

Rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) en respuesta a la fertilización con nitrógeno, fósforo y silicio al suelo

Maize (*Zea mays* L.) yield in response to soil fertilization with nitrogen, phosphorus and silicon

Oscar Martín Antúnez-Ocampo^{1*} , Juan Elías Sabino-López² ,
Cesar del Ángel Hernández-Galeno¹  y Mariana Espinosa-Rodríguez² 

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Iguala. Carretera Iguala-Tuxpan, km 2.5, Col. Centro. 40000 Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

* Autor para correspondencia (antunez.oscar@inifap.gob.mx)

² Universidad Autónoma de Guerrero, Maestría en Ciencias Agropecuarias y Gestión Local. Carretera Iguala-Tuxpan, km 2.5, Tuxpan. 40101 Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

Editor de Sección: Dr. Fabián Fernández Luqueño

RESUMEN

En el estado de Guerrero, el maíz (*Zea mays*) se siembra en diferentes condiciones edáficas y climáticas, en altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 2880 m de altitud, principalmente en régimen de temporal y por productores que utilizan maíces nativos y mejorados. El objetivo fue evaluar el efecto de la fertilización con nitrógeno y fósforo en combinación con silicio en los componentes de rendimiento del cultivo de maíz; bajo la hipótesis de que al menos una fórmula de fertilización y la aplicación de silicio al suelo generan un efecto positivo en el tamaño de la mazorca y el rendimiento de grano de maíz. La fertilización consideró dos factores; primero la fórmula de Nitrógeno, Fósforo y Potasio (N-P-K) con dos niveles (90-60-00 y 60-40-00); el segundo fue la fertilización de silicio (Si) con tres niveles (sin Si, Fermiphos y Silifosca[®]), cuya combinación originó seis tratamientos; los cuales se distribuyeron en un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones. La fertilización N-P-K no afectó estadísticamente las variables evaluadas; excepto el diámetro que, fue estadísticamente diferente y se incrementó en 2% con 90-60-00. La aplicación de silicio (Fermiphos y Silifosca[®]) aumentó más de 12% la longitud y 6% el diámetro de la mazorca y 24% el rendimiento de grano. La fertilización con 90-60-00 + silicio (Fermiphos y Silifosca[®]) incrementó de 8 a 32% el tamaño y rendimiento; mientras que, la fertilización con 60-40-00 + silicio (Fermiphos y Silifosca[®]) superó de 4 a 28% los parámetros evaluados. El incremento de la fórmula de fertilización tuvo impactos mínimos y no constantes en el tamaño de la mazorca. Pero, la aplicación de Silifosca[®] o Fermiphos combinada con la fertilización N-P-K favoreció cambios positivos en el tamaño de la mazorca y rendimiento de grano con 90-60-00 y la adición de Silifosca[®].

Palabras clave: *enmienda, manejo agronómico, nutrimentos, rendimiento de grano.*

SUMMARY

In the state of Guerrero, maize (*Zea mays*) is planted in different soil and climatic conditions, at altitudes ranging from sea level to 2880 altitude meters, mainly in a rainfed regime and by producers who use native and improved maize. The objective is to evaluate the effect of fertilization with nitrogen and phosphorus in combination with silicon on the yield of corn crop components under the hypothesis that at least one fertilization formula and silicon application to the soil generate an positive effect on the size of the corn ear and grain yield. Fertilization considers two factors; first the Nitrogen, Phosphorus and Potassium (N-P-K) formula with two levels (90-60-00



check for
updates

Cita recomendada:

Antúnez-Ocampo, O. M., Sabino-López, J. E., Hernández-Galeno, C. A., & Espinosa-Rodríguez, M. (2023). Rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) en respuesta a la fertilización con nitrógeno, fósforo y silicio al suelo. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-12. e1682. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1682>

Recibido: 16 de enero de 2023.
Aceptado: 23 de marzo de 2023.
Nota de Investigación. Volumen 41.
Julio de 2023.

and 60-40-00); the second was silicon (Si) with three levels (without Si, Fermiphos and Silifosca*), whose combination originated six treatments; which were distributed in a randomized block experimental design with three repetitions. N-P-K fertilization did not statistically affect the variables evaluated, except for diameter, which was statistically different and increased by 2% with 90-60-00. The application of silicon (Fermiphos and Silifosca*) increased cob more than 12% in length and 6% in diameter and grain yield 24%. Fertilization with 90-60-00 + silicon (Fermiphos and Silifosca*) increased size and yield from 8 to 32%; while fertilization with 60-40-00 + silicon (Fermiphos and Silifosca*) exceeded the evaluated parameters from 4 to 28%. Increasing the fertilization formula had minimal and inconsistent impacts on ear size. However, the application of Silifosca* or Fermiphos combined with N-P-K fertilization favored positive changes in ear size and grain yield with 90-60-00 and the addition of Silifosca*.

Index words: amendment, agronomic management, nutrients, grain yield.

INTRODUCCIÓN

En México, el maíz (*Zea mays* L.) es el principal cereal por el volumen de producción y superficie cultivada (SIAP, 2020). En el estado de Guerrero se cultiva en diferentes condiciones edafoclimáticas y altitudes desde el nivel del mar hasta 2880 m de altitud, principalmente de temporal (95%), usando maíces nativos y mejorados (i. e. H-516, H-563; VS-535, VS-559, VS-235, H-516 y Tornado, DK-357) (González-Mateos *et al.*, 2018), empleando densidades de 57 500 y 62 500 plantas ha⁻¹. Sin embargo, los rendimientos son bajos (< 5 Mg ha⁻¹) debido al ataque de plagas, enfermedades y malezas; así como, por condiciones climáticas adversas durante el ciclo del cultivo y problemas de fertilidad del suelo (Zamudio-González, Espinosa y Tadeo, 2012¹). De estas limitantes, la fertilidad del suelo tiene mayor influencia en el crecimiento y rendimiento, pues no siempre suministra los requerimientos nutrimentales del cultivo (Pérez-López, 2013); aunado a las dosis de fertilización inapropiadas aplicadas al suelo por los productores (Zamudio-González *et al.*, 2012¹), quienes comúnmente solo aportan de uno a tres macronutrientes primarios, escasamente adicionan macronutrientes secundarios y rara vez micronutrientes (González-Mateos *et al.*, 2018). La deficiencia de estos dos últimos se ha resuelto con la fertilización foliar al cultivo o a través de enmiendas (cal, yeso y silicatos) al suelo.

Las enmiendas mejoran las propiedades químicas del suelo al actuar como correctores de problemas de acidez mediante el ajuste del pH o deficiencia de algún elemento, lo que contribuye en el estado nutrimental de las plantas (Araya, Camacho, Molina y Cabalceta, 2015; Damian-Suclupe, Gonzáles, Quiñones Terán, 2018). Aplicaciones de silicio al suelo incrementan la capacidad de intercambio catiónico y favorece la absorción de Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Fósforo (P), Hierro (Fe), Zinc (Zn) y Molibdeno (Mo) (Araya *et al.*, 2015), estimulando el desarrollo y rendimiento del cultivo. El silicio se convierte en ácido ortosilícico (H₄SiO₄) y desplaza los iones fosfato fijados por los óxidos e hidróxidos de Fe y Al, o bien, reemplaza a los fosfatos en los sitios de adsorción de las arcillas, lo que incrementa el fósforo disponible (Snyder, Matichenkov y Datnoff, 2006); Álvarez y Osorio, 2014). Estos efectos han permitido aumentar la producción en más de 10% en los cultivos de trigo (*Triticum* sp.), arroz (*Oryza sativa* L.), zanahoria (*Daucus carota* L.), chícharo (*Paivum sativum* L.) (Greger, Landberg y Vaculík, 2018), cebada (*Hordeum vulgare* L.), mijo (*Setaria itálica* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), algodón (*Gossypium* sp), soya (*Glycine max* L.) (Liang, Nikolic, Bélanger, Gong y Song, 2015),

¹ Zamudio-González, B., Espinosa-Calderón, A. & Tadeo-Robledo, M. (2012). Enzimas y aminoácidos en producción de maíz grano bajo estrés natural en Temascalcingo, Estado de México. 15 Congreso Internacional de Ciencias Agrícolas (pp. 11-18). UBC-México: Universidad de Baja California.

frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), maíz (*Zea mays* L.) (Rohanipoor, Norouzi, Moezzi y Hassibi, 2013), pepino (*Cucumis sativus* L.) y jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Cázarez-Flores et al., 2022), los cuales extraen de 50 a 200 kg ha⁻¹ de silicio (Snyder et al., 2006); destacando dos fertilizantes silicatados para uso agrícola; el silicato de calcio (CaSiO₄) y el silicato de magnesio (MgSiO₄) (Navarro y Navarro, 2013).

A pesar de los beneficios del Si al suelo descritos anteriormente, no se cuenta con suficientes estudios que permitan conocer los beneficios que generan en el crecimiento y rendimiento de los cultivos; asimismo, el uso intensivo de fertilizantes químicos basados en tres macronutrientes ha ocasionado que el rendimiento de maíz en el estado de Guerrero se vea afectado por la deficiencia de otros nutrientes, y que los costos de producción y daño ambiental aumenten. En este sentido, González-Mateos et al. (2018) reportaron que aplicaciones de 60 a 90 kg de N ha⁻¹ con 65 000 plantas ha⁻¹ en las regiones norte y centro del estado de Guerrero, se obtienen rendimientos de 8.8 a 9.7 Mg ha⁻¹ de grano de maíz, respectivamente. Por otro lado, Turrent-Fernández et al. (2004) registraron rendimientos de 9.4 a 10.5 Mg ha⁻¹ con 60 a 65 kg N ha⁻¹ en el municipio de Iguala, Guerrero. Por lo descrito anteriormente, en la presente investigación se planteó evaluar el efecto de la fertilización con nitrógeno y fósforo en combinación con silicio en los componentes de rendimiento del cultivo de maíz; bajo la hipótesis de que al menos una fórmula de fertilización y la aplicación de silicio al suelo generan un efecto en el tamaño de la mazorca y el rendimiento de grano de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del Experimento

La investigación se realizó en el ciclo otoño-invierno 2019-2020 (enero a mayo de 2020) en condiciones de riego, en el Campo Experimental Iguala del INIFAP en Guerrero, ubicado a una altitud de 740 m. El suelo en la profundidad de 0 a 20 cm presentó color gris rojizo en seco y café rojizo en húmedo, con un contenido de 27.0, 13.8, 547.2, 6640.0, 3120.0 kg ha⁻¹ de N-inorgánico, P, K, Ca y Mg, respectivamente; textura migajón arcilloso limoso (8.3% arena, 31.7% arcilla y 60.0% limo); densidad aparente de 0.96 g cm⁻³; conductividad eléctrica de 0.45 dS m⁻¹; 5.4% de materia orgánica y pH de 7.5. Durante el desarrollo del experimento en campo, el promedio de las temperaturas mínimas y máximas de enero a mayo fue de 28.5 y 34.3 °C, respectivamente; la temperatura media fue de 28.8 °C, y la humedad relativa osciló de 29 a 40%, y la precipitación fue nula durante el ciclo de evaluación.

Material Vegetal

Se utilizó el maíz híbrido H-568, cuyo porte de planta es intermedio-alto (270 a 280 cm) y ciclo biológico de 125 a 130 días, tolerante al acame, con floración masculina a los 58 días y dos días después la femenina. La mazorca es cilíndrica de buena cobertura de las brácteas, tiene 15 a 20 cm de longitud con 14 a 18 hileras rectas y 31 a 40 granos por hilera de color blanco cremoso y textura dentada. Además, presenta buenas características y propiedades para la producción de elote y forraje, cumple con los parámetros comerciales e industriales para la elaboración de tortillas por el método tradicional, nixtamal-masa-tortilla. En siembras establecidas en condiciones de temporal el rendimiento de grano oscila de 5.6 a 9.5 Mg ha⁻¹. El híbrido se adapta a la región tropical de los estados de Guerrero, Michoacán, Oaxaca, Chiapas, Nayarit, Morelos, Puebla, Veracruz y Tamaulipas, a altitudes menores de 1000 m, precipitación de 800 a 1000 mm, temperatura media de 24 a 27 °C y suelos de mediana y alta productividad (Gómez et al., 2017b).

Factores de Estudio y Diseño Experimental

Se evaluó el efecto individual y combinado de la fertilización edáfica con dos niveles de nitrógeno (N) y fósforo (P), mediante las fórmulas de fertilización de N-P-K (90-60-00 y 60-40-00) y la fertilización con silicio (Si) usando dos fertilizantes silicatados: Fermiphos (50% Si, 25% Ca, 12% Mg) y Silifosca® (25% Si, 33% Ca) y el testigo sin Si, mediante un arreglo factorial completo 2 × 3. Cabe señalar que, ninguna fórmula de fertilización incluyó potasio, con base en la fertilización técnica (temporal: 90N-60P-00K y riego: 120N-60P-00K) recomendada para el estado de Guerrero (Gómez-Montiel y Cantú, 2017a), y del apoyo de fertilizante que entrega el Programa de Fertilizantes 2022 (96N-69P-00K) (Römheld y Kirkby, 2010). Se utilizó como fuente de N la urea (46% de N) y de P al fosfato diamónico o DAP (18% de N - 46% de P₂O₅). Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones. La unidad experimental fueron seis surcos de 20.0 m de longitud y 0.8 m de separación; la parcela útil consistió de los dos surcos centrales (la longitud de cada surco fue de 8 m) (Medina-Méndez, Alejo, Soto y Hernández, 2018).

Establecimiento y Manejo del Experimento

El suelo se preparó mecánicamente mediante un barbecho, rastreo y surcado. La siembra se realizó el 03 de enero de 2020, con una densidad de 150 000 plantas por hectárea (3 plantas por mata) cada 0.25 m. La fertilización al suelo fue en dos aplicaciones, la primera en la siembra incorporando todo el P y 650 kg ha⁻¹ de Silifosca®/Fermiphos de acuerdo con el tratamiento; la segunda a los 35 días después de la emergencia (dde), aplicando todo el N. Las malezas se controlaron con Nicosulfuron (Sanson® 4 SC) a los 35 dde y manual mediante dos deshierbes. El gusano alambre (*Agriotes lineatus* L.) y la gallina ciega (*Phyllophaga* spp.) se controlaron con 7 kg ha⁻¹ de Terbufos al 5% en la siembra. El gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* J.E. Smith) se controló con 0.750 y 0.100 L ha⁻¹ de Clorpirifos etil y Deltametrina, respectivamente. La cosecha fue manual, después de la madurez fisiológica de la mazorca (130 días después de la siembra). El desgrane se hizo manualmente cuando el grano presentó 13% de humedad.

VARIABLES EVALUADAS

Se registró el tamaño de la mazorca (longitud y diámetro) y el rendimiento de grano del cultivo. La longitud (cm) se midió con un flexómetro desde la base hasta la punta de la mazorca; el diámetro (mm), con un vernier digital Steren® (modelo HER-411) en la parte media de la mazorca; estas variables se registraron en 10 mazorcas sin brácteas (provenientes de los dos surcos centrales), y se obtuvo un promedio por repetición. El rendimiento de grano, se obtuvo mediante el peso del grano (13% de humedad) de las mazorcas, con una báscula digital RHINO® (modelo BAR-6) y se extrapoló a Mg ha⁻¹. La información se sometió a un análisis de varianza (ANOVA) y prueba de medias (Tukey al 5%) con el programa Statistical Analysis System (SAS) versión 9.0 (SAS Institute, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables analizadas mostraron efectos principales y simples. La fertilización con N-P-K (FF) afectó únicamente el diámetro de la mazorca; mientras que, la fertilización con silicio (FS) y su interacción FF × FS influyeron estadísticamente en las tres variables estudiadas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Componentes del rendimiento del cultivo de maíz con su significancia estadística por efecto de la fórmula de fertilización y silicio aplicado al suelo.**Table 1. Maize crop yield components with their statistical significance due to the effect of the fertilization formula and silicon applied to soil.**

Fuente de variación	Longitud de mazorca	Diámetro de mazorca	Rendimiento de grano
FF	0.5090ns	0.0049*	0.5260ns
FS	0.0483*	0.0001*	0.0001*
FF × FS	0.0031*	0.0002*	0.0011*
C. V. (%)	5	2	8

FF = fórmula de fertilización. FS = fertilización con silicio. C.V. = coeficiente de variación. * = significativo, $\alpha \leq 0.05$. ns = no significativo, $\alpha \geq 0.05$.

FF = fertilization formula; FS = silicon fertilization; C.V. = coefficient of variation. * = significant, $\alpha \leq 0.05$; ns = not significant, $\alpha \geq 0.05$.

Efecto de la Fórmula de Fertilización (FF)

El diámetro de mazorca fue la única variable que mostró diferencias significativas por la fertilización N-P-K, siendo la fórmula 90-60-00 la que originó las mazorcas de mayor diámetro (Figura 1A), superiores en 2% a las cosechadas en plantas fertilizadas con 60-40-00 (37.09 mm). En el caso de la longitud (14.56 a 14.69 cm), (Figura 1B), el rendimiento de mazorca (6.43 a 6.83 Mg ha⁻¹) y grano (5.26 a 5.56 Mg ha⁻¹) no presentaron diferencias estadísticas ($P \geq 0.05$), (Figura 1B-C).

La nula respuesta del rendimiento a fertilización edáfica también ha sido reportada por Ruiz-González y Victorino-Ramírez (2015), con 60N-60P-60K y 120N-60P-60K (5.4 y 6.6 Mg ha⁻¹), Martínez-Reyes *et al.* (2018) con 160N-46P-30K (5.97 Mg ha⁻¹) y 80N-23P-15K (5.87 Mg ha⁻¹), y por Domínguez, Studdert, Echeverría y Andrade (2001) y Cervantes-Ortiz *et al.* (2013) quienes no encontraron diferencias en el rendimiento, al fertilizar con diferentes niveles de nitrógeno (60 a 350 kg ha⁻¹). En este sentido, los resultados de diversas investigaciones señalaron que la respuesta (en crecimiento y rendimiento) de las plantas a la fertilización se relaciona con la eficiencia del aprovechamiento de los nutrientes N-P-K, ya que depende del uso correcto del fertilizante en el momento de la fertilización, de la demanda nutrimental del cultivo, así como de la tecnología industrial de fabricación de los fertilizantes, para evitar pérdidas por volatilización, lixiviación, fijación, precipitación, entre otras reacciones en el suelo (Roberts, 2007; Shavit, Reiss y Shaviv, 2003; Zaman *et al.*, 2013). Ya que una problemática es el uso inapropiado de los fertilizantes químicos, especialmente los nitrogenados que se pierden por volatilización y lixiviación (Wang *et al.*, 2018) y en otros casos su aplicación constante (uso excesivo) afecta negativamente la absorción de otros nutrientes como Zn, Ca y K en el cultivo (Yu-kui, Shi-ling, Fu-suo y Jian-bo, 2009).

A pesar de que en la investigación no se presentaron resultados contrastantes, el efecto positivo de la fertilización al suelo en el rendimiento del cultivo de maíz ha sido documentado en diversas investigaciones (Sosa y García, 2018), donde el impacto se relaciona con las características genéticas del material vegetal, condiciones ambientales, calidad del suelo y su interacción de ambos (Turrent-Fernández y Cortez-Flores, 2005; Medina-Méndez *et al.*, 2018). Por ejemplo, se reportó que la aplicación individual de N o P, y en forma combinada en suelos fértiles incrementó el rendimiento; sin embargo, en suelos con fertilidad media se requiere adicionar otros macronutrientes (K y Ca) y micronutrientes (Zn y B). Otra evidencia es que la fertilización estimula el desarrollo de la raíz, lo que le permite a la planta producir mayor biomasa (por la eficiencia del uso de los nutrientes), y resistir los efectos de la sequía (principalmente en la fase vegetativa) (González-Torres *et al.*, 2016), estos

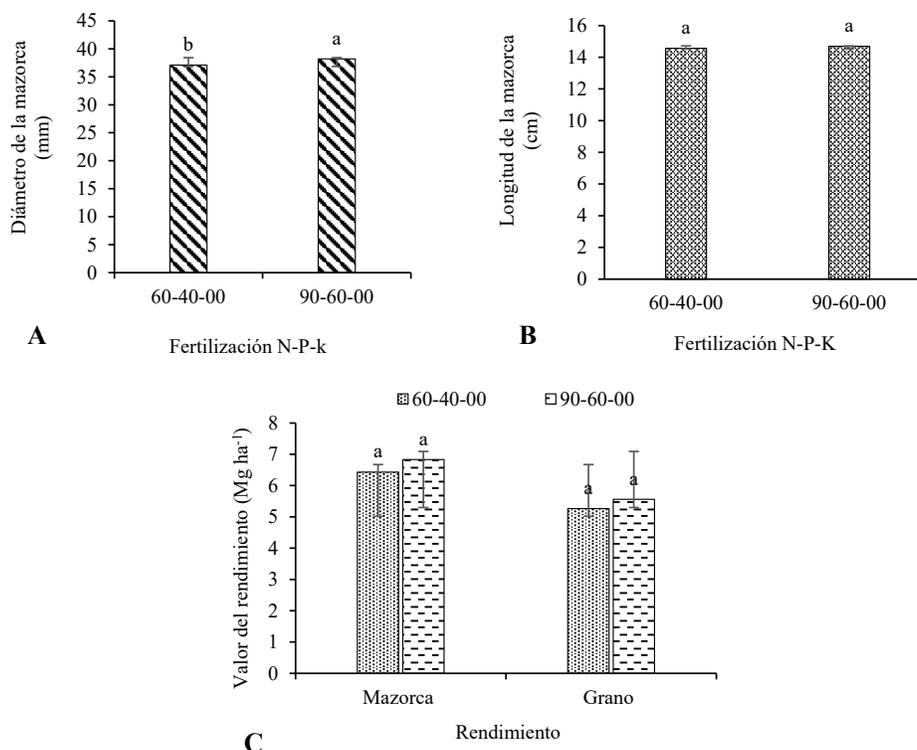


Figura 1. Efecto de la fórmula de fertilización edáfica en el diámetro de mazorca (A) y la longitud (B), y el rendimiento de mazorca y grano (B) de maíz H-568. Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05. DMSLongitud = 0.73. DMSDiámetro = 0.81. DMSRend. mazorca = 0.66. DMSRend. grano = 0.44.

Figure 1. Effect of soil fertilization formula on cob diameter (A), length (B), and cob and grain yield (B) of H-568 corn. Means with the same letter in each variable are statistically equal, Tukey's test, 0.05. DMSLongitud = 0.73. DMSDiámetro = 0.81. DMSRend. cob = 0.66. DMSRend. grain = 0.44.

resultados se han obtenido por el fraccionamiento de la fertilización en cantidad, lugar y momento (Zamudio-González *et al.*, 2015). También, se ha indicado que existe una interacción significativa de fertilización × tipo de suelo, ya que se tienen beneficios en la disponibilidad de nutrientes (*i. e.* P) y en algunos casos el pH se modifica (Bautista-Cruz, Cruz y Rodríguez, 2015).

Efecto de la Fertilización con Silicio (FS)

La aplicación de silicio al suelo tuvo un efecto positivo en el tamaño de la mazorca (longitud y diámetro) y el rendimiento (mazorca y grano) ($P \leq 0.05$). El aporte de silicio mediante Silifosca® y Fermiphos provocaron que las plantas fertilizadas con cualquier fórmula de fertilización N-P-K produjeran mazorcas con tamaños superiores en 12 a 17% en longitud, 6 a 8% en diámetro, 24 a 26% en rendimiento de mazorca y de 25 a 29% en grano, con respecto a los valores obtenidos en plantas sin fertilización con silicio (Figuras 2 A-C).

Los resultados favorables por la fertilización con silicio al suelo se atribuyen al incremento del intercambio de cationes, y la disponibilidad del fósforo y de otros nutrientes (K, Mg), lo que favorece el metabolismo y la fisiología de las plantas, cambios que conducen a un incremento del crecimiento y rendimiento de los cultivos (Alsar, Duskinova y Insepov, 2020).

En gramíneas, las respuestas pueden ser en términos de acumulación de compuestos fenólicos, lignina y fitoalexinas (Vieira, Araújo y da Silva, 2008); incremento de la síntesis de las enzimas peroxidasa, polifenoloxidasas, glucanasa y

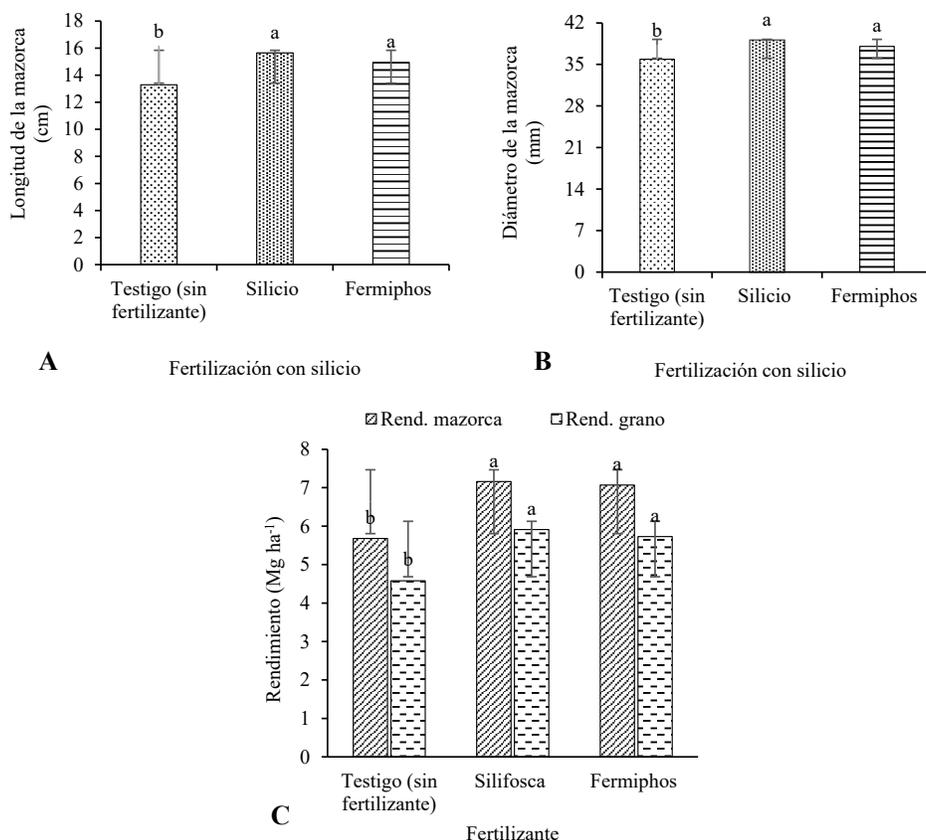


Figura 2. Efecto de la fertilización con silicio en el tamaño de la mazorca (diámetro y longitud) (A-B) y el rendimiento de mazorca y grano (C) de maíz H-568. Medias con la misma letra en cada variable son estadísticamente iguales, Tukey, 0.05. DMSLongitud = 0.73. DMSDiámetro = 0.81. DMSRend. mazorca = 0.66. DMSRend. grano = 0.44.

Figure 2. Effect of silicon fertilization on cob size (diameter and length) (A-B) and cob and grain yield of (C) H-568 corn. Means with the same letter in each variable are statistically equal, Tukey's, 0.05. DMSLongitud = 0.73. DMSDiámetro = 0.81. DMSRend. cob = 0.66. DMSRend. grain = 0.44.

quitinasa; las cuales contribuyen a la lignificación de los tejidos y altura de la planta; mayor concentración de nutrientes, rendimiento y calidad nutricional (Walsh, Shafian, McClintick-Chess, Belmont y Blanscet, 2018) de los cultivos. Todos estos cambios se han reportado en condiciones ambientales favorables o situaciones de estrés de agua, salinidad y biótico (Khan et al., 2019).

En trigo, la aplicación de Si al suelo mejoró la absorción y el almacenamiento de K y Mg; asimismo, el crecimiento y rendimiento del cultivo en condiciones de salinidad (Javaid, Farooq, Akhtar, Saqib y Anwar-ul-Haq, 2019). También, Nayekova, Aubakirova, Aitlessov, Demidchik y Alikulov (2020) reportaron mayor biomasa de hojas y raíces en plántulas de cebada fertilizadas con silicio cultivadas en un suelo salino. En este sentido, la respuesta de la planta a la fertilización con silicio depende de la concentración de este elemento, de la especie vegetal y de la influencia de los factores bióticos y abióticos.

Efecto de la Interacción FF × FS en los Componentes del Rendimiento

La fertilización conjunta con N-P-K y silicio incrementó el tamaño de mazorca y rendimiento de grano (Cuadro 1). Dicho efecto fue más evidente a medida que aumentó la fertilización con N-P-K. Las plantas fertilizadas con 90-60-00 + silicio (Silifosca® o Fermiphos) mejoraron la longitud (11 a 13%), el diámetro (8 a 10%) de mazorca N-P-K (Figura 3A, B) y el rendimiento de grano (27 a 29%); mientras

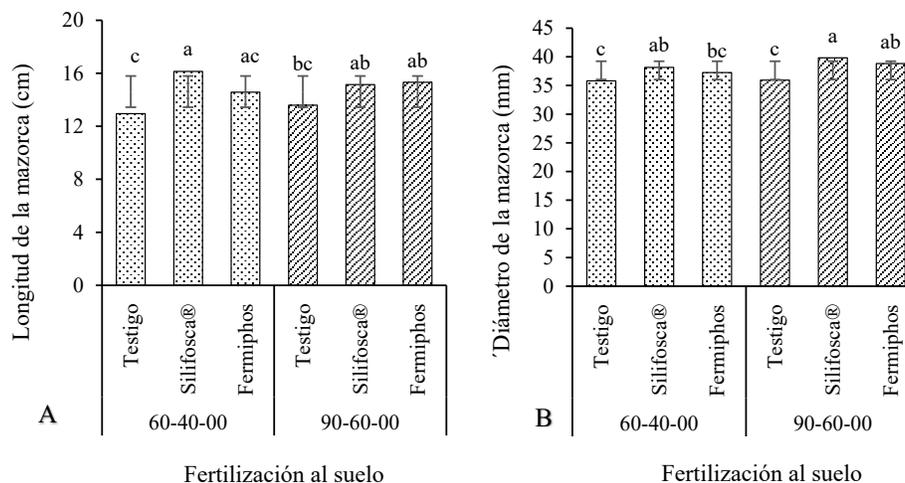


Figura 3. Comportamiento del tamaño (A: longitud y B: diámetro) de la mazorca de maíz H-568 en respuesta a la fertilización silicatada en combinación con las fórmulas de N-P-K. Barras con letras distintas indican diferencias estadísticas (Tukey, $P \leq 0.05$; DHSLongitud = 0.73; DHSDiámetro = 0.81).

Figure 3. Size behavior/performance/trend (A): length and (B) diameter) of the H-568 corn cob in response to silicate fertilization in combination with N-P-K formulas. Bars with different letters indicate statistical differences (Tukey, $P \leq 0.05$; DHSLongitud = 0.73; DHSDiámetro = 0.81).

que la fertilización con 60-40-00 + silicio (Silifosca® o Fermiphos) aumentó en 12 a 24% la longitud; de 4 a 6% el diámetro y de 22 a 28% el rendimiento de grano, en comparación con plantas fertilizadas con ambas fórmulas sin silicio (Figura 3 y 4).

La limitada respuesta de las variables a la fórmula de fertilización también fue observada por Ruiz-González y Victorino-Ramírez (2015) y Martínez-Reyes *et al.* (2018), quienes no encontraron respuesta del rendimiento de grano a las fórmulas de fertilización N-P-K (60-60-60, 80-23-15, 120-60-60 y 160-46-30) aplicadas al suelo. Asimismo, Domínguez *et al.* (2001) y Cervantes-Ortiz *et al.* (2013) no encontraron diferencias en el rendimiento del cultivo de maíz, al fertilizar con diferentes niveles de nitrógeno (60 a 350 kg ha⁻¹) en condiciones de campo. Por otro lado, la respuesta favorable a la aplicación de silicio se atribuye a la existencia de un doble efecto en el sistema suelo-planta.

Aunque en esta investigación no se determinaron parámetros anatómicos y fisiológicos, se tiene evidencias de que el Si refuerza la capacidad de almacenamiento y distribución de los carbohidratos en la planta para su crecimiento y producción (Adress *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2017). Así como, la autoprotección contra el ataque de plagas y enfermedades, y de las condiciones climáticas desfavorables; al estimular el desarrollo y la actividad de estructuras poliméricas en cutículas, tricomas y fitolitos en la superficie de las hojas, ya que el silicio participa como ácido monosilícico en la savia del xilema, y forma gel de sílice en las paredes celulares (Taiz y Zieger, 2006).

En el suelo, el Si mejora la retención y disponibilidad del agua, además de mantener los nutrimentos disponibles para la planta (Rivera *et al.*, 2010). En este sentido, el efecto positivo de la aplicación de Si en el rendimiento del cultivo de maíz, se ha relacionado con el sinergismo del Si con otros nutrientes en el suelo (P y K) y las dosis altas y medias de fertilización N-P-K; facilitando su absorción (200 a 350 kg ha⁻¹ de Si) por la planta; además, incrementa la tasa fotosintética (Pilon, Soratto y Moreno, 2013; Wang, Wang y Gao, 2015; Gao *et al.*, 2018). Al respecto, Detmann *et al.* (2012) reportaron que la aplicación de silicio aumentó la eficiencia

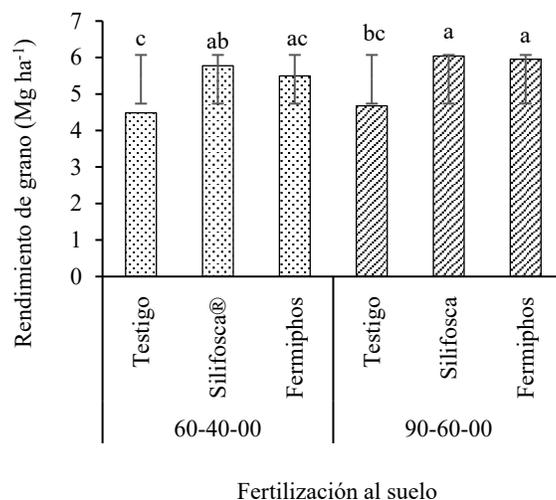


Figura 4. Comportamiento del rendimiento de grano de maíz H-568 en respuesta a la fertilización silicatada en combinación con las fórmulas de N-P-K. Barras con letras distintas indican diferencias estadísticas (Tukey, $P \leq 0.05$; DHSGrano = 0.44).

Figure 4. Behavior of H-568 corn grain yield in response to silicate fertilization in combination with N-P-K formulas. Bars with different letters indicate statistical differences (Tukey's, $P \leq 0.05$; DHSGrano = 0.44).

de la fertilización al suelo, principalmente el uso del nitrógeno por la planta. Sin embargo, esta respuesta es más visible en cultivos (*i. e.* caña de azúcar, arroz) que son fertilizados con altas dosis de N (Moreno-Seceña *et al.*, 2016). Los principales aspectos que se favorecen en los cultivos son la formación de una capa de sílice (sílice amorfo hidratado, $\text{SiO}_2 \cdot \text{NH}_2\text{O}$) en células epidérmicas, estomas y tricomas, plantas más altas con mayor número de tallos, follaje (materia fresca y seca) y tasa fotosintética, y presencia de hojas más erectas (Legarda-López, Benavidez y Ruiz, 2015); así como, disminución de daños por plagas y agentes patógenos, y el acame del tallo de la planta (Castellanos-González, de Mello y Silva, 2015). Es importante mencionar que los beneficios del Si en la planta pueden ser nulos por la deficiencia de uno o más nutrientes (*i. e.* N, P, K, Ca, S, B, Fe, Mn), (Guntzer, Keller y Meunier, 2012), que solos o en conjunto disminuyen de 10 a 30% el rendimiento del cultivo (Silva, Moraes y Melo, 2010).

CONCLUSIÓN

Los resultados de esta investigación permiten concluir que el incremento de la fórmula de fertilización con N-P-K tuvo impactos mínimos y no constantes en el tamaño de la mazorca de maíz, únicamente modificó el diámetro de mazorca. Pero, la aplicación de Si mediante Silifosca® o Fermiphos combinada con la fertilización N-P-K favoreció el aumento en el tamaño (longitud y diámetro) de la mazorca, así como, en el rendimiento de grano, obteniendo los mejores resultados (longitud 11%; diámetro 10%; rendimiento 29%) con el mayor nivel (90-60-00) de fertilización N-P-K y la adición de Silifosca®. La fertilización con N-P-K complementada con la adición de Si al suelo, mejora el rendimiento del cultivo de maíz en las condiciones edafoclimáticas de Iguala, Guerrero, México.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante este estudio están disponibles a través del autor correspondiente previa solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: J.E.S.L. Metodología: O.M.A.O. Validación, J.E.S.L., y C.A.H.G. Análisis formal: O.M.A.O., y J.E.S.L. Investigación: O.M.A.O., y C.A.H.G. Escritura, preparación del borrador original: O.M.A.O., y C.A.H.G. Escritura, revisión y edición: J.E.S.L., C.A.H.G., y M.E.R. Análisis estadístico: O.M.A.O., y J.E.S.L. Supervisión: J.E.S.L., C.A.H.G., y M.E.R.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del personal del Campo Experimental Iguala-INIFAP y del Jefe de Distrito de Desarrollo Rural-AGRICULTURA del Municipio de Tlapa de Comonfort.

LITERATURA CITADA

- Adress, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F., ... Irshad, M. K. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 119, 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.011>
- Alsar, Zh., Duskinova, B., & Insepov, Z. (2020). New sorption properties of diatomaceous earth for water desalination and reducing salt stress of plants. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 22(2), 89-97. <https://doi.org/10.18321/ectj955>
- Álvarez, C., & Osorio, W. (2014). *Silicio agrónomicamente esencial*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Araya, M. A., Camacho, M. E., Molina, E., & Cabalceta G. (2015). Evaluación de fertilizantes líquidos con silicio, calcio o magnesio sobre el crecimiento del sorgo en invernadero. *Agronomía Costarricense*, 39(2), 47-60.
- Bautista-Cruz, A., Cruz-Domínguez, G., & Rodríguez-Mendoza, M. N. (2015). Efecto de bocashi y fertilizantes de liberación lenta en algunas propiedades de suelos con maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(1), 217-222.
- Castellanos-González, L., de Mello-Prado, R., & Silva-Campos, C. N. (2015). El Silicio en la resistencia de los cultivos. *Cultivos Tropicales*, 36, 16-24.
- Cázares-Flores, L. L., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T. J., Ayala-Tafoya, F., Díaz-Valdés, T., Yáñez-Juárez, M. G., & López-Orona, C. A. (2022). Silicio y cloro en el crecimiento, rendimiento y calidad postcosecha de pepino y tomate. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.994>

- Cervantes-Ortiz, F., Covarrubias-Prieto, J., Rangel-Lucio, J. A., Terrón-Ibarra, A. D., Mendoza-Elos, M., & Preciado-Ortiz R. E. (2013). Densidad de población y fertilización nitrogenada en la producción de semilla híbrida de maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 24(1), 101-110.
- Damian-Suclupe, M. J., Gonzáles-Veintimilla, F., Quiñones-Paredes, P., & Terán-Iparraguirre, J. R. (2018). Plan de enmiendas, yeso agrícola, compost mejorado y enriquecido con EM y humus de lombriz, para mejorar el suelo. *Arnaldoa*, 25(1), 141-158.
- Detmann, K. C., Araújo, W. L., Martins, S. C., Sanglard, L. M., Reis, J. V., Detmann, E., ... DaMatta, F. M. (2012). Silicon nutrition increase grain yield, which, in turn, exerts a feedforward simulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. *New Phytology*, 196(3), 752-762.
- Domínguez, G. F., Studdert, G. A., Echeverría, H. E., & Andrade, F. H. (2001). Sistema de cultivo y nutrición nitrogenada en maíz. *Ciencia del Suelo*, 19(1), 47-56.
- Gao, M., Zhou, J., Liu, H., Zhang, W., Hu, Y., Liang, J., & Zhou, J. (2018). Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice. *Science of the Total Environment*, 631-632, 1100-1108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.047>
- Gómez-Montiel, N. O., & Cantú-Almaguer, M. A. (2017a). Maíz de riego y maíz de temporal. In R., Jiménez-Guillen, A. Jaimes-Antonino, A. Barrios-Ayala, D. H. Noriega-Cantu, M. A. Cantú-Almaguer, N. O. Gomez-Montiel, R. Ariza-Flores, & R. Vásquez-Ortiz (Comps.). *Agenda Técnica Agrícola de Guerrero* (pp. 35-42). Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Gómez-Montiel, N. O., Cantú-Almaguer, M. A., Vázquez-Carrillo, M. G., Hernández-Galeno, C. D. A., Espinosa-Calderón, A., Sierra-Macias, M., ... Trujillo-Campos, A. (2017b). Híbrido de maíz H-568: nueva opción para áreas de alta productividad del trópico bajo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1213-1218. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.121>
- González-Torres, A., Figueroa-Viramontes, U., Preciado-Rangel, P., Núñez-Hernández, G., Luna-Ortega, J. G., & Antuna-Grijalva, O. (2016). Uso eficiente y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero en suelos diferentes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(2), 301-309.
- González-Mateos, R., Noriega-Cantú, D. H., Volke-Haller, V. H., Pereyda-Hernández, J., Domínguez-Márquez, V. M., & Garrido-Ramírez, E. R. (2018). Rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) y respuesta a fuentes y dosis de fertilizantes, y biofertilizantes, en Guerrero, México. *Agroproductividad*, 11(1), 22-31.
- Greger, M., Landberg, T., & Vaculík, M. (2018). Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. *Plants*, 7(2), 1-16. <https://doi.org/10.3390/plants7020041>
- Guntzer, F., Keller, C., & Meunier, J. D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 201-213. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>
- Javaid, T., Farooq, M. A., Akhtar, J., Saqib, Z. A., & Anwar-ul-Haq, M. (2019). Silicon nutrition improves growth of salt-stressed wheat by modulating flows and partitioning of Na⁺, Cl⁻ and mineral ions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 141, 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.06.010>
- Khan, A., Latif, A., Muneer, S., Kim, Y., Al-Rawahi, A., & Al-Harrasi, A. (2019). Silicon and Salinity: Crosstalk in Crop-Mediated Stress Tolerance Mechanisms. *Frontier in Plant Science*, 10, 1-21. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01429>
- Legarda-López, D., Benavidez-Cuesta, G., & Ruiz-Erazo, H. (2015). Respuesta del pasto raigrass aubade (*Lolium* sp.) a dosis de silicio en interacción con diferentes dosis de NPK. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustria. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustria*, 13(1), 99-109.
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., & Song, A. (2015). Effect of silicon on crop growth, yield and quality. In Y. Liang, M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong, & A. Song, (Eds.). *Silicon in Agriculture* (pp. 209-223). Dordrecht, The Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2_11
- Martínez-Reyes, L., Aguilar-Jiménez, C. E., Carcaño-Montiel, M. G., Galdámez-Galdámez, J., Gutiérrez-Martínez, A., Morales-Cabrera, J. A., ... Gómez-Padilla, E. (2018). Biofertilización y fertilización química en maíz (*Zea mays* L.) en Villaflores, Chiapas, México. *Siembra*, 5, 26-37. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1425>
- Medina-Méndez, J., Alejo-Santiago, G., Soto-Rocha, J. M., & Hernández-Pérez, M. (2018). Rendimiento de maíz grano con y sin fertilización en el estado de Campeche. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(spe21), 4306-4316. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i21.1532>
- Moreno-Seceña, J. C., Landeros-Sánchez, C., Pérez-Vázquez, A., Palacios-Vélez, O. L., Castañeda-Chavez, M. R., & López-Collado, C. J. (2016). Manejo y actitud del productor sobre la fertilización nitrogenada en caña de azúcar: un estudio de caso. *RINDERESU*, 1(1), 26-34.
- Navarro-García, G., & Navarro-García, S. (2013). Química Agrícola: Química del suelo y de nutrientes esenciales para las plantas. (3ª ed.). Madrid, España: Mundi-Prensa. ISBN: 978-84-8476-656-8
- Nayekova, S. K., Aubakirova, K. M., Aitlessov, K. K., Demidchik, V. V., & Alikulov, Z. A. (2020). Impact of diatomite priming of seeds of hordeum vulgaris in salinity. *EurAsian Journal of BioSciences*, 14(1), 705-712.
- Pérez-López, E. (2013). Análisis de fertilidad de suelos en el laboratorio de Química del recinto de grecia, sede de occidente, Universidad de Costa Rica. *InterSedes*, 14(29), 6-18.
- Pilon, C., Soratto, R., & Moreno, L. (2013). Effects of soil foliar application of soluble silicon on mineral nutrition, gas exchange, and growth of potato plants. *Crop Science*, 53, 1605-1614. <http://doi.org/10.2135/cropsci2012.10.0580>
- Rivera, A., Moronta, M., González-Estopián, M., González, D., Perdomo, D., García, D. E., & Hernández, G. (2010). Producción de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) en condiciones de iluminación deficiente. *Zootecnia Tropical*, 28(1), 33-41.
- Roberts, T. L. (2007). *Right product, right rate, right time, right place*. IFA Workshop on Fertilizer Best Management Practices (FBMPs). Brussels, Belgium: International Plant Nutrition Institute.

- Rohanipoor, A., Norouzi, M., Moezzi, A., & Hassibi, P. (2013). Effect of Silicon on Some Physiological Properties of Maize (*Zea mays*) under Salt Stress. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 7(20), 71-79.
- Römheld, V., & Kirkby, E. (2010). Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant Soil*, 335, 155-180. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0520-1>
- Ruiz-González, R. O., & Victorino-Ramírez, L. (2015). Respuesta del policultivo jamaica-frijol-maíz a tratamientos de fertilización en Villaflores. Chiapas, México, *Agrociencia*, 49(5), 545-557.
- SAS Institute (2002). *Statistical Analysis System. User's Guide. Release 9.0*. Cary, NC, USA: SAS Institute, Inc.
- Shavit, U., Reiss, M., & Shaviv, A. J. (2003). Wetting mechanisms of gel-based controlled-release fertilizers. *Journal of Controlled Release*, 88(1), 71-83. [https://doi.org/10.1016/s0168-3659\(02\)00455-8](https://doi.org/10.1016/s0168-3659(02)00455-8)
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2020). *Avance de Siembras y Cosechas. Resumen nacional por cultivo*. Consultado el 17 de diciembre, 2020, desde http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do
- Silva, V. F. D., Moraes, J. C., & Melo, B. A. (2010). Influence of silicon on the development, productivity and infestation by insect pests in potato crops. *Ciência e Agrotecnologia*, 34, 1465-1469. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000600016>
- Snyder, G., Matichenkov, V., & Datnoff, L. (2006). Silicon. In: A. V. Barker, & D. J. Pilbeam (Eds.). *Handbook of Plant Nutrition*. (pp. 551-568). Boca Ratón, FL, USA: CRC Press. ISBN: 9780429134456
- Sosa-Rodriguez, B. A., & García-Vivas, Y. S. (2018). Eficiencia de uso del nitrógeno en maíz fertilizado de forma orgánica y mineral. *Agronomía Mesoamericana*, 29(1), 207-219. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.27127>
- Taiz, L., & Zieger, E. (2006). *Fisiología vegetal* (3ª ed.). Sunderland, MA, USA: Universitat Jaume. ISBN: 978-84-8021-601-2
- Turrent-Fernández, A., Camas-Gómez, R., López-Luna, A., Cantú-Almaguer, M., Ramírez-Silva, J., Medina-Méndez, J., & Palafox-Caballero, A. (2004). Producción de maíz bajo riego en el sur-sureste de México: II. Desempeño financiero y primera aproximación tecnológica. *Agricultura Técnica en México*, 30(2), 205-221.
- Turrent-Fernández, A., & Cortés-Flores, J. I. (2005). Ciencia y tecnología en la agricultura mexicana: I. Producción y sostenibilidad. *Terra Latinoamericana*, 23(2), 265-272.
- Vieira, C. K. P., Araújo, N. C. W., & da Silva, A. J. (2008). Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(6), 849-853. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800147>
- Walsh, O. S., Shafian, S., McClintick-Chess, J., Belmont, K., & Blanscet S. (2018). Potential of Silicon Amendment for Improved Wheat Production. *Plants*, 7(26), 1-13. <https://doi.org/10.3390/plants7020026>
- Wang, S., Wang, F., & Gao, S. (2015). Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 2837-2845. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3525-0>
- Wang, Z., Zhang, T. Q., Tan, C. S., Vadas, P., Qi, Z. M., & Wellen, C. (2018). Modeling phosphorus losses from soils amended with cattle manures and chemical fertilizers. *Science of the Total Environment*, 639, 580-587. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.141>
- Yang, L., Han, Y., Li, P., Li, F., Ali, S., & Hou, M. (2017). Silicon amendment is involved in the induction of plant defense responses to a phloem feeder. *Scientific Reports*, 7, 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04571-2>
- Yu-kui, R., Shi-ling, J., Fu-suo, Z., & Jian-bo, S. (2009). Effects of nitrogen fertilizer input on the composition of mineral elements in corn grain. *Revista Agrociencia*, 43(1), 21-27.
- Zaman, M., Zaman, S., Adhinarayanan, C., Nguyen, M. L., Nawaz, S., & Dawar, K. M. (2013). Effects of urease and nitrification inhibitors on the efficient use of urea for pastoral systems. *Soil Science and Plant Nutrition*, 59(4), 649-659. <https://doi.org/10.1080/00380768.2013.812940>
- Zamudio-González, B., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Martínez-Rodríguez, J. N., Celis-Euan, D. I., Valdivia-Bernal, R., & Zaragoza-Esparza, J. (2015). Eficiencia agronómica de fertilización al suelo de macro nutrientes en híbridos de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7), 1557-1569.