

**EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE SILICATO DE MAGNESIO  
EN LA FERTILIZACIÓN MINERAL DEL CULTIVO DE MAÍZ  
(*Zea mays L.*) EN FINCA LA VEGA, SAN CARLOS**

**ANDRÉS SANCHO MORA**



Carrera de Ingeniería en  
Agronomía  
Tecnológico de Costa Rica  
Sede Regional San Carlos

Trabajo final de graduación presentado a la Escuela de Agronomía como  
requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en  
Agronomía

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
SEDE REGIONAL SAN CARLOS**

**2016**

**EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE SILICATO DE MAGNESIO  
EN LA FERTILIZACIÓN MINERAL DEL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea  
mays L.*) EN FINCA LA VEGA, SAN CARLOS**

**ANDRÉS SANCHO MORA**



Carrera de Ingeniería en  
Agronomía  
Tecnológico de Costa Rica  
Sede Regional San Carlos

Trabajo final de graduación presentado a la Escuela de Agronomía como  
requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en  
Agronomía

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
SEDE REGIONAL SAN CARLOS**

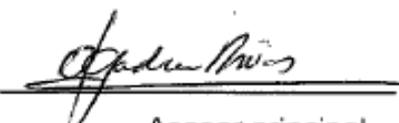
**2016**

**EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE SILICATO DE MAGNESIO  
EN LA FERTILIZACIÓN MINERAL DEL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea  
mays L.*) EN FINCA LA VEGA, SAN CARLOS**

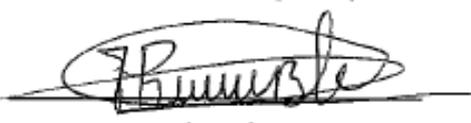
**ANDRÉS SANCHO MORA**

**Aprobado por los miembros del Tribunal Evaluador:**

Ing. Agr. Arnoldo Gadea Rivas, M. Sc.

  
Asesor principal

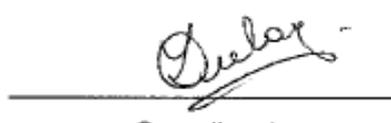
Ing. Agr. Parménides Furcal Berigüete, M. Sc.

  
Jurado

Ing. Agr. José Gerardo Chaves Alfaro, MAP.

  
Jurado

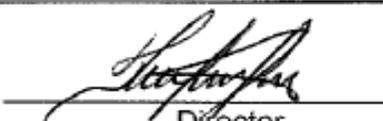
Ing. Agr. Zulay Castro Jiménez, MGA.

  
Coordinadora

Trabajos Finales de Graduación

---

Ing. Agr. Luis Alberto Camero Rey, M. Sc.

  
Director  
Escuela de Agronomía

**2016**

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo de investigación a Dios primero por brindarme la sabiduría y el conocimiento para concluir una etapa más en mi vida.

Dedicatoria especial a mis abuelos Guido Sancho y Ana Teresa Arroyo.

A mis padres Alberto Sancho y Denia Mora, a mis hermanas Paola Sancho y Anduriña Sancho que me brindaron el apoyo y las herramientas necesarias para lograr las metas propuestas a la fecha.

A mis compañeros(as) y amigos(as) quienes durante el periodo de estancia en la institución, me brindaron apoyo necesario para lograr metas personales y profesionales, consiguiendo con ello llegar a ser una mejor persona.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ing. Agr. Arnoldo Gadea Rivas, M. Sc, por el gran conocimiento transmitido y por el apoyo brindado a nivel profesional y personal desde el planteamiento de la investigación, desarrollo y conclusión de la misma.

A la Ing. Marlen Camacho por el apoyo brindado en la realización de los análisis estadísticos de los datos del proyecto.

A Marco Vinicio Salazar y Carlos Ramón Araya, colaboradores de la institución los cuales fueron un gran apoyo a nivel de campo para lograr el establecimiento, manejo y cosecha del cultivo.

Finalmente, al Instituto Tecnológico de Costa Rica y en especial a la Escuela de Agronomía, profesores y colaboradores en general de la institución que me brindaron oportunidad y las herramientas necesarias para poder llevar a cabo mis estudios en la institución.

## TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	i
TABLA DE FIGURAS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General .....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Silicatos.....	3
2.1.1 Generalidades de los silicatos .....	3
2.1.2 Tipos de silicatos .....	4
2.1.3 Silicio en el suelo.....	6
2.1.4 Uso de silicatos como enmienda.....	7
2.1.5 Silicio en las plantas .....	9
2.1.6 Importancia del silicio en el cultivo de Maíz.....	12
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	14
3.1 Localización del área de estudio .....	14
3.2 Características químicas del suelo.....	14
3.3 Establecimiento y manejo del cultivo.....	15
3.3.1 Preparación del terreno .....	15
3.3.2 Siembra del cultivo .....	15
3.3.3 Manejo fitosanitario y control de malezas.....	15
3.3.4 Cosecha del cultivo .....	16

3.4	Descripción de los tratamientos a evaluar.....	16
3.5	Variables de respuesta:.....	22
3.5.1	Variables de crecimiento .....	22
3.5.2	Variables de rendimiento.....	22
3.6	Diseño experimental y arreglo de los tratamientos.....	24
3.7	Croquis o especificación de diseño de tratamientos .....	24
3.8	Área experimental y unidad experimental .....	25
3.9	Modelo estadístico .....	26
3.10	Número de repeticiones y grados de libertad del error.....	26
3.11	Análisis de datos .....	27
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
4.1	Variables de crecimiento .....	28
4.1.1	Altura de la planta.....	28
4.1.2	Número de hojas .....	32
4.1.3	Peso seco de las plantas.....	34
4.2	Variables de rendimiento.....	38
4.2.1	Longitud de la mazorca .....	38
4.2.2	Peso de la mazorca.....	41
4.2.3	Peso seco de 1000 granos.....	43
4.2.4	Rendimiento de grano .....	46
5.	CONCLUSIONES.....	49
6.	RECOMENDACIONES .....	50
7.	BIBLIOGRAFIA: .....	51
8.	ANEXOS .....	57

## LISTA DE CUADROS

CUADRO	TITULO	PAGÍNA
1	Niveles de silicio para el cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> L.), expresado en gramos de silicio, por cada kilogramo de materia seca.	13
2	Aporte total de nutrientes incorporado por tratamiento en la fertilización mineral del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) relacionada con el uso de azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	17
3	Descripción de tratamientos en primera fertilización mineral del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) relacionada con el uso de azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	18
4	Descripción de tratamientos en segunda fertilización mineral del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) relacionada con el uso de azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016	19
5	Descripción de tratamientos en tercera fertilización mineral del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) relacionada con el uso de azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	20
6	Principales características de los productos incorporados en la fertilización mineral del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) relacionada con el uso de azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	21
7	Número de parcela asignada por tratamiento y su respectiva repetición en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016	24
8	Grados de libertad según las distintas causas de variación.	26
9	Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos en la altura del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> L.), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	29

- 10 Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos del número de hojas del cultivo de maíz (*Zea mays* L.), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016. 33
- 11 Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos del peso seco de las plantas de maíz (*Zea mays* L.), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016. 35
- 12 Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos de la longitud de mazorca del cultivo de maíz (*Zea mays* L.), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016. 39
- 13 Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos del peso de la mazorca del cultivo de maíz (*Zea mays* L.), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016. 42
- 14 Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos del peso seco de 1000 granos del cultivo de maíz (*Zea mays* L.), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016. 44
- 15 Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos en el rendimiento de grano del cultivo de maíz (*Zea mays* L.), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016. 47

## TABLA DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>	<b>TITULO</b>	<b>PAGÍNA</b>
1	Representación esquemática de los tetraedros de silicio.	3
2	Arreglo espacial de los tratamientos, dentro de cada unidad experimental en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	24
3	Dimensiones de cada unidad experimental, con sus respectivos bordes, en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	25
4	Altura de las plantas de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) fertilizadas con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	28
5	Número de hojas del cultivo maíz ( <i>Zea mays</i> L.) fertilizado con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	32
6	Peso seco de las plantas de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) fertilizadas con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	34
7	Longitud de la mazorca del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) fertilizado con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	38
8	Peso de la mazorca del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) fertilizado con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	41
9	Peso seco de 1000 granos cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) fertilizado con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	43
10	Rendimiento de grano estandarizado al 14% de humedad del cultivo de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) fertilizado con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.	46

## RESUMEN

La presente investigación planteó como objetivo principal evaluar el efecto de la inclusión de silicato de magnesio en la fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays L.*). La misma se realizó en Finca La Vega, propiedad del Tecnológico de Costa Rica, ubicada en Florencia de San Carlos, Alajuela; la misma posee suelo de orden inceptisol, de fertilidad media y textura franco-arcillosa. Para el desarrollo de la investigación se utilizaron cinco tratamientos, con cinco repeticiones, para un total de veinticinco unidades experimentales, las cuales se establecieron dentro de un área de 992,2 m<sup>2</sup>, utilizando un diseño experimental Completamente al Azar. Las variables evaluadas fueron la altura de la planta, número de hojas, peso seco de la planta, longitud de la mazorca, peso de la mazorca, peso de 1000 granos y rendimiento de grano; cuyos datos se sometieron a un análisis de varianza y a una comparación de contrastes entre los distintos tratamientos. Los resultados obtenidos, mostraron diferencias no significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) para la mayoría de variables evaluadas, excepto para el peso seco de la planta y longitud de la mazorca, en las cuales se presentaron diferencias significativas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) al incorporar silicato de magnesio en la fertilización mineral; no obstante, el efecto observado se atribuye al componente magnesio (MgO), descartando por ende el posible efecto de silicio (SiO<sub>2</sub>) sobre las variables evaluadas. Además, no se logró corroborar de manera precisa si la incorporación de silicato de magnesio puede influir en la reducción del fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) en la fertilización del cultivo de maíz.

**Palabras clave:** Maíz, silicio, silicatos, magnesio, fertilización, nutrimentos.

## ABSTRACT

The following research addresses, as main objective the effects of the inclusion of magnesium silicate on the mineral fertilization of the cultivation of corn. This research was done in Finca La Vega, belonging of the Tecnológico de Costa Rica in Florencia, San Carlos; which soil is from an inceptisol order, whit medium fertility and claylom texture. For the development of the research were used five treatments, with five repetitions each in order to reach a total of twenty-five experimental units, which were established within an area of 992,2 m<sup>2</sup>, using a completely random experimental design. The variables evaluated were of the plant's height, number of leaves, dry weight of the plant, length of the corn cob, weight of the corn cob, weight of a 1000 grains and the yield of grains; whose data were subjected to an analysis of variance and to a comparison of contrasts between the different treatments. The results obtained showed non-significant differences (p-value > 0.05), for most variables evaluated, except for the dry weight of the plant and length of the corn cob, in which significant differences (p-value < 0.05) were presented by incorporating magnesium silicate in mineral fertilization; however, the observed effect is attributed to the magnesium component (MgO), discarding the possible effect of silicon (SiO<sub>2</sub>) on the evaluated variables. Furthermore, it could not be determined whether the incorporation of magnesium silicate can influence the reduction of the phosphorus (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) in the fertilization of the corn crop.

**Key Words:** Corn, silicon, silicates, magnesium, fertilization, nutriments.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción agrícola dependen en gran medida del recurso suelo, el cual a través del uso intensivo puede llegar a perder sus propiedades químicas, físicas y biológicas, generando degradación del mismo. En consecuencia de dicha problemática puede ocurrir una reducción en los rendimientos, aumentar los costos de producción y generar un mayor impacto ambiental; por ende, debemos de enfocar nuestros esfuerzos en recuperar y mejorar las condiciones de los suelos agrícolas, con la finalidad de mantener y mejorar los rendimientos en los cultivos.

Una de las metodologías utilizadas en Costa Rica por agricultores y técnicos para mejorar y/o mantener las propiedades químicas del suelo se ha basado en dos puntos específicos; en primer lugar se realiza una corrección de acidez del suelo con la aplicación de carbonatos de calcio o magnesio, los cuales neutralizan el pH del suelo hasta valores aceptables para un mejor manejo de los cultivos tal y como menciona Kass (2007).

En segundo lugar, se realiza una fertilización basada en tres macronutrientes (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O) con la aplicación de fertilizantes comerciales que se encuentran en el mercado; lo cual indica que se está dejando de lado la suplementación de otros nutrimentos que son esenciales para el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Sin embargo, hoy en día en el mercado se encuentra una gran variedad de fertilizantes que pueden mejorar la nutrición de los cultivos y las propiedades químicas de los suelos, siendo esta una posible alternativa para resolver la problemática de la degradación química de los suelos. Dentro de los productos que están teniendo mayor auge en el mercado se encuentran los silicatos, los cuales según Osorio (2014), Moreno *et al.* (2011), Pulgarín, (2011), Quero (2008) y Matichenkov (2008) pueden mejorar las condiciones químicas del suelo, debido a que el mismo puede actuar como un corrector de los problemas de acidez o bien funcionar como fertilizante, mejorando el estado nutricional de los cultivos al liberar nutrientes fijados en el suelo, como por ejemplo los fosfatos o bien por el aporte de silicio que el mismo genera.

Según Osorio (2014) al aplicar silicatos al suelo se genera una liberación de ácido Ortosilícico ( $H_4SiO_4$ ), el cual es la única forma de silicio disponible para las plantas; de tal manera que, con la aplicación de estos productos se ha demostrado en diferentes países una mejora en el crecimiento de múltiples cultivos, llegando a representar hasta un 10% de la materia seca total de las plantas, principalmente en gramíneas.

Sin embargo, este tipo de productos silicatados según Furcal & Herrera (2013) no cuentan con suficientes estudios a nivel nacional que permitan conocer los verdaderos beneficios que podrían generar en las condiciones químicas de los suelos tropicales de Costa Rica; de allí la necesidad de generar y aumentar la información en dicho tema en miras de mejorar las propiedades del suelo y diversificar las posibilidades de manejo nutricional de los cultivos.

### **1.1 Objetivo General**

- Evaluar el efecto de la inclusión de silicato de magnesio en la fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays L.*).

### **1.2 Objetivos específicos**

- Evaluar el efecto del silicato de magnesio sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays L.*).
- Diferenciar el efecto de cada uno de los componentes del silicato de magnesio sobre el cultivo de maíz (*Zea mays L.*).
- Evaluar el efecto del silicato de magnesio sobre la reducción de fósforo aplicado al cultivo de maíz (*Zea mays L.*).

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Silicatos

#### 2.1.1 Generalidades de los silicatos

La composición mineral de la corteza terrestre está conformada en gran parte por silicio, siendo dicho elemento el segundo más abundante de la corteza terrestre únicamente superado por el oxígeno, los cuales representan un 28% y 47% respectivamente (Álvarez & Osorio 2014 y Raya & Aguirre 2012). Ambos elementos se unen formando un compuesto químico llamado sílice el cual es la base para la formación de múltiples compuestos minerales llamados silicatos (Monroe, Wicander & Pozo 2008).

Este compuesto de sílice, según Ibañez, Gisbert & Moreno (2011), Jaramillo (2002) y Fassbender (1984) está constituido químicamente por un catión de silicio ( $\text{Si}^{4+}$ ) enlazado fuertemente a cuatro aniones de oxígeno ( $\text{O}^{2-}$ ), generando una estructura molecular en forma de tetraedro, correspondiente a la unidad básica de los silicatos (Figura 1).



Fuente: Ibañez, Gisbert & Moreno 2011

**Figura 1.** Representación esquemática de los tetraedros de silicio.

De tal manera, las cuatro cargas o valencias positivas pertenecientes al silicio ( $\text{Si}^{4+}$ ) son neutralizadas por los aniones del oxígeno ( $\text{O}^{2-}$ ) ubicados en los vértices del tetraedro, los cuales satisfacen una de sus cargas; por lo que la carga restante es neutralizada al unirse a otro tetraedro cercano o bien al enlazarse a otros cationes y/o estructuras molecular más complejas, lo cual permite generar una carga final neta nula (Ibañez, Gisbert & Moreno 2011 y Fassbender 1984).

Los principales cationes que ejercen el rol de neutralizar dichas cargas corresponden a elementos como el aluminio, hierro, magnesio, manganeso, calcio y sodi, los cuales al crear enlaces con los oxígenos de los silicatos neutralizan las cargas y generan estructuras moleculares más complejas que conforman la mayoría de rocas y minerales presentes en los suelos (Osorio 2014).

La neutralización de las cargas más común en la naturaleza ocurre cuando los silicatos comparten oxígenos con otras estructuras moleculares en forma de octaedros, los cuales están constituidos por un catión de aluminio enlazado a seis aniones de oxígeno, generando una estructura química compleja conocida como aluminosilicatos, siendo este el compuesto mineral más abundante de la corteza terrestre y en cuya forma se encuentra presente el silicio con mayor abundancia (Osorio 2014).

### **2.1.2 Tipos de silicatos**

Los silicatos se pueden clasificar de acuerdo con la forma en que los mismos neutralizan sus cargas, es decir, según el tipo de enlace que se genere entre los oxígenos de un tetraedro y sus tetraedros u octaedros adyacentes, tal y como menciona Liang *et al.* (2015), Álvarez & Osorio (2014), Ibañez, Gisbert & Moreno (2011), Iriondo (2007), Jaramillo (2002) y Fassbender (1984), de tal manera los mismos exponen la siguiente clasificación:

- Neosilicatos: estructura química en la cual los tetraedros se encuentran de manera independiente, es decir no comparten oxígenos entre sí. Los mismos únicamente pueden estar conectados entre sí por cationes como el hierro y el magnesio. También conocidos como ortosilicatos o Isosilicatos, representado por el subgrupo del olivino, el zircón y la forsterita.
- Sorosilicatos: estructura en la cual los tetraedros se unen al compartir un mismo oxígeno, generando tetraedros dobles. Este grupo está representado por el mineral epidota y la hemimorfita.
- Ciclosilicatos: esta estructura genera un anillo de tetraedros al unirse varios entre sí. En este grupo se encuentra la turmalina y el berilo.

- Inosilicatos: este tipo de silicato puede ser de cadena simple cuando los tetraedros comparten dos oxígenos, representado por el subgrupo del piroxigeno; o bien de cadena doble, es decir cuando se comparten dos o tres oxígenos de forma alternativa, caso del subgrupo de la anfibolita.
- Filosilicatos: tres oxígenos de la estructura son compartidos a tetraedros cercanos, generando láminas paralelas de tetraedros de silicio. Este grupo representa una gran cantidad de minerales, como el caso de las arcillas, el subgrupo de la serpentina, las micas y la clorita.
- Tectosilicatos: los cuatro oxígenos del tetraedro son compartidos con tetraedros cercanos, de tal forma que todas las cargas quedan equilibradas, generando una estructura muy estable. Este grupo representa alrededor del 75% de la composición de la corteza terrestre y está representado por minerales como el cuarzo, feldespatos y Zeolitas.

No obstante, Ibañez, Gisbert & Moreno (2011) indican que los tetraedros de silicio pueden sufrir modificaciones en su estructura debido a la sustitución del silicio ( $\text{Si}^{4+}$ ) al ser reemplazados por cationes de aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ), cuando este se encuentra en altas concentraciones o bien de los oxígenos ( $\text{O}^{2+}$ ) por otros cationes presentes en la fase líquida del suelo.

De la misma forma, los octaedros de aluminio pueden sufrir modificaciones estructurales debido a la sustitución del aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) por cationes de hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), lo cual es posible debido a que dichos cationes poseen un tamaño relativo muy similar permitiendo dichas sustituciones isomórficas (Álvarez & Osorio 2014).

En ambas modificaciones de las estructuras, se genera un desequilibrio en las cargas debido a que la sustitución ocurre por un catión con una carga inferior al que posee el catión reemplazado y como resultado se genera una adición de un nuevo catión a la estructura, con la finalidad de neutralizar las cargas de la estructura y con ello lograr la estabilidad del mineral (Osorio 2014)

### 2.1.3 Silicio en el suelo

Los minerales silicatados presentes en el suelo poseen alta estabilidad química caracterizándolos como estructuras muy insolubles; no obstante, los mismos sufren procesos de meteorización a través de los cuales se presenta una lenta liberación de los diferentes compuestos que los constituyen (Osorio 2014).

Fassbender (1984) menciona que los silicatos sufren dicho proceso de meteorización principalmente a través de un proceso químico llamado hidrólisis, en donde dicho mineral reacciona de manera lenta con iones de  $H^+$  y  $OH^-$ , los cuales a través de distintas reacciones químicas generan la liberación de las distintas formas de silicio soluble en la solución del suelo.

Una de las formas libre de silicio presente en la solución del suelo está representado por el ácido monosilícico, el cual según Synder, Matichenkov & Datnoff (2006), se puede encontrar en dos formas distintas, correspondientes al ácido metasilícico ( $H_2SiO_3$ ) y el ácido ortosilícico ( $H_4SiO_4$ ), siendo este último la forma más abundante del silicio en la solución del suelo, tal y como lo menciona Osorio (2014).

Álvarez & Osorio (2014) mencionan que una vez que ocurre la disociación de los silicatos, el ácido ortosilícico ( $H_4SiO_4$ ) toma un comportamiento dinámico en la solución del suelo debido a que el mismo se puede reorganizar en minerales secundarios o por el contrario, ser absorbido como nutriente por parte de las raíces de los cultivos.

Matichenkov (2008) y Synder, Matichenkov & Datnoff (2006), también mencionan que este compuesto posee una alta reactividad química debido a que el mismo puede reaccionar fácilmente con cationes presentes la solución del suelo, principalmente con elementos como el aluminio, hierro y magnesio, o bien con metales pesados como cadmio, plomo y zinc.

Además de la forma ya descrita con anterioridad, Matichenkov (2008) expone la presencia de otra forma de silicio en el suelo correspondiente al ácido polisilícico, el cual posee una dinámica distinta debido a que el mismo actúa sobre la parte física al mejorar la estructura del mismo, generando mayor número de sitios de unión para los cationes y permitiendo a su vez mayor retención del agua.

#### 2.1.4 Uso de silicatos como enmienda

Los silicatos a través de diferentes reacciones pueden mejorar las condiciones químicas de los suelos agrícolas, esto se debe a que los silicatos poseen la capacidad de corregir la acidez y con ello aumentar la disponibilidad de múltiples nutrientes, es por ello que diversos estudios recomiendan su utilización como enmienda para mejorar los rendimientos en los cultivos (Álvarez & Osorio 2014, Matichenkov 2008 y Synder, Matichenkov & Datnoff 2006).

La corrección de la acidez al incorporar silicatos al suelo es debido al efecto alcalinizante que los mismos poseen, producto de una reacción química de hidrólisis que transforma los silicatos en hidróxidos, lo cuales neutralizan sus cargas al consumir protones (iones hidronio) presentes en la fase líquida del suelo, lo que permite una elevación en el pH y con ello la corrección de una de las fuentes de la acidez (Álvarez & Osorio 2014 y Moreno *et al.* 2011).

Lindsay (2001) citado por Álvarez & Osorio (2014), explica cómo actúan los silicatos según la fuente de los mismos en la corrección de la acidez, a través de las siguientes reacciones:

- $\text{CaSiO}_3 + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4$
- $\text{Mg}_{1.6}\text{Fe(II)}_{0.4}\text{SiO}_4 + 4\text{H}^+ \leftrightarrow 1.6\text{Mg}^{2+} + 0.4\text{Fe}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4$
- $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 6\text{H}^+ \leftrightarrow 3\text{Mg}^{2+} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8 + 12\text{H}^+ \leftrightarrow 6\text{Mg}^{2+} + 4\text{H}_4\text{SiO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

Por otra parte, los silicatos pueden ejercer un rol fundamental en la disponibilidad de fósforo para los cultivos, tal y como se mencionó con anterioridad, debido a que el ácido ortosilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) puede desplazar los iones de fosfatos ( $\text{H}_2\text{PO}_4$ ) que se encuentran fijados por óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, o bien desplazar aquellos fosfatos unidos en los sitios de absorción de las arcillas (Álvarez & Osorio 2014 y Matichenkov 2008).

De tal manera, Matichenkov (2008) presenta lo discutido con anterioridad a través de las siguientes reacciones:

- $2\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3 + 2\text{Si}(\text{OH})_4 + 5\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 + 5\text{H}_3\text{PO}_4 + 5\text{H}_2\text{O}$
- $2\text{FePO}_4 + \text{Si}(\text{OH})_4 + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}_2\text{SiO}_4 + 2\text{H}_3\text{PO}_4$

Además, el ácido ortosilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) también posee la capacidad de fijar los cationes de hierro y aluminio cuando los mismos se encuentran libres en la solución del suelo, en donde pueden generar problemas de toxicidad para los cultivos, tal y como lo indican Synder, Matichenkov & Datnoff (2006). Los mismos autores mencionan que este proceso de fijación también puede ocurrir con metales pesados presentes en el suelo, tal y como lo presentan en las siguientes reacciones:

- $2\text{Al}^{3+} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 \leftrightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 + 2\text{H}^+ + 3\text{H}_2\text{O}$
- $2\text{Al}^{3+} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 6\text{H}^+$
- $2\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 \leftrightarrow \text{Fe}_2\text{SiO}_4 + 4\text{H}^+$
- $\text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 \leftrightarrow \text{MnSiO}_3 + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$
- $2\text{Mn}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4 \leftrightarrow \text{Mn}_2\text{SiO}_4 + 4\text{H}^+$
- $2\text{Zn}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4 \leftrightarrow \text{ZnSiO}_4 + 4\text{H}^+$
- $2\text{Pb}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4 \leftrightarrow \text{PbSiO}_4 + 4\text{H}^+$

En relación a lo expuesto con anterioridad, se denota la importancia que pueden tener dichos compuestos para el uso agronómico, de tal manera, Navarro & Navarro (2013) indican que las dos principales enmiendas silicatadas para uso agrícola corresponden al silicato de calcio ( $\text{CaSiO}_4$ ) y el silicato de magnesio ( $\text{MgSiO}_4$ ).

Ambos compuestos citados anteriormente poseen un poder de neutralización de la acidez distinto, lo cual se correlaciona al grado de pureza que poseen los mismos poseen, teniendo mayor pureza el silicato de magnesio y con ello un mejor efecto sobre la corrección de la acidez, pero además este mejor efecto puede ser debido al menor peso molecular que posee el magnesio en comparación al calcio (Navarro & Navarro 2013).

De tal manera Quero (2009) indica que, al incorporar silicato de magnesio en suelos con problemas de acidez, lo que ocurre es una disociación del compuesto, liberando con ello el ácido ortosilícico ( $H_4SiO_4$ ) el cual corrige la acidez como se explicó con anterioridad y a su vez aumenta la concentración de iones de magnesio ( $Mg^{2+}$ ) en la solución del suelo, el cual puede ser tomado por parte de los cultivos para realizar diversas funciones metabólicas.

### **2.1.5 Silicio en las plantas**

El silicio es un elemento que no es considerado como esencial para el desarrollo de los cultivos; no obstante, en diversas partes del mundo existen reportes del efecto benéfico que el mismo ha tenido al ser incorporado en la fertilización mineral de diversos cultivos tales como el trigo, arroz, cebada, caña de azúcar, frijol, maíz y pepino, los cuales pueden extraer en promedio de 50 kilogramos a 200 kilogramos por hectárea de silicio (Quero 2009 y Datnoff *et al.* 2001).

De tal manera, existen diversos estudios que han encontrado concentraciones significativas de dicho elemento en la mayoría de plantas superiores, demostrando la importancia que el silicio puede tener como un elemento benéfico para los cultivos (Navarro & Navarro 2013).

Sin embargo, la concentración de este elemento en las plantas varía según la especie vegetal y por lo tanto la extracción del mismo será distinta entre los diferentes cultivos, tal y como indica Quero (2009) y Epstein (1994). De tal manera Ma, Miyake & Takahashi (2001) categorizan las plantas en sus investigaciones según la concentración de silicio en sus estructuras vegetales, de la siguiente manera:

- Plantas acumuladoras: plantas con contenidos de silicio mayor al 1% y que muestran relación de Si/Ca mayor a uno.
- Plantas intermedias: plantas con contenidos de silicio de 0,5 a 1%, pero con una relación de Si/Ca menor a uno.
- Plantas no acumuladoras: plantas con contenidos menores a 0,5% de silicio en sus tejidos.

Con respecto a dicha clasificación Ma, Miyake & Takahashi (2001) encontraron que las principales plantas acumuladoras de interés agronómico según sus estudios corresponde a cultivos como el arroz, maíz, frijol, cebada y caña de azúcar, coincidiendo en la mayoría de cultivos descritos por Quero (2009) y Datnoff (2001), mencionado con anterioridad.

De tal manera que, los cultivos obtienen el silicio de la solución del suelo en forma de ácido ortosilícico ( $H_4SiO_4$ ), correspondiente a la forma química en que dicho elemento es absorbido por parte de las plantas (Álvarez & Osorio 2014, Quero 2008, Synder, Matichenkov & Datnoff 2006, Datnoff 2001 y Epstein 1994).

Una vez que el silicio es absorbido por parte de los diferentes cultivos a través del sistema radicular de la solución del suelo, es translocado vía apoplasto hasta el xilema y de allí al resto de estructuras aéreas del cultivo tal y como indica Mitani & Ma (2005) mencionados por Álvarez & Osorio (2014).

Luego de dicho transporte la concentración de silicio en la savia de la planta aumenta gradualmente, lo que desencadena una condensación del silicio en forma de polímeros y otras formas de silicio amorfas que se acumulan en diversas estructuras del tejido vegetal (Quero 2008 y Datnoff 2001).

Así mismo, el silicio transportado y acumulado pasa a cumplir diversas funciones, dentro de las cuales se mencionan las siguientes:

- Mecánica: debido a la unión de ácido monosilícico con la pectina y calcio presentes en el tejido epidérmico, lo cual produce una doble capa en la

cutícula dando mayor rigidez al tejido vegetal (Matichenkov 2008 y Synder, Matichenkov & Datnoff 2006).

Además de la unión ya descrita, los compuestos de silicio pueden alojarse y recubrir otras estructuras llamadas tricomas para brindar mayor protección (Quero 2008).

- Nutricional: el ácido ortosilícico ( $H_4SiO_4$ ) y otras formas de silicio que se encuentran solubles en el citoplasma de las células vegetales logran solubilizar oxalatos de calcio y fosfatos de magnesio, calcio, aluminio y hierro, que normalmente se encuentran insolubles, lo cual permite la utilización de dichos elementos dentro del metabolismo de la planta (Quero 2008).
- Fisiológica: se correlaciona principalmente con un mayor desarrollo radical, mayor capacidad de retención de agua dentro de la planta y mayor estabilidad en las moléculas de clorofila (Matichenkov 2008).

De tal manera y debido a la mayor concentración y estabilidad de clorofila dentro de las hojas, aumenta el tamaño de las mismas, al mismo tiempo que se incrementa la concentración de rubisco lo que permite un proceso fotosintético más eficiente (Quero 2008).

- Química: se relaciona con la capacidad de los compuestos de sílice de controlar la toxicidad de metales pesados, debido a la capacidad que posee el ácido ortosilícico ( $H_4SiO_4$ ) de fijar cationes que ocasionan problemas por intoxicación en los cultivos; pero además el silicio ha demostrado reducir el efecto de estrés en ambientes salinos (Matichenkov 2008 y Synder, Matichenkov & Datnoff (2006).
- Bioquímica: hipótesis que plantea que el ácido polisilícico y monosilícico interviene en mecanismos de defensa específicos y no específicos, lo cual permite aumentar la resistencia de la planta frente a diferentes tipos de estrés (Matichenkov 2008).

Sin embargo, Raya & Aguirre (2012) mencionan que las plantas pueden crecer en ausencia de este elemento; no obstante, el mismo menciona que en aquellos cultivos en donde existen una presencia adecuada del mismo las plantas serán más vigorosas, con mejor crecimiento vegetativo y con mayor resistencia ante factores bióticos y abióticos.

### **2.1.6 Importancia del silicio en el cultivo de Maíz**

El cultivo de maíz según Quero (2008) es una de las plantas que posee mayor absorción de ácido ortosilícico ( $H_4SiO_4$ ), esto debido a que diversos estudios han logrado correlacionar el incremento del rendimiento del maíz con la aplicación de fertilizantes silicatadas, en donde se ha demostrado extracciones aproximadas de 200 kilogramos a 350 kilogramos por hectárea de silicio, por parte del cultivo de maíz.

Por ejemplo, Puentes (2016), a través de sus estudios logro demostrar que la aplicación de fertilizantes silicatados influye positivamente en los rendimientos del cultivo, obteniendo diferencias significativas en aquellos tratamientos con mayor dosis de fertilizante, alcanzando como máximo rendimiento valores cercanos a 50 toneladas por hectárea de maíz para forraje, con una dosis de 400 kilogramos por hectárea de fertilizantes a base de silicio.

De tal manera, se ha demostrado que existe una correlación positiva entre el aumento de la dosis de fertilizantes silicatados y el rendimiento del cultivo de maíz, obteniendo aumentos en la producción que van desde un 10%, hasta un 40% más en las cosechas del cultivo, lo cual permite aumentar la producción total en la misma área de cultivo (Quero 2008).

Por otra parte, Azcón & Talón (2013) mencionan que para el cultivo de maíz, este elemento puede llegar a representar en promedio hasta un 2% de la materia seca del mismo. No obstante, el porcentaje de silicio que se pueda acumular en la planta de maíz está directamente relaciona a la estructura a la cual se haga mención (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Niveles de silicio para el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), expresado en gramos de silicio, por cada kilogramo de materia seca.

<b>Estructura vegetal</b>	<b>Deficiencia</b>	<b>Optimo</b>	<b>Máximo</b>
Hoja	0.9	30	50
Tallo	2.5	5	7
Raquis	0.8	2	4
Semilla	0.1	0.3	0.8

Fuente: Quero 2015.

De tal manera y como se presenta en el Cuadro 1, el silicio puede llegar a representar hasta un 5% del peso seco del cultivo de maíz concentrado específicamente en las hojas del cultivo. Quero (2015) indica que la estructura con mayor demanda de dicho nutriente 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 de silicio.

La concentración mayor de silicio en las hojas del cultivo de maíz según Quero (2015) se debe a que dicho elemento absorbido de la solución del suelo y es transportado principalmente por efecto de la transpiración del cultivo, lo cual facilita su movilidad hasta las hojas, en donde dicho elemento se acumula en forma de fitolitos y tricomas.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Localización del área de estudio**

El trabajo se realizó en Finca La Vega, perteneciente al Tecnológico de Costa Rica, ubicada en Florencia de San Carlos, Alajuela. La misma se encuentra a una altura de 75 msnm, entre los 10°4' latitud norte y 84°45' longitud oeste correspondiente a sus coordenadas geográficas.

Según datos del Comité Sectorial Regional Agropecuario (2011) el lugar de estudio se encuentra dentro de una zona de clima tropical caracterizada por una temperatura promedio de 26 °C, con una humedad relativa que oscila entre 80% y 90%, evapotranspiración potencial promedio de 1150 mm y la evapotranspiración real promedio de 950 mm por año, respectivamente. Por otra parte, presenta una precipitación anual de 3500 mm en promedio, la cual es muy variable según la zona específica de la región.

#### **3.2 Características químicas del suelo**

El suelo donde se realizó el experimento está conformado por materiales de recién deposición, de origen aluvial y con características hidromórficas (Núñez 1979). Dicho suelo 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 (Núñez 1979 y Furcal & Barquero 2013).

Así mismo, la mayor parte de los suelos de Finca la Vega se categoriza dentro del suborden Tropepts debido al régimen de temperatura isomésico y en el gran grupo Eutropepts por la saturación de bases mayor al 50% a una profundidad de 25 cm y 100 cm según el estudio realizado por Núñez (1979).

Para el año 2016, periodo en el cual se realizó la investigación, el suelo presentó una sumatoria de bases de 17,97, con una capacidad de intercambio catiónico de 18,27 y una saturación de acidez correspondiente a un 3,65% (Anexo 1).

### **3.3 Establecimiento y manejo del cultivo**

#### **3.3.1 Preparación del terreno**

La ejecución del ensayo se llevó a cabo en un lote cultivado previamente con maíz, al cual se le realizó de manera preliminar un análisis químico completo (Anexo 1), con la finalidad de determinar la fertilidad del mismo.

En cuanto a la preparación del área se realizó un control químico de malezas con la aplicación de Paraquat en dosis de 1,5 l/ha quince días antes del establecimiento del cultivo, sin necesidad de realizar ningún tipo de labranza.

#### **3.3.2 Siembra del cultivo**

La siembra del cultivo se realizó de manera mecánica con la utilización de una sembradora neumática de precisión; la misma se calibró para establecer un cultivo con las siguientes características:

- Distancia entre hileras: 0,9 metros.
- Semillas / metro lineal: 6
- Distancia entre plantas: 16 centímetros
- Población teórica: 66.666 plantas / hectárea.

Para la siembra del cultivo se utilizó semilla de maíz blanco de la variedad Los Diamantes 8843 previamente seleccionada. Una vez realizada la siembra se procedió a delimitar el área efectiva de la investigación y dentro de la misma cada una de las unidades experimentales.

#### **3.3.3 Manejo fitosanitario y control de malezas**

Para el control de malezas se realizó una aplicación de Paraquat y Atrazina al momento de la siembra en dosis de 1,5 l/ha y 2 kg/ha respectivamente. Por otra parte, en cuanto al control fitosanitario al momento de la siembra se realizó una aplicación de Terbufos a una dosis de 10 Kg/ha. Adicionalmente se aplicó Oxamil

a una dosis de 0,5 l/ha, el cual se aplicó en conjunto con Cosmo-In<sup>®</sup>, como coayudante, a una dosis de 200 ml/ ha.

Como parte del manejo fitosanitario del cultivo, se llevó a cabo una aplicación de Abamectina transcurridos 39 días después de la siembra (DDS), para el control del gusano cogollero según muestreos previos de incidencia y severidad de dicha plaga, utilizado a una dosis de 0,5 l/ha. Todos los productos anteriormente descritos se resumen en el Anexo 2.

### **3.3.4 Cosecha del cultivo**

Las labores de cosecha se realizaron de forma manual al alcanzar la madurez fisiológica del cultivo. Preliminarmente se realizó la labor de doblamiento de las plantas a partir del nudo anterior de la inserción de la mazorca; dicha labor se realizó a los 86 DDS.

Luego de determinar 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, cuya labor se realizó transcurridos 105 DDS.

## **3.4 Descripción de los tratamientos a evaluar**

El estudio consistió en la incorporación de magnesio, azufre y silicio en conjunto con la fertilización comercial de Finca La Vega, dicha fertilización comercial consistió en la aplicación de 120 kg/ha de nitrógeno, 60 Kg/ha de fósforo ( $P_2O_5$ ) y 90 Kg/ha de potasio ( $K_2O$ ). La descripción de los tratamientos considera:

- **Tratamiento 1 (T1):** Fertilización comercial (Testigo).
- **Tratamiento 2 (T2):** Fertilización comercial + Azufre.
- **Tratamiento 3 (T3):** Fertilización comercial + Azufre + Magnesio.
- **Tratamiento 4 (T4):** Fertilización comercial + Azufre + Magnesio+ Sillico
- **Tratamiento 5 (T5):** Fertilización comercial\*\* + Azufre + Magnesio+ Sillico.

\*\*En la fertilización comercial se realizó una reducción del 50% de fósforo ( $P_2O_5$ ).

De tal manera, cada tratamiento generó un aporte nutricional diferenciado en el cultivo, lo cual se puede observar de manera más detallada en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Aporte total de nutrientes incorporado por tratamiento en la fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) relacionada con el uso de azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Tratamiento	Aporte total de nutrientes (Kg/ha)					
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	S	SiO <sub>2</sub>
T1	120	60	90	0	0	0
T2	120	60	90	0	23,2	0
T3	120	60	90	28,7	23,2	0
T4	120	60	90	28,7	23,2	29,7
T5	120	30	90	28,7	23,2	29,7

La incorporación de los nutrientes se realizó de manera fraccionada en tres momentos de aplicación según la etapa fenológica del cultivo. De tal forma que la primera aplicación de fertilizantes se realizó al momento de la siembra a través de la incorporación de diferentes fertilizantes comerciales, cuyas dosis y productos se detallan en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Descripción de tratamientos en primera fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) relacionada con el uso de azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Tratamiento	Producto	Cantidad	N	Dosis Kg/ha				
				P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	S	SiO <sub>2</sub>
T1	DAP	130	23,4	60	7	0	0	0
	KCl	12						
T2	DAP	130	23,4	60	7	0	6,4	0
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	14						
T3	DAP	130	23,4	60	7	7.8	6,4	0
	KCl	12						
	MgSO <sub>4</sub>	49						
T4	DAP	130	23,4	60	7	7.8	6,4	8
	Silicato de Mg	26						
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	14						
T5	DAP	65	23,2	30	7	7.8	6,4	8
	Urea	25						
	Silicato de Mg	26						
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	14						

A través de la primera fertilización se adicionó la cantidad total de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), correspondiente a cada tratamiento y se realizó una adición parcial del resto de nutrientes, según correspondiera.

La segunda fertilización se realizó a los 25 DDS, a través de la cual se adiciona de manera parcial los nutrimentos que se detallan en el Cuadro 4.

**Cuadro 4.** Descripción de tratamientos en segunda fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) relacionada con el uso de azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016

Tratamiento	Productos	Cantidad	N	Dosis Kg/ha				
				P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	S	SiO <sub>2</sub>
T1	Urea	145	66,7	0	38	0	0	0
	KCl	63						
T2	Urea	145	66,7	0	38	0	10	0
	KCl	45						
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	22						
T3	Urea	145	66,7	0	38	12,5	10	0
	KCl	63						
	MgSO <sub>4</sub>	78						
T4	Urea	145	66,7	0	38	12,5	10	13
	KCl	45						
	Silicato de Mg	41,6						
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	22						
T5	Urea	145	66,7	0	38	12,5	10	13
	KCl	45						
	Silicato de Mg	41,6						
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	22						

Finalmente, la tercera y última fertilización se realizó a los 45 DDS, con la cual se completó la fertilización mineral del cultivo de maíz (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Descripción de tratamientos en tercera fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) relacionada con el uso de azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Tratamiento	Productos	Cantidad	N	Dosis Kg/ha				
				P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	S	SiO <sub>2</sub>
T1	Urea	65	30	0	45	0	0	0
	KCl	75						
T2	Urea	65	30	0	45	0	6,9	0
	KCl	63						
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15						
T3	Urea	65	30	0	45	8,4	6,8	0
	KCl	75						
	MgSO <sub>4</sub>	52,5						
T4	Urea	65	30	0	45	8,4	6,9	8,7
	KCl	63						
	Silicato de Mg	28						
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15						
T5	Urea	65	30	0	45	8,4	6,9	8,7
	KCl	63						
	Silicato de Mg	28						
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15						

La fertilización descrita en los cuadros 3, 4 y 5, se realizó mediante la utilización de distintos fertilizantes comerciales utilizados a nivel nacional. De tal manera en el Cuadro 6 se presentan las principales características de los fertilizantes utilizados durante el desarrollo de la investigación.

**Cuadro 6.** Principales características de los productos incorporados en la fertilización mineral del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) relacionada con el uso de azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

<b>Fertilizante</b>	<b>Composición</b>	<b>Características</b>
Fosfato Diamónico (DAP)	N:18% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 45%	Fertilizante binario, utilizado principalmente al momento de siembra por su alto contenido de fósforo, además es ideal para realizar mezclas físicas (Navarro & Navarro 2014) Su solubilidad a 20 °C (g/l) es de 580 (Osorio 2014).
Cloruro de Potasio (KCl)	K <sub>2</sub> O: 60%	Fertilizante inorgánico de origen mineral de apariencia cristalina y coloración rojiza, el mismo es ideal para realizar mezclas físicas o soluciones nutritivas (CISAAGRO Sf) Posee alta higroscopicidad. Su solubilidad a 20 °C (g/l) es de 34,4 (Navarro & Navarro 2014)
Urea (CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> )	N:46%	Fertilizante simple y sintético, el mismo proporciona nitrógeno al suelo en forma de amonio luego de un proceso de hidrólisis. (FERTINOVA Sf; FAO 2002 y Ruiz 1999). Su solubilidad a 20 °C (g/l) es de 1000 a 1080 (Osorio 2014 y Ruiz 1999).
Sulfato de Potasio (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	K <sub>2</sub> O: 50% S:18%	Fertilizante inorgánico de origen mineral, ampliamente utilizado cuando se requiere de una fuente libre de cloro. Su presentación es en forma de polvo blanquecino o granular (CISAAGRO Sf)
Sulfato de Magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	MgO: 16% S: 13%	Su solubilidad a 20 °C (g/l) va de 34 a 260 (Osorio 2014).
Silicato de Magnesio (MgO) SiO <sub>2</sub>	MgO: 30% SiO <sub>2</sub> : 31%	Fertilizante que posee una acción lenta, la cual se aumenta al fragmentar el material y reducir el tamaño de sus partículas (Finck 1988)

### 3.5 Variables de respuesta:

#### 3.5.1 Variables de crecimiento

Las mismas se evaluaron a través de la medición de diez plantas seleccionadas al azar dentro del área útil de cada unidad experimental, evaluando lo siguiente:

- **Altura de la planta:** se realizó durante la floración masculina del cultivo en el momento en que más del 50% de las plantas de la parcela útil emitieron polen. Se midió en centímetros desde la base del tallo al nudo de inserción de la espiga.
- **Número de hojas:** se evaluó en las plantas seleccionadas para determinar la altura, cuantificando la cantidad total de hojas funcionales que las mismas poseían.
- **Peso seco de las plantas:** se determinó al final del ciclo del cultivo debido a que requirió de un muestreo destructivo, para lo cual se tomó una muestra al azar de diez plantas que fueron pesadas, picadas y mezcladas antes de proceder a tomar una submuestra de 200 gramos la cual se secó en una estufa de aire forzado a 55 °C hasta alcanzar peso constante. Dicha variable se estimó en relación a base seca expresada en kilogramos por hectárea.

#### 3.5.2 Variables de rendimiento

Las variables de rendimiento se evaluaron en la etapa final de desarrollo del cultivo, las cuales se detallan a continuación.

- **Longitud de la mazorca:** se evaluó al momento de la cosecha a través de la medición de diez mazorcas al azar; dicha medida se realizó en centímetros desde la base del pedúnculo hasta el ápice de las mismas.
- **Peso de la mazorca:** se determinó a través del peso expresado en gramos, mediante la utilización de las mazorcas (sin brácteas) seleccionadas para determinar la longitud, cuya medida se realizó en una balanza analítica.

- **Peso seco de 1000 granos:** dicha variable se estimó al contabilizar 1000 granos obtenidos de las mazorcas cosechadas en cada unidad experimental; se pesaron en fresco y posteriormente se seleccionó una submuestra al azar de 100 gramos la cual se colocó en una estufa de aire forzado a 55 °C para secar los granos y obtener el peso seco de los mismo.
- **Rendimiento de grano:** para determinar el rendimiento se utilizó la fórmula implementada por Espinosa *et al.* (2013), la cual se detalla a continuación:  

$$\text{Rendimiento} = (\text{PC} \times \% \text{MS} \times \% \text{G}) \times \text{FC} / 8600$$

Dónde:

- ✓ PC= peso promedio de las mazorcas (sin brácteas) cosechadas multiplicado por la cantidad total de mazorcas de la unidad experimental, expresado en kilogramos.
- ✓ %MS= porcentaje de materia seca del grano, para lo cual se seleccionó una submuestra al azar de 100 gramos, la cual se secó en una estufa de aire forzado a 55°C hasta alcanzar peso constante.
- ✓ G= porcentaje de grano, calculado como el cociente del peso de los granos entre el peso de las mazorcas.
- ✓ FC= factor de conversión para determinar el rendimiento por hectárea obtenido al dividir 10000 m<sup>2</sup> entre el tamaño de la parcela muestral.
- ✓ 8600= factor de estandarización del rendimiento para obtener una humedad uniforme del 14%.

### 3.6 Diseño experimental y arreglo de los tratamientos

El presente estudio, se realizó mediante un diseño experimental Completamente al Azar (DCA), asignando de manera aleatoria las cinco repeticiones de los cinco tratamientos en cada una de las unidades experimentales, a la cuales se les asigno una numeración según su ubicación en el campo, tal y como se observa en el Cuadro 7.

**Cuadro 7.** Número de parcela asignada por tratamiento y su respectiva repetición en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016

Tratamiento	Repetición				
	R1	R2	R3	R4	R5
T1	7	23	14	1	20
T2	11	4	25	17	8
T3	12	3	19	21	10
T4	19	2	6	15	18
T5	16	9	22	5	13

### 3.7 Croquis o especificación de diseño de tratamientos

En la Figura 2, se presenta el arreglo espacial de los tratamientos con sus respectivas repeticiones, según la aleatorización dentro de las parcelas.

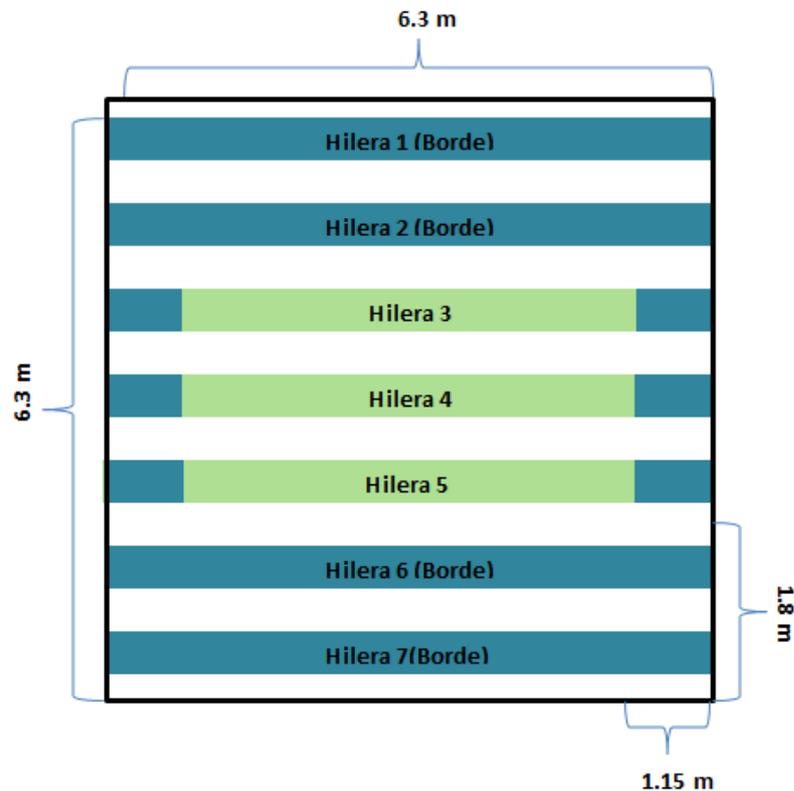
T5R4	T3R5	T4R4	T1R5	T2R3
T2R2	T5R2	T1R3	T3R3	T4R1
T3R2	T2R5	T5R5	T4R5	T1R2
T4R2	T1R1	T3R1	T2R4	T5R3
T1R4	T4R3	T2R1	T5R1	T3R4

**Figura 2.** Arreglo espacial de los tratamientos, dentro de cada unidad experimental en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

### 3.8 Área experimental y unidad experimental

El área experimental utilizada durante el desarrollo del experimento fue de 992,2 m<sup>2</sup>, la cual se subdividió en un total de veinticinco unidades experimentales correspondiente a las cinco repeticiones de cada uno de los cinco tratamientos.

Cada unidad experimental contó con un área total de 39,69 m<sup>2</sup> dentro de la cual se delimitaron los bordes correspondientes, tal y como se observa en la Figura 3; de tal manera el área útil de muestreo correspondió a tres hileras, cada una con una longitud de cuatro metros lineales para un total de doce metros lineales efectivos, para realizar los diferentes muestreos.



**Figura 3.** Dimensiones de cada unidad experimental, con sus respectivos bordes, en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

### 3.9 Modelo estadístico

Para el presente estudio se utilizó el modelo matemático que se presenta a continuación:

$$\text{Modelo para el ensayo: } Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

- $Y_{ij}$  = observación de la j-ésima unidad experimental que recibió el i-ésimo tratamiento
- $\mu$  = media general
- $\alpha_i$  = efecto del i-ésimo tratamiento
- $\varepsilon_{ij}$  = error experimental de la i-ésima unidad experimental

En modelo estadístico descrito anteriormente se utilizó para todas las variables descritas con anterioridad.

### 3.10 Número de repeticiones y grados de libertad del error

Cada uno de los cinco tratamientos en cuestión contó con cinco repeticiones para un total de veinticinco repeticiones, generando un total de 19 grados de libertad (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Grados de libertad según las distintas causas de variación.

<b>Causa de variación</b>	<b>Grados de libertad</b>
<b>Tratamientos</b>	4
<b>Error experimental</b>	15
<b>Total</b>	19

### 3.11 Análisis de datos

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa InfoStat/P (DiRienzo *et al.* 2014).

El análisis de datos se realizó mediante una comparación entre los tratamientos a través de la técnica de Modelos Lineales Generales y Mixtos, al realizar un Análisis de Varianza (ANDEVA), incluyendo la verificación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad, a través de la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba f, obteniendo con los mismos un cumplimiento de los supuestos para cada una de las variables.

Posteriormente, se realizó una prueba de contrastes para las siguientes comparaciones:

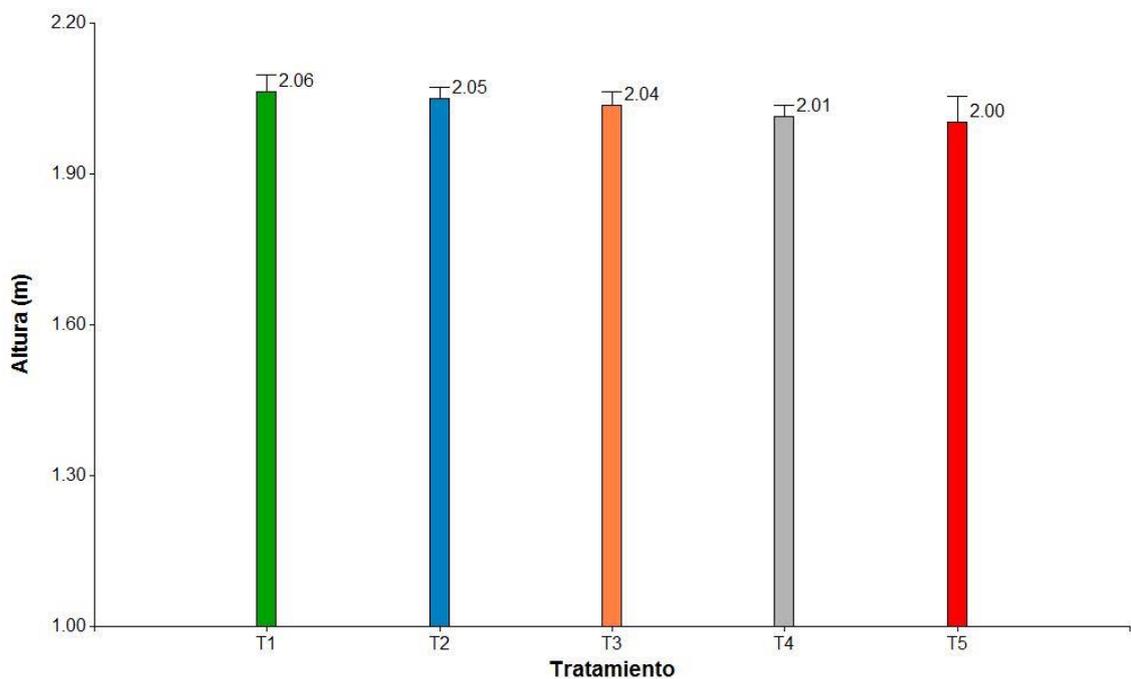
- C1: T1 contra T4.
- C2: T1 contra T3.
- C3: T3 contra T4.
- C4: T1 contra T3 y T4.
- C5: T1 contra T2.
- C6: T4 contra T5.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Variables de crecimiento

#### 4.1.1 Altura de la planta

Los resultados obtenidos a través del Análisis de Varianza para la variable altura presentaron diferencias estadísticamente no significativas entre los tratamientos ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) (Anexo 3). Estos datos indican, que no existió efecto de los tratamientos sobre la altura de las plantas de maíz de la variedad Diamante 8843, presentando una media general de 2,03 metros de altura.



**Figura 4.** Altura de las plantas de maíz (*Zea mays* L.) fertilizadas con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

En la Figura 4, se aprecia el comportamiento de la altura de las plantas de maíz, en donde se denota que no existió efecto de los tratamientos sobre la altura de las plantas, tal y como se demostró con el análisis estadístico realizado. De igual manera y para los distintos contrastes, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) (Cuadro 9).

**Cuadro 9.** Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos en la altura del cultivo de maíz (*Zea mays L.*), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

<b>Contraste</b>	<b>Comparaciones</b>	<b>P valor</b>	<b>Media 1</b>	<b>Media 2</b>
C1	T1 Vs T4	0,26	2,06 ± 0,03	2,01 ± 0,02
C2	T1 Vs T3	0,56	2,06 ± 0,03	2,04 ± 0,03
C3	T3 Vs T4	0,55	2,04 ± 0,03	2,01 ± 0,02
C4	T1 Vs T3, T4	0,35	2,06 ± 0,03	2,02 ± 0,02
C5	T1 Vs T2	0,76	2,06 ± 0,03	2,05 ± 0,02
C6	T4 Vs T5	0,84	2,01 ± 0,02	2,00 ± 0,05

Al analizar los resultados presentados en el Cuadro 9, se puede observar que ninguno de los contrastes propuestos, presenta diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ). De tal manera, al detallar el Contraste 1, se puede observar que no existen diferencias significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ), razón por la cual se puede inferir que la incorporación de silicato de magnesio no tuvo efecto sobre la altura de las plantas del cultivo de maíz, bajo las condiciones establecidas del ensayo.

Del resultado analizado con anterioridad, se puede deducir que ninguno de los componentes del silicato de magnesio genera un efecto diferencial sobre la altura del cultivo de maíz. De modo tal que, al observar el Contraste 3 se puede diferenciar el efecto del silicio ( $\text{SiO}_2$ ), debido a que dicho elemento es el único factor diferencial entre el tratamiento 3 y 4, cuyo resultado no presenta diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) razón por la cual se puede indicar que dicho elemento no tuvo efecto sobre la altura de las plantas.

Así mismo, al observar los resultados de los contrastes 2 y 4, se puede observar que la adición de magnesio ( $\text{MgO}$ ) en la fertilización mineral del cultivo de maíz, no presentó efecto alguno en comparación al Tratamiento 1, correspondiente a la fertilización tradicional de Finca La Vega, basada únicamente en la incorporación de nitrógeno (N), fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) y potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ).

Por consiguiente y con lo expuesto con anterioridad, se puede reafirmar que ninguno de los componentes del silicato de magnesio tuvo un efecto diferencial sobre la altura de las plantas del cultivo de maíz. Cabe resaltar que el posible efecto que pudiera observarse por la adición de azufre (S) sobre el cultivo de maíz, se descarta a través del Contraste 5, en donde no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) en relación al crecimiento del cultivo, con la adición de nutriente azufre (S).

Estos datos analizados con anterioridad correspondientes a la altura de las plantas de maíz, concuerdan con los resultados reportados por Gómez (2010), el cual utilizó dos fertilizantes silicatados con aporte de magnesio para el cultivo de canola donde el mismo no observó diferencias estadísticamente significativas en la altura de las plantas con respecto a los tratamientos sin el aporte de dichos fertilizantes; no obstante el mismo autor encontró diferencias en otras variables como el área foliar del cultivo.

Sin embargo y al contrario de los datos encontrados en la presente investigación, Borda *et al.* (2007) y Jiménez (2016) evidenciaron un aumento en la altura de las plantas de avena forrajera y maíz respectivamente, al incorporar silicio ( $\text{SiO}_2$ ) en la fertilización mineral del cultivo obteniendo una respuesta a dicho nutrimento.

No obstante, la altura de las plantas de maíz está definida en gran medida por las características genéticas de la misma, debido a que dicho parámetro posee una alta heredabilidad tal y como indica Paliwal *et al.* (2001), el cual menciona que en algunos estudios de selección y mejora genética del cultivo de maíz han demostrado una heredabilidad en el sentido amplio de hasta 0,8; razón por la cual es probable que la expresión fenotípica de la altura cultivo de maíz en la presente investigación, haya estado definida en su mayoría por el componente genético y en menor grado por los factores ambientales.

Por otra parte, al analizar la comparación entre el Tratamiento 4 correspondiente a la dosis completa de fósforo ( $P_2O_5$ ) y el Tratamiento 5 con la mitad de dosis de dicho nutriente, no presentó diferencias estadísticamente significativas ( $p$  valor  $> 0,05$ ). De modo tal, se podría inferir la incorporación de silicato de magnesio pudo tener efecto alguno sobre la disponibilidad de fósforo ( $P_2O_5$ ) para el cultivo de maíz; no obstante, lo indicado con anterioridad, no se puede afirmar, debido a varios factores.

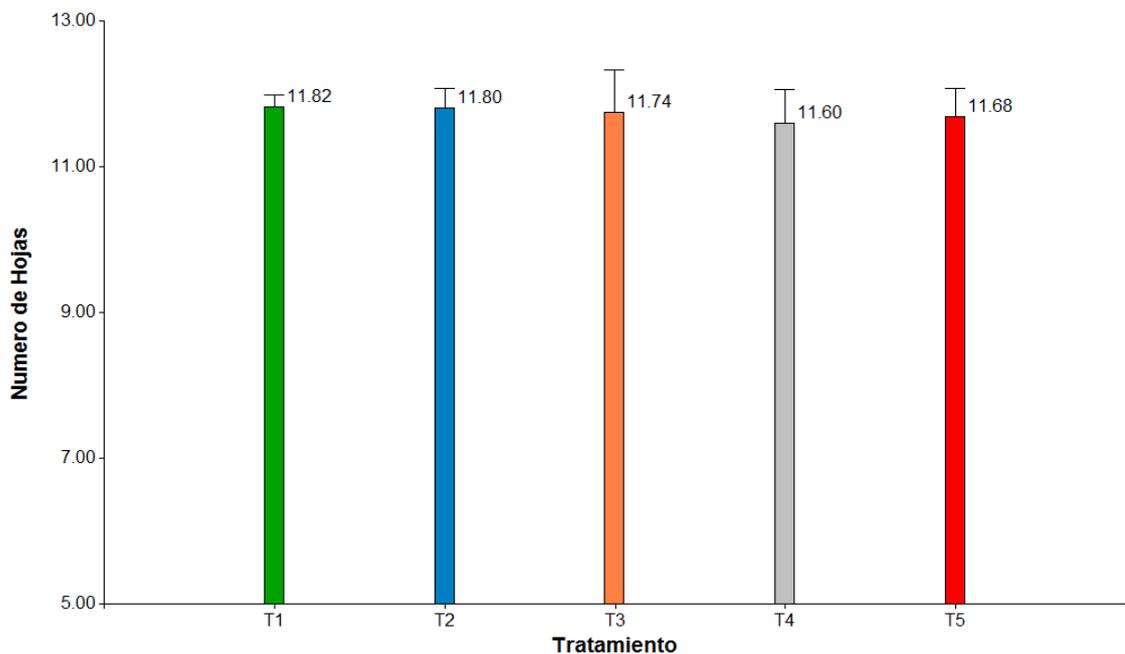
En primer lugar, al observar el Anexo 1 correspondiente al análisis químico de suelos de la parcela evaluada, se puede denotar que la concentración de fósforo ( $P_2O_5$ ) se encuentra dentro de un rango óptimo según la tabla de niveles críticos de nutrientes indicada por el Bertsch (Sf), de modo tal que la probabilidad de respuesta del cultivo a la fertilización fosforada es baja.

Además de lo mencionado con anterioridad, se puede observar que no existen problemas de acidez lo cual indica que la absorción de los diferentes nutrientes no se ve comprometido por dicho factor, siendo el fósforo ( $P_2O_5$ ) el nutrimento con mayor fijación por parte de los suelos cuando existes problemas de acidez y valores de pH bajos, tal y como lo indica Kass (2007).

De tal manera que, con las características químicas del suelo presente en el estudio existe una alta probabilidad de que el efecto observado en el Tratamiento 5 en contraste con el Tratamiento 4, no se deba a la incorporación del silicato de magnesio, sino a un nivel adecuado de fósforo ( $P_2O_5$ ), producto de la fertilidad natural del suelo presente en Finca La Vega.

#### 4.1.2 Número de hojas

Los valores obtenidos a través de Análisis de Varianza para el número de hojas del cultivo de maíz mostraron diferencias estadísticamente no significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) (Anexo 4). Estos datos indican que no existió efecto de los tratamientos sobre la cantidad de hojas del cultivo de maíz de la variedad Diamante 8843, obteniendo una media general de 11,73 hojas funcionales por planta.



**Figura 5.** Número de hojas del cultivo maíz (*Zea mays L.*) fertilizado con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

En la Figura 5, se puede observar la media de cada uno de los tratamientos, correspondiente al número de hojas funcionales por planta, donde se denota que no existió efecto de los tratamientos sobre el número de hojas del cultivo de maíz. Asimismo, en los distintos contrastes realizados, mediante el análisis estadístico, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) (Cuadro 10).

**Cuadro 10.** Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos del número de hojas del cultivo de maíz (*Zea mays L.*), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

<b>Contraste</b>	<b>Comparaciones</b>	<b>P valor</b>	<b>Media 1</b>	<b>Media 2</b>
C1	T1 Vs T4	0,22	11,82 ± 0,07	11,60 ± 0,16
C2	T1 Vs T3	0,69	11,82 ± 0,07	11,74 ± 0,19
C3	T3 Vs T4	0,57	11,74 ± 0,19	11,60 ± 0,16
C4	T1 Vs T3, T4	0,30	11,82 ± 0,07	11,67 ± 0,12
C5	T1 Vs T2	0,89	11,82 ± 0,07	11,80 ± 0,12
C6	T4 Vs T5	0,73	11,60 ± 0,16	11,68 ± 0,17

De acuerdo, con los datos presentados en el Cuadro 10, se puede observar que los contrastes propuestos no presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ). Al comparar el tratamiento Testigo con el Tratamiento 4, correspondiente a la incorporación de silicato de magnesio, se observa que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) tal y como se observa en el Contraste 1. Este resultado indica, que la incorporación de silicato de magnesio en la fertilización mineral del cultivo de maíz no tuvo un efecto diferencial en contraste con la fertilización tradicional de Finca La Vega, para el número de hojas del cultivo de maíz.

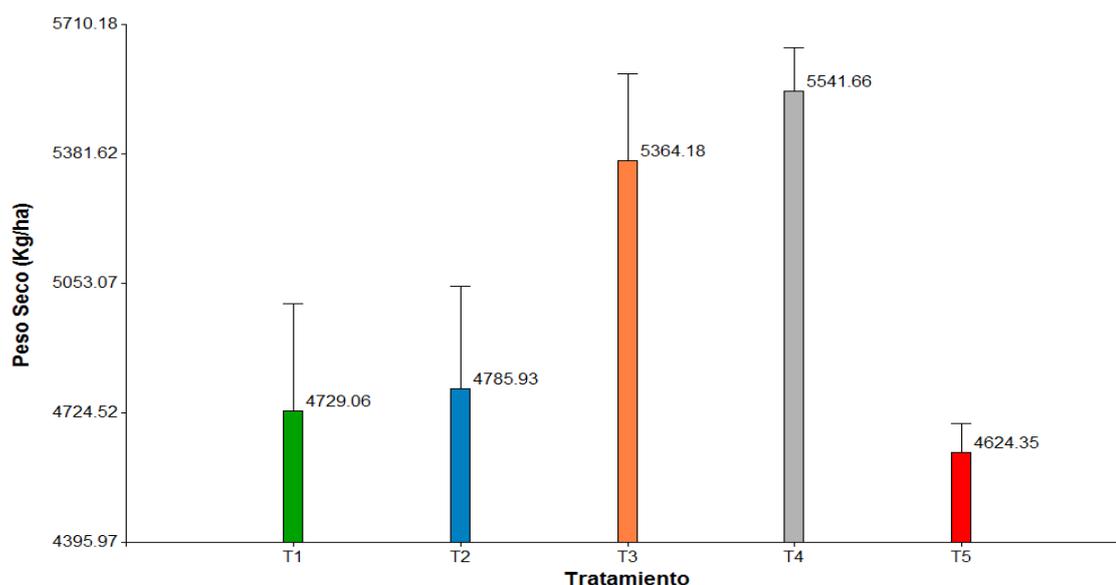
Lo analizado con anterioridad, concuerda con los datos obtenidos en el Contraste 3, en donde se denota que el silicio ( $\text{SiO}_2$ ), aportado por el Tratamiento 4 no influyó en el número de hojas del cultivo de maíz. Así mismo, no se presentaron diferencias significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ), para los contrastes 2 y 4, a través de los cuales se puede diferenciar el efecto de magnesio ( $\text{MgO}$ ); no obstante, dicho nutriente no tuvo efecto diferencial en comparación al tratamiento testigo.

Los resultados obtenidos, demuestran que ninguno de los componentes del silicato de magnesio tuvo un efecto sobre el número de hojas del cultivo de maíz. Los datos anteriormente analizados, concuerdan con los obtenidos por Hurtado (2014), el cual no observó efecto alguno al aplicar silicato de magnesio sobre el número de hojas funcionales en plantas maíz, en comparación a la fertilización tradicional del cultivo.

Por otra parte, al analizar el Contraste 6, se puede observar que el Tratamiento 5, con la mitad de dosis de fósforo ( $P_2O_5$ ), no presentó diferencias con la dosis completa correspondiente al Tratamiento 4; sin embargo, este efecto no se puede atribuir directamente a la incorporación de silicato de magnesio, tal y como ya se mencionó en la variable de altura de las plantas, debido al nivel de fósforo ( $P_2O_5$ ) presente en el suelo donde se realizó el estudio, tal y como se denota en el Anexo 1.

#### 4.1.3 Peso seco de las plantas

Con respecto a la variable de peso seco de las plantas de maíz, se obtuvieron diferencias altamente significativas ( $p$ -valor  $\leq 0,05$ ) (Anexo 5), de manera tal que, la diferencia entre los tratamientos puede ser explicada por el efecto de los diferentes nutrimentos aportados en cada uno de los mismos.



**Figura 6.** Peso seco de las plantas de maíz (*Zea mays L.*) fertilizadas con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

En la Figura 6, se observa que los datos obtenidos para los tratamientos T3 y T4 fueron los superiores, con un peso seco promedio de 5.364,18 Kg/ha y 5.541,66 Kg/ha respectivamente, tal y como se observa en la Figura 6, existiendo un efecto de los tratamientos sobre el peso seco de las plantas de la variedad Los Diamantes 8843 del cultivo de maíz.

De igual manera, al realizar la comparación por contrastes, se encontraron diferencias significativas; encontrando variación en los datos en los contrastes 1, 4 y 6 a un nivel de significancia del 0,05 y para el Contraste 2 a un nivel de significancia del 0,10. Para los contrastes 3 y 5 no se encontraron diferencias estadísticamente significativas (p-valor > 0,05) (Cuadro 11).

**Cuadro 11.** Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos del peso seco de las plantas de maíz (*Zea mays L.*), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Contraste	Comparaciones	P valor	Media 1	Media 2
C1	T1 Vs T4	0,01	4.729 ± 273	5.542 ± 109
C2	T1 Vs T3	0,08	4.729 ± 273	5.364 ± 221
C3	T3 Vs T4	0,48	5.364 ± 221	5.542 ± 109
C4	T1 Vs T3, T4	0,02	4.729 ± 273	5.443 ± 129
C5	T1 Vs T2	0,88	4.729 ± 273	4.786 ± 259
C6	T4 Vs T5	0,0001	5.542 ± 109	4.624 ± 74

En el Cuadro 11, se muestra que para el Contraste 1, los datos presentan diferencias significativas (p-valor ≤ 0,05), con lo cual se puede inferir que la variación entre los tratamientos se explica por la incorporación de silicato de magnesio en la fertilización mineral, obteniendo un efecto sobre el peso seco de las plantas de maíz.

La incorporación de silicato de magnesio posee efectos positivos sobre el follaje del cultivo obteniendo mayor peso seco de las plantas con una media de 5.542 kg/ha, con la adición de dicho fertilizante en comparación a la fertilización tradicional de Finca La Vega, con la cual se obtuvo una media de 4.729 Kg/ha.

No obstante, a través del análisis del Contraste 1, no se puede inferir cuál de los diferentes componentes del silicato de magnesio es el responsable de dicho efecto. Por lo cual, al comparar entre los tratamientos 3 y 4, mediante el Contraste 3 se puede denotar que no existen diferencias significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) entre ambos, siendo el único elemento diferencial el silicio ( $\text{SiO}_2$ ), descartando con ello el posible efecto que tenga este nutriente sobre el peso seco de las plantas de maíz.

El análisis realizado con anterioridad sugiere que el efecto observado en el aumento del peso seco de las plantas de maíz con la incorporación del silicato de magnesio se debe al componente magnesio ( $\text{MgO}$ ) al descartar el efecto del silicio ( $\text{SiO}_2$ ) mediante el Contraste 3. Esta deducción, se reafirma al observar el contraste 2 y 4, a través de los cuales se observa que ambos tratamientos que aportaron magnesio ( $\text{MgO}$ ) fueron superiores a la fertilización tradicional de Finca La Vega.

Estos resultados concuerdan con los datos obtenidos por Araya *et al.* (2015) para el cultivo de sorgo evaluado en un Ultisol bajo invernadero, el cual utilizó fuentes de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) en contraste con fuentes de magnesio ( $\text{MgO}$ ), encontrado diferencias significativas en los tratamientos que aportaron magnesio con respecto al testigo para la variable de peso seco de la parte aérea y peso seco de la raíz. No obstante, para los fertilizantes silicatados no se encontraron diferencias estadísticas en comparación con el testigo, denotándose que el silicio bajo las condiciones evaluadas no fue fundamental para el crecimiento del cultivo.

Por otra parte, en cuanto al efecto del silicato de magnesio sobre la reducción de fósforo aplicada al cultivo de maíz, en Finca La Vega, se presentaron diferencias altamente significativas ( $p$ -valor  $\leq 0,05$ ), tal y como se observa en el Contraste 6, siendo superior el Tratamiento 4, correspondiente a la dosis completa de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) en comparación al Tratamiento 5 correspondiente a la dosis media de dicho nutrimento, el cual obtuvo el menor promedio correspondiente a 4.624,35 Kg/ha.

Con los resultados expuestos con anterioridad se puede inferir que, al incorporar silicato de magnesio en la fertilización mineral del cultivo, no existe un efecto sobre la disponibilidad de fósforo en las condiciones establecidas en el ensayo. Estos resultados concuerdan a los encontrados por Furcal & Herrera (2013), los cuales evaluaron el contenido de fósforo en el suelo de Finca La Vega antes y después de la aplicación de silicio en el cultivo de arroz obteniendo valores de dicho elemento similares en ambos momentos, lo que al mismo tiempo no se tradujo en un mejor rendimiento del cultivo.

Los resultados obtenidos para la presente variable y los encontrados por Furcal & Herrera (2013), respaldan la hipótesis planteada de los resultados observados en el Tratamiento 5, para la variable de altura de la planta y número de hojas, donde no se presentaron diferencias entre la dosis completa de fósforo ( $P_2O_5$ ) y el tratamiento con la reducción de dicho elemento, lo cuales no necesariamente se justifican por la adición de silicato de magnesio.

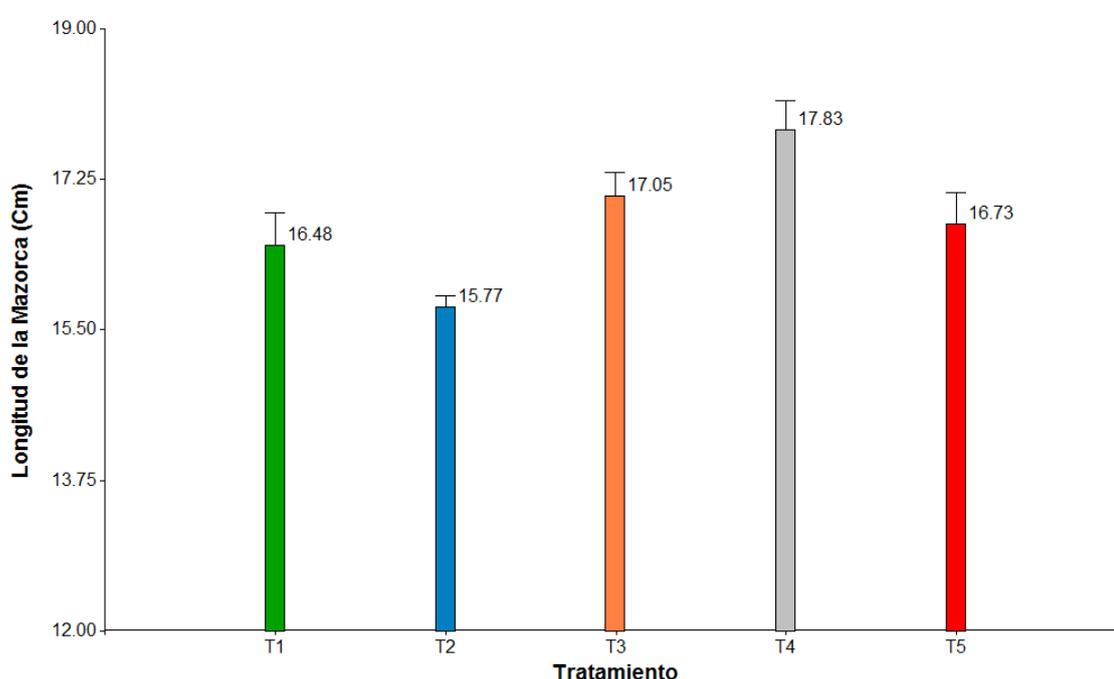
De tal manera, el efecto del silicato de magnesio sobre la disponibilidad de fósforo bajo las condiciones establecidas del presente estudio, no concuerda con lo reportado por Álvarez & Osorio (2014) y Matichenkov (2008), los cuales indican que al adicionar silicatos al suelo la disponibilidad de fósforo aumenta, debido al efecto que posee el ácido ortosilícico ( $H_4SiO_4$ ) de desplazar a los aniones de fósforo que se encuentran fijados por cationes de hierro y aluminio principalmente, aumentando la concentración de dicho nutriente en la solución del suelo.

No obstante, Name & Villarreal (2004) encontraron resultados positivos al incorporar silicatos al suelo para el cultivo de arroz, el cual obtuvo mayor biomasa, altura y número de hijos en el cultivo con dosis de 20 Kg/ha y 40 Kg/ha de  $SiO_2$ . Dicho estudio se realizó en dos tipos distintos de suelos, presentado mayor respuesta en un suelo Ultisol de baja fertilidad en contraste con un Alfisol con fertilidad media en el cual se presentaron diferencias menores; de modo tal que, se puede inferir que la respuesta del cultivo a la fertilización silicatada, dependerá directamente de las características químicas que posea el suelo donde se establezca el cultivo.

## 4.2 Variables de rendimiento

### 4.2.1 Longitud de la mazorca

Los datos obtenidos mediante el Análisis de Varianza para la longitud de la mazorca del cultivo de maíz, muestran diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $\leq 0,05$ ) (Anexo 6). De tal manera que, los tratamientos que obtuvieron la mayor longitud corresponden al T3 y T4, con una media de 17,05 cm y 17,83 cm correspondientemente, existiendo un efecto de los tratamientos sobre la de longitud de la mazorca (Figura 7).



**Figura 7.** Longitud de la mazorca del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) fertilizado con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

De acuerdo con el  $p$ -valor obtenido, se deduce que la diferencia entre tratamientos que se observada en la Figura 7 puede ser explicada por el efecto de la fertilización diferenciada. Del mismo modo, se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $\leq 0,05$ ) al realizar la comparación de los tratamientos en los contrastes 1, 4 y 6. En cuanto a los contrastes 2, 3 y 5 no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) (Cuadro 12).

**Cuadro 12.** Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos de la longitud de mazorca del cultivo de maíz (*Zea mays L.*), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

<b>Contraste</b>	<b>Comparaciones</b>	<b>P valor</b>	<b>Media 1</b>	<b>Media 2</b>
C1	T1 Vs T4	0,007	16,48 ± 0,38	17,83 ±0,33
C2	T1 Vs T3	0,21	16,48 ± 0,38	17,05 ± 0,28
C3	T3 Vs T4	0,09	17,05 ± 0,28	17,83 ±0,33
C4	T1 Vs T3,T4	0,02	16,48 ± 0,38	17,44 ± 0,24
C5	T1 Vs T2	0,14	16,48 ± 0,38	15,77 ± 0,13
C6	T4 Vs T5	0,02	17,83 ±0,33	16,73 ± 0,36

Los datos obtenidos para el Contraste 1, presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p\text{-valor} \leq 0,05$ ), tal y como se observan en el Cuadro 12, de modo tal que, existió un efecto del Tratamiento 4 sobre la longitud de la mazorca, en comparación con la fertilización tradicional de Finca La Vega, obteniendo una media de 17,83 y 16,48 cm, para el tratamiento T4 y T1 respectivamente.

Lo expuesto con anterioridad, indica que la incorporación de silicato de magnesio posee un efecto positivo sobre la longitud de las mazorcas del cultivo de maíz, bajo las condiciones establecidas para el ensayo. Sin embargo, a través del contraste analizado no se puede diferenciar cuál de los dos componentes del fertilizante, fue el que ejerció dicho efecto.

A través del Contraste 3, se logra diferenciar el efecto del silicio ( $\text{SiO}_2$ ), cuyos resultados muestran diferencias estadísticamente no significativas ( $p\text{-valor} > 0,05$ ) entre el Tratamiento 4 con aporte de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y el Tratamiento 3 sin aporte del mismo. Se puede inferir que el efecto observado en el Tratamiento 4 correspondiente a la incorporación de silicato de magnesio se debe específicamente a la adición de magnesio ( $\text{MgO}$ ) por parte del fertilizante.

Lo indicado con anterioridad se puede reafirmar a través del Contraste 4 en donde se obtuvieron diferencias significativas ( $p$ -valor  $\leq 0,05$ ), obteniendo mayor longitud de mazorca los tratamientos con aporte de magnesio (MgO) en comparación con el tratamiento Testigo, el cual no aporta dicho nutrimento.

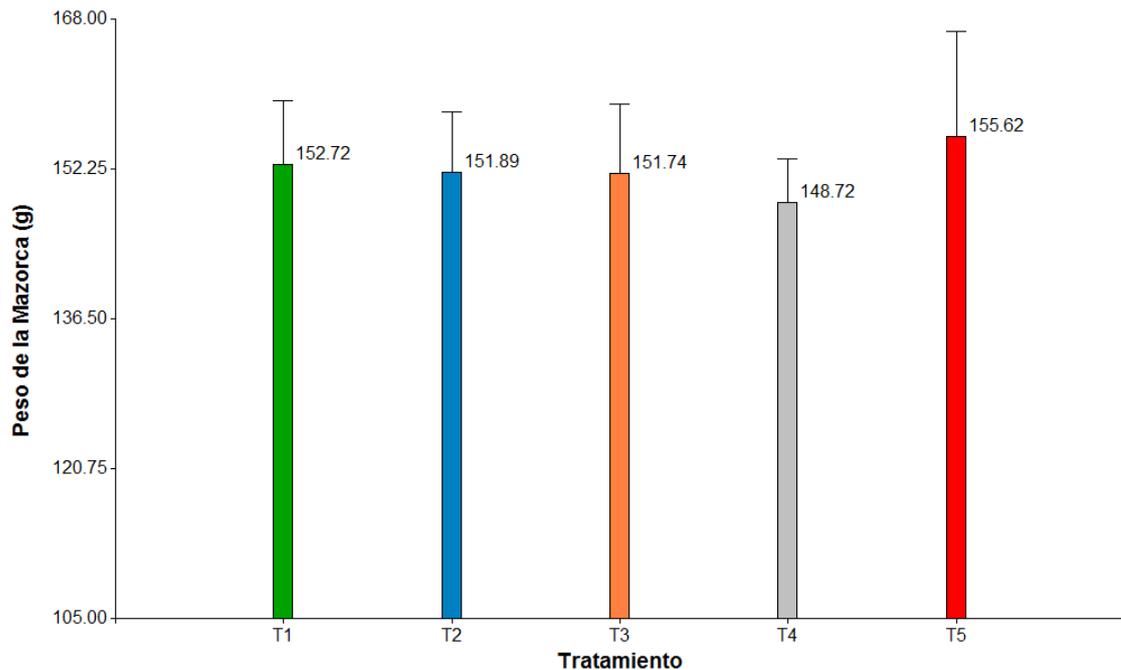
Estos resultados expuestos correspondientes a la longitud de la mazorca concuerdan con lo obtenido en el presente estudio para la variable de peso seco de las plantas de maíz, donde se observó que, de igual manera, la variación superior en los datos se presentó en los tratamientos que generaron un aporte de magnesio (MgO) al cultivo, descartado por ello un posible efecto de silicio (SiO<sub>2</sub>).

No obstante, los datos analizados con anterioridad difieren de los obtenidos por Jiménez (2016), el cual obtuvo diferencias estadísticamente significativas al aplicar silicio (SiO<sub>2</sub>) de manera foliar al cultivo de maíz consiguiendo una longitud de mazorca de 17,30 cm con una dosis de 200 ml/ha del producto comercial, en comparación con las mazorcas con una dosis menor (100 ml/ha) las cuales obtuvieron una longitud de 15,95 cm; de manera tal que, existió un efecto positivo en la longitud de la mazorca al adicionar silicio (SiO<sub>2</sub>) al cultivo de maíz, contrario a la respuesta observada en la presente investigación, no obstante cabe resaltar que la forma de aplicación difiere entre ambas investigaciones.

Por otra parte, se puede denotar que el Tratamiento 5 obtuvo menor media con un valor de 16,73 cm, correspondiente al tratamiento con la reducción del 50% de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) en comparación a la dosis completa de nutriente con la cual se obtuvo una longitud de mazorca mayor (17,83 cm); de manera tal que, se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $\leq 0,05$ ) siendo mejor el tratamiento que aportó la cantidad total de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Por lo que se puede inferir que la incorporación de silicato de magnesio no tuvo un efecto sobre la disponibilidad de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) para el cultivo de maíz bajo las condiciones establecidas en el ensayo.

#### 4.2.2 Peso de la mazorca

Los valores correspondientes al peso de la mazorca obtenidos a través del Análisis de Varianza presentaron diferencias estadísticamente no significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) (Anexo 7). De tal manera, se obtuvo 152,14 gramos en promedio de peso para las mazorcas del cultivo de maíz de la variedad Los Diamantes 8843 bajo las condiciones establecidas en el ensayo.



**Figura 8.** Peso de la mazorca del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) fertilizado con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

En la Figura 8 se observa el comportamiento del peso de la mazorca del cultivo de maíz evaluado, donde se observa la poca diferencia entre los tratamientos la cual según el análisis estadístico y el  $p$ -valor obtenido, no es producto de la fertilización diferenciada.

De igual manera, al realizar la comparación de los tratamientos por contrastes no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) (Cuadro 13), lo cual indica la no existencia de efecto de los tratamientos sobre las variables evaluadas en la investigación.

**Cuadro 13.** Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos del peso de la mazorca del cultivo de maíz (*Zea mays L.*), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

<b>Contraste</b>	<b>Comparaciones</b>	<b>P valor</b>	<b>Media 1</b>	<b>Media 2</b>
C1	T1 Vs T4	0,63	153 ± 7	149 ± 5
C2	T1 Vs T3	0,92	153 ± 7	152 ± 7
C3	T3 Vs T4	0,73	152 ± 7	149 ± 5
C4	T1 Vs T3, T4	0,76	153 ± 7	150 ± 4
C5	T1 Vs T2	0,92	153 ± 7	152 ± 6
C6	T4 Vs T5	0,57	149 ± 5	156 ± 11

En el Cuadro 13 se puede apreciar como la incorporación de silicato de magnesio no posee efecto alguno sobre el peso de la mazorca en comparación con el Tratamiento 1 correspondiente a la fertilización tradicional de Finca La Vega. Lo discutido con anterioridad, se logra apreciar mediante el Contraste 1 donde se denota que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) entre ambos tratamientos.

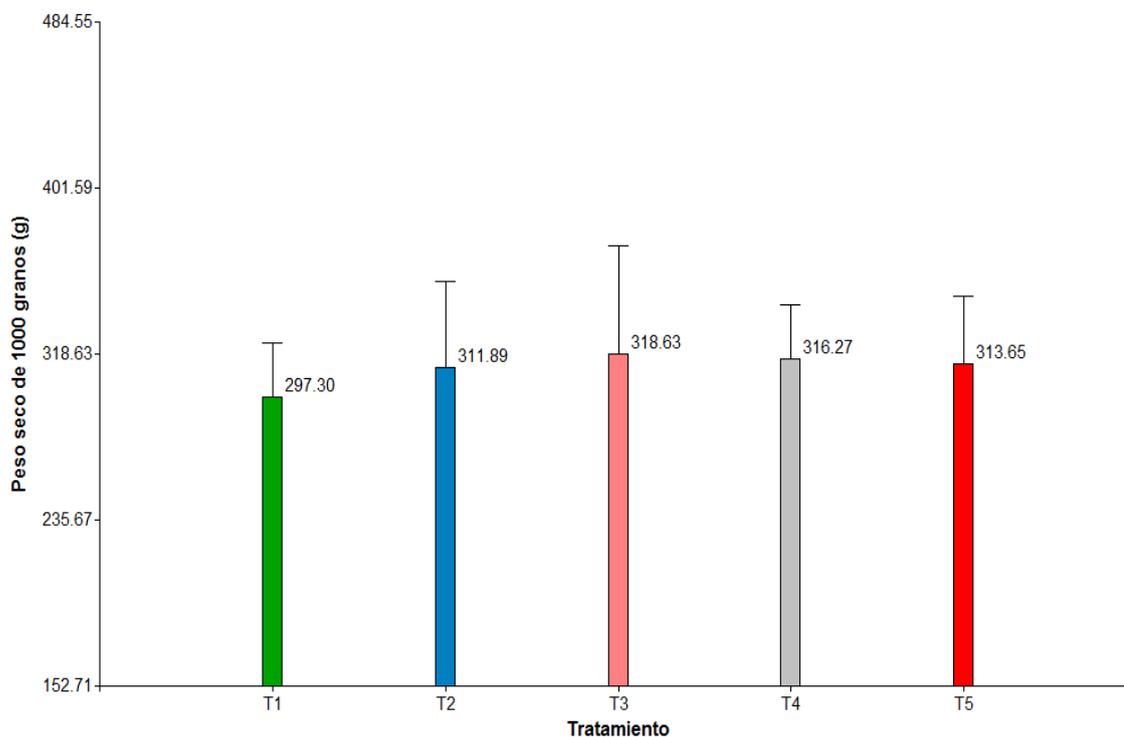
Al comparar los tratamientos 3 y 4 se puede deducir que el silicio ( $\text{SiO}_2$ ) no tuvo efecto sobre el peso de mazorca, debido a que las diferencias no fueron significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ), tal y como se observa en el Contraste 3. Así mismo, el componente relacionado al magnesio ( $\text{MgO}$ ) no presentó respuesta alguna en el peso de las mazorcas, lo cual se denota al observar los contrastes 2 y 4; de manera tal que, ninguno de los componentes del silicato de magnesio tuvo un efecto sobre el peso de la mazorca del cultivo de maíz.

La no respuesta del cultivo de maíz a la adición de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) en la presente investigación mediante la incorporación de silicato de magnesio puede deberse a las características propias del suelo donde se realizó el ensayo, siendo el mismo un suelo de tipo Inceptisol, caracterizado por la presencia de minerales primarios (Mica) y/o arcillas de alófana que presentan altas cantidades de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) en su estructura, tal y como lo indica Fassbender (1984), en comparación a otros tipos de suelos como los Ultisoles y Oxisoles, deficientes en el nutrimento en cuestión.

Por otra parte, al comparar el peso de la mazorca del Tratamiento 4 correspondiente a la dosis completa de fósforo ( $P_2O_5$ ) y el Tratamiento 5 con la reducción del 50% del nutrimento, se denota que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ); no obstante, el posible efecto de silicato de magnesio sobre la disponibilidad de fósforo ( $P_2O_5$ ), no se puede comprobar, debido a las características químicas presentes en el suelo del presente estudio, tal y como se ha mencionado con anterioridad.

#### 4.2.3 Peso seco de 1000 granos

En cuanto a los datos obtenidos mediante el Análisis de Varianza el peso seco de 1000 granos, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) (Anexo 8). Con los resultados obtenidos, se concluye que no existió efecto alguno de los tratamientos sobre el peso seco de 1000 granos, obteniendo una media general de 311,53 gramos, correspondiente al peso seco de 1000 granos en el cultivo de maíz de la variedad Diamante 8843.



**Figura 9.** Peso seco de 1000 granos cultivo de maíz (*Zea mays L.*) fertilizado con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

En la Figura 9 se demuestra la homogeneidad de los datos correspondientes al peso seco de 1000 granos de maíz, de manera tal que no se presentó efecto de los tratamientos para dicha variable. De igual manera, al realizar la comparación por contrastes entre los diversos tratamientos no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) (Cuadro 14).

**Cuadro 14.** Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos del peso seco de 1000 granos del cultivo de maíz (*Zea mays L.*), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

<b>Contraste</b>	<b>Comparaciones</b>	<b>P valor</b>	<b>Media 1</b>	<b>Media 2</b>
C1	T1 Vs T4	0,27	297 ± 12	316 ± 12
C2	T1 Vs T3	0,44	297 ± 12	319 ± 24
C3	T3 Vs T4	0,93	319 ± 24	316 ± 12
C4	T1 Vs T3, T4	0,28	297 ± 12	317 ± 13
C5	T1 Vs T2	0,52	297 ± 12	312 ± 19
C6	T4 Vs T5	0,89	316 ± 12	314 ± 15

Al observar el Contraste 1, se muestra que el Tratamiento 4 correspondiente a la incorporación de silicato de magnesio posee la media superior con un valor de 316 gramos, en comparación a 297 gramos correspondiente al Testigo; no obstante, según el análisis estadístico entre ambos tratamientos las diferencias no son significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ), lo cual indica que la incorporación de silicato de magnesio en la fertilización mineral, no posee efecto sobre el peso de los granos del cultivo de maíz, en comparación con la fertilización tradicional de Finca La Vega.

Estos resultados indican que ninguno de los componentes del silicato de magnesio favoreció el llenado de los granos; lo mencionado con anterioridad, se reafirma al observar el Contraste 3, en donde la adición de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) no tuvo un efecto diferencial en el peso de los granos del maíz, denotándose la no esencialidad de dicho elemento para la variable evaluada.

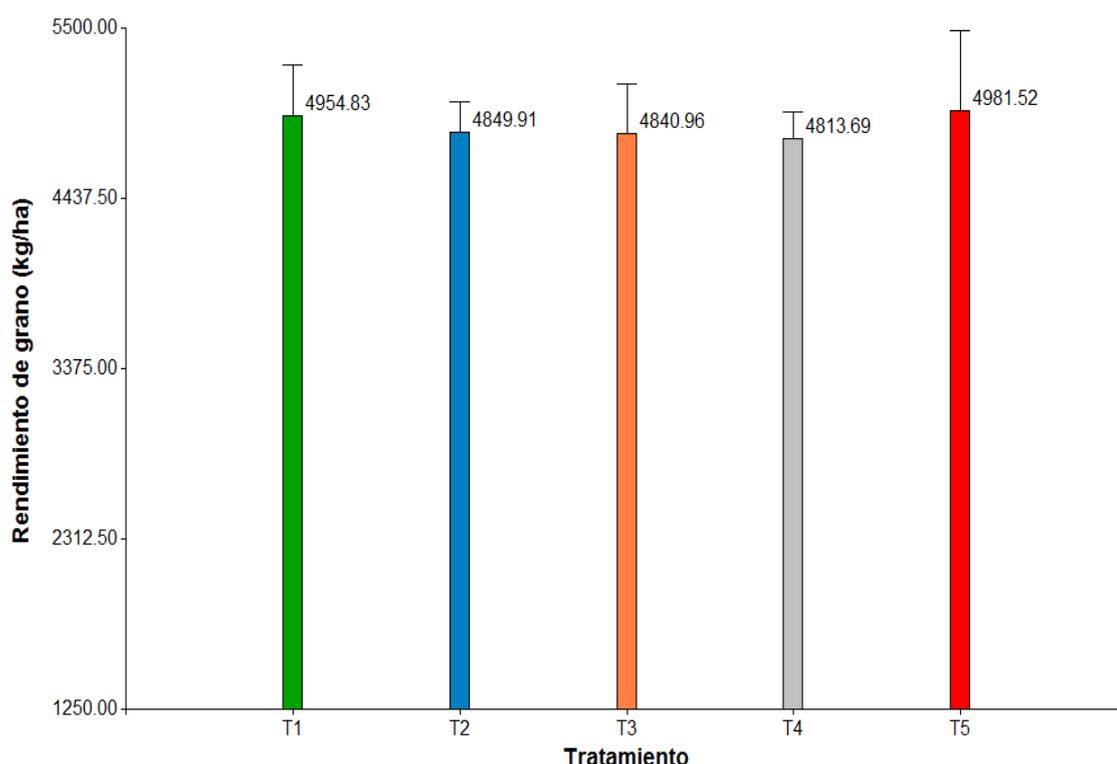
Así mismo, al analizar los contrastes 2 y 4, se pudo corroborar que el magnesio (MgO) de igual forma que el silicio (SiO<sub>2</sub>) no cumplió un papel importante en el llenado de los granos del cultivo, teniendo valores semejantes al tratamiento sin la incorporación del mismo; de modo tal que, no se justifica la incorporación del magnesio (MgO) en la fertilización mineral de Finca La Vega para el cultivo de maíz.

No obstante, Jiménez (2016) ha encontrado efectos positivos sobre el peso de los granos de maíz al incorporar silicio (SiO<sub>2</sub>) obteniendo promedios superiores en los tratamientos donde se adicione una dosis media de dicho elemento, en comparación con los tratamientos con dosis menores, existiendo una respuesta del cultivo hacia la fertilización con silicio (SiO<sub>2</sub>).

Con respecto a la reducción de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) en el cultivo de maíz realizada a través del Tratamiento 5, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas (p-valor > 0,05) en comparación a la dosis completa de dicho elemento, tal y como se observa en el Contraste 6. No obstante, según el análisis realizado para otras variables dicho efecto puede no deberse a la incorporación de silicato de magnesio, debido a las características químicas del suelo presente en el lugar de la investigación, tal y como lo demuestran las evidencias expuestas por Furcal & Herrera (2013).

#### 4.2.4 Rendimiento de grano

Los resultados correspondientes al rendimiento de grano de cultivo de maíz obtenidos mediante el Análisis de Varianza presentaron diferencias estadísticamente no significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) (Anexo 9). De tal manera que, la variación en los datos obtenidos no se explica por el efecto de los tratamientos, obteniendo un valor promedio de rendimiento de grano de 4.888,18 Kg/ha para el cultivo de maíz de la variedad Diamante 8843.



**Figura 10.** Rendimiento de grano estandarizado al 14% de humedad del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) fertilizado con azufre, magnesio y silicio en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

En la Figura 10 se observa el comportamiento del rendimiento en donde se observa que no existió efecto de los tratamientos sobre la variable de rendimiento de grano del maíz, tal y como se demostró con el análisis estadístico realizado. Del mismo modo, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) entre los diferentes contrastes (Cuadro 15).

**Cuadro 15.** Resultados de prueba de comparación por contrastes para la estimación de diferencias entre tratamientos en el rendimiento de grano del cultivo de maíz (*Zea mays L.*), Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

<b>Contraste</b>	<b>Comparaciones</b>	<b>P valor</b>	<b>Media 1</b>	<b>Media 2</b>
C1	T1 Vs T4	0,69	4.955 ± 315	4.814 ± 160
C2	T1 Vs T3	0,79	4.955± 315	4.841 ±310
C3	T3 Vs T4	0,93	4.841 ±310	4.814 ± 160
C4	T1 Vs T3, T4	0,72	4.955 ± 315	4.827 ± 164
C5	T1 Vs T2	0,77	4.955 ± 315	4.850 ± 193
C6	T4 Vs T5	0,75	4.814 ± 160	4.982 ± 499

Al observar el Contraste 1, se observa que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) entre el tratamiento Testigo y el Tratamiento 4, correspondiente a suministro de silicato de magnesio. De tal manera y con los datos obtenidos se puede deducir que la incorporación de silicato de magnesio en la fertilización mineral no tuvo efecto con respecto a la fertilización tradicional en Finca La Vega para el cultivo de maíz.

Por otra parte, al analizar el Contraste 4 indica que no existen diferencias significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) por lo que el silicio ( $\text{SiO}_2$ ) no generó un aporte adicional en el rendimiento de grano del cultivo de maíz. Así mismo, el componente magnesio ( $\text{MgO}$ ) del silicato evaluado no presentó un efecto diferencial sobre el rendimiento de grano del cultivo de maíz, lo cual se puede deducir al analizar el contraste 2 y 4, en donde no se presentaron diferencias significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) con la adición de dicho nutrimento.

De tal manera y con el análisis anterior se puede concluir que ninguno de los componentes del silicato de magnesio ejerció efecto alguno sobre el rendimiento de grano del cultivo de maíz. Estos resultados coinciden con lo obtenido por Hurtado (2014), el cual no logró mayor rendimiento en el cultivo de maíz con la adición de silicato de magnesio en comparación con la fertilización testigo.

La no respuesta del cultivo de maíz a la fertilización con magnesio (MgO), para las variables evaluados, exceptuando el peso seco de las plantas y la longitud de la mazorca en donde éxito un efecto positivo de dicho nutriente, puede tener explicación al detallar el Anexo 1, correspondiente al análisis químico de suelos del cultivo, en donde se muestra que dicho nutriente se encuentra dentro del rango óptimo, tal y como lo indica Bertsch (Sf), según la tabla de niveles críticos de nutrientes, razón por la cual la fertilización con magnesio (MgO) en el suelo evaluado, tendrá una baja probabilidad de respuesta.

Por otra parte, al observar el Contraste 6 se observa que no existen diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ), entre la dosis completa de fósforo ( $P_2O_5$ ), correspondiente al Tratamiento 4 y el Tratamiento 5 con la mitad de dosis de dicho elemento. Estos datos, podrían indicar que la incorporación del silicato de magnesio favoreció el aprovechamiento del fósforo ( $P_2O_5$ ); no obstante, debido a los niveles de suficiencia de dicho nutrimento en el suelo evaluado, se puede deducir que existe baja probabilidad de respuesta del cultivo, razón por la cual no se puede concluir de manera precisa dicho cuestionamiento.

## 5. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones evaluadas en la presente investigación se puede concluir que:

- La incorporación de silicato de magnesio en la fertilización mineral del cultivo maíz (*Zea mays L.*) generó un aumento sobre el peso seco de las plantas y la longitud de las mazorcas del cultivo.
- El efecto observado sobre el peso seco de las plantas y la longitud de mazorca del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) al incorporar silicato de magnesio, se puede atribuir al componente magnesio (MgO), debido a la respuesta de ambas variables a la aplicación de dicho nutrimento.
- La incorporación de magnesio (MgO) en la fertilización puede ser importante en la producción de maíz (*Zea mays L.*) para forraje, debido al incremento que se obtuvo en la producción de biomasa al incorporar magnesio (MgO) en la fertilización mineral.
- El magnesio (MgO) no ejerció efecto sobre la altura de la planta, número de hojas, peso de la mazorca, peso de 1000 granos y rendimiento de grano del cultivo de maíz (*Zea mays L.*).
- El Silicio (SiO<sub>2</sub>) incorporado a la fertilización no tuvo efecto sobre ninguna de las variables evaluadas en la investigación, descartando su posible efecto directo en el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays L.*).
- No se logró concluir de manera precisa, si la inclusión de silicato de magnesio en la fertilización del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) permitiría reducir las dosis de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), debido a que únicamente se encontró diferencias entre tratamientos en las variables peso seco y longitud de la mazorca y no se obtuvieron diferencias en la altura de la planta, número de hojas, peso de la mazorca, peso de 1000 granos y rendimiento de grano.

## 6. RECOMENDACIONES

De acuerdo a los datos obtenidos en la investigación se recomienda:

- Evaluar dosis superiores de silicato de magnesio, para valorar si un incremento del mismo puede generar una mayor respuesta en el cultivo de maíz (*Zea mays L.*).
- Realizar una comparación entre distintas fuentes de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y/o magnesio ( $\text{MgO}$ ).
- Realizar un análisis económico para valorar si el incremento en el peso seco de las plantas justifica la adición de magnesio ( $\text{MgO}$ ) en cultivo de maíz (*Zea mays L.*) forrajero.
- Realizar un ensayo similar en suelos deficientes en fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) para valorar si es posible reducir la dosis de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) en el cultivo de maíz (*Zea mays L.*) cuando se incorpora silicatos en la fertilización.

## 7. BIBLIOGRAFIA:

- Álvarez, C; Osorio, W. 2014. Silicio Agronómicamente Esencial. Medellín, CO, Universidad Nacional de Colombia. 102 p.
- Araya, M; Camacho, M; 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): 47-59.
- Azcón, J; Talón, M. 2013. Fundamentos de fisiología vegetal. 2 ed. Madrid, ES, McGraw-Hill. Sp
- Bertsch, F. Sf. El análisis de suelos: Una herramienta para diagnosticar los problemas nutricionales de los suelos. ACCS (Asociación Costarricense de la ciencia del suelo). (en línea). Consultado 04 Mar 2016. Disponible en [http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual\\_ciencia/av0713\\_analis\\_suelo.pdf](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/av0713_analis_suelo.pdf)
- Borda, O; Barón, F; Gómez, M. 2007. El silicio como elemento benéfico en avena forrajera (*Avena sativa L.*): respuestas fisiológicas de crecimiento y manejo. *Agronomía Colombiana*. 25 (2). 273 – 279 p.
- CISAAGR. Sf. Sulfato de potasio. (en línea). Consultado 11 Feb 2017. Disponible en <https://www.google.es/search?q=Caracteristicas+sulfato+de+magnesio+&hl=es&#hl=es&q=fertilizante+sulfato+de+potasio>
- CISAAGRO. Sf. Muriato de potasio. (en línea). Consultado 11 Feb 2017. Disponible en <http://www.cisaagro.com/images/stories/VADEMECUM2/fertilizantes/MURIATO%20DE%20POTASIO-01.pdf>
- Datnoff, L; Snyder, G; Korndörfer, G. 2001. Silicon in Agriculture. Amsterdam, DE, Elsevier Science. 424 p.

- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini MG; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, C. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. (en línea). Consultado 5 Mayo 2016. Disponible en <http://www.infostat.com.ar/>
- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. (en línea). Consultado 27 Ene 2017. Disponible en <http://www.pnas.org/content/91/1/11.full.pdf>
- Espinosa, A; Tadeo, M; Turrent, A; Sierra, M; Gómez, N; Zamudio, B. 2013. Rendimiento de variedades precoces de maíz grano amarillo para valles altos de México. *Agronomía Mesoamericana*. 24(1):93-99.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2002. Los fertilizantes y sus usos. (en línea). Consultado 11 Feb 2017. Disponible en [https://rhes.ruralhorizon.org/uploads/documents/los\\_fertilizantes\\_y\\_su\\_uso\\_faoifa.pdf](https://rhes.ruralhorizon.org/uploads/documents/los_fertilizantes_y_su_uso_faoifa.pdf)
- Fassbender, H. 1984. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, CR, IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 422 p.
- FERTINOVA. Sf. Ficha técnica: Urea. (en línea). Consultado 11 Feb 2017. Disponible en <http://www.fertinova.mx/sites/default/files/FICHA%20UREA.pdf>
- Finck, A. 1988. Fertilizantes y fertilización: fundamentos y métodos para la fertilización de los cultivos. Barcelona, ES, Editorial Riverté S.A. 454 p.
- Furcal, P; Barquero, A. 2013. Respuesta del plátano a la fertilización con P, K y S durante el primer ciclo productivo. *Agronomía Mesoamericana*. 24(2): 317-327.
- Furcal, P; Herrera, A. 2013. Efecto del silicio y plaguicidas en la fertilidad del suelo y rendimiento del arroz. *Agronomía Mesoamericana*. 24(2):365-378.

- Hurtado, C. 2014. 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. Guayaquil, EC, Escuela superior politécnica del litoral. 99 p.
- Ibañez, S; Gisbert; J; Moreno, H. 2011. Estructura general de los silicatos. (en línea). Universidad Politécnica de Valencia. Consultado 28 Mar 2016. Disponible en <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12888/Estructura%20de%20los%20Silicatos.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Iriondo, M. 2007. Introducción a la geología. 3 ed. Córdoba, AR, Editorial Brujas. Sp.
- Jiménez, E. 2016. Evaluación de dosis y fuentes de silicio líquido aplicado foliarmente en el cultivo de maíz (*Zea mays L.*). Tesis Tesis B.Sc. Guayaquil, EC, Universidad de Guayaquil. 98 p.
- Kass, D. 2007. Fertilidad de suelos. San José, CR, EUNED. 272 p.
- Liang, Y; Nikolic, M; Bélanger, R; Gong,H; Song, A. 2015. Silicon in Agriculture: From Theory to Practice. New York, US, Springer Dordrecht Heidelberg. 235p.
- Lindsay, W. 2001 chemical equilibria in soils. New Jersey, US, The Blackburn Press. 449 p.
- Ma, J, Miyake, Y; Takahashi, E. 2001. Chapter 2: Silicon as a beneficial element for crop plants. (en línea). Consultado 27 Ene 2017. Disponible en <http://thefarm.com/studies/Silicon%20in%20Agriculture%20Volume%208%20Chapter%202%20Silicon%20as%20a%20beneficial%20element%20for%20crop%20plants.pdf>
- Matichenkov, V. 2008. Deficiencia y funcionalidad del sílice en suelos, cosechas y alimentos. (en línea). Consultado 23 Mar 2016. Disponible en [http://soilace.com/pdf/pon2008/d28/Cas/21\\_Matichenkov.pdf](http://soilace.com/pdf/pon2008/d28/Cas/21_Matichenkov.pdf)

- Mitani, N; Ma, J. 2005. Uptake system of silicon in different plant species. Journal of Experimental Botany. 56(414):1255-1261 p.
- Monroe, J; Wicander, R; Pozo, M. 2008. Geología: dinámica y evolución de la tierra. 4 ed. Madrid, ES, Editorial Paraninfo. 744 p.
- Moreno, R; Garcia, T; Stroch, JM; Muñoz, M; Yañez, E; Perez, E. 2011. Fertilización y corrección edáfica de suelos agrícolas con productos orgánicos (en línea). Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. 9. Consultado 28 Mar 2016. Disponible en <http://www.uax.es/publicacion/fertilizacion-y-correccion-edafica-de-suelos-agricolas-con-productos-organicos.pdf>
- Name, B; Villarreal, J. 2004. Compendio de resultados de investigación del programa de suelos del IDIAP: Estudios de suelos Ultisoles y Alfisoles. realizado en las estaciones experimentales de Cabalcito, Guarumal y Rio Hato. Ciudad Panamá, PA, IDAP (Instituto de investigación agropecuaria de Panamá), 229 p.
- Navarro, G; Navarro, S. 2008. Química Agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. 2 ed. Madrid, ES, Mundi-Prensa. 492 p.
- Navarro, G; Navarro, S. 2013. Química Agrícola: Química del suelo y de nutrientes esenciales para las plantas. 3 ed. Madrid, ES, Mundi-Prensa. 508 p.
- Navarro, G; Navarro, S. 2014. Fertilizantes: Química y acción. Madrid, ES, Mundi-Prensa .241 p.
- Núñez, J. 1979. Cartografía detallada de suelos de la finca Peñas Blancas, San Carlos. Tesis Lic. San José, CR: UCR: Facultad de agronomía. 255 p.
- Osorio, N. 2014. Manejo de nutrientes en suelos del trópico. Medellín, CO, Universidad Nacional de Colombia. 416 p.

- Paliwal, R; Granados, G; Lafitte, H; Violic, A. 2001. El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. Roma, IT, FAO. 392 p.
- Puentes, JA. 2016. Comparación de la fertilización tradicional con la fertilización a base de silicio en la producción de maíz. Tesis B.Sc. Torreón, Coahuila, MX, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 30 p.
- Pulgarín, S. 2011. Respuesta de una mezcla forrajera establecida de clima frío, a la aplicación de silicato de magnesio. Escuela politécnica nacional. Tesis B.Sc. Quito, EC, Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria. 116 p.
- Quero, E. 2008. La biosilificación proceso biológico fundamental en la productividad vegetal. Consultado 7 Abr 2016. Disponible en [http://api.ning.com/files/2ZKVfghWByMzbsJPkRBWf-tqFOGvEi\\*oUgtoXIVRLrsiP\\*ixl6nlvSKIfLHqDIILgp\\*4-fBDrfBhMoltnco-3nCtKrC7gj8u/2008quero03.pdf](http://api.ning.com/files/2ZKVfghWByMzbsJPkRBWf-tqFOGvEi*oUgtoXIVRLrsiP*ixl6nlvSKIfLHqDIILgp*4-fBDrfBhMoltnco-3nCtKrC7gj8u/2008quero03.pdf)
- Quero, E. 2009. Nutrición con silicio y sus aplicaciones a cultivos a cielo abierto y en agricultura protegida: Un pequeño recorrido por la naturaleza. (en línea). Consultado 5 Abr 2016. Disponible en <http://escuelasinmurosplanetairis.org/biblioteca/NutricionConSilicioySusAplicaciones.pdf>
- Quero, E. 2015. El flujo de silicio en los cultivos agrícolas (Maíz). (en línea). Consultado 8 Feb 2017. Disponible en <http://www.engormix.com/MA-agricultura/maiz/articulos/flujo-silicio-cultivos-agricolas-t6787/417-p0.htm>
- Raya, JC; Aguirre, C. 2012. El Papel del Silicio en los Organismos y Ecosistemas. Conciencia Tecnológica No. 43
- Ruiz, R. 1999. Características de algunos fertilizantes nitrogenados para uso en goteo. (en línea). Consultado 11 Feb 2017. Disponible en <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/informativos/NR35530.pdf>

Snyder, G; Matichenkov, V; Datnoff, L. 2006. Silicon. (en línea). Consultado 25 Ene 2017. Disponible en <http://www.siliforce.com/pdf/7c/Snyder%20Mati%20Les%20effets%20du%20Silicium.pdf>

Usón, A; Boixadera, J; Bosch, A; Martin, A. 2010. Tecnología de suelos: estudio de casos. Zaragoza, ES, Universidad de Zaragoza. 515 p.

## 8. ANEXOS

**Anexo 1.** Análisis químico completo de suelos del lote Quebrada terraza, donde se realizó en experimento en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

**REPORTE DE ENSAYO SUELOS**

---

CLIENTE: **Gadea- La Vega. Unidad de Cultivos** FECHA: **17/02/2016**

PROVINCIA: **Alajuela** CANTON: **San Carlos** DISTRITO: **Florencia**

OTRAS SEÑAS:  
**Muestra tomada el 29/01/2016**

---

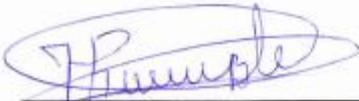
N° Lab	Identificación de campo	pH	cmol(+)/L				mg/L				
			Ca	Mg	K	Acidez ext.	Cu	Fe	Mn	Zn	P
S16_24	Lote Terraza quebrada	5,27	12,96	4,82	0,19	0,3	6	280	55	1,9	16,39

N° Lab	Identificación de campo	C.I.C.E	%
			Saturación de acidez
S16_24	Lote Terraza quebrada	18,27	1,64

Observación: Muestras tomadas por el interesado.  
Los resultados de este ensayo reflejan únicamente a la muestra entregada en el laboratorio por el interesado.

Metadología: K, P y menores extraídos con Olsen Modificado. Ca, Mg y Acidez extractable extraídos con KCl. pH en agua.



Ing. Parménides Furcal Beriguete  
Coordinador Laboratorio Análisis Agronómicos



**Anexo 2.** Productos químicos utilizados durante el ciclo del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) fertilizado con azufre, magnesio y silicio en La Vega en Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

<b>Producto</b>	<b>Ingrediente Activo</b>	<b>Dosis</b>	<b>Época de aplicación</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Gramoxone®</b>	Paraquat	1,5 l/ha	Presiembra y al momento de siembra	Herbicida: para control generalizado de malezas
<b>Atranex® 90 WG</b>	Atrazina	2 Kg/ha	Al momento de la siembra	Herbicida: sistémico para el control de malezas de hoja ancha
<b>Vydate® L</b>	Oxamil	0,5 l/ha	Al momento de la siembra	Insecticida-Acaricida
<b>Forater® 10 GR</b>	Terbufos	10 Kg/ha	Al momento de la siembra	Insecticida-Nematicida
<b>Cosmo-In®</b>	Alcohol etoxilado + Polyxiethylene Alkyl Ether	200 ml/ha	Al momento de siembra	Coayudante
	Abamectina	0,5 L/ha	39 dds	Insecticida: utilizado para el control del gusano cogollero

### Anexo 3. Análisis de varianza para la altura de la planta, Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Resultados para el modelo: modelo.050\_Altura de la planta\_REML

Variable dependiente: Altura de la planta

#### Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
25	-22,47	-12,51	21,23	0,08	0,10	

AIC y BIC menores implica mejor

#### Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	17769,86	<0,0001
Trata	4	0,58	0,6837

### Anexo 4. Análisis de varianza para el número de hojas de la planta, Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Resultados para el modelo: modelo.051\_Número de hojas\_REML

Variable dependiente: Número de hojas

#### Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
25	43,87	53,83	-11,94	0,16	0,07	

AIC y BIC menores implica mejor

#### Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	18837,88	<0,0001
Trata	4	0,65	0,6357

**Anexo 5.** Análisis de varianza para el peso seco de las plantas, Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Resultados para el modelo: modelo.052\_Peso seco de las plantas\_REML

Variable dependiente: Peso seco de las plantas

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
25	330,02	339,98	-155,01	611,23	0,27	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	2065,41	<0,0001
Trata	4	3,22	0,0343

**Anexo 6.** Análisis de varianza para la longitud de mazorca, Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Resultados para el modelo: modelo.053\_Longitud de mazorca\_REML

Variable dependiente: Longitud de mazorca

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
25	73,26	83,22	-26,63	0,84	0,43	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	12387,03	<0,0001
Trata	4	3,97	0,0157

**Anexo 7.** Análisis de varianza para el peso de la mazorca, Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Resultados para el modelo: [modelo.054\\_Peso de la mazorca\\_REML](#)

Variable dependiente: *Peso de la mazorca*

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
25	194,52	204,48	-87,26	15,11	0,02	

*AIC y BIC menores implica mejor*

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	2035,63	<0,0001
Trata	4	0,13	0,9706

**Anexo 8.** Análisis de varianza para el peso seco de 1000 granos, Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Resultados para el modelo: [modelo.055\\_Peso.100.gr\\_REML](#)

Variable dependiente: *Peso.100.gr*

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
25	145,18	155,14	-62,59	3,59	0,05	

*AIC y BIC menores implica mejor*

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	1630,70	<0,0001
Trata	4	0,40	0,8080

**Anexo 9.** Análisis de varianza para el rendimiento de grano, Finca La Vega, San Carlos, Alajuela, 2016.

Resultados para el modelo: modelo.049\_Rendimiento de grano\_REML

Variable dependiente: Rendimiento de grano

Medidas de ajuste del modelo

<u>N</u>	<u>AIC</u>	<u>BIC</u>	<u>logLik</u>	<u>Sigma</u>	<u>R2</u>	<u>0</u>
25	341,28	351,24	-160,64	704,97	0,01	

*AIC y BIC menores implica mejor*

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	<u>numDF</u>	<u>F-value</u>	<u>p-value</u>
(Intercept)	1	1177,93	<0,0001
Trata	4	0,06	0,9932