



Revista

AGROINNOVACIÓN

en el Trópico Húmedo

ISSN: 2215-5368

<http://revistas.tec.ac.cr/index.php/agroinn/index>

Incorporación del silicato de magnesio en la fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en La Vega, San Carlos, Costa Rica

Magnesium silicate addition to the mineral fertilization of corn (*Zea mays* L.) at La Vega, San Carlos, Costa Rica

Andrés Sancho Mora^{✉1}, Arnoldo Gadea Rivas²

Palabras clave

Enmienda, ácido orto silícico, inceptsol, silicio, silicatos, magnesio, fertilización, nutrimentos.

Key words

Amendment, ortho silicic acid, inceptsol, silicon, silicates, magnesium, fertilization, nutrients.

Resumen

Se realizó un experimento para evaluar el efecto de la inclusión de silicato de magnesio en la fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). El estudio se realizó en la finca La Vega, propiedad del Instituto Tecnológico de Costa Rica, ubicada en Florencia de San Carlos, Alajuela, Costa Rica. Las variables analizadas fueron altura de planta, número de hojas, peso seco de planta, longitud de mazorca, peso de mazorca, peso de 100 granos y rendimiento de grano. Los resultados obtenidos mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$) para el peso seco de planta, longitud de mazorca y peso de 100 granos, especialmente en tratamientos que incluyeron silicato de magnesio en la fertilización mineral. No obstante, el efecto observado se atribuyó al magnesio, por lo que se descartó el posible efecto del silicio sobre las variables evaluadas. No se logró demostrar que la incorporación de silicato de magnesio como parte de la fertilización mineral, permite disminuir la aplicación de fósforo en el cultivo de maíz.

Abstract

A field trial was established to quantify the effect of magnesium silicate addition on mineral fertilization of corn (*Zea mays* L.), was conducted at La Vega Farm, owned by Technological Institute of Costa Rica, located at Florencia, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. Variables evaluated were: plant height, number of total leaves, dry weight, cob length, cob weight, weight of 100 grains, and grain yield. Results showed significant differences ($p < 0.05$) for plant dry weight, cob length, and weight of 100 grains, mainly in treatments that included magnesium silicate magnesium silicate on fertilizer. Observed effects seems to be related to magnesium instead of silicium. It was not possible to verify if magnesium silicate addition had an effect on less P doses recommended for corn nutrition management.

1 Ing. Agrónomo. Palmares, Alajuela. ✉ andres9.3@hotmail.com

2 Profesor e investigador. Escuela de Agronomía ITCR. agadea@tec.ac.cr

Recibido: 19 de mayo del 2018

Aceptado: 15 de setiembre del 2018

Publicado: 30 de octubre del 2018

DOI: 10.18860/rath.v1i1.3926



Introducción

Los sistemas de producción agrícola dependen en gran medida del recurso suelo, el cual puede llegar a modificar sus propiedades químicas, físicas y biológicas a través del uso intensivo, lo que genera su degradación [1]. En consecuencia, puede ocurrir reducción en los rendimientos, aumentar costos de producción y generarse mayor impacto ambiental. Por ello, es importante enfocar los esfuerzos en recuperar y mejorar las condiciones de los suelos agrícolas con el fin de mantener y mejorar los rendimientos en los cultivos en el marco de una agricultura climáticamente inteligente.

En Costa Rica, los agricultores y técnicos realizan una corrección de la acidez del suelo con la aplicación de carbonatos de calcio o magnesio, los cuales neutralizan la acidez del suelo hasta valores aceptables para un mejor manejo de los cultivos [2]. Adicionalmente, realizan una fertilización basada en tres macronutrientes (N, P₂O₅, K₂O) mediante la aplicación de fertilizantes comerciales disponibles en el mercado. Estas prácticas dejan de lado la aplicación de otros nutrimentos que son esenciales para el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

No obstante, el mercado ofrece una gran variedad de fertilizantes que pueden mejorar las propiedades químicas de los suelos y la nutrición de los cultivos, siendo una alternativa para contribuir a resolver la problemática de su degradación química. Dentro de los productos que están teniendo mayor auge se encuentran los silicatos, los cuales pueden mejorar las condiciones químicas del suelo [1], [3]-[7] debido a que pueden actuar como un corrector de los problemas de acidez o bien funcionar como fertilizante, mejorando el estado nutricional de los cultivos al liberar nutrientes que se fijan al suelo o por el aporte de silicio. Debido a esto, diversos autores recomiendan su utilización como enmienda para mejorar los rendimientos en los cultivos [8], [6], [9].

Al aplicar silicatos al suelo se libera ácido ortosilícico (H₄SiO₄), el cual es la única forma de silicio disponible para las plantas [1]. El ácido ortosilícico puede desplazar los iones fosfatos (H₂PO₄⁻) que se encuentran fijados por óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio; también puede desplazar aquellos fosfatos unidos en los sitios de absorción de las arcillas [8], [6]. Este ácido también posee la capacidad de fijar los cationes de hierro y aluminio cuando se encuentran libres

en la solución del suelo, donde pueden generar problemas de toxicidad para los cultivos [9].

Al incorporar silicato de magnesio en suelos con problemas de acidez ocurre disociación del compuesto y se libera el ácido ortosilícico, el cual corrige la acidez y a su vez aumenta la concentración de iones Mg²⁺ en la solución del suelo, que pueden ser absorbidos por las plantas para realizar diversas funciones metabólicas [10].

El silicio es un elemento considerado no esencial para el desarrollo de los cultivos. Sin embargo, diversos estudios han encontrado concentraciones significativas de dicho elemento en la mayoría de plantas superiores, demostrando la importancia que este mineral puede tener como un elemento benéfico para los cultivos [11]. Las plantas obtienen silicio de la solución del suelo en forma de ácido ortosilícico [8], [5], [9], [12], [13]. Sin embargo, las plantas también pueden crecer en ausencia de este elemento [14]. Adicionalmente, esos autores indican que en aquellos cultivos en donde existe una presencia adecuada del nutriente, las plantas son más vigorosas, tienen mejor crecimiento vegetativo y mayor resistencia ante factores bióticos y abióticos negativos.

Las dos principales enmiendas silicatadas para uso agrícola corresponden al silicato de calcio (CaSiO₄) y al silicato de magnesio (MgSiO₄) [11]. Ambos compuestos poseen un poder de neutralización de la acidez distinto, debido al menor peso molecular que posee el magnesio en comparación al calcio [11].

El maíz es una de las plantas que más absorbe ácido ortosilícico; de hecho, se ha correlacionado el incremento del rendimiento del maíz con la aplicación de fertilizantes silicatados [5]. Los mismos autores indican que el cultivo puede extraer de 200 a 350 kg de Si por hectárea.

Puentes [15] señala que la aplicación de fertilizantes silicatados influye positivamente en los rendimientos del cultivo, indicando diferencias significativas en aquellos tratamientos con mayor dosis de fertilizante (400 kg/ha) que alcanzan rendimientos máximos cercanos a 50 t/ha de maíz para forraje.

De ese modo se ha demostrado que existe una correlación positiva entre el aumento de la dosis de fertilizantes silicatados y el rendimiento del cultivo de maíz, que muestra aumentos en la

producción que van desde 10% hasta 40% más en las cosechas, lo cual permite aumentar la productividad [5]. Además, en maíz este elemento puede llegar a representar en promedio hasta 2% de la materia seca [16].

La estructura con mayor demanda de silicio en el cultivo de maíz corresponde al tejido foliar, seguido del tallo, el raquis y finalmente la semilla, la cual posee una menor demanda y/o acumulación del nutriente [17]. La mayor concentración de silicio en las hojas del cultivo se debe a que el elemento es absorbido desde la solución del suelo y transportado principalmente por efecto de la transpiración de las plantas, lo cual facilita su movilidad hasta las hojas en donde se acumula en forma de fitolitos y tricomas [17].

A pesar de los estudios que resaltan la importancia de los silicatos en los cultivos, la aplicación de fertilizantes con ese nutriente no cuenta con suficientes estudios a nivel nacional que permitan conocer los verdaderos beneficios que podrían generar sobre las condiciones químicas de los suelos tropicales de Costa Rica [18]. En este contexto, se planteó un experimento con el propósito de evaluar el efecto de la inclusión del silicato de magnesio en la fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays* L.).

Materiales y métodos

El trabajo se realizó en la finca La Vega, propiedad del Instituto Tecnológico de Costa Rica, ubicada en Florencia, San Carlos, Alajuela. La misma se encuentra a una altura de 75 msnm, entre los 10°4' latitud norte y 84°45' longitud oeste.

Según datos del Comité Sectorial Regional Agropecuario [19], el lugar se caracteriza por presentar una temperatura promedio de 26°C, humedad relativa de 80%-90%, evapotranspiración potencial promedio de 1150 mm/año y evapotranspiración real promedio de 950 mm/año. La precipitación anual promedio es 3500 mm, la cual es muy variable según la zona específica de la región.

El suelo donde se realizó el experimento está conformado por materiales de deposición reciente, de origen aluvial y con características hidromórficas [20]. Se clasifica dentro del orden Inceptisol caracterizado por la presencia de un epipedón ócrico o úmbrico sobre un horizonte subsuperficial

cámbico, de fertilidad media y textura franco-arcillosa [20], [21]. La mayor parte de los suelos en la finca pertenecen al suborden Tropepts, debido al régimen de temperatura Isohipertérmico y al gran grupo Eutropepts por saturación de bases mayor al 50% a una profundidad de 25 cm y 100 cm [20].

Para el año 2016, periodo en el cual se realizó la investigación, el análisis de suelo presentó una sumatoria de bases de 17,97, capacidad de intercambio catiónico de 18,27 y saturación de acidez correspondiente a 3,65%.

El ensayo se ejecutó en un lote cultivado previamente con maíz. La preparación del área se realizó mediante control químico de malezas con la aplicación de paraquat (1,5 L/ha) 15 días antes del establecimiento del cultivo, sin necesidad de realizar ningún tipo de labranza. La siembra se realizó con una sembradora neumática de precisión calibrada para establecer 6 semillas/metro lineal (16 cm de distancia entre plantas) y distancia entre hileras de 0,9 m; lo que permitió obtener una población teórica de 66 666 plantas/ha. Se utilizó semilla de maíz blanco variedad Los Diamantes 8843. Una vez realizada la siembra, se delimitó el área efectiva de la investigación y dentro de la misma cada una de las unidades experimentales.

Con el dispensador para agroquímicos de la sembradora se aplicó terbufos (10 kg/ha) en la hilera de siembra, como parte del control fitosanitario. Para minimizar el riesgo de competencia de otras especies posteriormente se aplicó Paraquat y atrazina (1,5 L/ha y 2 kg/ha respectivamente). A los 39 días después de la siembra (dds) se aplicó abamectina para el control del gusano cogollero, luego de realizar un muestreo de incidencia y severidad de dicha plaga.

La cosecha se realizó de forma manual una vez alcanzada la madurez fisiológica del cultivo. En primera instancia, se dobló las plantas a partir del nudo anterior de la inserción de la mazorca a los 86 dds. Luego de determinarse el momento óptimo de cosecha, según la humedad de las mazorcas en campo, se procedió a la recolección manual de las plantas y mazorcas del cultivo 105 dds.

El estudio consistió en la aplicación de magnesio, azufre y silicio conjuntamente con la fertilización tradicional de la finca. Esta fertilización consistió en la aplicación de 120 kg/ha de nitrógeno, 60 kg/ha

de fósforo (P_2O_5) y 90 kg/ha de potasio (K_2O). Los tratamientos utilizados fueron:

- T1: fertilización finca (testigo) (NPK)
- T2: fertilización finca + azufre (NPKS)
- T3: fertilización finca + azufre + magnesio (NPKSMg)
- T4: fertilización finca + azufre + magnesio + silicio (NPKSMgSi)
- T5: fertilización finca, con reducción del 50% de fósforo + azufre + magnesio + silicio (NP^{*}KSMgSi).

La incorporación de los nutrientes se realizó de manera fraccionada en tres momentos de aplicación según la etapa fenológica del cultivo. La primera aplicación se realizó al momento de la siembra incorporando distintos fertilizantes comerciales. En esta fertilización, se adicionó la cantidad de fósforo y otros nutrientes según cada tratamiento. La segunda fertilización se realizó 25 dds y la tercera 45 dds.

En el experimento se utilizaron diversos fertilizantes comerciales utilizados a nivel nacional (Cuadro 1), cuya composición química se describe a continuación:

- Fosfato diamónico (DAP): N:18% y P_2O_5 : 45%
- Cloruro de potasio (KCl): K_2O : 60%
- Urea ($CO(NH_2)_2$): N: 46%
- Sulfato de potasio (K_2SO_4): K_2O : 50% y S:18%
- Sulfato de magnesio ($MgSO_4$): MgO: 16% y S: 13%
- Silicato de magnesio: MgO: 30% y SiO_2 : 31%.

El área experimental utilizada fue 992 m², la cual se dividió en 25 unidades experimentales, correspondientes a las cinco repeticiones de cada uno de los cinco tratamientos. Cada unidad experimental midió 39,7 m² y como parcela útil en cada una se utilizaron tres hileras centrales de cuatro metros de longitud.

En diez plantas seleccionadas al azar dentro del área útil de cada unidad experimental se midieron tres variables de crecimiento:

- Altura de la planta durante la floración

masculina del cultivo, en el momento en que más del 50% de las plantas de la parcela útil liberaban polen.

- Número de hojas funcionales.
- Peso seco de las plantas al final del ciclo del cultivo, calculado a partir de una muestra de diez plantas por unidad experimental que fueron pesadas, picadas y mezcladas para medir una submuestra de 200 g, la cual se secó en una estufa de aire forzado a 55°C hasta alcanzar peso constante.

Se midieron cuatro variables de producción en la etapa final de desarrollo del cultivo:

- Longitud de mazorca, determinada por la medición de 10 mazorcas al azar en cada unidad experimental al momento de la cosecha.
- Peso de la mazorca, determinado a través del peso expresado en gramos (balanza analítica) de las mazorcas (sin brácteas) seleccionadas para determinar la longitud.
- Peso seco de 100 granos, obtenidos de las mazorcas cosechadas en cada unidad experimental, pesados en fresco; posteriormente se seleccionó una submuestra al azar de 100 g y se colocó en estufa de aire forzado a 55°C para secar los granos y obtener el peso seco de los mismos.
- Rendimiento de grano, el cual se estimó mediante la fórmula detallada a continuación [22]:

$$\text{Rendimiento (en kg ha}^{-1}\text{)} = PM * MC * \% Gr * \% MS * FC$$

Donde:

PM = Peso promedio de las mazorcas (sin brácteas)

MC = Cantidad de mazorcas cosechadas (por unidad de área)

% Gr = Cociente del peso promedio de los granos entre el peso promedio de las mazorcas

% MS = Peso de la materia seca del grano

FC = Factor de conversión / 8600

Cuadro 1. Descripción de tratamientos según la fuente utilizada en la fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) relacionada con el uso de azufre, magnesio y silicio. Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Table 1. Description of the treatments according to the source used for the mineral fertilization of the corn crop (*Zea mays* L.) related to the use of sulfur, magnesium, and silicon. La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Tratamiento	Producto	Dosis (kg/ha)						
		Cantidad	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	S	SiO ₂
T1	Urea	210						
	DAP	130	120	60	90	0	0	0
	KCl	150						
T2	Urea	210						
	DAP	130	120	60	90	0	23,2	0
	K ₂ SO ₄	51						
	KCl	108						
T3	Urea	210						
	DAP	130	120	60	90	28,7	23,2	0
	KCl	150						
	MgSO ₄	179,5						
T4	Urea	210						
	DAP	130	120	60	90	28,7	23,2	29,7
	Silicato de Mg	95,6						
	K ₂ SO ₄	51						
	KCl	108						
T5	Urea	235						
	DAP	65	120	30	90	28,7	23,2	29,7
	Silicato de Mg	95,6						
	K ₂ SO ₄	51						
	KCl	108						

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar (DCA), asignando de manera aleatoria las cinco repeticiones de los cinco tratamientos a cada una de las unidades experimentales. El análisis de datos se realizó mediante modelos lineales generales y mixtos (MLMix), con corrección de heterocedasticidad cuando fue necesario y la prueba de comparación múltiple Di Rienzo, González y Casanoves (DGC) en caso de encontrarse diferencias significativas entre tratamientos. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa InfoStat/P [23], con un nivel de significancia de 0,05.

Resultados y discusión

Variables de crecimiento

No se encontró diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$) para las variables altura de la planta y cantidad de hojas. La variable peso seco de plantas sí mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos (Cuadro 2).

Estos resultados permiten inferir que la incorporación de silicio, azufre y magnesio en la fertilización no ejercen un efecto diferencial sobre la altura de las plantas y la cantidad de hojas de maíz, bajo las condiciones establecidas en este ensayo.

Cuadro 2. Efecto de cinco formulaciones fertilizantes sobre variables de crecimiento (media y error estándar) de plantas en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Table 2. Effect of five fertilizer-formulations on the average height of plants, number of leaves, and dry weight of plants in the corn crop (*Zea mays* L.). La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Tratamiento	Altura (m)	Cant. hojas	Peso seco (kg/ha)
T1- NPK	2,06 ± 0,03	11,82 ± 0,07	4729 ± 273 ^b
T2- NPKS	2,05 ± 0,02	11,80 ± 0,12	4786 ± 259 ^b
T3- NPKSMg	2,04 ± 0,03	11,74 ± 0,19	5364 ± 221 ^a
T4- NPKSMgSi	2,01 ± 0,02	11,60 ± 0,16	5542 ± 109 ^a
T5- NP ¹ KSMgSi	2,00 ± 0,05	11,68 ± 0,17	4624 ± 74 ^b
p-valor	0,6837	0,7361	<0,0001

Para cada variable, letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba DGC ($\alpha = 0,05$).
For each variable, different letters indicate significant differences according to DGC Test ($\alpha = 0.05$).

Estos resultados concuerdan con los reportados por otros autores [24] en maíz y [25] canola, aunque los últimos encontraron diferencias en variables como área foliar. Se ha evidenciado el aumento en altura de plantas de avena forrajera y maíz respectivamente, al incorporar silicio en la fertilización mineral del cultivo [26], [27].

La altura de las plantas de maíz se define mayoritariamente por sus características genéticas, debido a que es un carácter que posee alta heredabilidad [28]. Estos autores mencionan que algunos estudios de selección y mejora genética del maíz han demostrado una heredabilidad hasta de 0,8; razón por la cual es probable que la expresión fenotípica de la altura del cultivo en la presente investigación haya estado definida principalmente por el componente genético y en menor grado por los factores ambientales.

La ausencia de diferencias observada entre el tratamiento 4 (correspondiente a la dosis completa de fósforo) y el tratamiento 5 (mitad de la dosis de dicho nutriente) sugiere que la incorporación de silicato de magnesio no tiene efecto sobre la disponibilidad de fósforo para el cultivo de maíz. Sin embargo, el análisis químico de suelos de la parcela evaluada mostró que la concentración de fósforo se encuentra dentro de un rango óptimo según la tabla de niveles críticos de nutrientes

indicada por Bertsch [29], de modo tal que la probabilidad de respuesta del cultivo a la fertilización fosforada es baja. Por otra parte, se observó que el suelo no mostró problemas de acidez, por lo que la absorción de los diferentes nutrientes no se comprometió por dicho factor, siendo el fósforo el nutrimento con mayor fijación por parte de los suelos cuando existen problemas de acidez [2].

Respecto a la variable de peso seco de las plantas, los resultados obtenidos indican diferencias altamente significativas entre los tratamientos, siendo T3 y T4 los superiores (5364 kg/ha y 5542 kg/ha respectivamente) por lo que fue posible observar efecto de la incorporación de Mg y no del Si en la fertilización. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Araya *et. al.* [30] para sorgo evaluado en un Ultisol bajo invernadero, donde se utilizaron fuentes de silicio en contraste con fuentes de magnesio y se encontraron diferencias significativas en los tratamientos que aportaron magnesio respecto al testigo para las variables de peso seco de la parte aérea y peso seco de la raíz, mientras que para los fertilizantes silicatados no se encontraron diferencias estadísticas en comparación con el testigo, lo que indica que el silicio bajo las condiciones evaluadas no fue fundamental para el crecimiento del cultivo.

Al evaluar el efecto del silicato de magnesio sobre la reducción de fósforo aplicado al cultivo, mediante la comparación de los tratamientos 4 (dosis completa de fósforo) y 5 (dosis media de fósforo), los resultados sugieren que la incorporación de silicato de magnesio en la fertilización mineral del cultivo no ejerce efecto sobre la disponibilidad de fósforo en las condiciones del ensayo. Estos resultados concuerdan con los encontrados por Furcal-Beriguete y Herrera-Barrantes [18], quienes evaluaron el contenido de fósforo en el suelo de finca La Vega antes y después de la aplicación de silicio para el cultivo de arroz, obteniendo valores similares en ambos momentos y sin encontrar mayor rendimiento del cultivo.

Respecto a la disponibilidad de fósforo se encontró que la adición de silicato de magnesio a la fertilización en las condiciones del ensayo, no concuerdan con lo reportado por estudios donde se indica que al adicionar silicatos al suelo la disponibilidad de fósforo aumenta debido al efecto del ácido ortosilícico (H_4SiO_4) de desplazar los aniones de fósforo que se encuentran fijados por cationes de hierro y aluminio principalmente, aumentado la concentración de dicho nutriente en la solución del suelo [8], [6].

Se han encontrado resultados positivos al incorporar silicatos al suelo para el cultivo de arroz, el cual produjo mayor biomasa, altura y número de hijos con dosis de 20 kg/ha y 40 kg/ha de silicio [31]. Dicho estudio se realizó en dos tipos de suelos y el que presentó mayor respuesta fue un Ultisol de baja fertilidad, en contraste con un Alfisol con fertilidad media. Se puede concluir entonces que la respuesta del cultivo a la fertilización silicatada dependerá directamente de las características químicas que posea el suelo donde se establezca el cultivo.

Variables de producción

Según los resultados del análisis de varianza no hubo diferencias significativas entre tratamientos para las variables peso de mazorca y rendimiento del grano, aunque sí en las variables longitud de la mazorca y peso de 100 granos (Cuadro 3).

La media estadísticamente superior en el tratamiento 4 sugiere que la incorporación de silicato de magnesio posee un efecto positivo sobre la variable longitud de mazorca y que este efecto se podría deber a la adición de silicio por parte del fertilizante. En otro estudio se obtuvo diferencias estadísticamente significativas al aplicar silicio de manera foliar al cultivo de maíz, logrando una

Cuadro 3. Efecto de cinco formulaciones fertilizantes sobre variables de producción (media y error estándar) en el cultivo (*Zea mays* L.). Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Table 3. Effect of five fertilizer-formulations on production (mean and standard error) variables in the corn crop (*Zea mays* L.). La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Tratamiento	Longitud mazorca (cm)	Peso de la mazorca (g)	Peso de 100 granos (g)	Rendimiento de grano (kg/ha)
T1- NPK	16,48 ± 0,38 ^b	152,72 ± 6,76	38,54 ± 1,61 ^b	4955 ± 315
T2- NPKS	15,77 ± 0,13 ^c	151,89 ± 6,37	38,77 ± 1,75 ^b	4850 ± 193
T3- NPKSMg	17,05 ± 0,28 ^b	151,74 ± 7,35	44,73 ± 1,24 ^a	4841 ± 310
T4- NPKSMgSi	17,83 ± 0,33 ^a	148,72 ± 4,62	40,78 ± 1,26 ^b	4814 ± 160
T5- NP [*] KSMgSi	16,73 ± 0,36 ^b	155,62 ± 11,08	40,74 ± 2,13 ^b	4982 ± 499
p-valor	0,0001	0,9706	0,0367	0,9932

Para cada variable, letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba DGC ($\alpha = 0,05$).
For each variable, different letters indicate significant differences according to DGC Test ($\alpha = 0.05$).

longitud de mazorca de 17,30 cm con dosis 200 mL/ha del producto comercial, en comparación con 15,95 cm logrados con dosis de 100 mL/ha [27]. Cabe destacar que la forma de aplicación del producto difiere entre ambas investigaciones. En este ensayo, con el tratamiento 5 se obtuvo un tamaño de mazorcas menor al tratamiento 4, lo cual sugiere que la incorporación de silicato de magnesio no influyó en la disponibilidad de fósforo para el cultivo de maíz, bajo las condiciones establecidas en el ensayo.

Para la variable peso de 100 granos, se observó que el valor superior en los datos se presentó en el tratamiento 3, correspondiente a un tratamiento sin adición de silicio; razón por la cual se descartaría un posible efecto de silicio en el aumento productivo de esta variable.

Los resultados obtenidos sugieren que el silicato de magnesio no favoreció el llenado de los granos, pues los tratamientos 4 y 5 no fueron distintos al tratamiento testigo. No obstante, Jiménez [27] encontró efectos positivos sobre el peso de los granos de maíz al incorporar silicio, obteniendo promedios superiores en los tratamientos donde se adicionó una dosis media de dicho elemento en comparación con tratamientos de dosis menores.

Considerando ambas variables (longitud de mazorca y peso de 100 granos) los resultados muestran que con la incorporación de Si en la formulación se obtuvo mazorcas más largas con granos más livianos que en el tratamiento 3 (NPKSMg).

Por otra parte, el magnesio del silicato evaluado no presentó un efecto diferencial sobre el rendimiento de grano, lo que se evidenció al no encontrarse diferencias en ninguno de los tratamientos para esa variable. Según lo anterior, se puede concluir que ninguno de los componentes del silicato de magnesio ejerció efecto alguno sobre el rendimiento del grano del cultivo de maíz. Estos resultados coinciden con lo obtenido por Hurtado [24] el cual no logró mayor rendimiento en el cultivo de maíz con la adición de este mineral en comparación con la fertilización testigo.

La no respuesta del cultivo a la adición de silicio mediante la incorporación de silicato de magnesio, puede deberse a las características propias del suelo donde se realizó el ensayo: un Inceptisol caracterizado por la presencia de

minerales primarios (mica) y/o arcillas de alófana que presentan altas cantidades de silicio en su estructura [32], en comparación a otros tipos de suelos como los Ultisoles y Oxisoles, que son deficientes del nutrimento en cuestión. Por lo tanto, un posible efecto de silicato de magnesio sobre la disponibilidad de fósforo no se puede comprobar debido a las características químicas presentes en el suelo del estudio.

La respuesta del cultivo a la fertilización con magnesio para las variables evaluadas sugiere un efecto positivo de dicho nutriente, aunque los resultados del análisis químico del suelo donde se estableció el ensayo mostraron que el nutriente se encuentra dentro del rango óptimo, según la escala de Bertsch [29], razón por la cual la fertilización con magnesio en el suelo evaluado podría tener una baja probabilidad de respuesta.

Conclusiones y recomendaciones

La incorporación de silicato de magnesio en la fertilización mineral del cultivo maíz generó un aumento sobre el peso seco de las plantas, la longitud de las mazorcas y el peso de 100 granos; no ejerció efecto sobre la altura de la planta, número de hojas, peso de la mazorca o rendimiento de grano del cultivo de maíz. Así mismo, se determinó la importancia y potencial que puede tener la incorporación del magnesio en la fertilización mineral del cultivo de maíz para forraje, al aumentar la producción de biomasa al adicionar el nutrimento.

Únicamente para la variable longitud de mazorca se observó efecto del silicio incorporado a la fertilización, lo cual permite descartar un posible efecto directo en el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz.

No se logró concluir de manera precisa, si la inclusión de silicato de magnesio en la fertilización del cultivo de maíz permitiría reducir las dosis de fósforo debido a que únicamente se encontró diferencias entre tratamientos en las variables peso seco y longitud de la mazorca y no se encontró diferencias en altura de las plantas, número de hojas, peso de mazorca, peso de 100 granos y rendimiento de grano.

Se recomienda evaluar dosis superiores de silicato de magnesio para valorar el efecto de un incremento del mismo en el cultivo de maíz, así como realizar

una comparación entre distintas fuentes de silicio y/o magnesio y ejecutar ensayos similares en suelos deficientes en fósforo para valorar el efecto de la reducción de la dosis de este elemento en presencia de silicatos.

Bibliografía

- [1] N. Osorio, "Manejo de nutrientes en suelos del trópico", Medellín: Editorial Medellín, 2014.
- [2] D. Kass, "Fertilidad de suelos", San José: EUNED, 2007.
- [3] R. Moreno, T. García, J. Stroch, M. Muñoz, E. Yáñez, E. Pérez, "Fertilización y corrección edáfica de suelos agrícolas con productos orgánicos", *Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*, vol. 9, Set., pp 4-34, 2011.
- [4] S. Pulgarín, "Respuesta de una mezcla forrajera establecida de clima frío, a la aplicación de silicato de magnesio", Tesis Bach., Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2011.
- [5] E. Quero, "La biosilicificación proceso biológico fundamental en la productividad vegetal", *Protección y Nutrición de Hortalizas y Frutas*, vol. 6, no. 39, pp 72-76, 2008.
- [6] V. Matichenkov, "Deficiencia y funcionalidad del silicio en suelos, cosechas y alimentos", *II Conferencia Internacional sobre Eco-Biología del Suelo y el Compost*, 2008, pp 431-438.
- [7] F. Vindas, "Efecto de la fertilización edáfica con dos fertilizantes silicatados sobre el pH y el aluminio intercambiable del suelo, la severidad de la sigatoka negra y la producción del banano (*Musa AAA*, cv. Grande Naine)", Tesis Lic., Tecnológico de Costa Rica, San Carlos, Alajuela, 2011.
- [8] C. Álvarez, W. Osorio, "Silicio agrónomicamente esencial", Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [9] G. Synder, V. Matichenkov, L. Datnoff, "Silicon", en *Handbook of Plant Nutrition*, A. Barker y D. Pilbeam, Eds. New York: CRC Press, 2006, pp 551-562.
- [10] E. Quero, "Nutrición con silicio y sus aplicaciones a cultivos a cielo abierto y en agricultura protegida: Un pequeño recorrido por la naturaleza", *Simposio Internacional de Nutrición Vegetal: Guadalajara*, 2009, pp 1-38.
- [11] G. Navarro, S. Navarro, "Química agrícola: Química del suelo y de nutrientes esenciales para las plantas", Madrid: Mundi-Prensa, 2013.
- [12] L. Datnoff, G. Snyder, G. Korndörfer, "Silicon in Agriculture". Amsterdam: Elsevier Science, 2001.
- [13] E. Epstein, "The anomaly of silicon in plant biology", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 91, Ene., pp 11-17, 1994.
- [14] J. Raya, C. Aguirre, "El Papel del Silicio en los Organismos y Ecosistemas", *Conciencia Tecnológica*, vol. 43, Ene.-Jun., pp 42-46, 2012.
- [15] J. Puentes, "Comparación de la fertilización tradicional con la fertilización a base de silicio en la producción de maíz", Tesis B.Sc., Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Coahuila, 2016.
- [16] J. Azcón, M. Talón, *Fundamentos de fisiología vegetal*, Madrid: McGraw-Hill, 2013.
- [17] E. Quero, *Nutrición con silicio y sus aplicaciones a cultivos a cielo abierto y en agricultura protegida*, Guadalajara, 2015.
- [18] P. Furcal-Beriguete, A. Herrera-Barrantes, "Efecto del silicio y plaguicidas en la fertilidad del suelo y rendimiento del arroz", *Agronomía Mesoamericana*, vol. 24, no.2, pp 365-378, 2013.
- [19] Comité Sectorial Regional Agropecuario, "Plan Regional de Desarrollo Región Huetar Norte 2011 – 2014", Comité Sectorial Regional Agropecuario, 2011.
- [20] J. Núñez, "Cartografía detallada de suelos de la finca Peñas Blancas, San Carlos", Tesis Lic., Universidad de Costa Rica, San José, 1979.
- [21] P. Furcal-Beriguete, A. Barquero-Badilla, "Respuesta del plátano a la fertilización con P, K y S durante el primer ciclo productivo", *Agronomía Mesoamericana*, vol. 24, no. 2, pp 317-327, 2013.
- [22] A. Espinosa-Calderón, M. Tadeo-Robledo, A. Turrent-Fernández, M. Sierra-Masías, N. Gómez-Montiel, B. Zamudio-González, "Rendimiento de variedades precoces de maíz grano amarillo para valles altos de México", *Agronomía Mesoamericana*, vol. 24, no. 1, pp 93-99, 2013.
- [23] JA, DiRienzo, F Casanoves, MG Balzarini, L. González, M. Tablada, C Robledo, "InfoStat versión 2014". Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, 2014.
- [24] C. Hurtado, "Estudio de alternativas de fertilización edáfica y foliar, en un híbrido comercial de maíz (*Zea mays* L.), en la zona de Balzar, Provincia del Guayas", Tesis B.Sc., Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2014.
- [25] B. Gómez, M. Cepeda, "Efecto de la fertilización química y organomineral sobre la producción de canola en secano bajo labranza reducida en Michoacán, México", *Información Técnica Económica Agraria*, vol. 106, no. 3, pp 170-183, 2010.
- [26] O. Borda, F Barón, M Gómez, "El silicio como elemento benéfico en avena forrajera (*Avena sativa* L.): respuestas fisiológicas de crecimiento y manejo", *Agronomía Colombiana*, vol. 25, no. 2, pp 273-279, 2007.
- [27] E. Jiménez, "Evaluación de dosis y fuentes de silicio líquido aplicado foliarmente en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.)", Tesis B. Sc., Universidad de Guayaquil, Guayaquil, 2016.

- [28] R. Paliwal, G. Granados, H. Lafitte, A. Violic, "El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción", Roma: FAO, 2001.
- [29] F. Bertsch, "El análisis de suelos: Una herramienta para diagnosticar los problemas nutricionales de los suelos", 2011. [en línea]. Disponible en: <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/LSF/AnalisisSuelos.pdf>. [Accesado 4 Mar. 2016]
- [30] M. Araya, M. Camacho, E. Molina, G. Cabalceta, "Evaluación de fertilizantes líquidos con silicio, calcio o magnesio sobre el crecimiento del sorgo en invernadero", *Agronomía Costarricense*, vol. 39, no. 2, pp 47-59, 2015.
- [31] B. Name, J. Villarreal, "Compendio de resultados de investigación del programa de suelos del IDIAP: Estudios de suelos Ultisoles y Alfisoles realizados en las estaciones experimentales de Cabalcito, Guarumal y Río Hato", Ciudad Panamá: Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá, 2004.
- [32] H. Fassbender, E. Bornemisza, "Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina", San José: IICA, 1987.

De acuerdo con la norma IEEE, este documento debe citarse:

A. Sancho-Mora, A. Gadea-Rivas. "Efecto de la incorporación del silicato de magnesio en la fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en finca La Vega, San Carlos, Costa Rica". *Revista AgroInnovación en el Trópico Húmedo*, vol. 1, no. 1, pp 25-34, 2018, DOI: 10.18860/rath.v1i1.3926.