



## CALIDAD DE SEMILLA DE MAÍZ TRATADA CON DOSIS MUY ALTAS DE FOSFURO DE ALUMINIO

## QUALITY OF MAIZE SEED TREATED WITH VERY HIGH DOSES OF ALUMINUM PHOSPHIDE

Abraham Coutiño-Magdaleno<sup>1</sup>, Oscar J. Ayala-Garay<sup>1\*</sup>, Israel Castillo-Juárez<sup>2</sup>, Manuel Livera-Muñoz<sup>1</sup>, Gabino García-de los Santos<sup>3</sup>, J. Jesús Magdaleno-Villar<sup>4</sup>, María del Rosario Martínez-Sánchez<sup>5</sup> y Claudio Chavarín-Palacio<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo (CP-CM). Programa de Recursos Genéticos y Productividad-Fisiología Vegetal, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. <sup>2</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Facultad de Química, Pachuca, Hidalgo, México. <sup>3</sup>CP-CM, Programa de Recursos Genéticos y Productividad-Producción de Semillas, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. <sup>4</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. <sup>5</sup>Bio King Labs, Departamento de Investigación Química, Texcoco, Estado de México, México. <sup>6</sup>Comité Estatal del Sanidad Vegetal de Nayarit, Departamento de Gerencia Técnica, Tepic, Nayarit, México.

\*Autor de correspondencia (oayala@colpos.mx)

### RESUMEN

El gas fosfina generado a partir de fosforo de aluminio (AIP) es usado ampliamente en México y gran parte del mundo para el control de insectos plaga en granos y semillas almacenadas de maíz, así como de una gran cantidad de otras especies vegetales. Para el caso del maíz, y debido a la presencia de cepas de insectos resistentes a dosis convencionales de fosfina, surge la necesidad de incrementar las dosis para lograr el control esperado, aun sin saber si existe daño a la calidad fisiológica por motivo del aumento en la dosificación de AIP. Por ello, en el presente estudio se realizaron ensayos donde se trataron semillas de maíz con diferentes dosis de fosforo de aluminio, desde 0 hasta por encima de los 3000 g t<sup>-1</sup>. Se midió la calidad fisiológica de las semillas mediante porcentaje de germinación, envejecimiento acelerado, conductividad eléctrica y contenido de humedad. Ninguna de las concentraciones utilizadas provocó daño fisiológico en cuanto a las variables medidas, por lo cual, y en caso de ser necesario en tratamientos comerciales de maíz para el control de plagas, se tendría un intervalo de incremento de dosis de fosforo de aluminio muy amplio, sin correr riesgo de daño o demérito de la calidad fisiológica de la semilla de maíz.

**Palabras clave:** Calidad fisiológica, dosis, fosfina, fosforo, maíz.

### SUMMARY

Phosphine gas generated from aluminum phosphide (AIP) is widely used in Mexico and around the world for pest insect control on grains and stored maize seeds, as well as a wide range of other crops. In the case of maize, due to the presence of insect strains resistant to conventional doses of phosphine, there is a need to increase doses to achieve the expected control even without knowing if there is damage to the physiological quality due to the increased dose of AIP. Therefore, in this study, trials were carried out in which maize seeds were treated with different doses of aluminum phosphide ranging from 0 to over 3000 g t<sup>-1</sup>. Physiological seed quality was assessed by germination percentage, accelerated aging, electrical conductivity and moisture content. None of concentrations used caused physiological damage in terms of measured variables. Therefore, when required for pest control, higher doses can be applied without compromising the physiological quality of maize seeds.

**Index words:** Dose, maize, phosphide, phosphine, physiological quality.

### INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cereales de mayor importancia en términos de alimentación humana y animal a nivel mundial (Ramos, 2013); para el caso de México, es el cereal de mayor importancia, con una superficie sembrada de 7.5 millones de hectáreas, y un valor de la producción de 186,246 millones de pesos mexicanos, para el año 2023 (SIAP, 2024). Por otra parte, la semilla de maíz representa a nivel nacional una demanda estimada en un mínimo de 180,000 toneladas al año (García y Ramírez, 2013).

El gas fosfina (PH<sub>3</sub>), generado a partir de fosforo de aluminio (AIP), es usado de manera amplia en México y en la gran mayoría de países para el control de insectos plaga en granos y semillas de maíz, trigo, sorgo, frijol, entre otros (Krzyzanowski *et al.*, 2013). De acuerdo con Fluck (1972) y FAX México (2024), al hacer reaccionar formulaciones comerciales de fosforo de aluminio (AIP) con agua (H<sub>2</sub>O), se produce una reacción exotérmica, cuyos productos son hidróxido de aluminio [Al(OH)<sub>3</sub>] y fosfina (PH<sub>3</sub>), siendo este último un gas utilizado como fumigante. Por cada 3 g de formulado comercial de AIP se libera la cantidad de 1 g de PH<sub>3</sub>, equivalente a 718.3 ppm (FAX México, 2024). SENASICA (2016) señaló que en ambientes herméticos con bajo contenido de humedad, como es el caso de granos y semillas almacenadas, la máxima liberación de PH<sub>3</sub> a partir de AIP se alcanza entre 30 y 60 h; además, de acuerdo con Gorbachuk *et al.* (2016), la molécula de fosfina se descompone, en presencia de humedad, principalmente en derivados químicos de naturaleza ácida, y la velocidad de dicho proceso se ve incrementada directamente por el aumento de la temperatura.

La fosfina es altamente tóxica para los organismos que

respiran aeróbicamente, pero no para los organismos anaeróbicos o en latencia metabólica, es por ello que el uso de este gas como tratamiento químico en infraestructuras herméticas es eficaz para eliminar plagas de insectos y roedores, permitiendo a las semillas mantenerse viables por el hecho de encontrarse en estado de latencia (Nath *et al.*, 2011). El  $\text{PH}_3$  actúa inhibiendo la fosforilación oxidativa en las mitocondrias por inhibición del citocromo C oxidasa, mediante la generación de especies reactivas de oxígeno, formando fosfinas oxidadas, entre otros compuestos (Monsalve-Salamanca *et al.*, 2015), lo que resulta en un decremento irreversible en la producción de ATP, hipoxia y muerte celular (Singh *et al.*, 2006).

Entre los métodos más utilizados para la medición de concentraciones de fosfina se encuentran, de mayor a menor precisión, la cromatografía de gases (Monsalve-Salamanca *et al.*, 2015), los detectores electroquímicos y los tubos colorimétricos (FAX México, 2024; SENASICA, 2016), siendo estos últimos, y debido a sus amplios sesgos de precisión, mecanismo de ejecución, naturaleza de detección mediante reacciones químicas y volumen requerido para las mediciones, métodos poco viables en experimentos cuya unidad experimental sea menor de  $1 \text{ m}^3$ , y cuya presión interna sea superior a 1 atmósfera.

A pesar de que la aplicación de dosis comerciales de  $6 \text{ g AIP t}^{-1}$  de maíz, para el control de insectos plaga, no representa ningún riesgo potencial sobre la calidad de la semilla (Mendoza, 2012; Com. Pers.)<sup>1</sup>, existe evidencia del desarrollo de resistencia a dosis convencionales de AIP ( $6\text{-}9 \text{ g t}^{-1}$ ) por parte de algunas cepas de especies de insectos plaga presentes en semillas de maíz almacenadas, como son *Rhyzopertha dominica*, *Tribolium castaneum*, *Sitophilus oryzae*, *Trogoderma granarium* (Ahmad *et al.*, 2013) y *Sitophilus zeamais* (Pimentel *et al.*, 2009); además, existe un riesgo latente de ingreso, salida y dispersión de una amplia variedad de plagas cuarentenadas y no cuarentenadas, tanto presentes en México, como no presentes, y que se encuentran actualmente normadas por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA, 2024) y organismos internacionales (FAO, 2024), y que por ley, deben contemplarse al realizar un tratamiento fitosanitario (CIPF, 2020; SAGARPA, 2018). Por lo anterior, para garantizar un control fitosanitario eficaz ante plagas resistentes y cumplir con las normativas vigentes, se plantea la necesidad de incrementar las dosis de aplicación de AIP; sin embargo, esta estrategia se ve limitada por la ausencia de información científica que defina la dosis máxima tolerable sin afectar la calidad fisiológica de la semilla;

<sup>1</sup>Mendoza G. G. A. (2012) Efecto de frecuencia de aplicación y tiempo de exposición al fosforo de aluminio (AIP) en la calidad de semilla de maíz en Zamorano. Tesis Profesional. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. Zamorano, Honduras. 20 p.

por tanto, resulta fundamental generar datos precisos sobre estas dosificaciones máximas permisibles, no solo para posibilitar un uso equilibrado y seguro del fumigante, sino también para sentar las bases de futuros modelos y metodologías de tratamiento (NAPPO, 2009; SENASICA, 2024). Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue analizar la respuesta fisiológica de la semilla de maíz a un intervalo extendido de dosis de fosforo de aluminio para establecer un nuevo umbral de seguridad en tratamientos fitosanitarios.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Condiciones experimentales

La fase experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Análisis de Semillas y en parcelas experimentales del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, ubicado a 2257 msnm, en las coordenadas 19.462873 LN y -98.904903 LW.

### Tratamientos y diseño experimental

#### Experimento 1

En semilla de maíz híbrido blanco P4028 (Pioneer®), con densidades aparente de  $0.854 \text{ kg L}^{-1}$  y absoluta de  $1.33 \text{ kg L}^{-1}$ , se aplicaron tratamientos con gas  $\text{PH}_3$  generado a partir de AIP (formulación comercial 56.7 %), en contenedores herméticos de 50 L de polietileno de alta densidad (Plastienvases®, Standard Deckel, Bavaria, Alemania). Los tratamientos fueron T1: 0 g, T2: 75 g y T3: 750 g de AIP  $\text{t}^{-1}$  de semilla durante un periodo de 76 h. Las condiciones internas y externas de temperatura y humedad relativa se monitorearon con un termohigrómetro digital (Her-428, Steren®, San Diego, California, EUA) y una bomba neumática (Modelo 801, Elite®, Boise, Idaho, EUA), de flujo de  $5 \text{ L min}^{-1}$ , ambos modificados y acoplados a un circuito de flujo cerrado mediante tubos y conexiones neumáticas de 8 mm.

#### Experimento 2

En un segundo experimento se evaluaron tratamientos en semilla de maíz híbrido blanco P4028 con gas fosfina generado a partir de AIP en contenedores herméticos de polietileno de alta densidad (PEAD) de 1 L marca Plastienvases®. Se estableció un experimento con diseño completamente al azar con cinco repeticiones, cuyos tratamientos fueron T1: 0, T2: 150, T3: 500, T4: 1,137.5 y T5: 3,417.77 g de AIP  $\text{t}^{-1}$  durante 72 h. Las condiciones internas y externas de temperatura y HR se monitorearon mediante termohigrómetros (RC-51H, Elitech Technology, San Jose, California, EUA, y MX2202, HOB0 Onset Computer

Co., Bourne, Massachusetts, EUA). De esta misma forma, también se evaluaron tratamientos en semilla de maíz del híbrido amarillo P4039 (Pioneer®) con tratamientos de T1: 0, T2: 142.5, T3: 518.75, T4: 921.25 y T5: 3211.11 g de ALP t<sup>-1</sup>.

Adicionalmente, se realizó una prueba de envejecimiento acelerado sobre semillas de los híbridos P4028 y P4039 del segundo experimento bajo un diseño completamente al azar con cinco repeticiones ( $\geq 80$  unidades por cada repetición), las cuales se sometieron a condiciones de 45 °C y 100 % HR durante un periodo de 24 h;

### Variables respuesta

#### Experimento 1

Una vez transcurridas 76 h de la aplicación del tratamiento, se tomaron 100 semillas de cada repetición de cada tratamiento, las cuales se colocaron en vasos de precipitados de 250 mL de capacidad y se adicionaron 100 mL de agua destilada desionizada (dd). Cada vaso de precipitados se cubrió con papel aluminio y se dejó reposar durante 24 h; transcurrido ese tiempo, se procedió a determinar el pH y la conductividad eléctrica (CE,  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$  de semilla) de la solución de imbibición de cada muestra mediante un equipo de medición (Gro line HI9814, Hanna Instruments, Woonsocket, Rhode Island, EUA).

#### Experimento 2

Concluido el periodo de aplicación del fosforo de aluminio, con la semilla tratada de los híbridos P4028 y P4039 se hizo una prueba de germinación, mediante su siembra por el método entre papel, el cual consistió en colocar toallas de papel "sanitas" calidad de laboratorio (Merck®) de 25 cm de ancho  $\times$  30 cm de largo, previamente humedecidas con agua destilada-desionizada (dd), y sobre éste se colocaron 40 semillas equidistantes una de otra, para posteriormente colocar otro pliego de papel encima de ellas; luego, se enrolló y se colocó de forma vertical en un recipiente limpio; el proceso se realizó dos veces por repetición de cada tratamiento. Los rollos de sanitas conteniendo las semillas se colocaron en una cámara de incubación (IL-21A, Jeio Tech Co., Columbia, Maryland, EUA) durante un periodo de 7 d, a 25 °C y 86 % HR, realizando los conteos de plantas germinadas a los 4 y 7 d posteriores a la siembra.

A las semillas provenientes de la prueba de envejecimiento acelerado también se les realizó una prueba de germinación, mediante su siembra por el método descrito, utilizando 80 semillas por repetición, para completar un total de 400 semillas evaluadas por tratamiento. Los conteos de las semillas germinadas a los

4 y 7 d posteriores a la siembra.

Adicionalmente, del segundo experimento se tomaron 100 g de semillas de los híbridos P4028 y P4039 del segundo experimento, las cuales se colocaron en cajas Petri de borosilicato y se ingresaron en un horno con corriente de aire forzado (Modelo 31480, Thelco, Englewood, Colorado, EUA) previamente estabilizado a una temperatura de 130 °C. Transcurrido un periodo de 4 h, se cubrió cada recipiente con su tapa y se colocaron dentro de un desecador para enfriar a temperatura ambiente. Después de enfriarse las muestras, se pesaron el recipiente con su tapa y el contenido; posteriormente, se pesó solo el recipiente sin contenido, y se estimó la humedad en base húmeda.

#### Análisis estadístico

Los datos obtenidos de la prueba de conductividad eléctrica, prueba de germinación, prueba de germinación en semillas sometidas a envejecimiento acelerado y el contenido de humedad en la semilla se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) empleando el paquete estadístico SAS 9.0 y SAS® OnDemand for Academics 2024). Previo al análisis de varianza, los datos de las variables obtenidas en porcentaje se transformaron mediante la función arco seno  $\sqrt{x/100}$ .

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los datos obtenidos y analizados de la medición de conductividad eléctrica de la solución de imbibición de semillas de las diferentes muestras del experimento 1, se encontró que no existe una variación significativa de la permeabilidad de membrana en las semillas de maíz no tratadas, con respecto a las tratadas con bajas y altas dosis de fosfina. Los valores de esta variable variaron entre 4.8781 y 5.5983  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$  de semilla con un promedio de 5.2120  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$  de semilla. Estos valores son similares a los medidos en semillas del híbrido de maíz HS2 y una variedad nativa de tipo Cacahuacintle por Mancera-Rico *et al.* (2019).

Así mismo, en los resultados obtenidos en las pruebas de germinación realizadas en semillas de P4028 y P4039 tratadas con diferentes dosis de  $\text{PH}_3$  en el segundo experimento, se encontró que no hay una variación significativa en cuanto al porcentaje de germinación, a los 4 y 7 d, en semillas de maíz no tratadas, con respecto a las tratadas con bajas y altas dosis. Los valores de germinación variaron entre 97.3 y 98.3 % con un promedio de 98.0 % para el conteo de los 4 d y 97.5 y 99 %, con un promedio de 98.5 % para el conteo de los 7 d en el híbrido P4028. Para el híbrido P4039 la germinación varió entre

96.5 y 98.8 %, con un promedio de 97.4 % para el conteo de los 4 d, y de 96.8 a 98.8 % con un promedio de 98 % para el conteo de los 7 d.

Tradicionalmente, la prueba de envejecimiento acelerado de semillas es realizada para evaluar el vigor de las mismas, que de acuerdo con la ISTA (2021), este parámetro se define como la suma de las propiedades que determinan el nivel de actividad y eficiencia de un lote de semillas durante la germinación y emergencia de plántulas en una amplia gama de condiciones ambientales. En este estudio, los resultados obtenidos de las pruebas de germinación de semillas de maíz P4028 (Figura 1) y P4039 (Figura 2), del segundo experimento, y sometidas a un tratamiento de envejecimiento acelerado, se puede apreciar que, aunque existieron diferencias significativas, no existe una tendencia relacionada con las aplicaciones de fosfina. Las diferencias podrían ser debidas a la respuesta individual de cada híbrido al proceso de envejecimiento acelerado, tal como lo indicaron Salazar *et al.* (2006).

Los resultados de las pruebas de humedad para los híbridos P4028 y P4039 mostraron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados en el segundo experimento (Figura 3). Se aprecia que el porcentaje de humedad de las semillas de cada tratamiento es inversamente proporcional a la dosis de AIP  $t^{-1}$  de semilla. Lo anterior pudo deberse a que la reacción de transformación de AIP a  $PH_3$  es dependiente de la cantidad de humedad presente en el medio, en los envases la humedad relativa disminuyó de  $67 \pm 0.5$  a  $64 \pm 2$  %. Entre más cantidad de AIP  $t^{-1}$  el medio absorbería

más humedad de la semilla poniéndose en equilibrio con el ambiente (Taylor, 2020); sin embargo, de acuerdo con las mediciones de humedad realizadas dentro de los contenedores con semillas de maíz, la disminución del contenido de humedad en las misma, en promedio 2 %, no se consideró un valor tan importante como para provocar una desecación de la simiente o considerarse como señal de falta de humedad dentro de los espacios herméticos del envase que pudiese limitar la reacción del AIP en su totalidad, así como la liberación de gas fosfina.

Ninguna de las dosis de AIP evaluadas afectó significativamente la calidad fisiológica de la semilla, medida mediante la conductividad eléctrica y la germinación con y sin envejecimiento acelerado. Esta ausencia de un efecto fitotóxico coincide con lo observado por Mendoza (2012), quien probó una dosis máxima de 6 g AIP  $t^{-1}$  de semilla de maíz, mientras que en el presente estudio se utilizaron dosis superiores a los 3000 g AIP  $t^{-1}$ . En cumplimiento del objetivo de este estudio, los resultados establecen un nuevo umbral de seguridad para el tratamiento de semillas de maíz con fosfuro de aluminio, demostrando que dosis de hasta 3211 g  $t^{-1}$  no causan daño fisiológico. Este hallazgo es crucial, ya que proporciona un amplio margen de maniobra para diseñar tratamientos cuarentenarios o para el control de plagas resistentes sin comprometer la viabilidad de la semilla. Adicionalmente, se observó que dosis más altas de AIP reducen el contenido de humedad de la semilla, un efecto secundario que resulta beneficioso para su preservación a largo plazo.

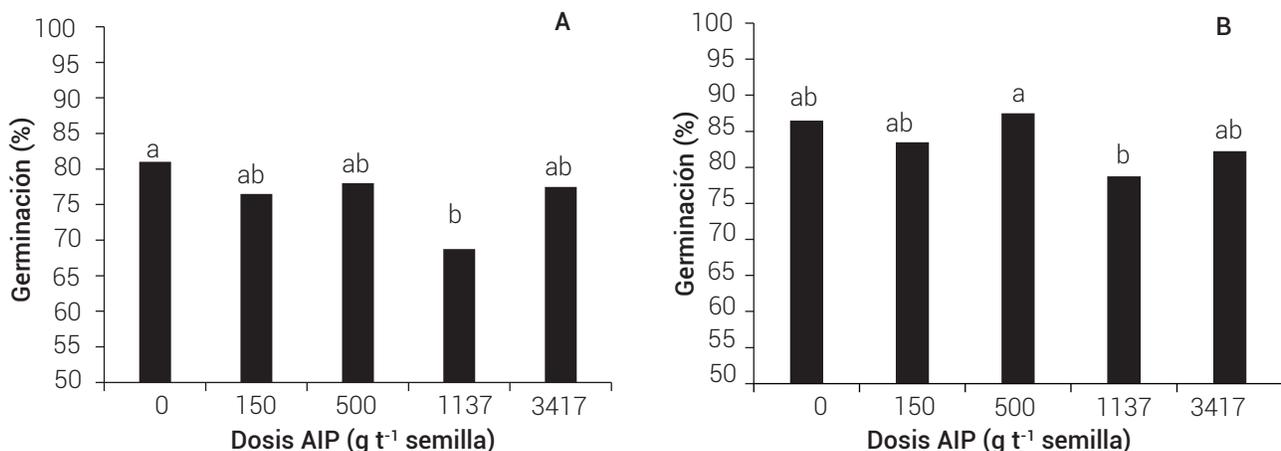


Figura 1. Comparación de medias de los porcentajes de germinación promedio (A: 4 días postsiembra, B: 7 días postsiembra), obtenidos en cada uno de los tratamientos de semillas de maíz P4028 con diferentes dosis de AIP, sometidas a un tratamiento de envejecimiento acelerado. ANOVA (A:  $F = 2.98$ ,  $R^2 = 0.37$  y B:  $F = 3.18$ ,  $R^2 = 0.38$ ). Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

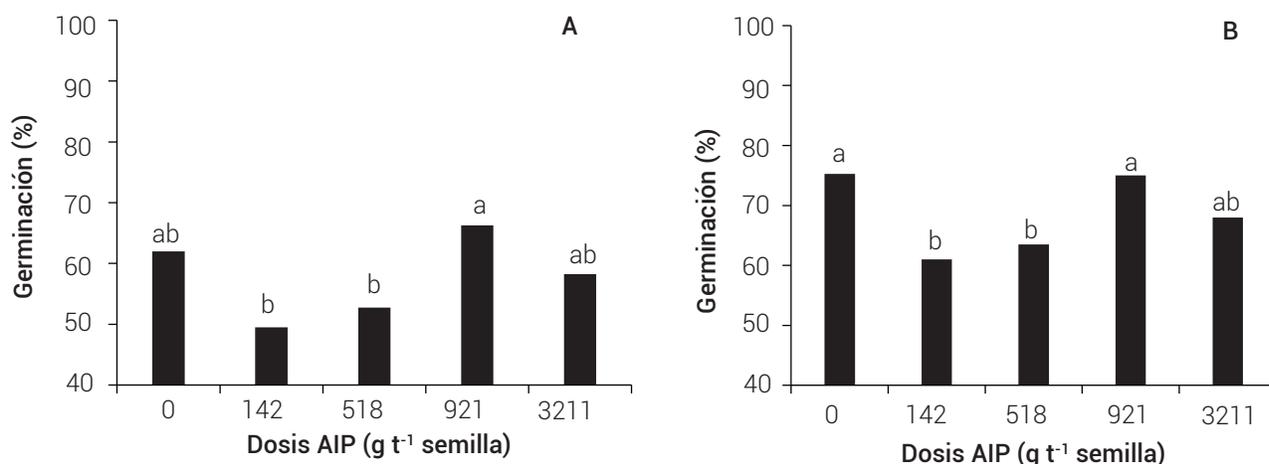


Figura 2. Comparación de medias de los porcentajes de germinación promedio (A: 4 días postsiembra, B: 7 días postsiembra), obtenidos en cada uno de los tratamientos de semillas de maíz P4039 con diferentes dosis de AIP, sometidas a un tratamiento de envejecimiento acelerado. ANOVA (A:  $F = 5.76$ ,  $R^2 = 0.53$  y B:  $F = 10.2$ ,  $R^2 = 0.67$ ). Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

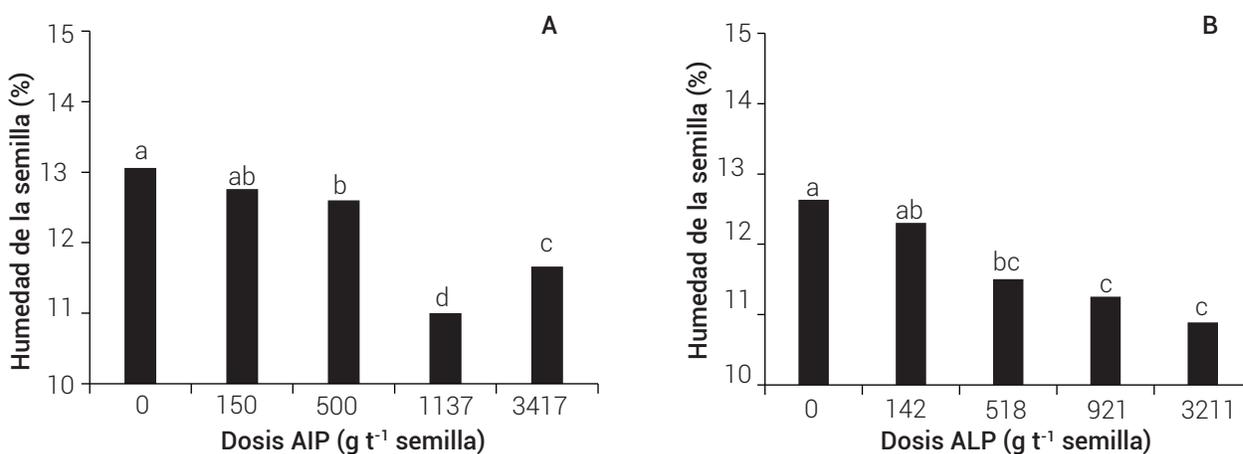


Figura 3. Comparación del contenido de humedad en semillas del híbrido P4028 (A) y el híbrido P4039 (B), obtenidos en cada uno de los tratamientos de semillas de maíz a diferentes dosis de AIP. ANOVA (A:  $F = 119.46$ ,  $R^2 = 0.95$  y B:  $F = 12.09$ ,  $R^2 = 0.70$ ). Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

### CONCLUSIONES

El tratamiento de semillas de maíz con dosis de fosfina generada a partir de AIP, no representó un cambio significativo respecto al testigo, incluso a niveles elevados, en la permeabilidad de las membranas ni en el porcentaje de germinación. Aunque se observó un efecto estadístico en la germinación de las semillas sometidas a envejecimiento acelerado, éste no pudo correlacionarse con las dosis de fosfina, confirmando la ausencia de fitotoxicidad. Por otra parte, el contenido de humedad en las semillas se vio afectado de forma inversamente proporcional a la dosis de fosfuro de aluminio, lo cual puede ser beneficioso para la preservación del material. De acuerdo con estos hallazgos

y para efectos prácticos en tratamientos comerciales o cuarentenarios, se concluye que es factible emplear dosis de fosfuro de aluminio muy superiores a las recomendadas, estableciendo un nuevo umbral de seguridad por encima de los 3000 g t<sup>-1</sup> sin provocar daños a la calidad fisiológica de la semilla.

### AGRADECIMIENTOS

Se extiende un profundo agradecimiento a:

El CONHACYT (Actualmente SECIHTI) por el apoyo con una beca de estudios para postgrado del primer autor. Al Colegio de Postgraduados, por su apoyo con instalaciones

y equipo, además de personal del área de Semillas. A Bio King Labs por el apoyo con equipo y financiamiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad A., M. Ahmed, Noorullah, Q. M. Ali, M. Abbas and S. Arif (2013) Monitoring of resistance against phosphine in stored grain insect pests in Sindh. *Middle-East Journal of Scientific Research* 16:1501-1507.
- CIPF, **Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (2020)** Requisitos para el uso de la fumigación como medida fitosanitaria. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. 21 p.
- FAO, **Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2024)** Producción y protección vegetal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. <https://www.fao.org/plant-production-protection/in-action/governance-and-normative-work/ippc/es> (Noviembre 2024).
- FAX México (2024) Fosfuro de aluminio. FAX México, S.A. de C.V. Ciudad de México, México. 36 p.
- Fluck E. (1972) The chemistry of phosphine. In: *Inorganic Chemistry. Fortschritt der Chemischen Forschung*. Springer, Berlin, Germany. pp:1-64, <https://doi.org/10.1007/BFb0051358>
- García-Salazar J. A. y R. Ramírez-Jaspeado (2013) El tamaño de las unidades de producción de maíz (*Zea mays* L.): un desafío para elevar la tasa de utilización de semilla mejorada. *Agrociencia* 47:837-849.
- Gorbachuk E. V., E. K. Badeeva, S. A. Katsyuba, P. O. Pavlov, K. R. Khayarov, O. G. Sinyashin and D. G. Yakhvarov (2016). Thermal stability of primary and secondary phosphine oxides formed as a reaction of phosphine oxide with ketones. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements* 191:1480-1481, <https://doi.org/10.1080/10426507.2016.1212047>
- ISTA, **International Seed Testing Association (2021)** International Rules for Seed Testing International Seed Testing Association. Bassersdorf, Switzerland. 429 p.
- Krzyzanowski F. C., I. Lorini, J. B. França-Neto and A. A. Henning (2013) Effects of phosphine fumigation on the quality of soybean seeds. *Journal of Seed Science* 35:179-182, <https://doi.org/10.1590/S2317-15372013000200006>
- Mancera-Rico A., A. Ramírez-Jaspeado, M. R. Venegas-Ordoñez, L. M. Vásquez-Siller y C. A. Villaseñor-Perea (2019) Daño tisular y calidad fisiológica en semillas de maíz sometidas a compresiones equivalentes a ruptura. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42:393-403, <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.4.393>
- Monsalve-Salamanca L. A., M. M. Ortiz-Rangel y A. Mateus-Fontecha (2015) Identificación simultánea y determinación cualitativa de ácido cianhídrico y fosfina por cromatografía de gases con detector de nitrógeno fósforo y automuestreador *Headspace* (hs-gc-ncpd) en fluidos biológicos. *Colombia Forense* 2:21-26, <https://doi.org/10.16925/cf.v3i1.1188>
- Nath N. S., I. Bhattacharya, A. G. Tuck, D. I. Schlipalius and P. R. Ebert (2011) Mechanisms of phosphine toxicity. *Journal of Toxicology* 2011:494168, <https://doi.org/10.1155/2011/494168>
- NAPPO, **North American Plant Protection Organization (2009)** Fumigación de granos o sus productos con fosfina para el control de plagas de productos almacenados. Protocolos de Tratamientos de la NAPPO. Secretaría de la Organización Norteamericana de Protección a las Plantas. Ontario, Canadá. 4 p.
- Pimentel M. A. G., L. R. D'A. Faroni, R. N. C. Guedes, A. H. Sousa and M. R. Tótola (2009) Phosphine resistance in Brazilian populations of *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Stored Products Research* 45:71-74, <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2008.09.001>
- Ramos G. F. (2013) Maíz, Trigo y Arroz. Los Cereales que Alimentan al Mundo. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León, México. 79 p.
- SAGARPA, **Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2018)** Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-022-FITO-1995, Requisitos y especificaciones que deben de cumplir las personas morales para la prestación de servicios de tratamientos fitosanitarios, para quedar como Norma Oficial Mexicana NOM-022-SAG/FITO-2016, Especificaciones, criterios y procedimientos fitosanitarios para las personas físicas o morales que presten servicios de tratamientos fitosanitarios. Diario Oficial de la Federación. Edición 30/04/2018. Ciudad de México, México.
- Salazar P., A. Trejo y L. M. Hernández (2006) Pruebas de envejecimiento acelerado en semillas de maíz (*Zea mays* L.) de diferentes bases genéticas. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología* 24:63-69.
- SENASICA, **Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (2016)** Manual de Tratamientos Fitosanitarios. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Tecamac, Estado de México, México. 213 p.
- SENASICA, **Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (2024)** Plagas de vigilancia activa y pasiva. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México, México. <https://www.gob.mx/senasica/documentos/plagas-de-vigilancia-activa-y-pasiva-111406> (Noviembre 2024).
- SIAP, **Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2024)** Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México, México. [https://nube.agricultura.gob.mx/cierre\\_agricola/](https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/) (Noviembre 2024).
- Singh S., A. Bhalla, S. K. Verma, A. Kaur and K. Gill (2006) Cytochrome-C oxidase inhibition in 26 aluminium phosphide poisoned patients. *Clinical Toxicology* 44:155-158, <https://doi.org/10.1080/15563650500514467>
- Taylor A. G. (2020) Seed storage, germination, quality and enhancements. In: *The Physiology of Vegetable Crops*, 2<sup>nd</sup> edition. H. C. Wien and H. Stutzel (eds.). CAB International. Wallingford, UK. pp:1-36.