación se requiere el uso de equipo de protección respiratoria. El tiempo de ventilación dependerá del volumen y movimiento de la masa de aire circulante en el sitio fumigado. La concentración de fosfina debe ser menor a 0,1 ppm (norma Europea) o menor a 0.3 ppm (norma USA).

DESACTIVACION DE RESIDUOS

Los polvos residuales deben recogerse en un recipiente abierto, nunca deben taparse, ni siquiera temporalmente. Antes de ser desechados deben ser desactivados.

La desactivación puede realizarse por el método húmedo o método seco.

Consulte a su representante local para más información.



Anexo B
Costos fijos

Materiales	Costos
TSL	200\$-245\$
Plástico de polietileno	166\$
Bote de fosforo de aluminio	188\$