



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

RESPUESTA AGRONÓMICA Y FISIOLÓGICA DE LA FRESA (*Fragaria x ananassa Duch.*) A LA APLICACIÓN DE SILICIO

JUAN PABLO CRUZ HIPÓLITO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

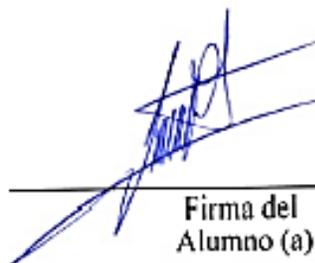
2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Juan Pablo Cruz Hipólito, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Prometeo Sánchez García, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Respuesta agronómica y fisiológica de la fresa (Fragaria x ananassa Duch.) a la aplicación de silicio

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 3 de Septiembre de 2018


Firma del
Alumno (a)


Dr. Prometeo Sánchez García
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

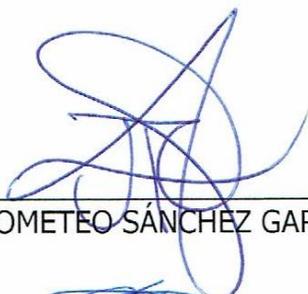
La presente tesis titulada: **Respuesta agronómica y fisiológica de la fresa (*Fragaria x ananassa Duch.*) a la aplicación de silicio**, realizada por el alumno: Juan Pablo Cruz Hipólito, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. PROMETEO SÁNCHEZ GARCÍA

ASESOR:



DR. GUILLERMO CALDERÓN ZAVALA

ASESOR:



DR. VICTOR HUGO VOLKE HALLER

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, septiembre 2018

RESPUESTA AGRONÓMICA Y FISIOLÓGICA DE LA FRESA (*Fragaria x ananassa* Duch.) A LA APLICACIÓN DE SILICIO

Juan Pablo cruz Hipólito, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

El silicio (Si) es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, pero no es considerado un elemento esencial para las plantas. Sin embargo, el resultado de distintas investigaciones muestra los efectos benéficos de este elemento en varias especies. La fresa es una de las frutillas más importantes a nivel mundial, y se ha demostrado la presencia de transportadores de silicio en algunos de sus órganos, pero la información acerca de los efectos de su acumulación para este cultivo es limitada. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del silicio en variables fisiológicas y agronómicas de fresa. Se utilizó la variedad Festival y se evaluó el efecto de las dosis 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 mM de Si aplicados en solución y 0.0, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 mM de Si aplicados al follaje utilizando metasilicato de sodio (Na_2SiO_3) como fuente. Las variables estudiadas fueron el rendimiento, la producción de biomasa, variables de calidad del fruto, la concentración en hoja de elementos esenciales seleccionados y variables fisiológicas como la fotosíntesis neta, la transpiración y la conductancia estomática. La aplicación de silicio en solución incrementó el rendimiento de manera significativa (Tukey=0.05). La producción de biomasa y su compartimentación también fueron influenciadas por la dosis y forma de aplicación de silicio. La concentración en hojas de N, Ca, Cu, Fe y Mn se incrementó con dosis superiores a 2.5 mM de Si independientemente de la forma de aplicación. De las variables relacionadas al intercambio gaseoso únicamente la fotosíntesis neta y la transpiración se incrementaron como respuesta a la aplicación foliar de silicio. Puede recomendarse el uso de silicio como un elemento bioestimulante para mejorar el rendimiento, la absorción de elementos esenciales y algunas variables fisiológicas en fresa. No obstante, su papel en el metabolismo vegetal debe ser estudiado con mayor profundidad.

Palabras clave: *Silicio, efectos benéficos, acumulación, rendimiento, calidad, variables fisiológicas, intercambio gaseoso.*

AGRONOMIC AND PHYSIOLOGICAL RESPONSE IN STRAWBERRY (*FRAGARIA X ANANASSA DUCH.*) TO SILICON APLICACION

Juan Pablo cruz Hipólito, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

Silicon (Si) is one of the most abundant elements in the earth's crust, but it is not considered an essential element for plants. However, the result of several investigations shows beneficial effects of this element in different species. Strawberry is one of the most important berries worldwide, and it has been shown the presence of silicon transporters in some of its organs, but information on the effects of its accumulation for this is limited. The objective of this research was to evaluate effects of silicon on strawberry physiological and agronomic variables. The Festival variety was used and effect of the 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 mM Si doses applied in solution and 0.0.1.0.2.0, 3.0 and 4.0 mM Si applied to the foliage using sodium metasilicate (Na_2SiO_3) as source was evaluated. The variables studied were yield, biomass production, fruit quality parameters, concentration of essential elements and physiological variables such as net photosynthesis, transpiration and stomatal conductance. Application of silicon in solution increased yield significantly (Tukey = 0.05). Production of biomass and its compartmentalization was also influenced by dose and form of application of silicon. Concentration in leaves of N, Ca, Cu, Fe and Mn was increased with doses higher than 2.5 mM Si regardless of the application form. About variables related to gaseous exchange, only net photosynthesis and transpiration were modified in response to the foliar application of silicon. Use of silicon can be recommended as a biostimulant element to improve yield, uptake of essential elements and some physiological variables in strawberry. However, its role in plant metabolism must be studied carefully.

Key words: *Silicon, beneficial effects, accumulation, yield, quality, physiological variables, gas exchange.*

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por darme la vida, por brindarme la capacidad y la determinación para cumplir mis metas y rodearme de personas maravillosas que día con día me impulsan a ser mejor profesional y mejor hombre. Nunca me he sentido solo porque sé que donde vaya, tú vas conmigo.

A mis asesores, Dr. Prometeo Sánchez, Dr. Guillermo Calderón y Dr. Victor Volke. Por su apoyo en la realización de este trabajo, por su dedicación y por todas sus enseñanzas. Gracias por la confianza que me hizo considerarlos siempre mis amigos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo proporcionado para realizar mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados, por todas las facilidades brindadas durante mi estancia en esta gran institución que me permitieron cumplir satisfactoriamente esta meta personal.

A mis profesores, gracias por todas sus enseñanzas y por brindarme su amistad. Con ustedes aprendí que la calidad profesional debe siempre ir acompañada de la calidad humana.

A los trabajadores del Colegio de Postgraduados, gracias por el esfuerzo físico e intelectual para hacer nuestras labores más sencillas y compartir con nosotros toda su experiencia.

DEDICATORIA

A Lupita, mi gran amor y compañera de mil batallas. Gracias por tu apoyo, tu confianza y tu cariño sin condiciones. Que este, sea el inicio de un camino que hemos soñado recorrer juntos durante mucho tiempo.

A mis padres Rosa Ena y Ovidio, gracias por tanto amor, esfuerzo y sacrificio para hacer de mí, lo que soy. Cada meta cumplida es también un logro suyo. Gracias por la confianza que siempre han depositado en mí y por inspirarme a superar las adversidades con esfuerzo y entereza. En mi corazón ustedes siempre tendrán el lugar más especial.

A mis hermanos, ustedes han sido siempre mis amigos y maestros incondicionales. Gracias por ser ejemplo de tantas virtudes. Sin el apoyo de todos y cada uno, nada de lo que soy y hago sería posible. Gracias por tantas vivencias, risas y aprendizaje juntos.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
DEDICATORIA.....	vii
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS PARTICULARES.....	3
HIPÓTESIS	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
PANORAMA MUNDIAL Y NACIONAL DE LA FRESA.....	4
GENERALIDADES DE LA FRESA	5
REQUERIMIENTOS NUTRIMENTALES DE LA FRESA.....	6
ELEMENTOS ESENCIALES EN FRESA: DEFICIENCIAS Y FUNCIONES.....	7
ELEMENTOS BENÉFICOS EN LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS.....	10
EL SILICIO COMO ELEMENTO BENÉFICO.....	11
BENEFICIOS AGRONÓMICOS Y FISIOLÓGICOS DEL SILICIO	13
<i>Efectos agronómicos del silicio.....</i>	<i>13</i>
<i>Rendimiento.....</i>	<i>14</i>
<i>Producción y partición de biomasa</i>	<i>16</i>
<i>Color.....</i>	<i>17</i>
<i>Firmeza.....</i>	<i>18</i>
<i>Acidez titulable y grados Brix.....</i>	<i>19</i>
<i>Fotosíntesis neta.....</i>	<i>20</i>
<i>Conductancia estomática</i>	<i>21</i>
<i>Regulación en la absorción y distribución nutrimental.....</i>	<i>23</i>
LITERATURA CITADA	25
CAPÍTULO I. RESPUESTA AGRONÓMICA DE LA FRESA A LA APLICACIÓN DE SILICIO	34
1.1 RESUMEN	34
1.2 ABSTRACT	35
1.3 INTRODUCCIÓN	36
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
1.4.1 <i>Sitio experimental y material vegetal.....</i>	<i>37</i>
1.4.2 <i>Sustrato.....</i>	<i>37</i>
1.4.3 <i>Tratamientos y diseño experimental.....</i>	<i>37</i>
1.4.4 <i>Aplicación de los tratamientos y riego.....</i>	<i>38</i>
1.4.5 <i>Rendimiento y tamaño de infrutescencia.....</i>	<i>38</i>
1.4.6 <i>Indicadores de calidad del fruto</i>	<i>38</i>
1.4.7 <i>Producción de materia seca y compartimentación.....</i>	<i>39</i>

1.4.8	<i>Contenido de silicio en el fruto</i>	40
1.4.9	<i>Análisis estadístico</i>	40
1.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
1.5.1	<i>Producción de materia seca y compartimentación</i>	41
1.5.2	<i>Rendimiento y sus componentes</i>	46
1.5.3	<i>Variables de calidad del fruto</i>	49
1.6	CONCLUSIONES	55
1.7	LITERATURA CITADA	56
CAPÍTULO II RESPUESTA FISIOLÓGICA DE LA FRESA A LA APLICACIÓN DE SILICIO		62
2.1	RESUMEN	62
2.2	ABSTRACT	63
2.3	INTRODUCCIÓN	64
2.4	MATERIALES Y MÉTODOS	65
2.2.1	<i>Sitio experimental y material vegetal</i>	65
2.2.2	<i>Sustrato</i>	65
2.2.3	<i>Tratamientos y diseño experimental</i>	65
2.2.4	<i>Aplicación de los tratamientos y riego</i>	65
2.2.5	<i>Intercambio gaseoso</i>	66
2.2.6	<i>Concentración nutrimental</i>	67
2.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
2.3.1	<i>Acumulación y compartimentalización de silicio</i>	68
2.3.2	<i>Influencia del silicio sobre la acumulación de elementos en hojas</i>	70
2.3.3	<i>Variables relacionadas con el intercambio gaseoso</i>	79
2.6	CONCLUSIONES	83
2.7	LITERATURA CITADA	84
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS		91

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1 Rangos de suficiencia nutrimental en hojas para la fresa, obtenido por distintos autores.	7
Cuadro 2 Producción total de biomasa en peso seco y su partición en plantas de fresa como respuesta a la forma y dosis de aplicación silicio	43
Cuadro 3 Rendimiento acumulado de fresa (peso fresco) y tamaño promedio de fruto como respuesta a la dosis y forma de aplicación de silicio	47
Cuadro 4 Variables relacionadas con la calidad del fruto de fresa como respuesta a la aplicación foliar y en solución de silicio	51
Cuadro 5 Correlación entre la concentración de silicio y concentración de elementos esenciales en hojas de fresa	70
Cuadro 6 Concentración de silicio y macronutrientes en hojas de fresa y su relación con la dosis y la forma de aplicación de silicio	73
Cuadro 7 Concentración de micronutrientes en hojas de fresa y su relación con la dosis y la forma de aplicación de silicio	76
Cuadro 8 Variables fotosintéticas y relacionadas con el intercambio de gases como respuesta a la dosis y forma de aplicación de silicio.	81

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Producción relativa de biomasa de plantas de fresa como respuesta a la aplicación en solución (superior) y foliar (inferior) de silicio.....	45
Figura 2 Rendimiento de promedio de fresa como respuesta a la aplicación foliar y en solución de silicio	49
Figura 3 Aspecto de frutos de fresa como respuesta a la dosis y forma de aplicación de silicio	50
Figura 4 Firmeza de frutos de fresa como respuesta a la dosis y forma de aplicación de silicio	53
Figura 5 Concentración y distribución de silicio por órgano en planta de fresa. (El número para cada órgano representa la media con la correspondiente desviación estándar expresada en mg por kg de materia seca. Los órganos cuya concentración precede a letras iguales no difieren en su concentración de silicio.)	69
Figura 6 Concentración de macronutrientes en hojas de fresa como respuesta a la forma de aplicación de silicio. (Las barras representan la media para todos los tratamientos correspondientes a cada forma de aplicación. Letras diferentes muestran diferencias significativas (Tukey=0.05) en la concentración del elemento en las hojas. Las barras de error señalan la desviación estándar.)	75
Figura 7 Concentración de silicio y micronutrientes en hojas de fresa como respuesta a la forma de aplicación de silicio. (Las barras representan la media para todos los tratamientos correspondientes a cada forma de aplicación. Letras diferentes muestran diferencias significativas (Tukey=0.05) en la concentración del elemento en las hojas. Las barras de error señalan la desviación estándar.)	78

INTRODUCCIÓN GENERAL

El uso de los elementos benéficos en la agricultura es cada vez más frecuente. Su disponibilidad, aunque es crítica únicamente para un grupo de especies ha demostrado ser de utilidad en el crecimiento de las plantas, siempre y cuando estos elementos se suministren en concentraciones adecuadas ([Kaur et al., 2016](#)).

El silicio, uno de los componentes más abundantes de los minerales del suelo es considerado un elemento benéfico. El estudio de sus funciones en la fisiología de las plantas tiene su inicio a principios del siglo veinte ([Ma y Yamaji, 2006](#)), no obstante, el interés en sus propiedades y beneficios se ha acelerado en los últimos veinte años ([Coskun et al., 2018](#)).

La investigación reciente ha demostrado que el uso del silicio en especial, es de gran utilidad porque tiene actividad bioestimulante en algunos cultivos que permite incrementar la productividad o bien mantenerla en condiciones de estrés ([Tubana et al., 2016](#)). Esta particularidad es de vital importancia actualmente, debido a los efectos producidos por el cambio climático que aunado al constante crecimiento de la población mundial representan un serio desafío para la agricultura. Por lo anterior el estudio del silicio en la fisiología y productividad de los cultivos es hoy más que nunca un tema no solo interesante sino necesario.

Sin embargo, las investigaciones concernientes al efecto del silicio en los cultivos se reducen a aquellas especies con una alta acumulación del elemento. Siete de los diez cultivos más producidos en el mundo tienen una alta acumulación de silicio (concentración superior al 1% en materia seca) pero de estos solo uno es una especie hortícola ([Guntzer et al., 2012](#)). No obstante, nuevas evidencias sugieren que otras especies tienen una naturaleza más silíceas de lo que se creía.

En la fresa una de las frutillas más producidas a nivel mundial, el uso de silicio como fertilizante ha sido poco explorado y se limita en la mayoría de las ocasiones a disminuir la incidencia de enfermedades fúngicas. Como señalan [Ouellette et al. \(2017\)](#), esta tendencia se debe al limitado conocimiento que se tiene de los

beneficios que produce el silicio en estos cultivos, así como la dosis y forma óptima para maximizar sus efectos. En la fresa, y en las frutillas en general la calidad es un parámetro igual de importante que el rendimiento por lo que analizar la influencia del silicio de manera aislada es de poca utilidad desde el punto de vista agronómico. Es necesario señalar que los cambios en variables agronómicas no podían explicarse sin que medien cambios en el metabolismo de las plantas, por tanto, el estudio de los efectos fisiológicos es necesario para conocer el uso potencial del silicio en la agricultura.

Esta investigación tuvo como finalidad evaluar la respuesta agronómica y fisiológica de la fresa al suministro de silicio. Se analizan los cambios generados en la producción y compartimentalización de biomasa, las diferencias producidas en el rendimiento y la calidad de los frutos, así como la respuesta fisiológica en la absorción de elementos y el intercambio gaseoso.

OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de la aplicación de silicio (Si) sobre variables agronómicas, fisiológicas y de calidad de fruto en plantas de fresa 'Festival'

OBJETIVOS PARTICULARES

Cuantificar la producción y partición de biomasa de fresa en respuesta al suministro de silicio.

Determinar el efecto de la aplicación de silicio sobre el rendimiento y sus componentes en fresa.

Examinar la calidad de frutos de fresa como respuesta al suministro de silicio.

Identificar la acumulación y distribución del silicio en los órganos de fresa.

Evaluar el efecto de la aplicación de silicio en la acumulación de elementos esenciales en tejido foliar de fresa.

Medir el efecto de la aplicación de silicio en variables relacionadas con el intercambio gaseoso en fresa.

HIPÓTESIS

La aplicación de silicio incrementa la producción de biomasa en la parte aérea de las plantas de fresa.

El suministro de silicio mejora el rendimiento y estimula la producción de frutos de fresa de mayor tamaño.

El abastecimiento de silicio mejora la calidad de frutos de fresa.

La aplicación del silicio favorece su acumulación en las hojas de plantas de fresa

El suministro de silicio promueve la absorción de otros elementos esenciales, lo que incrementa la concentración de estos en el tejido foliar.

La aplicación de silicio disminuye el intercambio gaseoso en hojas de fresa.

REVISIÓN DE LITERATURA

PANORAMA MUNDIAL Y NACIONAL DE LA FRESA

Dentro de las frutillas, la fresa es quizá la más consumida a nivel mundial debido a su sabor dulce, su aroma característico, su textura suave, su atractivo color rojo y su contenido de vitaminas, minerales, folato y fibra (Giampieri *et al.*, 2012; Skrovankova *et al.*, 2015). El consumo de esta frutilla se ha favorecido por su elevado contenido de antioxidantes, los fenoles principalmente, podrían tener efectos benéficos en enfermedades mediadas por estrés oxidativo (Zhang *et al.*, 2008).

Datos recopilados por la FAO muestran una significativa mejora en la productividad de este cultivo en los últimos años. La superficie mundial de fresa se incrementó en 2014 con respecto a 2007, durante este mismo periodo la producción mundial de fresa subió casi 40 %, siendo cercana a los 8 millones de toneladas. De esta producción 69% se concentra en los cinco principales productores de fresa a nivel mundial: China, USA, México, Turquía y España (FAOSTAT, 2017).

La introducción del cultivo de la fresa en México se dio a mediados del siglo XIX, pero adquirió mayor importancia con el inicio de las exportaciones (Santoyo y Martínez, 2010). Actualmente la producción de fresa en México se concentra en los estados de Michoacán y Baja California, pero la superficie dedicada a este cultivo es cada vez mayor. Datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) muestran que esta superficie pasó de 6, 214 ha en 2008 a poco más de 11,000 ha en 2016. La productividad también ha mejorado considerablemente, de poco más de 12 t ha⁻¹ en 1980 a 44.85 t ha⁻¹ en 2017 (SIAP, 2017). Esto guarda una estrecha relación con la adopción, y uso de nuevos sistemas de producción que permiten un uso de los insumos más eficiente (Vázquez *et al.*, 2008; SIAP, 2017).

Para el país, la producción de fresa es importante por la generación de divisas, producto de las exportaciones a Estados Unidos principalmente. Aunque esto al principio representó una ventaja competitiva es un riesgo *posteriori*, la concentración

en un solo mercado, la relativa escasa superficie dedicada a la producción de fresa (únicamente el 1% de la superficie agrícola en México) y la falta de obtención en productos con valor agregado son una seria limitante para el crecimiento del cultivo en México ([Santoyo y Martínez, 2010](#); [Macías, 2010](#); [Ávila y González, 2012](#))

GENERALIDADES DE LA FRESA

La mayor proporción de fresa cultivada se clasifican dentro del género *Fragaria* perteneciente a la familia de las rosáceas, subfamilia *Potentilloideae*, anteriormente clasificado *Rosideae* ([Hummer y Hancock, 2009](#)).

El híbrido *Fragaria x ananassa Duchesne ex Rozier* es la especie de fresa económicamente más importante, su distribución y explotación comercial es muy amplia. Este híbrido octaploide ($2n=56$) fue obtenido a mediados del siglo XVIII accidentalmente cuando algunas plantas de *F. chiloensis* importadas de Chile se cruzaron con plantas de *F. virginiana* que habían sido introducidas en algunos jardines europeos ([Darrow, 1966](#); [Hancock et al., 2010](#)).

La fresa es una planta herbácea perenne que se caracteriza por la producción de estolones para la generación de plantas hijas como principal medio de reproducción ([Darrow, 1966](#); [Mouhu et al., 2009](#)). Su tallo conocido como corona es corto y consiste en un núcleo rodeado de un anillo vascular. El núcleo está compuesto principalmente de tejido medular rodeado de una delgada capa de cambium con un punto de crecimiento ubicado en la parte superior ([Hancock, 1999](#); [Polling, 2005](#)).

Las hojas son compuestas trifoliadas y tienen un arreglo en espiral sobre la corona, los folíolos tienen una forma ovalada con el borde dentado. La lamina foliar posee las capas epidérmicas, empalizada y mesófilo típicas de las dicotiledóneas. Las flores son de color blanco típicamente con 5 pétalos y 5 sépalos, de 20 a 35 estambres y con los pistilos dispuestos en espiral sobre el receptáculo ([Dana, 1980](#); [Hancock, 1999](#); [Polling, 2005](#)).

El fruto de la fresa es un fruto agregado, aunque botánicamente lo que normalmente se conoce como fruto es una porción del tallo (receptáculo) sobre el que se encuentran insertados los frutos verdaderos conocidos como aquenios. Esta

peculiaridad morfológica la presentan todas las especies del genero *Fragaria* ([Polling, 2005](#); [Liston et al., 2014](#))

El sistema radicular de la planta es fasciculado, se compone de raíces primarias y raíces secundarias. Las primeras se originan alrededor de la corona a partir del periciclo y estas a su vez dan origen a las raíces secundarias ([Darrow, 1966](#)). La mayor proporción de estas raíces (50-90%) se encuentran entre los 10 y 15 cm del suelo ([Hancock, 1999](#)).

REQUERIMIENTOS NUTRIMENTALES DE LA FRESA

La fresa se encuentra adaptada a diferentes clases de suelos, así como un amplio rango de pH. No obstante, los mejores rendimientos se obtienen en suelos con pH entre 6.0 y 6.5, con buena fertilidad, adecuada condición de humedad, elevado contenido de materia orgánica y buen drenaje ([Hancock, 1999](#); [Hoover et al., 2003](#); [Milosevic et al., 2009](#)).

La demanda de nutrimentos en la fresa depende de muchos factores, entre los que se incluyen el sitio y la tecnología de cultivo, sin embargo, son el vigor de la variedad y el rendimiento los que determinan la dinámica de absorción de nutrimentos, por tanto, los que condicionan la fertilización ([Tagliavini et al., 2004](#)). Con frecuencia, se emplean los rangos de suficiencia para conocer y comparar la absorción y acumulación de elementos en las plantas, además son una herramienta útil cuando se pretende elaborar un plan de fertilización. El Cuadro 1 presenta estos rasgos de suficiencia para la fresa.

Cuadro 1 Rangos de suficiencia nutrimental en hojas para la fresa, obtenido por distintos autores.

Concentración (PS)	Elemento	Rangos de suficiencia			
		Bottoms <i>et al.</i> (2013)	Campbell y Miner (2000)	Hochmuth y Albregts (1994)	Pritts <i>et al.</i> (N.D.)
g kg ⁻¹	N	24.0-30.0	30.0-40.0	28.0-30.0	20.0-28.0
	P	3.0-4.0	2.0-4.0	2.0-4.0	2.5-4.0
	K	13.0-17.0	11.0-25.0	11.0-25.0	15.0-25.0
	Ca	9.0-21.3	5.0-15.0	4.0-15.0	7.0-17.0
	Mg	3.1-4.1	2.5-4.5	2.0-4.0	3.0-5.0
	S	1.6-2.0	1.5-4.0	2.5-8.0	----
mg kg ⁻¹	B	43-77	25-50	20-40	30-70
	Zn	12-22	15-60	20-40	20-50
	Mn	26-426	30-300	25-100	50-200
	Fe	102-188	50-300	50-100	60-250
	Cu	2.5-4.9	3-15	5-10	6-20

ELEMENTOS ESENCIALES EN FRESA: DEFICIENCIAS Y FUNCIONES

El nitrógeno (N) es uno de los elementos más demandados por la fresa ([Avitia *et al.*, 2014](#)). Su disponibilidad es crítica durante el periodo de crecimiento, la producción de estolones, así como la formación de las flores y los frutos ([Andriolo *et al.*, 2014](#); [Trejo y Gómez, 2014](#)). Durante esta última etapa, es de vital importancia regular los niveles de nitrógeno ya que influyen en la calidad del fruto en variables como el tamaño, peso, contenidos de azúcares, el color y la acidez ([Miner *et al.*, 1997](#); [Aguilheiro-Santos, 2008](#); [Ojeda *et al.*, 2009](#)). La deficiencia de nitrógeno, como es de esperarse, produce una reducción en la tasa de crecimiento, retraso en el desarrollo, así como un amarillamiento en las hojas maduras que posteriormente se extiende a las hojas jóvenes ([Choi *et al.*, 2000](#); [Petrović, 2013](#)).

El potasio (K) es el catión más abundante en las plantas ([Wang *et al.*, 2013](#)). Es esencial en la activación de enzimas, la síntesis de proteínas, la osmoregulación, el movimiento de los estomas y la resistencia al estrés ([Hawkesford *et al.*, 2012](#)). En el cultivo de fresa en particular, se ha demostrado que el potasio está relacionado con el desarrollo y la madurez del fruto de fresa ([Wang *et al.*, 2017](#)). Su

disponibilidad y absorción determina los contenidos de vitamina C y sólidos solubles totales, además influye en el rendimiento pues regula el número de frutos y el peso de ellos (Ebrahimi *et al.*, 2012). La deficiencia de potasio se refleja en las hojas viejas que adquieren una coloración bronceada en el margen exterior de la hoja, si la deficiencia permanece toda la hoja puede volverse necrótica (Johanson, 1965).

El fósforo (P) está involucrado en muchos procesos metabólicos. Sus funciones principales incluyen la transferencia de energía, participación en la fotosíntesis, transformación de azúcares y como constituyente del material genético de las células (Hawkesford *et al.*, 2012; Trejo y Gómez, 2014). En la fresa la deficiencia de fósforo se manifiesta con una reducción en el tamaño de las hojas, con una coloración verde oscuro que puede tornarse ligeramente púrpura, incluso rojiza (Whipker, 2014). Tanto la deficiencia como un exceso de fósforo representan una seria restricción al crecimiento y desarrollo de las plantas (Choi *et al.*, 2013). Algunas variables relacionadas con la dosis y fuente de fósforo son el rendimiento (May y Pritts, 1993), el contenido de sólidos solubles (Li *et al.*, 2016), el contenido de ácido ascórbico y el porcentaje de acidez (Ahmad *et al.*, 2017).

La función del calcio (Ca) en las plantas va más allá de ser un componente estructural de la membrana y la pared celular, su papel como contraión para aniones orgánicos e inorgánicos, así como mensajero intracelular que coordina la respuesta a cambios ambientales y metabólicos lo hacen un elemento esencial (White y Broadley, 2003; Hepler, 2005). La deficiencia de calcio en la fresa se manifiesta en las hojas jóvenes, cuya punta se deforma y necrosa. En plantas con deficiencia manifiesta, el fruto es de menor tamaño y con una textura dura (Whipker, 2014). Los efectos del calcio en el fruto de la fresa se manifiestan en la firmeza del fruto principalmente (Bieniasz *et al.*, 2010; Wójcik y Lewandowski, 2003). La pérdida de firmeza se debe a cambios en la estructura de la pared celular lo que implica directamente al calcio (Hocking *et al.*, 2016)

El magnesio (Mg) es de vital importancia en procesos metabólicos indispensables para las plantas. Forma parte de la molécula de clorofila y regula la función de muchas enzimas celulares, así como la agregación de las unidades ribosomales

(Shaul, 2002). En la fresa su deficiencia se manifiesta en una clorosis internerval que inicia en los márgenes de la hoja y que se extiende hacia la parte central de la lámina foliar, posteriormente está adquiere una coloración bronceada. El fruto se decolora, pero sin que se afecte su tamaño (Whipker, 2014). De forma poco específica y similar a otros nutrientes en condiciones de estrés salino, el Mg es capaz de mitigar los efectos de éste en la producción de clorofila y en la absorción de otros elementos esenciales (Yildirim *et al.*, 2009).

La función del azufre (S) en las plantas es principalmente estructural. Este elemento es un constituyente de los aminoácidos cisteína y metionina, necesarios para la formación de muchas proteínas. Además de ser indispensable para la formación de sulfolípidos que desempeñan un papel fundamental en la fluidez de membrana de los tilacoides (Maathuis y Diatloff, 2013). A diferencia de las deficiencias de otros elementos esenciales la deficiencia de azufre es menos específica y difícil de identificar (Haneklaus *et al.*, 2007). En la fresa las hojas medias y superiores presentan una coloración verde clara que posteriormente adquieren una coloración amarillenta más uniforme. El fruto, aunque es de menor tamaño presenta una coloración normal (Whipker, 2014). Al igual que en la deficiencia, una adecuada fertilización con azufre se manifiesta en el tamaño del fruto (Santos, 2010; Silva *et al.* 2013) y en el sabor y aroma que están relacionados con la cantidad de compuestos sulfurados volátiles presentes y que se acumulan conforme madura el fruto (Dirinck *et al.*, 1981; Du *et al.*, 2011).

Los micronutrientes, aunque se encuentran en baja concentración en los tejidos en comparación con otros elementos, tienen roles cruciales en el metabolismo de las plantas superiores. Sus funciones, aunque específicas para cada nutriente agrupan la participación en sistemas redox, la activación o conformación de enzimas, la osmoregulación, así como la integración de las paredes y membranas celulares (Merchant, 2010; Broadley *et al.*, 2012a). No obstante, su importancia en el metabolismo celular, la baja concentración en el tejido vegetal puede ser influenciada por factores como la especie, el genotipo, las condiciones de crecimiento, así como el tejido muestreado (Welch y Shuman 1995). Incluso la

susceptibilidad de los cultivos a la deficiencia de estos elementos varía considerablemente con la especie o el cultivar (Alloway, 2008).

Los efectos de los micronutrientes en la fresa han sido probados en muchos ensayos con resultados similares. Chaturvedi *et al.* (2003) reportan que la aplicación de sulfato de zinc y de hierro (0.4 y 0.2 % respectivamente) incrementan la biomasa, el número de frutos y el rendimiento por planta. Además, mejoran los contenidos de ácido ascórbico, acidez titulable y sólidos solubles totales. Las aplicaciones de boro, aunque no tenga efectos sobre el rendimiento o los contenidos de algunos ácidos orgánicos, influyen en la firmeza poscosecha de acuerdo a los datos obtenidos por Wojcik y Lewandowski (2003). Las aplicaciones foliares de molibdeno en función de la dosis incrementa los contenidos de clorofila y con ello mejora la fotosíntesis neta. Además, incrementa el contenido de sólidos solubles totales, ácidos orgánicos, azúcares y compuestos volátiles del fruto (Li *et al.*, 2017). Aunque la fresa se considera una especie susceptible a concentraciones altas de cloro Bellof y Schubert (2009) hallaron una mejor respuesta en rendimiento a la aplicación de cloruro de potasio con respecto al sulfato de potasio y atribuyen este efecto al cloro. Los mismos autores señalan que el cloro también modifica en el suelo la disponibilidad de manganeso, lo que posibilita la compensación de manganeso en suelos con ligeras deficiencias de este elemento.

ELEMENTOS BENÉFICOS EN LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS

Se denomina elemento benéfico a aquellos elementos que a pesar de no ser esenciales más que para un limitado número de taxas, estimulan el crecimiento o mejoran los rendimientos en determinadas especies. Poseen además la capacidad de desempeñar funciones poco específicas de elementos esenciales, así como de aminorar los efectos del estrés sobre el crecimiento o el desarrollo de cultivos de interés agronómico principalmente (Broadley *et al.*, 2012; Kaur *et al.*, 2016).

La clasificación de elementos benéficos de acuerdo a su definición incluye a elementos como el Sodio (Na), Silicio (Si), Cobalto (Co), Selenio (Se), Aluminio (Al), Vanadio (Va) y Titanio (Ti). (Carvajal y Alcaraz, 1998; Pilon-Smits *et al.*, 2009

Broadley *et al.*, 2012; Kaur *et al.*, 2016). Autores como Pilon-Smits *et al.* (2009) señalan como potencial área de estudio la identificación y caracterización funcional de otros elementos cuyas funciones en el crecimiento y desarrollo son parcialmente desconocidas.

Debido a la reciente atención que ha adquirido el estudio de los elementos benéficos, al desarrollo de la química analítica y sus métodos existe una creciente cantidad de investigaciones, cuyo objetivo es el análisis de los elementos benéficos y sus efectos en cultivos de interés. Como en la mayoría de los cultivos y en la fresa en particular, los efectos de la aplicación de elementos benéficos se ven reflejados en el rendimiento y en la calidad de los frutos. Así las aplicaciones foliares de titanio incrementan el rendimiento, la firmeza y los contenidos de clorofila en condiciones reducidas de luz (Choi *et al.*, 2015). Las aplicaciones de selenio, favorecen la síntesis de flavonoides y polifenoles que a menudo se relacionan con las características organolépticas de los frutos (Mimmo *et al.*, 2017). Con respecto al silicio, objeto de estudio de esta investigación, también existe numerosa bibliografía acerca de sus funciones en los cultivos hortícolas.

El uso de elementos benéficos como fertilizantes o bioestimulantes, aunque es una práctica cada vez más extendida es todavía incipiente. Es necesaria más investigación que permita conocer los alcances reales del empleo de estos elementos en la producción de cultivos.

EL SILICIO COMO ELEMENTO BENÉFICO

El silicio no es considerado como un elemento esencial más que para algunas pocas especies, debido a que estrictamente no reúne los criterios establecidos por Arnon y Stout en 1939. A pesar de ello las plantas tienen la capacidad de acumular cantidades importantes de este elemento, incluso en proporciones similares a otros elementos que si son considerado esenciales como el fósforo o el calcio (Epstein, 1999).

Las plantas absorben el silicio en forma de ácido silícico (H_4SiO_4), una molécula sin carga, que una vez absorbida es transportada en el xilema por el flujo transpiratorio,

en las hojas y con la pérdida de agua por la transpiración se concentra y deposita en forma de sílice (Richmond y Sussman, 2003; Ma, 2009). La acumulación de este elemento en las plantas varía de acuerdo a la capacidad de absorción de sus raíces lo cual depende en gran medida de la especie (Takahashi *et al.*, 1990) Por ello la concentración del silicio en el tejido vegetal es muy variable y su acumulación principal es en la parte aérea de la planta predominando en los tejidos más viejos (Matichenkov *et al.*, 1999). Epstein (1994) señala que la concentración en los tejidos es en ocasiones menor al 1% pero en otras especies es superior al 10% (Ma y Takahashi, 2002). Takahashi *et al.* (1990) propusieron una clasificación de las especies al silicio en función de su forma de absorción. Para ello consideran la dinámica del elemento con respecto a la tasa de absorción de agua: activa, mayor a la absorción de agua; Pasiva, similar a la absorción de agua y restrictiva menor al influjo de agua.

Los mismos autores utilizan una clasificación de acuerdo a la acumulación de silicio con respecto a la materia seca. En esta clasificación son plantas acumuladoras aquellas cuyo contenido de silicio en las hojas supera el 1%, siempre que la relación molar Si/Ca sea mayor a 1. En cambio, aquellas especies donde esta relación es menor a 0.5 y la concentración de Si no es mayor a 0.5 % son clasificadas como no acumuladoras (Takahashi *et al.*, 1990). Richmond y Sussman (2003) mencionan la tendencia que existe en la acumulación de silicio, siendo las monocotiledóneas más efectivas en la absorción y acumulación de silicio en comparación a las dicotiledóneas, pero con variabilidad incluso dentro de cada ecotipo.

La fresa generalmente se cataloga como una especie no acumuladora de silicio, pero Miyake y Takahashi (1986) al estudiar la dinámica del silicio en la planta observaron variaciones en el contenido de este elemento en los distintos órganos, lo que los hizo replantearse el papel secundario del silicio en la fresa.

Estos autores demostraron que la absorción de silicio por parte de la fresa es un proceso facultativo. No se observan síntomas de deficiencias de este elemento en el desarrollo de las plantas cuando no es adicionado a la solución nutritiva, pero se incrementa la concentración de silicio en las hojas en estadios fenológicos próximos

a la floración y fructificación acompañado de una disminución de este elemento en la corona y en la raíz lo que permite suponer una translocación.

Ouellette y colaboradores (2017) confirmaron la acumulación de silicio en la fresa. Caracterizaron dos transportadores de silicio, (uno de influjo y otro de eflujo), que habían sido descritos en arroz y otros cultivos por Ma *et al.* (2006,2007). En plantas suministradas con 1.7 mM de silicio la concentración del elemento en las hojas osciló entre 1 y 3%. Esta evidencia es suficiente para considerar a la fresa como un cultivo susceptible a la fertilización con silicio.

BENEFICIOS AGRONÓMICOS Y FISIOLÓGICOS DEL SILICIO

Aunque no es del todo claro cómo se involucra el silicio en el metabolismo de las plantas, es evidente que favorece el desarrollo de ciertas especies (Liang *et al.*, 2006). Varios autores coinciden en que los efectos benéficos del silicio en los cultivos se acentúan cuando estos se someten a estrés ya sea de tipo biótico o abiótico (Kumar y Bandhu, 2005; Liang *et al.*, 2006; Guntzer *et al.*, 2012; Haynes, 2014; Cooke *et al.*, 2016).

La respuesta de las plantas a la acumulación de silicio es diferente para cada especie (Mitani y Ma, 2005) dentro de estas respuestas pueden incluirse cambios en la concentración de elementos, producción de biomasa (incluido el rendimiento), tasa fotosintética y transpiratoria y producción de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (Cooke *et al.*, 2016). Estudios cada vez más numerosos prueban la influencia que tiene el silicio en variables de interés agronómico o comercial, así como en otras vinculadas al metabolismo de las plantas.

Efectos agronómicos del silicio

Los beneficios agronómicos, debido a la aplicación de silicio, dentro de los que se cuenta la producción de biomasa y, por tanto, el rendimiento, se observan principalmente en plantas acumuladoras (Meena *et al.*, 2014) Especies como el arroz, maíz, trigo, cebada, sorgo y caña en las cuales la deficiencia de silicio es incluso notoria. En otras especies hortofrutícolas se observan mejoras en los

rendimientos, aunque en ocasiones se atribuye a un impacto indirecto de los fertilizantes silicatados en el suelo o en el medio de cultivo (Liang *et al.*, 2015).

En las especies acumuladoras los cambios producidos por el silicio se observan de manera posterior a su concentración en los tallos y hojas, en contraste, en las especies no acumuladoras los efectos son más notorios cuando la concentración de silicio en solución es alta (Ma *et al.*, 2001).

Rendimiento

Como elemento nutritivo, el silicio desempeña algunas funciones metabólicas y estructurales dentro de la fisiología de las plantas, los beneficios que su acumulación genera, resulta a menudo con un incremento en la productividad de distintas especies (Marodin *et al.*, 2014)

En el arroz, una especie acumuladora de silicio (Si >10% en peso seco) Ma *et al.* (2006) reportan que el rendimiento en grano fue diez veces menor en un mutante con baja absorción de silicio ($[Si]_{\text{tallo}} < 0.5\%$) comparado con un tipo silvestre cuya acumulación en tallo oscilaba entre 2.5 y 4%. Esta respuesta está relacionada con una mayor susceptibilidad a las plagas y enfermedades por parte del cultivar mutante.

Para el mismo cultivo Cuong *et al.* (2017) reportan un comportamiento similar. Estos investigadores observaron que la aplicación de silicio influye en el crecimiento y en el rendimiento de paja y grano de arroz. Componentes del rendimiento como el número de granos por panícula, así como el peso de 1000 granos aumentaron con la aplicación del elemento. El rendimiento de grano más alto (3 705 kg ha⁻¹) se obtuvo con la dosis de silicio más alta en combinación con la dosis de fertilizante recomendada. Gholami y Falah (2013) observaron la misma tendencia en rendimiento aunado al incremento en contenido de silicio en tallos y hojas.

En el trigo, otra especie clasificada como acumuladora de silicio, Newton *et al.* (2017) evaluaron la aplicación foliar de silicio sobre componentes del rendimiento en 5 y 4 variedades durante dos ciclos respectivamente. No encontraron diferencia en la mayoría de las variables asociadas al rendimiento. Únicamente el índice de

cosecha en el primer ciclo y el número de espigas en segundo ciclo presentan una relación cuadrática con el suministro de silicio.

En la leguminosa *Trifolium alexandrinum* L. [Ibrahim et al. \(2015\)](#) evaluaron el efecto de distintos regímenes de riego y 3 concentraciones foliares de silicato de potasio en la producción de biomasa. Observaron que mientras las variables de rendimiento (peso por planta, rendimiento en paja y rendimiento en semilla) respondían de manera favorable a un aumento en la lámina de riego la respuesta a una dosis creciente de silicato de potasio parecía disminuir de manera significativa la producción de biomasa.

En contraste, en *Phaseolus vulgaris* L. [Jafarei et al. \(2015\)](#) hallaron que la aplicación foliar de silicio durante la elongación del tallo y al inicio de la floración mejoran el rendimiento, al incrementar el peso de las semillas y el número de estas por vaina y por planta. También registraron una mayor área foliar y mayor contenido de clorofila en aquellas plantas asperjadas con silicio.

Al igual que la especie, la dosis y fuente de silicio son determinantes en la absorción y en el efecto que esto produce. Así lo muestra la investigación realizada por [Marodin et al. \(2014\)](#) quienes probaron el efecto de tres fuentes de silicio sobre el rendimiento de jitomate (*Solanum lycopersicum*). Sus resultados muestran que el rendimiento tiene una respuesta cuadrática positiva decreciente a la dosis de silicio ($R^2=0.99$). El rajado de frutos disminuye siguiendo la misma respuesta. Por último, la acumulación de silicio es lineal cuando se suministra en forma de silicato de potasio o de calcio, pero cuadrática para el silicato de sodio disminuyendo cuando la dosis supera los 400 kg de SiO_2 .

En un estudio similar, [Lu et al. \(2016\)](#) evaluaron tres fuentes distintas de silicio sobre variables agronómicas de jitomate 'Magilas'. Sus observaciones muestran que la aplicación de nanosílíce tiene un mayor impacto en el incremento de altura y en el peso seco y fresco de los órganos. La misma fuente produjo una mayor absorción del elemento acompañado de un aumento del número de frutos por planta y de manera consecuente del rendimiento.

Producción y partición de biomasa

Además de una acumulación diferencial del silicio en los tejidos de las plantas, la evidencia muestra que esta acumulación incide sobre la producción y partición de la biomasa. El vástago es la parte más afectada por un suministro insuficiente de silicio.

[Miyake y Takahashi \(1978\)](#), en un estudio realizado en jitomate, que a medida que disminuye el suministro de silicio disminuye la relación vástago/raíz debido a la limitación en el crecimiento de la parte aérea. Destacan que las deficiencias son notables a partir de la floración, con ello disminuye la fertilidad del polen y se incrementa el número de frutos malformados.

También [Miyake y Takahashi \(1983\)](#), al evaluar las anomalías causadas por la deficiencia de silicio en pepino (*Cucumis sativas L.*) observaron que para esta especie la asimilación de silicio era muy similar a la de especies acumuladoras como el arroz. Sus resultados muestran que la acumulación del elemento está estrechamente relacionada con la fuente del elemento. De manera similar al jitomate el rendimiento y la producción de biomasa aérea son las más afectadas cuando se limita el suministro de silicio.

[Dakora y Nelwamondo \(2003\)](#) estudiaron los efectos del silicio en el crecimiento del caupí (*Vigna unguiculata (L.) Walp.*) Cultivado en hidroponía e inoculado con *Bradyrhizobium*. Las plantas tratadas mostraron una asimilación creciente de silicio en tallos y raíces que promovió el crecimiento de las raíces, pero no el de los tallos. La resistencia mecánica de los tallos y de los pedúnculos se incrementó. Un análisis de raíces laterales y nódulos reveló un marcado incremento en la concentración de ácido abscísico (ABA) endógeno, este compuesto funciona como señalizador hormonal que estimula el crecimiento radicular.

Por su parte [Wang y Galleta \(1998\)](#) al evaluar la aplicación foliar de silicato de potasio en fresa observaron una mayor producción de biomasa (30 % de la dosis más alta con respecto al control). Aunado a esto, la partición es ligeramente distinta de acuerdo al tratamiento. En todos los tratamientos exceptuando el control el

porcentaje de los peciolos con respecto a la biomasa total está muy por debajo del porcentaje que representan las láminas foliares. Ellos atribuyen este efecto a una mejor regulación en la elasticidad de los tejidos y al incremento en el volumen simplástico de agua. En otros órganos, aunque el peso entre tratamientos es diferente estadísticamente ($p=0.05$), existe la misma tendencia en cuanto a la distribución.

Color

Las antocianinas son los principales pigmentos responsables de la coloración rosa, roja o púrpura de los frutos de fresa y, a su vez, proveen la coloración característica de otros órganos como los pétalos, peciolos y estolones (Pillet y Folta, 2015). Existe una estrecha relación entre las condiciones de cultivo y la producción de antocianinas y algunos compuestos antioxidantes (Anttonen *et al.*, 2006). Factores como la fecha de siembra, el color del acolchado, el nivel de sombra, el orden del fruto analizado y por supuesto la fertilización son factores cruciales en la síntesis de estos compuestos Chelpiński *et al.* (2010).

Los resultados de la aplicación de silicio sobre la coloración de fresa de manera particular son variables. El albinismo es un desorden fisiológico caracterizado por la falta de color en los frutos y está asociado principalmente a la cantidad y calidad de luz, así como a desordenes nutrimentales. Lieten *et al.* (2002) estudiaron esta fisiopatía como respuesta a la fertilización con silicio. Reportan que la ausencia de silicio en la solución nutritiva no se manifiesta en síntomas visuales. La aplicación de silicato de potasio en dosis menores a 1 mM L^{-1} , producen un peso promedio menor de fruto y una mayor cantidad de frutos albinos. En estos frutos el contenido de pelargonidina 3-glucósido y cianidina 3-glucósido (antocianinas) fue significativamente menor ($p=0.05$) y las relaciones N/Ca, K/Ca muy altas comparadas con el control.

En contraste Silva *et al.* (2013) evaluando la respuesta de la fresa a dosis entre 0 y 100 mg Si L^{-1} de Si aplicados al follaje o en solución. Hallaron cambios importantes en el contenido de antocianinas con máximos de cianidina 3-glucósido en los frutos

en dosis cercanas a 50 mg Kg⁻¹. También señalan que existe una respuesta favorable en el rendimiento y en la concentración de ácido cítrico a la aplicación de silicio.

Estas discrepancias en los resultados pueden también atribuirse a la incidencia de otros factores como el estadio de desarrollo que son más determinantes en la producción de pigmentos sobre factores ambientales y genéticos (Pillet y Folta, 2015)

Firmeza

La firmeza es un parámetro importante en la vida postcosecha de cultivos hortícolas para consumo en fresco, pues representa un índice de la madurez y calidad de los frutos (Plocharski *et al.*, 2000). Algunos estudios muestran que dentro de las cualidades organolépticas que son afectadas por la aplicación de silicio se encuentra la firmeza de los frutos. Los mecanismos, aunque no del todo claros incluyen la regulación de la actividad de enzimas oxidantes lo que se traduce en una vida postcosecha más larga.

En postcosecha el silicio tiene resultados similares a la aplicación de calcio. En aguacate, la aplicación postcosecha de silicato de potasio no solo incrementa la firmeza de los frutos, sino que propicia la producción de compuestos fenólicos y mejora la actividad de sistemas antioxidantes (Tesfay *et al.*, 2012). Kaluwa *et al.* (2010) obtuvieron resultados similares en cuanto a vida postcosecha cuando aplicaron 2940 ppm de silicio a los frutos, pero ellos atribuyen estos efectos a la reducción en la producción de etileno y en la respiración de los frutos que observaron con la aplicación de los tratamientos.

La acumulación de silicio y posterior engrosamiento de las cutículas es otro de los mecanismos que hacen que contribuya a la firmeza de los frutos. Jayawardana *et al.* (2014), en un ensayo realizado en pimiento (*Capsicum annuum* L. 'Muria F1'), observaron que la incorporación del silicio en la solución nutritiva incrementa notablemente la firmeza de los frutos y el grosor de las cutículas. Esto produce una

menor cantidad de lesiones causados por *Colletotrichum gloeosporioides* en los frutos asperjados con silicato de potasio.

En pepino (*Cucumis sativus* L. 'Shabah F1'), [Abd-Alkarim et al. \(2017\)](#) evaluaron la aplicación de diatomita como fuente de silicio sobre parámetros agronómicos y de calidad de pepino. Sus resultados muestran un notable incremento en la firmeza del fruto, más notoria en etapas tempranas del desarrollo de este órgano. También observaron un mayor contenido de sólidos solubles totales en fruto y una mayor concentración de fósforo en las hojas cuando el silicio era aplicado en solución.

Por el contrario, en calabaza zucchini (*Cucurbita pepo* L., cv. Rival), [Savvas et al. \(2009\)](#) no encontraron relación entre la firmeza y la aplicación de silicio. Únicamente observaron un incremento en el contenido de ácidos ascórbico en frutos provenientes de plantas tratadas con silicio y sometidas a estrés salino.

Acidez titulable y grados Brix

Aunque los efectos de la aplicación de silicio son más evidentes en el crecimiento, rendimiento y en la resistencia a factores de estrés existe evidencia que muestra que el silicio influye en la calidad fisicoquímica de los frutos de algunos cultivos. [Marodin et al. \(2016\)](#) probaron el efecto de distintas fuentes de silicio, y diferentes dosis en un cultivar de jitomate de crecimiento indeterminado y de baja vida postcosecha. Observaron que las aplicaciones de silicio mejoraron la calidad fisicoquímica de los frutos ya que incrementa los contenidos de sólidos solubles, vitamina C y licopeno, mejora la firmeza y con ello aumenta la vida postcosecha.

En otro experimento de campo, [Hanumanthaiah et al. \(2015\)](#) en la India evaluaron los efectos de la aplicación foliar de silicato de potasio en banano. Sus resultados muestran que en dosis entre 2 y 4 mL de silicato por litro, mejoró la calidad del banano en parámetros como la vida postcosecha, los sólidos solubles totales (Brix), la acidez, y el contenido de azúcares reductores y no reductores.

En jitomate, [Stamatakis et al. \(2003\)](#) evaluaron los efectos del silicio y la salinidad sobre el rendimiento, estado nutrimental y la calidad de frutos. Explican que la aplicación de silicio (2.25 mM) incrementa el contenido de sólidos solubles totales

en fruto de forma similar a cuando se duplica la conductividad. Sus resultados también muestran la interacción del silicio y la salinidad sobre los contenidos de β -caroteno, licopeno, vitamina C y luteína, así como un marcado incremento en la firmeza de los frutos. En el pepino [Jarosz \(2012\)](#) encontró respuestas similares a las del jitomate. Las plantas asperjadas con silicio produjeron frutos con un mayor contenido de sólidos solubles totales.

Por su parte, [Zhang et al. \(2017\)](#) estudiaron el impacto de residuos siderúrgicos con alto contenido de silicio ($\geq 18\%$ SiO_2) sobre la calidad y rendimiento de uva de mesa (*Vitis vinifera L.*). Sus resultados muestran un incremento en los sólidos solubles totales y su proporción con respecto a la acidez titulable (SST/AT). La absorción de silicio se incrementó de manera posterior al amarre de frutos con valores máximos durante la cosecha, este aumento se reflejó en el tamaño de las berries (diámetro) y posteriormente en el rendimiento.

Fotosíntesis neta

Los efectos producidos por el silicio sobre el rendimiento y otras variables relacionadas con este serían difíciles de explicar sin tomar en cuenta a la fotosíntesis. La absorción y acumulación de silicio estimula la producción de clorofilas y hace más eficiente el proceso fotosintético. Desde el punto de vista mecánico mejora la estabilidad mecánica de tallos y hojas lo que se traduce en una mejor interceptación de la luz ([Yoshida et al., 1969](#)).

En un experimento realizado por [Wang y Galleta \(1998\)](#) en fresa 'Earliglow', observaron cambios en la concentración de ácidos orgánicos, fosfo y glicolípidos, así como una disminución en el contenido de carbohidratos solubles producidos por la aplicación de silicio. Lo más destacable es que al cuadruplicar la dosis de silicio se estimula la síntesis de clorofilas a y b, incrementándose su contenido hasta en 12 %. La mayor concentración de ácidos orgánicos y sacarosa (productos tempranos de la fotosíntesis) indican un proceso fotosintético más eficiente.

Estos resultados son similares a los obtenidos por [Gerami et al. \(2012\)](#), quienes observaron que la aplicación de silicio en forma de silicato de potasio y sodio

incrementó los contenidos totales de clorofila en arroz. Estos autores evaluaron 3 dosis de silicio (0, 50 y 100 mg kg⁻¹), y observaron un aumento en los contenidos de clorofila a y b, así como una mayor superficie foliar. Concluyen que la aplicación de silicio puede mejorar los contenidos de los principales pigmentos fotosintéticos y con ello la tasa fotosintética.

De forma similar, [Maghsoudi et al. \(2016\)](#) evaluaron el efecto de las aplicaciones foliares de silicio sobre variables relacionadas con la fotosíntesis en trigo. Variables como el contenido total de clorofila, el contenido relativo de agua, así como la estabilidad de las membranas fue superior al control en todos los cultivares con o sin estrés hídrico, pero fue más notorio en las variedades resistentes a la sequía. La tasa fotosintética (*A*), la conductancia estomática (*g_s*), y la tasa transpiratoria (*E*) mejoró incluso en las plantas sin déficit hídrico, pero sin que fuera significativa a diferencia de los tratamientos donde el riego fue menor a la capacidad de campo.

Con relación a la eficiencia fotosintética, [Valandro et al. \(2016\)](#) evaluaron los efectos de la aplicación foliar de silicio en el intercambio de gases de plantas de cacao (*Theobroma cacao*) en Brasil. Sus resultados muestran una mayor eficiencia fotoquímica a dosis medias de silicio (1.5 g L⁻¹), esta dosis incrementó la tasa fotosintética, la eficiencia en el uso del agua y la eficiencia de la carboxilación, además de mejorar la actividad de enzimas como la ascorbato peroxidasa (APX) y la polifenol oxidasa (PPO) en plantas sometidas a déficit hídrico.

En maíz sometido a estrés salino, [Xie et al. \(2015\)](#) evaluaron el efecto de cinco dosis de metasilicato de sodio sobre variables relacionadas con el intercambio gaseoso. Sus resultados muestran un incremento en la tasa fotosintética en la dosis más alta de silicio (225 Kg SiO₂ ha⁻¹) con respecto al control. La tasa transpiratoria se redujo la conductancia estomática aumentó y la concentración intercelular de CO₂ fue superior cuando se comparan ambos tratamientos.

Conductancia estomática

Al igual que otras variables relacionadas con el metabolismo, la conductancia estomática depende de la capacidad de absorción de silicio como principal

determinante para que exista influencia sobre la tasa transpiratoria ([Mansano et al., 2016](#)). La disminución en la conductancia estomática provocada por la acumulación de silicio va acompañada de un incremento en la eficiencia en el uso del agua. El principal mecanismo para que disminuya la conductancia estomática y la transpiración es mediante la formación de una doble capa cuticular que reduce la apertura de los estomas y con ello la pérdida de agua, siendo esta una adaptación útil para la tolerancia a la sequía en periodos de baja humedad en el suelo ([Marafon y Endres, 2013](#)). En la misma condición la agregación de silicio en los vasos del xilema previenen la compresión cuando la transpiración es alta ([Aziz et al., 2002](#)) lo que le permite desarrollar una función análoga a la lignina cuando se deposita en las paredes celulares ([Epstein, 1994](#)).

La reducción en la pérdida de agua se da principalmente en condiciones de estrés, como lo demuestra el estudio conducido por [De Jesus et al. \(2017\)](#). Estos investigadores evaluaron la mitigación del estrés hídrico por la aplicación foliar de silicio en plantas de arúgula (*Eruca sativa L. Mill*). Observaron que cuando el riego es menor a la evapotranspiración la absorción del elemento disminuye el efecto de la sequía en la transpiración, conductancia estomatal y en general promueve un uso más eficiente del agua.

De forma similar, [Mansanto et al. \(2016\)](#) evaluaron dosis de aplicación entre 0 y 6 t ha⁻¹ de silicato de calcio y magnesio en la especie forrajera *Brachiaria*. Observaron que, aunque la especie acumula gran cantidad de silicio en las hojas esta acumulación no explica directamente variables como la tasa de asimilación de carbono y la conductancia estomática, pero tiene influencia significativa ($p=0.05$) sobre la eficiencia en el uso del agua, estimada a partir de estas dos variables.

Los cambios producidos en el intercambio gaseoso a partir de la deposición de silicio, están relacionados directamente con la apertura estomática y no con su densidad o cambios en su estructura. Según [Gao et al. \(2006\)](#) al estudiar la acumulación del silicio en plantas de maíz y su efecto sobre la tasa transpiratoria y la conductancia estomática. Sus resultados muestran la acumulación de silicio en

tallos principalmente mientras que la aplicación de 2 mM Si L⁻¹ reduce la transpiración adaxial y abaxial por cambios en la conductancia estomática.

Regulación en la absorción y distribución nutrimental

El silicio en los tejidos vegetales desempeña funciones tanto mecánicas como fisiológicas. Dentro de estas últimas, destaca su capacidad de regular la absorción y translocación de elementos potencialmente tóxicos, así como de algunos elementos esenciales ([Guntzer et al., 2012](#); [Liang et al., 2015](#)).

Los mecanismos mediante los que regula la absorción y translocación de elementos son diversos y pueden ser divididos en externos e internos con relación a la planta ([Liang et al., 2006](#)). Estos mecanismos involucran complejas interacciones en el suelo que limitan o propician la disponibilidad de los nutrimentos mientras que dentro de las plantas forma complejos o induce la expresión de transportadores de alta afinidad ([Pontigo et al., 2015](#)).

[Pontigo et al. \(2015\)](#) señalan que la mayoría de los efectos benéficos en plantas vasculares se atribuyen a una alta acumulación de este elemento en los tejidos. No obstante, no todas las especies en las que se observa esta regulación en la distribución de elementos tienen la habilidad de acumular cantidades importantes de silicio.

En el arroz, una planta acumuladora de silicio, [Cuong et al. \(2017\)](#) evaluaron el efecto de cuatro dosis de Si en combinación con una dosis de fertilización recomendada. Observaron que además del rendimiento la aplicación de Si, mejoró de manera sustancial ($p=0.05$) la absorción de N, P y K, así como la acumulación de estos elementos en la paja, y el contenido de N y P en el grano.

En un estudio similar, [Lu et al. \(2016\)](#) evaluaron la influencia que tiene la estructura del material utilizada como fuente de silicio sobre el rendimiento y el contenido de algunos elementos seleccionados. Encontraron que la aplicación de silicio en forma de nanosílice incrementa los contenidos de N y K mientras disminuye la concentración de P y Ca.

En una especie con absorción restrictiva como el frijol común (Liang *et al.*, 2005), las aplicaciones altas de silicio favorecen su acumulación en los tejidos, pero sin influenciar el contenido de elementos como el fósforo o la producción de biomasa (Tokura *et al.*, 2014). En contraste, en plántulas de soya (*Glycine max L.*) la acumulación en las hojas de elementos como K, Ca y Fe se favoreció con la aplicación de Si incluso cuando las plántulas no fueron sometidas a estrés. En general la condición de estrés incrementa el contenido de los macroelementos en las hojas, mientras que la aplicación de Si disminuye este efecto manteniendo las concentraciones de los elementos cercanas a las del control (Shen *et al.*, 2014)

En especies ornamentales, la influencia del silicio en la absorción y compartimentalización de elementos es diferente. Mientras que en zinnia la acumulación de silicio produce un mayor contenido de potasio en tallos y peciolo y una disminución de calcio en los mismos órganos (Tefagiorgis y Laing, 2013), en crisantemo no existe relación entre la acumulación de silicio y los contenidos de Ca y K (Carvahlo *et al.*, 2012).

En un estudio realizado por Miyake y Takahashi (1986) en fresa, encontraron relación entre los contenidos de Si y una disminución de los contenidos de N y P. En contraste, el contenido de calcio se incrementó junto con el de silicio en las hojas, mientras disminuyó en las raíces. Otras investigaciones muestran que la aplicación de Si puede influir sobre las concentraciones de elementos como calcio (Stamatakis *et al.*, 2003; Jarosz, 2012), potasio (Lieten *et al.*, 2002; Abd-Alkarim *et al.*, 2017), fósforo (Lieten *et al.*, 2002; Ibrahim *et al.*, 2015; Abd-Alkarim *et al.*, 2017) y nitrógeno (Ibrahim *et al.*, 2015) en los tejidos vegetales.

Merece una mención aparte el papel que desempeña el Si sobre el contenido de nutrimentos cuando existe un desbalance nutricional que puede conducir a una deficiencia o al exceso. Sobre este tema existe mucha investigación relacionada con macro y micronutrimentos y los mecanismos mediante los cuales la acumulación de silicio contrarresta los efectos adversos provocados por este desbalance (Ver: Neumann y Nieden, 2001; Ma, 2004; Sahebi *et al.*, 2015; Adrees *et al.*, 2015).

LITERATURA CITADA

- Agulheiro-Santos, A. C. 2008. Quality of strawberry 'camarosa' with different levels of nitrogen fertilization. *In VI international strawberry symposium 842*. 907-910.
- Ahmad, H., M. Sajjid, S. Hayat, R. Ullah, M. Ali, A. Jamal, A. Rahman, Z. Aman, y J. Ali. 2017. Growth, yield and fruit quality of strawberry (*Fragaria ananasa dutch*) under different phosphorus levels. *Research in Agriculture*. 2(2). 19. [10.22158/ra.v2n2p19](https://doi.org/10.22158/ra.v2n2p19)
- Alloway, B. J. 2008. Micronutrients and crop production: an introduction. *In Alloway, B.J. (Ed) Micronutrient deficiencies in global crop production*. (pp. 1-39). Springer Netherlands.
- Andriolo, J. L., D. I. Janisch, M. Dal Picio, O.J. Schmitt, y M.A. Lerner. 2014. Nitrogen accumulation and monitoring by strawberry stock plants for runner tips production. *Horticultura Brasileira*. 32(3): 273-279. [10.1590/S0102-05362014000300006](https://doi.org/10.1590/S0102-05362014000300006)
- Arnon, D. I., y P.R. Stout. 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant physiology*. 14(2): 371.
- Ávila-Arce, A., y D. de J. González-Milán. 2012. La competitividad de las fresas (*Fragaria spp.*) mexicanas en el mercado nacional, regional y de Estados Unidos. *Agricultura, sociedad y desarrollo*. 9(1): 17-27.
- Bellof, S., y S. Schubert. 2009. Chloride improves fruit yield and quality of strawberry (*Fragaria x ananassa Duch.*). *In The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI*.
- Bieniasz, M., M. Małodobry, y E. Dziedzic. 2010. The effect of foliar fertilization with calcium on quality of strawberry cultivars 'luna' and 'zanta'. *In XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People International Symposium on 926*. 457-461. [10.17660/ActaHortic.2012.926.64](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.926.64)

- Bottoms, T. G., M. P. Bolda, M.L. Gaskell, y T.K. Hartz. 2013. Determination of strawberry nutrient optimum ranges through diagnosis and recommendation integrated system analysis. *HortTechnology*. 23(3): 312-318.
- Broadley, M., P. Brown, I. Cakmak, Z. Rengel, y F. Zhao. 2012. Beneficial elements. In P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants 3rd edition* (PP. 191-248). San Diego, CA. ELSEVIER. [10.1016/B978-0-12-384905-2.00008-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00008-X)
- Broadley, M., P. Brown, I. Cakmak, Z. Rengel, y F. Zhao. 2012a. Function of nutrients: micronutrients. In P. Marschner (Ed.), *Mineral Nutrition of Higher Plants 3rd edition* (PP. 191-248). San Diego, CA. ELSEVIER. [10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8)
- Campbell, C., y G.S. Miner. 2000. Strawberry, Annual Hill culture. In Campbell (edit.) Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States. *Southern Cooperative Series Bulletin No. 394*.
- Carvajal, M., y C.F. Alcaraz.1998. Why titanium is a beneficial element for plants. *Journal of plant nutrition*. 21(4): 655-664. [10.1080/01904169809365433](https://doi.org/10.1080/01904169809365433)
- Chaturvedi, O. P., A.K. Singh, V.K. Tripathi, y A.K. Dixit. 2003. Effect of zinc and iron on growth, yield and quality of strawberry cv. Chandler. In VII *International Symposium on Temperate Zone Fruits in the Tropics and Subtropics-Part Two* 696 (pp. 237-240). [10.17660/ActaHortic.2005.696.41](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.696.41)
- Choi, H. G., B.Y. Moon, K. Bekhzod, K.S. Park, J.K. Kwon, J.H. Lee, M.W. Cho, y N.J. Kang. 2015. Effects of foliar fertilization containing titanium dioxide on growth, yield and quality of strawberries during cultivation. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 56(5): 575-581.
- Choi, J. M., A. Latigui, y C.W. Lee. 2013. Visual symptom and tissue nutrient contents in dry matter and petiole sap for diagnostic criteria of phosphorus nutrition for seolhyang strawberry cultivation. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 1(54): 52-57.

- Choi, J., S. Jeong, K. Cha, H. Chung, y K. Seo. 2000. Deficiency symptom, growth characteristics, and nutrient uptake of 'Nyoho' strawberry as affected by controlled nitrogen concentrations in fertilizer solution. *Journal of the Korean Society for Horticultural Science*. 41(4): 339-344.
- Coskun, D., R. R. Deshmukh, H. Sonah, J.G. Menzies, O. Reynolds, J.F. Ma, H.J. Kronzucker, y R.R. Bélanger.2018. The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist*. [10.1111/nph.15343](https://doi.org/10.1111/nph.15343)
- Dana, M. N.1980. The strawberry plant and its environment. Proc. 1980 III, Strawberry School, 1-10.
- Darrow, G.M. 1966. The strawberry: history, breeding and physiology. The New England Institute for Medical Research, New York.
- Dirinck, P. J., H.L. De Pooter, G.A. Willaert., y N.M. Schamp.1981. Flavor quality of cultivated strawberries: the role of the sulfur compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 29(2): 316-321. [10.1021/jf00104a024](https://doi.org/10.1021/jf00104a024)
- Du, X., M. Song, y R. Rouseff. 2011. Identification of new strawberry sulfur volatiles and changes during maturation. *Journal of agricultural and food chemistry*. 59(4):1293-1300. [10.1021/jf104287b](https://doi.org/10.1021/jf104287b)
- Ebrahimi, R., M.K. Souri, F. Ebrahimi, y M. Ahmadizadeh. 2012. Growth and yield of strawberries under different potassium concentrations of hydroponic system in three substrates. *World Applied Sciences Journal*. 16(10): 1380-1386.
- Epstein, E. 1999. Silicon. *Annual review of plant biology*. 50(1): 641-664. [10.1146/annurev.arplant.50.1.641](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641)
- Faostat, FAO. 2017. Statistical databases. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (27-10-2017)
- Giampieri, F., S. Tulipani, J. M. Alvarez S., J. L. Quiles, B. Mezzetti, y M. Battino .2012. The strawberry: composition, nutritional quality, and impact on human health. *Nutrition*. 28(1): 9-19. [10.1016/j.nut.2011.08.009](https://doi.org/10.1016/j.nut.2011.08.009)

- Guntzer, F., C. Keller, J-D Meunier. 2012. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 32:201–213. [10.1007/s13593-011-0039-8](https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8).
- Hancock, J. F., C.E. Finn, J.J. Luby, A. Dale, P.W. Callow, y S. Serçe. 2010. Reconstruction of the strawberry, *Fragaria x ananassa*, using genotypes of *F. virginiana* and *F. chiloensis*. *HortScience*. 45(7): 1006-1013.
- Hancock, J. F. 1999. Strawberries. CABI. New York.
- Haneklaus, S., E. Bloem, E. Schnug, L. Kok, I. Stule. 2007. Sulfur. *In* Barker, A. V., Y Pilbeam, D. J. (Eds.). *Handbook of plant nutrition*. CRC press. New York.
- Hawkesford, M., W. Horst, T. Kichey, H. Lambers, J. Schjoerring, I.M. Skrumsager, P. White. 2012. Functions of macronutrients. *In* P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants 3rd edition* (PP. 135-189). San Diego, CA. ELSEVIER. [10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6)
- Hepler, P. K. 2005. Calcium: a central regulator of plant growth and development. *The Plant Cell*. 17(8): 2142-2155. [10.1105/tpc.105.032508](https://doi.org/10.1105/tpc.105.032508)
- Hochmuth, G. J., y E. Albrechts. 1994. Fertilization of strawberries in Florida. University of Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agriculture Sciences.
- Hocking, B., S.D. Tyerman, R.A. Burton, y M. Gilliam. 2016. Fruit calcium: transport and physiology. *Frontiers in plant science*. 7. [10.3389/fpls.2016.00569](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00569)
- Hoover, E., C. Rosen and J. Luby. 2003. Commercial strawberry production in Minnesota. Regents of the University of Minnesota. USA.
- Hummer K.E., J. Hancock. 2009. Strawberry genomics: Botanical history, cultivation, traditional breeding, and new technologies. *In*: Folta K.M., S.E. Gardiner (eds) *Genetics and genomics of rosaceae. Plant genetics and genomics: Crops and Models*. vol 6. Springer, New York, NY
- Johanson, F. D. 1965. Strawberry nutrient deficiency symptoms. Ext. Bull.— Wash. State Univ., Coop. Ext. Serv.561.

- Kaur, S., N. Kaur, K.H. Siddique, y H. Nayyar. 2016. Beneficial elements for agricultural crops and their functional relevance in defence against stresses. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 62(7): 905-920. [10.1080/03650340.2015.1101070](https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1101070)
- L. Li, X. Wei, M. Ji, Y. Chao, L. Ling, D. Gao y X. Fu. 2017. Effects of molybdenum on nutrition, quality, and flavour compounds of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch. cv. *Akihime*) fruit. *Journal of Integrative Agriculture*. 16(7): 1502-1512. [10.1016/S2095-3119\(16\)61518-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61518-6)
- Li, H., X. Li, H. Dai, Z. Zhang, y F. Cao. 2016. Correlation between phosphorus content and fruit quality in strawberries. In VIII *International Strawberry Symposium* 1156 (pp. 661-666). [10.17660/ActaHortic.2017.1156.96](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1156.96)
- Liston, A., R. Cronn, y T.L. Ashman. 2014. *Fragaria*: a genus with deep historical roots and ripe for evolutionary and ecological insights. *American journal of botany*. 101(10): 1686-1699. [10.3732/ajb.1400140](https://doi.org/10.3732/ajb.1400140)
- Ma, J.F., N. Yamaji .2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*. 11 (8): 392-397. [10.1016/j.tplants.2006.06.007](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007)
- Maathuis, F. J., y E. Diatloff. 2013. Roles and functions of plant mineral nutrients. In Maathuis (Ed) *Plant mineral nutrients: methods and protocols*, 1-21. Humana Press. New York. [10.1007/978-1-62703-152-3_1](https://doi.org/10.1007/978-1-62703-152-3_1).
- Macías M., A. 2010. Competitividad de México en el mercado de frutas y hortalizas de estados unidos de América,1989-2009. *Agroalimentaria*. 16(31): 31-48.
- May, G. M., y M.P. Pritts. 1993. Phosphorus, zinc, and boron influence yield components in 'Earliglow' Strawberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 118(1): 43-49.
- Merchant, S. S. 2010. The elements of plant micronutrients. *Plant physiology*. 154(2): 512-515. [10.1104/pp.110.161810](https://doi.org/10.1104/pp.110.161810)

- Milosevic, T. M., N.T. Milosevic, y I.P. Glisic. 2009. Strawberry (*Fragaria X ananassa Duch.*) yield das affected by the soil pH. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 81(2): 265-269. [10.1590/S0001-37652009000200012](https://doi.org/10.1590/S0001-37652009000200012)
- Mimmo, T., R. Tiziani, F. Valentinuzzi, L. Lucini, C. Nicoletto, P. Sambo, M. Scampicchio, P. Youri y S. Cesco. 2017. Selenium biofortification in *Fragaria x ananassa*: implications on strawberry fruits quality, content of bioactive health beneficial compounds and metabolomic profile. *Frontiers in plant science*.8.1887. [10.3389/fpls.2017.01887](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01887)
- Miner, G. S., E.B. Poling, D.E. Carroll, L.A. Nelson, y C.R. Campbell. 1997. Influence of fall nitrogen and spring nitrogen—potassium applications on yield and fruit quality of Chandler ‘Strawberry’. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 122(2): 290-295.
- Mouhu, K., T. Hytönen, K. Folta, M. Rantanen, L. Paulin, P. Auvinen, y P. Elomaa. 2009. Identification of flowering genes in strawberry, a perennial SD plant. *BMC plant biology*. 9(1):122. [10.1186/1471-2229-9-122](https://doi.org/10.1186/1471-2229-9-122)
- Ojeda-Real, L. A., P. Lobit, R. Cárdenas-Navarro, O. Grageda-Cabrera, R. Farías-Rodríguez, E. Valencia-Cantero, y L. Macías-Rodríguez. 2009. Effect of nitrogen fertilization on quality markers of strawberry (*Fragaria x ananassa Duch. cv. Aromas*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 89(6): 935-939. [10.1002/jsfa.3531](https://doi.org/10.1002/jsfa.3531)
- Ouellette, S., M.H. Goyette, C. Labbé, J. Laur, L. Gaudreau, A. Gosselin, ... y R.R. Bélanger. 2017. Silicon transporters and effects of silicon amendments in strawberry under high tunnel and field conditions. *Frontiers in plant science*. 8: 949-960. [10.3389/fpls.2017.00949](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00949)
- Petrović, A. 2013. Effect of nutrient starvation on some aspects of nitrogen metabolism in substrate-grown strawberry plantings cv. *Nyoho*. *Ratarstvo i povrtarstvo*. 50(1): 24-30. [10.5937/ratpov50-3615](https://doi.org/10.5937/ratpov50-3615)

- Pilon-Smits, E. A., C.F. Quinn, W. Tapken, M. Malagoli, y M. Schiavon. 2009. Physiological functions of beneficial elements. *Current opinion in plant biology*. 12(3): 267-274. [10.1016/j.pbi.2009.04.009](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.009).
- Poling, E. B. 2005. An Introductory guide to strawberry plasticulture. Department of Horticultural Science, North Carolina State. 30p.
- Pritts, M. N.D. Interpreting foliar analysis results. In Pritts, Heidenreich, McDermott, Miller (eds.) *berry soil and nutrient management—A guide for educators and growers*. Cornell University, Ithaca, NY
- Santos, B. M. 2010. Effects of preplant nitrogen and sulfur fertilizer sources on strawberry. *HortTechnology*. 20(1): 193-196.
- Santoyo, J., y C. Martínez. 2009. Paquete tecnológico para la producción de fresa. Fundación PRODUCE Sinaloa AC. www.fps.org.mx/.../29-frutales?...paquete-tecnologico-para-la-produccion-de-fresa (30-10-2017)
- Shaul, O. 2002. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *Biometals*. 15(3): 307-321.
- SIAP. SAGARPA. 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/ (27-10-2017)
- Silva De S., M. L., M. de Cássia Piccolo., y A.R. Trevizam. 2013. Gypsum as a source of sulfur for strawberry crops. *Semina: Ciências Agrárias*. 34(4): 1683-1693. [10.5433/1679-0359.2013v34n4p1683](https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n4p1683)
- Skrovankova, S., D. Sumczynski, J. Mlcek, T. Jurikova, y J. Sochor .2015. Bioactive compounds and antioxidant activity in different types of berries. *International Journal of Molecular Sciences*. 16(10): 24673–24706. [10.3390/ijms161024673](https://doi.org/10.3390/ijms161024673)
- Tagliavini, M., E. Baldi, R. Nestby, C. Raynal-Lacroix, P. Lieten, T. Salo, D. Pivot, P.L. Lucchi, G. Baruzzi, W. Faedi. 2004. Uptake and partitioning of major nutrients by strawberry plants. *Acta Horticulturae*. 197-200. [10.17660/ActaHortic.2004.649.36](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.649.36)

- Trejo-Téllez, L. I., y F.C. Gómez-Merino. 2014. Nutrient management in strawberry: effects on yield, quality and plant health. *In Strawberries: Cultivation, Antioxidant Properties and Health Benefits (Nutrition and Diet Research Progress)*. Nova Science Publishers, Inc., USA.
- Tubana, S., T. Babu, y L.E. Datnoff. 2016. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. *Soil Science*.181(9/10) 393-411. [10.1097/SS.000000000000179](https://doi.org/10.1097/SS.000000000000179)
- Vázquez-Gálvez, G., R. Cárdenas-Navarro, y P. Lobit. 2008. Efecto del nitrógeno sobre el crecimiento y rendimiento de fresa regada por goteo y gravedad. *Agricultura técnica en México*. 34(2): 235-241.
- Wang, M., Q. Zheng, Q. Shen, y S. Guo. 2013. The critical role of potassium in plant stress response. *International journal of molecular sciences*. 14(4): 7370-7390. [10.3390/ijms14047370](https://doi.org/10.3390/ijms14047370)
- Wang, S., M. Song, J. Guo, Y. Huang, F. Zhang, C. Xu, ... y L. Zhang. 2017. The potassium channel FaTPK1 plays a critical role in fruit quality formation in strawberry (*Fragaria x ananassa*). *Plant Biotechnology Journal*. [10.1111/pbi.12824](https://doi.org/10.1111/pbi.12824)
- Welch, R. M., y L. Shuman. 1995. Micronutrient nutrition of plants. *Critical Reviews in plant sciences*.14 (1): 49-82. [10.1080/07352689509701922](https://doi.org/10.1080/07352689509701922)
- Whipker, B. 2014. Strawberry Abiotic Disorders. North Carolina State Extension Publications. <https://content.ces.ncsu.edu/strawberry-phosphorus-p-deficiency>
- White, P. J., y M.R. Broadley. 2003. Calcium in plants. *Annals of botany*. 92(4): 487-511. [10.1093/aob/mcg164](https://doi.org/10.1093/aob/mcg164)
- Wójcik, P., y M. Lewandowski. 2003. Effect of calcium and boron sprays on yield and quality of “Elsanta” strawberry. *Journal of plant nutrition*. 26(3): 671-682. [10.1081/PLN-120017674](https://doi.org/10.1081/PLN-120017674)

- Yildirim, E., H. Karlidag, y M. Turan. 2009. Mitigation of salt stress in strawberry by foliar K, Ca and Mg nutrient supply. *Plant Soil Environ.* 55(5): 213-221.
- Zhang, M., Y. Liang, y G. Chu. 2017. applying silicate fertilizer increases both yield and quality of table grape (*Vitis vinifera L.*) grown on calcareous grey desert soil. *Scientia Horticulturae.* 225: 757-763. [10.1016/j.scienta.2017.08.019](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.019)
- Zhang, Y., N.P. Seeram, R. Lee, L. Feng, y D. Heber .2008. Isolation and identification of strawberry phenolic with antioxidant and human cancer cell antiproliferative properties. *Journal of agricultural and food chemistry.* 56(3): 670-675. [10.1021/jf071989c](https://doi.org/10.1021/jf071989c)

CAPÍTULO I. RESPUESTA AGRONÓMICA DE LA FRESA A LA APLICACIÓN DE SILICIO

1.1 RESUMEN

La fresa es una de las frutas más producidas a nivel mundial, su importancia económica es atribuible a sus propiedades organolépticas y nutraceuticas que la hacen apetecible para el consumo. El uso del silicio (Si) en especies como la fresa ha sido limitado debido a se conoce poco acerca de los efectos que produce este elemento en variables relacionadas con el rendimiento y la calidad de los frutos. El objetivo de esta investigación fue analizar la respuesta agronómica de la fresa a la aplicación de silicio, así como los cambios producidos en la calidad del fruto. Se utilizaron plantas de fresa 'Festival' a las cuales se suministró silicio en solución (1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 mM de Si) o Foliar (0.0, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 mM de Si). Se evaluó la producción y compartimentación de biomasa, el rendimiento y parámetros de calidad del fruto incluidos el tamaño y peso promedio. La aplicación de silicio incrementó la producción de biomasa aérea y redujo la biomasa correspondiente a raíces a dosis altas, independientemente de la forma de aplicación. Las dosis inferiores a 2.0 mM, produjeron mayor biomasa que las dosis altas. La aplicación de silicio en solución a su vez, mejoró el rendimiento con respecto a la aplicación foliar sin que hubiera diferencia significativa entre el tamaño de los frutos. Mientras que las aplicaciones foliares incrementaron la firmeza y el contenido de ácido cítrico de los frutos a dosis menores a 2.0 mM.

Palabras clave: *Fresa, organolépticas, silicio, respuesta agronómica, calidad, rendimiento, biomasa.*

1.2 ABSTRACT

Strawberry is one of the most produced fruits worldwide; its economic importance is attributable to its organoleptic and nutraceutical properties that make it palatable for consumption. The use of silicon (Si) in species such as strawberry has been limited due to little is known about the effects produced by this element in variables related to yield and fruit quality. The objective of this research was to analyze the agronomic response of the strawberry to the application of silicon, as well as the changes produced in the quality of the fruit. Strawberry plants 'Festival' were used to which silicon was supplied in solution (1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 mM Si) or Foliar (0.0, 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0 mM Si). The production and compartmentalization of biomass yield, and parameters of fruit quality including average size and weight were evaluated. The application of silicon increased the production of aerial biomass and reduced the biomass corresponding to roots at high doses, independently of the application form. Doses lower than 2.0 mM produced higher biomass than high doses. The application of silicon in solution, at the same time, improved the yield with respect to the foliar application without there is significant difference between the size of the fruits. While the foliar applications increased the firmness and citric acid content of the fruits at doses lower than 2.0 mM.

Key words: *Silicon, beneficial effects, accumulation, yield, quality, physiological variables, gas exchange*

1.3 INTRODUCCIÓN

El silicio es junto con el oxígeno uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre (Ma y Yamaji, 2008), a pesar de su ubicuidad no es considerado como elemento esencial, por lo que su estudio en la agricultura ha sido relegado a un papel secundario. Sin embargo, los criterios de esencialidad fueron obtenidos en condiciones controladas, lo que no siempre refleja las condiciones de crecimiento de la mayoría de las plantas (Epstein, 2009).

A pesar de ello una vasta cantidad de estudios muestran la influencia del silicio en el crecimiento, la biomasa, el rendimiento y la calidad del producto de una amplia variedad de cultivos (Liang *et al.*, 2015). Estos estudios habían sido enfocados a plantas con una alta acumulación de silicio, pero actualmente se ha demostrado que especies con baja acumulación también responden favorablemente a la aplicación de este elemento.

La fresa es una de las especies en que recientemente se ha descrito la presencia de transportadores de silicio que facilitan su acumulación y que genera una respuesta favorable en variables de interés agronómico (Ouellette *et al.*, 2017). Cambios en la producción y compartimentación de biomasa (Miyake y Takahashi, 1986), incremento en el rendimiento (Silva *et al.*, 2013), cambios en la coloración y firmeza de los frutos (Lieten *et al.*, 2000; Dehghanipoodeh *et al.*, 2016), además de un contenido más alto de ácido cítrico, antocianinas y azúcares totales (Figueiredo *et al.*, 2010; Hajiboland *et al.*, 2017), son algunas de las variables cuya respuesta está relacionada con el suministro de silicio.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia del silicio en variables de interés agronómico en plantas de fresa. Estas variables incluyen la producción y compartimentación de biomasa, el rendimiento y algunos de sus componentes, así como algunos parámetros asociados con la calidad de los frutos.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 *Sitio experimental y material vegetal*

El experimento se realizó en un invernadero del Colegio de Postgraduados localizado a 19° 27' 28.4" N y 98° 54' 11.72" O, entre los meses de septiembre 2016 y mayo 2017. La temperatura máxima, mínima y promedio durante el experimento fue de 41.2, 2.6 y 22.2 °C respectivamente.

Como material vegetal se utilizaron plantas de fresa a raíz desnuda de la variedad Festival.

1.4.2 *Sustrato*

Las plantas se establecieron en contenedores tipo slabs de 60 litros de capacidad, en una mezcla 2:1 de tezontle/fibra de coco como sustrato. Se realizó un lavado a la fibra de coco para evitar liberación y acumulación de sales hasta alcanzar una conductividad eléctrica similar a la del agua de riego ($CE=0.7 \text{ dS m}^{-1}$)

1.4.3 *Tratamientos y diseño experimental*

Los tratamientos consistieron en cinco dosis de silicio aplicados en la solución nutritiva o al follaje. Se utilizaron cinco concentraciones de Si vía foliar (0, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 mM de Si) y cinco concentraciones vía solución nutritiva (1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 mM). Se utilizó como fuente metasilicato de sodio (Na_2SiO_3) sigma Aldrich® grado reactivo. Para los tratamientos foliares se utilizó agua desionizada incluso para el control, para los tratamientos en solución se adicionó el silicato de sodio a la solución nutritiva descrita en el siguiente apartado.

Como diseño experimental se utilizó parcelas divididas, con la forma de aplicación como parcela grande y la dosis como parcela chica. Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones las cuales se aleatorizaron para su arreglo espacial. La unidad experimental consistió en un slab con seis plantas.

1.4.4 Aplicación de los tratamientos y riego

El riego se realizó diariamente de forma manual. Durante los primeros tres meses se regó cada planta con 500 mL de la solución nutritiva. Los meses restantes el volumen incrementó a 700 mL. Los tratamientos en solución se aplicaron diariamente mediante el riego, mientras que los tratamientos foliares fueron aplicados únicamente una vez por semana.

Las soluciones nutritivas se formularon con base en el equilibrio iónico propuesto por [Steiner \(1984\)](#) al 60% a partir de reactivos grado técnico. La concentración de micronutrientes para todas las soluciones fue de: 5 mg L⁻¹ de Fe, 0.503 mg L⁻¹ de B, 0.19 mg L⁻¹ de Cu, 2.25 mg L⁻¹ de Mn, 0.16 mg L⁻¹ de Mo y 0.44 mg L⁻¹ de Zn. Para ello se consideró la concentración de nutrientes presentes en el agua y se complementó con las distintas fuentes.

El pH de las distintas soluciones se ajustó a 6.2-6.4, con el uso de ácido sulfúrico grado reactivo.

1.4.5 Rendimiento y tamaño de infrutescencia

Se realizaron 14 cosechas de frutos completamente maduros ([NMXFF-062-SCFI-2002](#)) entre el 15 de febrero y el 3 de mayo del 2017. A cada infrutescencia se midió el diámetro polar y ecuatorial utilizando un vernier y el peso utilizando una balanza analítica. El rendimiento total se obtuvo mediante la suma de todas las cosechas y corresponde a las seis plantas establecidas en cada repetición.

1.4.6 Indicadores de calidad del fruto

Las mediciones correspondientes a la calidad de infrutescencias de fresa se realizaron en el laboratorio de postcosecha del Colegio de Postgraduados el día en que las infrutescencias fueron cosechadas. Las variables evaluadas fueron: color, firmeza, °Brix y acidez titulable. Estas determinaciones se realizaron una vez por mes en frutos seleccionados con el mismo grado de madurez.

El color se determinó con un colorímetro Hunter Lab modelo D25-PC2 con escala CIEL*a*b. Se seleccionaron cuatro frutos por repetición y se midió dos veces cada infrutescencia. La medición de firmeza se hizo con un texturómetro Wagner (FVD-30) de puntal cónico en cuatro frutos, la variable se reporta en newtons (N).

La medición de los sólidos solubles totales o grados Brix se realizó con un refractómetro de mano (Atago palette PR 101®). Por compresión se extrajo el jugo de las infrutescencias y se colocó sobre la celda del aparato. Se hicieron dos mediciones para cada repetición.

La determinación de acidez titulable se hizo con el método volumétrico. Se pesan 20 g de pulpa, se agregan 100 ml de agua destilada, se licua, homogeniza y filtra la mezcla. Se toma una alícuota de 10 ml y se agregan de 3 a 5 gotas de fenolftaleína al 2.5% como indicador. Posteriormente se titula con hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N. El porcentaje de acidez se calcula con la Ecuación 1.

$$\% \text{ de } \textit{Ácido cítrico} = \frac{(\textit{ml de NaOH})(N)(\textit{meq AC})(VT)(100)}{(\textit{Alícuota})(\textit{Peso de la muestra})} \text{ -----} \blacktriangleright \text{ Ecuación 1}$$

Donde:

N = Normalidad del hidróxido de sodio = 0.1 N

Meq AC = Mili equivalentes del ácido cítrico = 0.064

VT = Volumen total (100 ml agua + volumen de 10 g de pulpa)

Alícuota = 10 ml

Peso de la muestra = 20 g

1.4.7 Producción de materia seca y compartimentación

Al final del ciclo, se colectaron dos plantas por cada repetición. Se retiró el sustrato adherido a las raíces utilizando agua destilada. Las plantas se separaron en raíces, corona y parte aérea (hojas, peciolo, flores y frutos). Cada órgano se colocó en bolsa de papel individual y se sometió a secado en una estufa de aire forzado a 70 °C hasta peso constante (aproximadamente 72 horas). Terminado el proceso de

secado se pesó cada órgano en balanza analítica. El peso total y por órgano se expresa en gramos por planta.

1.4.8 Contenido de silicio en el fruto

Para la determinación de silicio en los frutos se empleó una digestión húmeda a partir de ácido perclórico y nítrico, siguiendo la metodología propuesta por [Alcántar y Sandoval \(1999\)](#). Las muestras obtenidas a partir de la digestión incluidos los blancos fueron analizadas en un equipo de espectroscopia de emisión atómica de inducción por plasma (ICP-VARIAN 725-ES).

1.4.9 Análisis estadístico

El análisis de varianza y comparación de medias se realizó utilizando el procedimiento proc GLM (General Lineal Model) del software estadístico SAS System (versión 9.0). La comparación de medias se hizo utilizando la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Para algunas variables (para las cuales se incluye el modelo) se realizó un análisis de regresión utilizando el mismo programa estadístico. Se reporta el modelo con mejor ajuste y que a su vez considera la variación que aporta cada repetición.

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.5.1 Producción de materia seca y compartimentación

El suministro de silicio modificó la producción de materia seca total ($p=0.05$) y de algunos órganos. Con respecto a la producción de biomasa total (sin incluir el rendimiento) los valores más altos se observaron como respuesta a las dosis medias (2.0 y 1.0 mM respectivamente) cuando la forma de aplicación fue foliar (Cuadro 2). Estos tratamientos superaron en más de 35 % al tratamiento con la producción de biomasa más baja. Estos resultados concuerdan con estudios previos como el realizado por [Wang y Galleta \(1998\)](#), que muestra que la aplicación foliar de silicio (K_2SiO_3) en fresa puede mejorar sustancialmente la producción de biomasa, a medida que se incrementa el peso de todos los órganos de la planta. En ese estudio los autores muestran que la producción de biomasa responde a concentraciones tan altas como 17.0 mM, aunque señalan que la mejora en el crecimiento es más notoria a concentraciones cercanas a 4.0 mM.

El rendimiento de biomasa más bajo no se obtuvo en ninguno de los controles correspondientes a las formas de aplicación, sino con la dosis más alta aplicada en solución como lo muestra el Cuadro 2. Este incremento en la producción de biomasa y en otros parámetros relacionados con el crecimiento producidos por la aplicación de silicio ha sido bien documentado para especies acumuladoras ([Sávio et al., 2011](#); [Agostinho et al., 2017](#); [Amin et al., 2018](#)) como para aquellas que tienen una baja capacidad de absorción y acumulación del elemento ([Pozo et al., 2015](#); [Lu et al., 2016](#)).

Aunque la mejora en el crecimiento y la producción de biomasa se observa principalmente en plantas sometidas a estrés abiótico como señalan algunos autores ([Liang et al., 2005](#); [Hanafy et al., 2008](#); [Ríos et al., 2017](#)) otros tantos, aunque menos numerosos muestran que esta reacción también se presenta en condiciones de crecimiento óptimas ([Costa et al., 2016](#); [Neu et al., 2017](#)). En ambos casos la respuesta del crecimiento a la dosis de silicio parece más favorable cuando la dosis es relativamente baja.

A su vez la forma de aplicación tuvo un efecto significativo ($p=0.05$) sobre la producción de biomasa, siendo superior cuando el silicio se suministró vía foliar (24.91 ± 4.39 g) que cuando se hizo en solución (20.81 ± 3.57 g). Estos resultados contrastan con los obtenidos por [Khosroford et al. \(2017\)](#) y [Jayawardana et al. \(2014\)](#), en los cuales las aplicaciones en fresa y pimiento (*Capsicum annuum*) mejoraron parámetros relacionados con el crecimiento y la producción de biomasa cuando se suministró silicio a través del medio de crecimiento. A diferencia de esta investigación, en los estudios mencionados, las plantas fueron sometidas a estrés, por lo que es posible que la producción de biomasa en función de la forma de aplicación esté relacionada con las condiciones de crecimiento predominantes.

En contraste, en un ensayo realizado en trigo sin factores de estrés [Agostinho et al. \(2017\)](#) encontraron que mientras que la aplicación de silicio al suelo incrementaba el contenido del elemento en los tejidos, la aplicación foliar mejoraba la producción de biomasa. Los mismos autores señalan que existe poca evidencia acerca de los mecanismos que facilitan la absorción y deposición foliar de silicio, pero concuerdan con [Savvas y Ntatsi \(2015\)](#) en que puede estar relacionado con cambios morfológicos que facilitan la intercepción de luz y mejoran el desarrollo y la producción de biomasa. En cambio, [Luyckx et al. \(2017\)](#) lo asocian a la estimulación que produce el silicio en fitohormonas endógenas y a la resistencia mecánica que origina su acumulación y sirve de resistencia a la presión de turgencia durante el crecimiento.

Cuadro 2/Producción total de biomasa en peso seco y su partición en plantas de fresa como respuesta a la forma y dosis de aplicación silicio

Aplicación	Dosis (mM Si)	Biomasa por órgano(g)			Biomasa total† (g)
		Raíz	Corona	Hojas†	
Solución	1.0	4.20ab*	1.95a	14.95a	21.10ab
	1.5	3.82ab	2.45a	15.70a	22.85ab
	2.0	3.45ab	3.70a	14.45a	19.85ab
	2.5	3.20ab	3.45a	15.45a	22.85ab
	3.0	2.82ab	3.45a	12.45a	17.01b
Foliar	0.0	5.61a	2.95a	15.95a	23.47ab
	1.0	4.70ab	2.57a	14.61a	27.01ab
	2.0	2.28b	3.12a	17.70a	28.85a
	3.0	2.61ab	2.20a	16.45a	26.18ab
	4.0	2.11b	2.45a	17.01a	20.85ab
	Pr>F	0.0098	0.5003	0.1941	0.0243
	DSH ⁺	3.0531	3.1088	6.0817	10.237
Pr > I t l	Interacción [‡]	0.206ns*	0.2562ns	0.4715ns	0.3512ns

* Valores con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05)

† Estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05) entre las formas de aplicación (Foliar vs Solución)

⁺ Diferencia significativa honesta ✦ No significativa [‡] Interacción entre la forma y la dosis de aplicación

En cuanto a la producción por órgano, el peso seco de la corona fue estadísticamente igual para todos los tratamientos. La misma respuesta se observó a las formas de aplicación aun cuando el peso seco de la corona tuvo una tendencia cuadrática en los ensayos donde el silicio se añadió a la solución nutritiva. La corona parece ser el órgano menos susceptible a la dosis de silicio, aunado a este estudio así lo demuestran investigaciones previas como la de [Wang y Galleta \(1998\)](#), pues los pesos de las coronas que ellos reportan apenas difieren (sin ser significativas) cuando la concentración en la solución asperjada se incrementó de 4.25 a 17 mM.

La raíz fue el único órgano cuyo peso respondió a la dosis de silicio. Como se observa en el Cuadro 2 la acumulación de materia seca en raíz fue similar para los tratamientos con aplicación en solución, pero fue sensible a la dosis en aplicación foliar. En ambos casos, la producción de raíces disminuyó a medida que se incrementó la concentración del elemento en la solución. [Gao et al. \(2005\)](#) reportan resultados similares a los de esta investigación en maíz; ellos muestran que una dosis de silicio 2.0 mM en comparación con el control no produjo diferencias

significativas en el peso de la raíz, aunque si una disminución en el peso fresco del órgano. En contraste, [Crusciol et al. \(2009\)](#) señalan un incremento en la producción de tubérculos de papa cuando se suministró silicio en concentraciones próximas a 8 mM en el suelo. Resultados similares para frijol caupí (*Vigna unguiculata*) muestran [Dakora y Nelwamondo \(2003\)](#), con una mayor producción de raíces a medida que se incrementa la concentración de silicio en solución. Ellos atribuyen este comportamiento a la acción elicitora del elemento en la síntesis y acumulación de ácido abscísico, el cual se relaciona con la producción de raíces laterales. Mientras que [Hattori et al. \(2003\)](#) señalan que sería una respuesta atribuida a cambios en la arquitectura de la raíz; provocados a su vez por modificaciones en la extensibilidad de la pared celular de las distintas zonas radicales.

A diferencia de las raíces, la producción de materia seca en hojas no difirió entre las dosis, pero si respondió de manera diferente a las formas de aplicación. Estos resultados son similares a los obtenidos en un estudio previo realizado por [Miyake y Takahashi \(1986\)](#) en el cual no se observan diferencias en la producción de biomasa aérea entre los tratamientos; mientras que en una investigación posterior llevada a cabo por [Wang y Galleta \(1998\)](#) se observan diferencias significativas, aunque como respuesta a concentraciones de silicio más altas. En concordancia con nuestros resultados al comparar ambos estudios se observa una mayor respuesta en la producción de hojas a cambios en la concentración de silicio cuando este se suministra a través de la solución nutritiva. Como se observa en el Cuadro 2 una mayor producción de hojas se reflejó en el peso total de biomasa, al ser esta parte de la planta la de mayor proporción en la materia seca total como se muestra en la Figura 1.

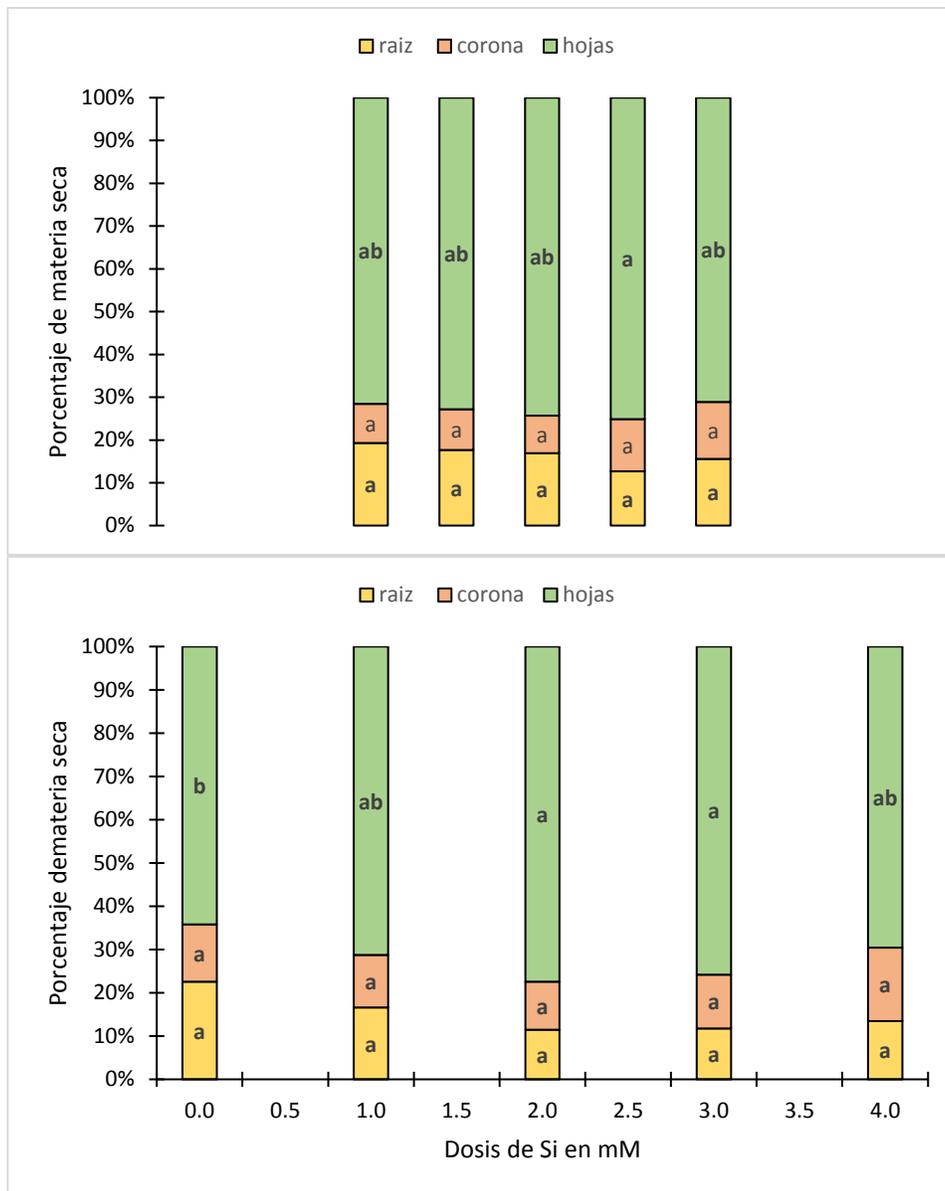


Figura 1 Producción relativa de biomasa de plantas de fresa como respuesta a la aplicación en solución (superior) y foliar (inferior) de silicio.

Entre los tratamientos hubo diferencia significativa ($p < 0.05$) en los porcentajes que representan las hojas para la biomasa total. Este porcentaje es similar a los datos que presentan Wang y Galleta (1998) aunque con una mayor variación entre tratamientos. Para los otros órganos, no hubo diferencia en el porcentaje entre las dosis, en contraste con las hojas cuyo porcentaje más alto se dio como respuesta a las dosis comprendidas entre 2.0 y 3.0 mM de silicio independientemente de la

forma de aplicación, aunque esta respuesta se observó en un intervalo de concentración más amplio para las aplicaciones foliares. Evidentemente la diferencia en la compartimentación de la biomasa es en detrimento del alguno de los órganos, al observar la Figura 1 puede notarse que en aquellos tratamientos donde el porcentaje de biomasa correspondiente a hojas fue estadísticamente diferente disminuyó el porcentaje correspondiente a las raíces.

1.5.2 Rendimiento y sus componentes

El rendimiento de la fresa y el peso promedio del fruto respondieron a la dosis y la forma de aplicación de silicio. El diámetro ecuatorial y polar del fruto no difirió entre los tratamientos ni como respuesta a la forma de aplicación tal como se observa en el Cuadro 3 pero en promedio las plantas tratadas con silicio en la solución produjeron frutos más alargados mientras que la otra forma de aplicación produjo frutos ligeramente más anchos. Los datos obtenidos por [Lalithya et al. \(2014\)](#) en chicozapote (*Manilkara achras*), muestran una tendencia similar. En su ensayo la aplicación de silicio incrementó el tamaño de fruto, siendo más eficiente la aplicación foliar que la aplicación al suelo y a su vez con diferencias entre el uso de silicato de potasio y silicato de calcio. En mango (*Mangifera indica*) [Costa et al. \(2015\)](#) reportan un comportamiento similar, con una respuesta cuadrática del diámetro del fruto con respecto a la dosis del elemento. [Das et al. \(2017\)](#) también obtuvieron resultados similares con tamaño de frutos de guayaba (*Psidium guajava* L.) mayores cuando utilizaban dosis de fertilizantes recomendadas más tierra de diatomeas como fuente de silicio.

En relación al peso promedio del fruto la aplicación en solución produjo frutos uniformes, sin diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto a peso. Las plantas tratadas con silicio vía foliar produjeron a su vez los frutos más pesados con la dosis más alta pero también los más ligeros en ausencia de silicio en la solución asperjada. Existe mucha evidencia acerca de la influencia del silicio en el peso del fruto en distintos cultivos. Al igual que en los datos presentados en el Cuadro 3 [Lieten y Horvath \(2002\)](#), observaron poca diferencia en el peso del fruto en función de la dosis de silicio. Sin embargo, a medida que se concentraba el elemento en la

solución disminuía el peso del fruto. De forma opuesta, en jitomate [Lu et al. \(2016\)](#) reportan incrementos mayores al 5 % en el peso promedio del fruto en función de la estructura del insumo utilizado. En el mismo cultivo, [Jarosz \(2014\)](#) halló resultados similares, aunque los incrementos fueron menores y también estuvieron relacionados con el sustrato utilizado.

Los datos presentados en el Cuadro 3 también muestra una mayor sensibilidad (en el peso promedio del fruto) a la variación en la concentración de silicio cuando este se aplica a las hojas. Esta diferencia en el peso de fruto, pero sin diferencias en el tamaño, solo pueden atribuirse a un cambio en el peso específico; no obstante, esas mediciones no fueron contempladas en esta investigación.

Cuadro 3/Rendimiento acumulado de fresa (peso fresco) y tamaño promedio de fruto como respuesta a la dosis y forma de aplicación de silicio

Aplicación	Dosis (mM Si)	Rendimiento [†] (g)	Diámetro polar	Diámetro ecuatorial	Peso promedio del fruto
Solución	1.0	2121.95ab*	4.61a	3.07a	17.75ab
	1.5	2192.95ab	4.20a	2.86a	16.81ab
	2.0	2151.60ab	4.11a	2.80a	16.50ab
	2.5	2193.38ab	4.15a	2.85a	15.82ab
	3.0	2308.53a	3.94a	2.70a	16.18ab
Foliar	0.0	1844.50b	4.40a	3.03a	15.51b
	1.0	1941.60ab	4.21a	2.88a	15.81ab
	2.0	1999.70ab	4.19a	2.90a	16.79ab
	3.0	1893.80ab	3.84a	2.66a	17.05ab
	4.0	1880.77ab	4.08a	2.76a	17.95a
	Pr>F	0.0147	0.5651	0.6013	0.0061
	DSH	459.74	1.2101	0.713	2.2704
Pr > I t I	Interacción [‡]	0.2441ns*	0.3679ns	0.3538ns	0.0165

* Valores con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05)

† Estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05) entre las formas de aplicación (Foliar vs Solución)

‡ Diferencia significativa honesta ✦ No significativa [‡] Interacción entre la forma y la dosis de aplicación

El Cuadro 3 también muestra los cambios en el rendimiento producidos por el suministro de silicio, en él puede verse que el rendimiento responde a la dosis y la forma en la cual se suministra el elemento. El mayor rendimiento se observó para la dosis más alta de silicio cuando este se incorporó en la solución nutritiva, mientras

que la aplicación foliar alcanzó el máximo rendimiento a una concentración 2.0 mM de Si y disminuyó a medida que la concentración fue aumentando. Numerosos estudios muestran evidencia del incremento que produce el silicio en el rendimiento de cultivos, como la fresa ([Ouellette et al., 2017](#); [Silva et al., 2013](#)), jitomate ([Marodin et al., 2014](#); [Toresano et al., 2012](#); [Lu et al., 2016](#)), pepino ([Abd-Alkarim et al., 2017](#); [Jarosz, 2012](#)) calabacín ([Savvas et al., 2009](#)), papa ([Pilon et al., 2013](#)), trigo ([Hanafy et al., 2008](#)) y otras gramíneas ([Ahmad et al., 2013](#)). En pocos estudios se muestra una respuesta adversa del suministro de silicio en el rendimiento como el que reportan [Van Winkel et al. \(2014\)](#), la mayoría, muestra una respuesta favorable como consecuencia, con mejoras en el rendimiento, sus componentes y en general en la calidad del fruto u órgano de interés.

[Marodin et al. \(2014\)](#) señalan que al igual que a la producción de biomasa en general, el incremento en el rendimiento también puede atribuirse a una mejor arquitectura de la planta, lo que le permitiría interceptar de mejor forma la luz haciendo más eficiente el proceso fotosintético. Otros investigadores como [Abd-Alkarim y colaboradores \(2017\)](#) concuerdan en este punto y añaden que, aunque el mecanismo no es del todo claro puede relacionarse con la absorción y uso más eficiente de otros elementos, entre los que pueden incluirse el fósforo. Antes a estos resultados [Miyake y Takahashi \(1978\)](#) llegaron a la conclusión que la disponibilidad de silicio era más crítica en la etapa reproductiva y que además influía en la fertilidad del polen por lo que la deficiencia de este elemento producía frutos deformes con impacto en el rendimiento. Este último argumento sería más determinante para explicar cómo la limitación en la disponibilidad del silicio condiciona parcialmente el rendimiento.

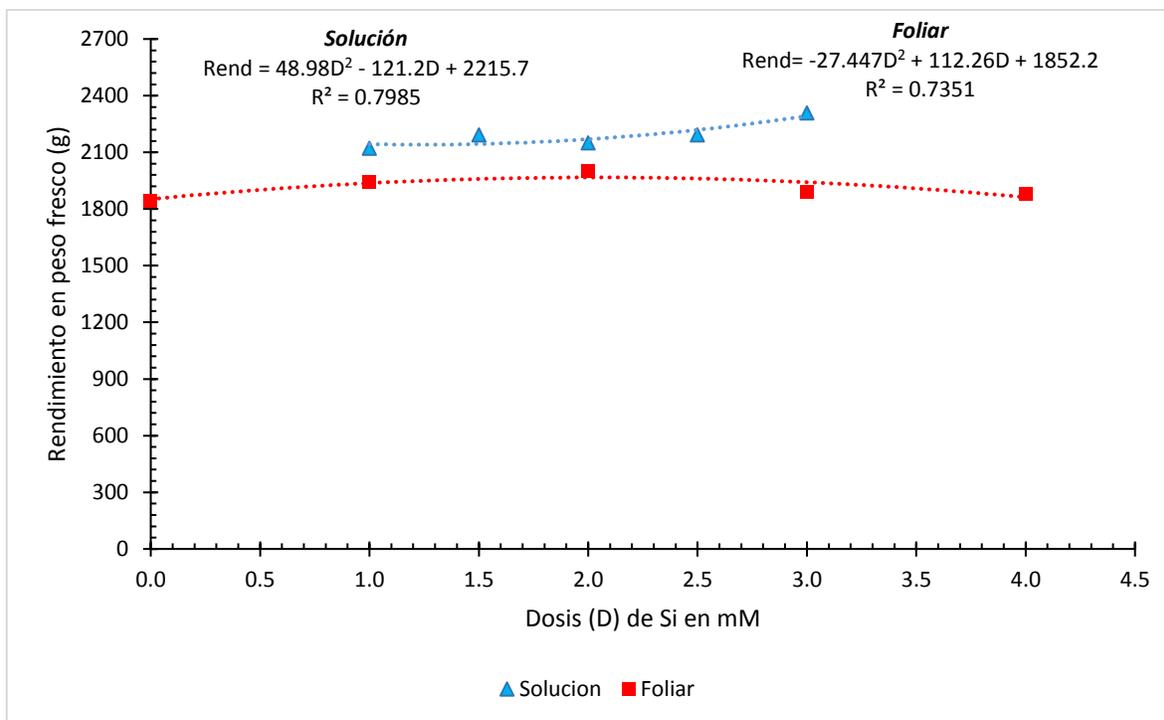


Figura 2 Rendimiento de promedio de fresa como respuesta a la aplicación foliar y en solución de silicio

Todos los tratamientos correspondientes a la aplicación en solución superaron en rendimiento a aquellos en los cuales el silicio se aplicó vía foliar como muestra la Figura 2. La diferencia en el rendimiento entre ambas formas de aplicación fue significativa ($p=0.05$). El rendimiento promedio para los tratamientos de aplicación en solución (2167.40 ± 183.5 g) superó en 11% a aquellos en los cuales la aplicación de silicio fue a las hojas (1933.49 ± 212.81 g). Antes [Silva y colaboradores \(2013\)](#) habían reportado resultados similares atribuyéndolos al sinergismo entre el silicio y otros elementos como el fósforo, esto debido a la similitud entre las formas metabólicas de ambos elementos. Éí porque los tratamientos foliares son menos efectivos no es del todo claro y es necesaria más investigación en este sentido.

1.5.3 Variables de calidad del fruto

Con respecto a las variables relacionadas con la calidad de los frutos, la respuesta fue menos evidente que la que presentaron los parámetros relacionados con el rendimiento y la productividad de biomasa.

En lo que respecta a los componentes de la variable color, la Figura 3 muestra que no se observan diferencias en la tonalidad de los frutos. Los parámetros que componen esta variable tampoco fueron influenciados de manera significativa por la dosis de silicio o la forma en la que este se aplicó, tal como se muestra en el Cuadro 4. La mayor diferencia en estos parámetros se observó en la luminosidad (L) sin que esto produjera un agrupamiento (Tukey=0.05) distinto.

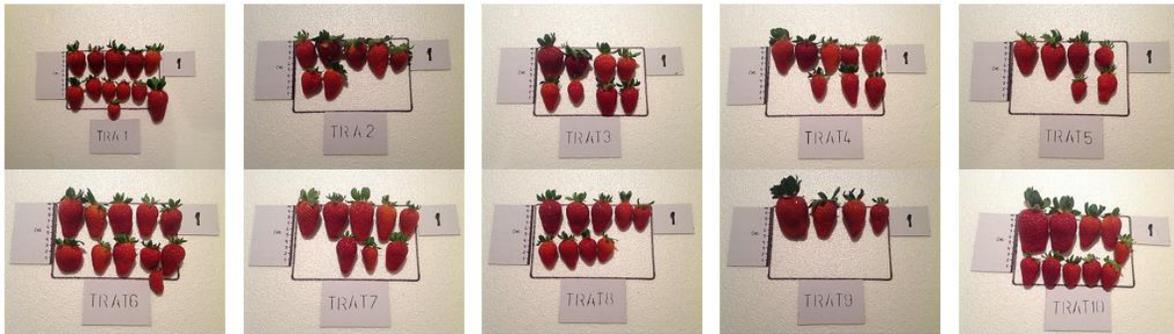


Figura 3 Aspecto de frutos de fresa como respuesta a la dosis y forma de aplicación de silicio

A pesar de que no hubo diferencias en el valor del parámetro A(hue) del color la tendencia es diferente en función de la forma de aplicación. Como se observa en el Cuadro 4, existe interacción entre la dosis y forma de aplicación (pr. $|t|=0.0378$) y el mismo Cuadro permite ver que el valor de A acrecienta a medida que se incrementa la concentración de silicio en la solución nutritiva mientras que el mismo componente disminuyó si la concentración del elemento aumenta en la aspersión foliar. Estos resultados, habían sido reportados por [Lieten y Horvath \(2002\)](#), que observaron un aumento en frutos albinos y disminución de antocianinas cuando se incrementa el silicio en solución. Mientras que [Figueiredo et al., \(2010\)](#) encontraron una relación inversa cuando se aporta el silicio en forma foliar. No obstante, esta no es una particularidad del cultivo, pues [Fatma y Mustafa \(2017\)](#) hallaron una relación inversa entre la coloración de frutos de naranja valencia y las dosis de silicato de potasio y magnesio cuando ambos compuestos eran asperjados en el follaje.

Cuadro 4/Variables relacionadas con la calidad del fruto de fresa como respuesta a la aplicación foliar y en solución de silicio

Aplicación	Dosis (mM Si)	Firmeza [†] (N)	Sólidos solubles totales(Brix)	Acidez titulable (% ácido cítrico)	Color		
					L	A	B
Solución	1.0	0.572a	6.281a	1.008ab	31.280a	23.4907a	17.075a
	1.5	0.580a	6.485a	0.936b	30.691a	24.3594a	15.564a
	2.0	0.651a	6.731a	0.916b	31.363a	24.2125a	15.153a
	2.5	0.637a	6.391a	0.987ab	31.919a	24.7320a	16.489a
	3.0	0.608a	6.891a	1.024ab	30.046a	24.9974a	15.445a
Foliar	0.0	0.710a	6.501a	1.107a	32.272a	25.8844a	16.735a
	1.0	0.683a	7.013a	1.013ab	30.391a	24.8604a	15.175a
	2.0	0.674a	6.561a	0.923b	31.147a	25.0063a	16.383a
	3.0	0.586a	6.427a	0.944b	29.421a	23.9500a	15.253a
	4.0	0.683a	6.443a	0.955b	32.213a	23.5203a	17.159a
	Pr>F	0.0657	0.6268	0.0041	0.5505	0.0840	0.3723
	DSH	0.1629	1.393	0.1374	5.0125	2.6479	3.8868
Pr > I t I	Interacción [‡]	0.1769ns♣	0.0792	0.2919ns	0.8998ns	0.0378	0.2950ns

* Valores con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05)

† Estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05) entre las formas de aplicación (Foliar vs Solución)

‡ Diferencia significativa honesta ♣ No significativa [‡] Interacción entre la forma y la dosis de aplicación

La acidez titulable del fruto no fue susceptible a la forma de aplicación, pero lo fue a la dosis. Los valores más altos de ácido cítrico se obtuvieron en el control cuando se realizaron aplicaciones foliares y con la dosis más alta cuando el silicio se añadió a la solución nutritiva. Aun con esa diferencia la tendencia en la concentración de ácido cítrico fue similar para ambas formas de aplicación, con valores mínimos en las dosis comprendidas entre 2.0 y 3.0 mM. Estos resultados se asemejan a los que obtuvieron [Silva y et al. \(2013\)](#) en un estudio referido anteriormente, en él, los autores muestran que la acidez titulable responde a la dosis, pero es independiente de la forma de aplicación. Una tendencia similar muestra los datos obtenidos por [Figueiredo et al., \(2010\)](#), en este estudio se observa una respuesta cuadrática en el contenido de ácido cítrico en función de la dosis de silicio. En un estudio más reciente realizado por [Hajiboland y colaboradores \(2018\)](#) notaron una disminución del ácido cítrico en los frutos cuando se incorporó silicato de sodio a la solución.

El contenido de sólidos solubles totales no difirió entre los tratamientos, pero la respuesta para ambas formas de aplicación fue muy similar. El Cuadro 4 muestra una mejor respuesta de los frutos a dosis bajas de silicio (entre 1.0 y 2.0 mM), independientemente de la forma en que se suministró el elemento. [Dehghanipoodeh et al. \(2016\)](#) tampoco encontraron diferencia en el contenido de sólidos solubles totales, incluso a dosis tan altas como 15 mM de K_2SiO_3 , pero si en otras variables relacionadas con la calidad de los frutos.

En contraste, [Stamatakis et al. \(2003\)](#) señalan que existe un incremento de sólidos solubles totales en frutos de jitomate cuando se incorpora silicio en la solución; no obstante, este efecto no puede asociarse únicamente a un incremento en la conductividad eléctrica. Existe poca información acerca de la forma en la que el silicio modifica algunas propiedades como el contenido de sólidos solubles totales de los frutos. Sin embargo, la respuesta de las especies a la fertilización silicatada puede ser distinta incluso entre variedades o bien ser dependiente de las condiciones de crecimiento ([Chelpiński y Ochmian, 2010](#); [Zhang et al., 2017](#))

En contraste, la firmeza de los frutos no fue diferente entre los tratamientos, pero resultó mayor para una de las dos formas de aplicación. La respuesta a las dosis de silicio no fue significativa, en coincidencia con los resultados que obtuvieron [Savvas et al. \(2009\)](#) en zucchini, sin diferencia externa o interna de los frutos. De forma interesante el valor más alto en los tratamientos correspondió al control de los tratamientos foliares, es decir el tratamiento en el cual no se proporcionó silicio. Aunque estos resultados parecen contradictorios debido al rol mecánico con el cual se asocia al silicio comúnmente; otros investigadores habían observado resultados similares, es decir, una baja respuesta a la dosis de silicio incluso en aplicaciones postcosecha ([Abd-Alkarim et al., 2017](#); [Tesfay et al., 2011](#)).

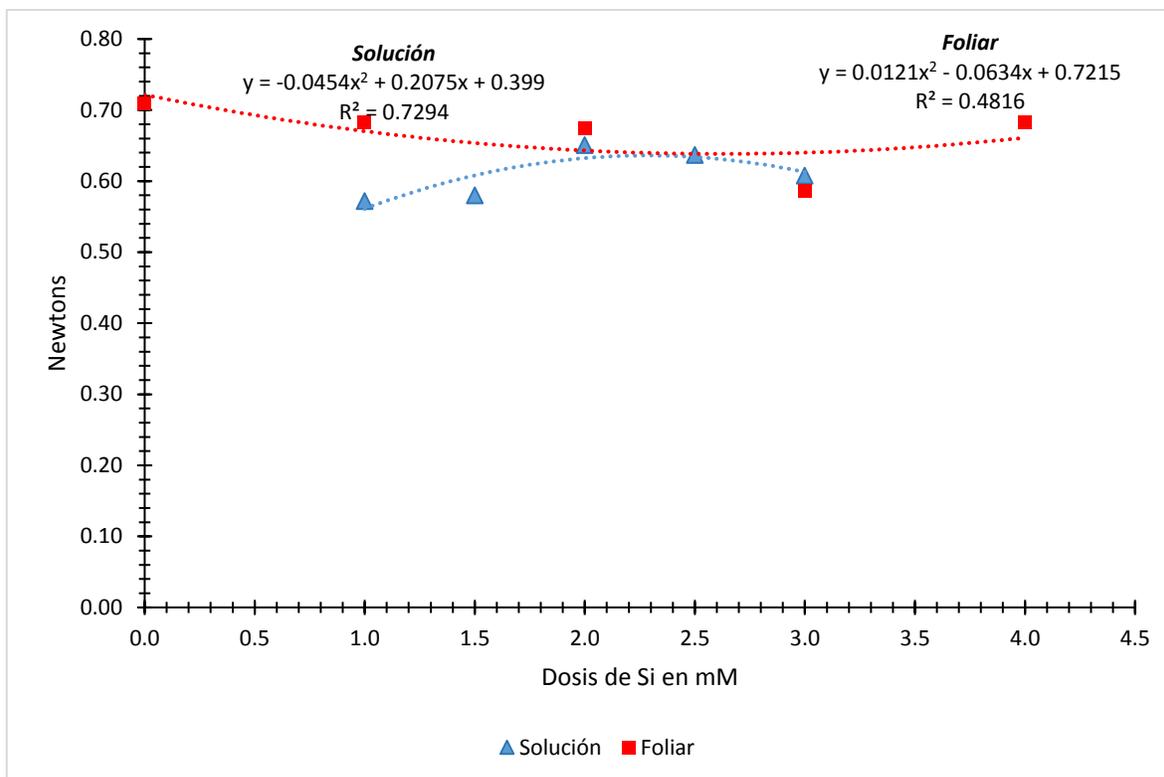


Figura 4 Firmeza de frutos de fresa como respuesta a la dosis y forma de aplicación de silicio

La Figura 4 muestra que, aunque el ajuste de los puntos a la línea de tendencia en ambos casos es bajo ($r^2 < 0.8$), la respuesta es cuadrática, pero con tendencia opuesta. A su vez, la firmeza de los frutos en los tratamientos foliares fue superior a aquellos en los que la aplicación fue a través de la solución exceptuando la concentración 3.0 mM. Los resultados en estudios previos son contradictorios, por ejemplo, [Abd-Alkarim et al. \(2017\)](#) encontraron diferencias en la firmeza de los frutos como respuesta a la forma de aplicación, pero únicamente en combinación con la época de crecimiento. En discrepancia [Jayawardana et al. \(2015\)](#) no halló diferencias en la firmeza de frutos de pimienta a pesar de ligeras diferencias en el grosor de la cutícula. Al analizar la forma de aplicación de silicato de potasio como fuente de variación, [Dehghanipoodeh et al. \(2016\)](#) no encontraron respuesta en la firmeza de los frutos, en cambio sí hubo respuesta en función de la dosis del elemento, aunque únicamente con respecto al control.

Sin embargo, los resultados presentados en la Figura 4 no pueden ser explicados únicamente a partir del contenido de silicio del fruto. Pues a diferencia de la firmeza,

el contenido de silicio en el fruto no difirió significativamente entre las formas de aplicación (51.26 mg Si kg⁻¹ y 50.46 mg Si kg⁻¹ para la aplicación en solución y foliar respectivamente). Al considerar que la firmeza en los frutos está relacionada con el silicio, y que se debe a los enlaces que este elemento forma con componentes de la pared celular como señalan [Guerrero *et al.* \(2016\)](#), y solo puede especularse que la función del silicio en las plantas también depende de la forma en que el elemento se asimila.

1.6 CONCLUSIONES

Los resultados muestran que, en general, la fresa respondió favorablemente al suministro de silicio. Su aplicación, modificó la producción de biomasa y la compartimentación de la misma. La producción de biomasa mejoró a dosis medias o bajas de silicio independientemente de la forma de aplicación. Por otro lado, el incremento en la dosis de silicio disminuyó la biomasa correspondiente a las raíces.

El silicio añadido a la solución nutritiva también incrementó el rendimiento de plantas de fresa sin que se modifique el tamaño promedio del fruto o la forma del mismo. No obstante, la calidad del fruto es poco susceptible al suministro de silicio, con cambios en la firmeza cuando el elemento se asperja y con ligeros incrementos en el contenido de ácido cítrico como respuesta a dosis bajas del elemento.

En conclusión, el silicio en el cultivo de fresa tiene una función bioestimulante complementaria a la fertilización, su uso para la producción de fresa es recomendable cuando se desea mejorar el rendimiento y parámetros relacionados con la calidad del fruto.

1.7 LITERATURA CITADA

- Abd-alkarim E., Y. Bayoumi, E. Metwally, y A.M. Rakh. 2017. Silicon supplements affect yield and fruit quality of cucumber (*Cucumis sativus L.*) grown in net houses. *African Journal of Agricultural Research*. 12(31): 2518-2523. [10.5897/AJAR2017.12484](https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12484)
- Agostinho, F. B., B.S. Tubana, M.S. Martins, y L.E. Datnoff. 2017. Effect of different silicon sources on yield and silicon uptake of rice grown under varying phosphorus rates. *Plants*. 6(3). [10.3390/plants6030035](https://doi.org/10.3390/plants6030035)
- Ahmad, A., M. Afzal, A.U.H. Ahmad, y M. Tahir. 2013. Effect of foliar application of silicon on yield and quality of rice (*Oryza Sativa L.*). *Cercetari Agronomice in Moldova*. 46(3). [10.2478/v10298-012-0089-3](https://doi.org/10.2478/v10298-012-0089-3)
- Alcántar, G. G., M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación Especial No. 10. SMCS. Chapingo, México. 150 p.
- Amin, M., R. Ahmad, A. Ali, I. Hussain, R. Mahmood, M. Aslam, y D.J. Lee. 2018. Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. *Silicon*. 10(2): 177-183. [10.1007/s12633-015-9372-x](https://doi.org/10.1007/s12633-015-9372-x)
- Chelpiński, P., y I. Ochmian. 2010. Effect of fertilization on yield and quality of cultivar kent strawberry fruit. *J. Elementol*. 15(2): 251–257.
- Costa S., B.N., G. de M. Dias G., I. de J. Costa S., F.A. Assis, F.A. da Silveira, M. Pasqual. 2016. Effects of silicon on the growth and genetic stability of passion fruit. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 38(4): 503-511. [10.4025/actasciagron.v38i4.30939](https://doi.org/10.4025/actasciagron.v38i4.30939)
- Costa S., I. de J., M. Pereira, G.P. Mizobutsi, V. Maia, J.F. Silva, J.A. Oliveira., M.B. Oliveira, V. N. Souza, R., S. Nietsche, E. F. Santos, y G. Korndorfer. 2015. Influence of silicon fertilization on «Palmer» mango tree cultivation. *Acta Horticulturae*. 1075: 229-234. [10.17660/ActaHortic.2015.1075.26](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1075.26)
- Crusciol C., C. A., A. L. Pulz, L. B. Lemos, R.P. Soratto, y G. P. Lima. 2009. Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. *Crop Science - CROP SCI*. 49. [10.2135/cropsci2008.04.0233](https://doi.org/10.2135/cropsci2008.04.0233)

- Dakora, F. D., y A. Nelwamondo. 2003. Silicon nutrition promotes root growth and tissue mechanical strength in symbiotic cowpea. *Functional Plant Biology*. 30(9): 947-953. [10.1071/fp02161](https://doi.org/10.1071/fp02161)
- Das, K. K. D., G.S.K. Swamy, S. Kumbar, P.M. Gangadharappa, y R.C. Jagadeesha. 2017. Effect of silica on physical and biochemical characters of guava. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 6(4): 1527-1532. [10.20546/ijcmas.2017.604.187](https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.187)
- Dehghanipoodeh, S., C. Ghobadi, B. Baninasab, M. Gheysari, y S.S. Bidabadi. 2016. Effects of potassium silicate and nanosilica on quantitative and qualitative characteristics of a commercial strawberry (*Fragaria x ananassa* cv. 'camarosa'). *Journal of Plant Nutrition*. 39(4): 502-507. [10.1080/01904167.2015.1086789](https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1086789)
- NMX-FF-062-SCFI-2002. Diario Oficial de la Federación. México D.F. 01- Agosto-2002.
- Epstein, E. 2009. Silicon: its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology*. 155(2): 155-160. [10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x)
- Fatma, K., y A.-A. Mustafa. 2017. Effect of silica compounds on vegetative growth, yield, fruit quality and nutritional status of olinda valencia orange. *Middle East Journal of Agriculture Research*. 06(01): 45-56
- Figueiredo, F. C., P.P. Botrel, C.P. Teixeira, L.L. Petrazzini, M. Locarno, y J. de G. Carvalho. 2010. Leaf spraying and fertirrigation with silicon on the physicochemical attributes of quality and coloration indices of strawberry. *Ciência e Agrotecnologia*. 34(5): 1306-1311. [10.1590/S1413-70542010000500032](https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000500032)
- Gao, X., C. Zou, L. Wang, y F. Zhang. 2005. Silicon improves water use efficiency in maize plants. *Journal of Plant Nutrition*. 27(8): 1457-1470. [10.1081/PLN-200025865](https://doi.org/10.1081/PLN-200025865)
- Guerriero, G., J.-F. Hausman, y S. Legay. 2016. Silicon and the plant extracellular matrix. *Frontiers in Plant Science*. 7. [10.3389/fpls.2016.00463](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00463)
- Hajiboland, R., N. Moradtalab, Z. Eshaghi, y J. Feizy. 2018. Effect of silicon supplementation on growth and metabolism of strawberry plants at three

- developmental stages. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. 46(2): 144-161. [10.1080/01140671.2017.1373680](https://doi.org/10.1080/01140671.2017.1373680)
- Hanafy A., A.H., E. M. Harb, M.A. Higazy, y S. H. Morgan. 2008. Effect of silicon and boron foliar applications on wheat plants grown under saline soil conditions. *International Journal of Agricultural Research*. 3: 1-26. [10.3923/ijar.2008.1.26](https://doi.org/10.3923/ijar.2008.1.26)
- Hattori, T., S. Inanaga, E. Tanimoto, A. Lux, M. Luxová, y Y. Sugimoto. 2003. Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. *Plant y Cell Physiology*. 44(7): 743-749.
- Jarosz, Z. 2012. The effect of silicon application and type of substrate on yield and chemical composition of leaves and fruit of cucumber. *Journal of Elementology*. (3/2013). [10.5601/jelem.2013.18.3.05](https://doi.org/10.5601/jelem.2013.18.3.05)
- Jarosz, Z. 2014. The effect of silicon application and type of medium on yielding and chemical composition of tomato. *Acta Sci Pol Hortorum Cultus*. 13: 171-83.
- Jayawardana, H. A. R. K., H.L.D. Weerahewa, y M.D.J.S. Saparamadu. 2015. Effect of root or foliar application of soluble silicon on plant growth, fruit quality and anthracnose development of capsicum. *Tropical Agricultural Research*. 26(1). [10.4038/tar.v26i1.8073](https://doi.org/10.4038/tar.v26i1.8073)
- Khosroford, Z. S., S. Eshghi, S. Rastgoo, y M. Hedayat. 2017. Effect of root and foliar applications of silicon on growth of strawberry and mineral nutrient uptake under salinity stress in soilless culture. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*. 18(2): 195-208.
- Lalithya, K. A., H.P. Bhagya, A. Taj, K. Bharati, y K. Hipparagi. 2014. Response of soil and foliar application of silicon and micro nutrients on soil nutrient availability of sapota. *The Bio Scan*. 9(1): 171-74.
- Liang, Y., M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong, y A. Song. 2015. Effect of silicon on crop growth, yield and quality. In *Silicon in Agriculture* (pp. 209-223). Springer, Dordrecht. [10.1007/978-94-017-9978-2_11](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2_11)

- Liang, Y., J.W.C. Wong, y L. Wei. 2005. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. *Chemosphere*. 58(4): 475-483. [10.1016/j.chemosphere.2004.09.034](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.034)
- Lieten, P., J. Horvath, y H. Asard. 2002. Effect of silicon on albinism of strawberry. *Acta Horticulturae*. 567: 361-364. [10.17660/ActaHortic.2002.567.78](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.78)
- Lu De., M. M., M. R. De Silva, E. K. Peralta, A. N. Fajardo, M.M. Peralta. 2016. Growth and Yield of Tomato Applied with Silicon Supplements with Varying Material Structures. *Philippine e-Journal for Applied Research and Development*. 6:10-18
- Luyckx, M., J. –F. Hausman, S. Lutts, y G. Guerriero. 2017. Impact of silicon in plant biomass production: focus on bast fibres, hypotheses, and perspectives. *Plants (Basel, Switzerland)*. 6(3). [10.3390/plants6030037](https://doi.org/10.3390/plants6030037)
- Ma, J. F., y N. Yamaji. 2008. Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and molecular life sciences*. 65(19): 3049-3057. [10.1007/s00018-008-7580-x](https://doi.org/10.1007/s00018-008-7580-x)
- Marodin, J. C., J.T. Resende, R.G. Morales, M.L. Silva, A.G. Galvão, D.S. Zanin. 2014. Yield of tomato fruits in relation to silicon sources and rates. *Horticultura Brasileira*. 32(2): 220-224. [10.1590/S0102-05362014000200018](https://doi.org/10.1590/S0102-05362014000200018)
- Miyake, Y., y E. Takahashi. 1978. Silicon deficiency of tomato plant. *Soil Science and Plant Nutrition*. 24(2):175-189. [10.1080/00380768.1978.10433094](https://doi.org/10.1080/00380768.1978.10433094)
- Miyake, Y., y E. Takahashi. 1986. Effect of silicon on the growth and fruit production of strawberry plants in a solution culture. *Soil science and plant nutrition*. 32(2): 321-326. [10.1080/00380768.1986.10557510](https://doi.org/10.1080/00380768.1986.10557510)
- Neu, S., J. Schaller, y E.G. Dudel. 2017. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C: N: P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*. 7. doi.org/10.1038/srep40829
- Ouellette, S., M. H. Goyette, C. Labbé, J. Laur, L. Gaudreau, A. Gosselin, R. R. Bélanger. 2017. Silicon transporters and effects of silicon amendments in strawberry under high tunnel and field conditions. *Frontiers in Plant Science*. 8. [10.3389/fpls.2017.00949](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00949)

- Pilon, C., R.P. Soratto, y L.A. Moreno. 2013. Effects of soil and foliar application of soluble silicon on mineral nutrition, gas exchange, and growth of potato plants. *Crop Science*. 53(4): 1605-1614. [10.2135/cropsci2012.10.0580](https://doi.org/10.2135/cropsci2012.10.0580)
- Pozo, J., M. Urrestarazu, I. Morales, J. Sánchez, M. Santos, F. Dianez, y J.E. Álvaro. 2015. Effects of silicon in the nutrient solution for three horticultural plant families on the vegetative growth, cuticle, and protection against botrytis cinerea. *HortScience*. 50(10):1447-1452.
- Rios, J. J., M.C. Martínez-Ballesta, J.M. Ruiz, B. Blasco, y M. Carvajal. 2017. Silicon-mediated improvement in plant salinity tolerance: the role of aquaporins. *Frontiers in Plant Science*. 8. [10.3389/fpls.2017.00948](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00948)
- Sávio, F. L., G.C. da Silva, I.R. Teixeira, y A. Borém. 2011. Biomass production and silicon content in forages under different sources of silicate. *Semina: Ciências Agrárias*. 32(1):103-110. [10.5433/1679-0359.2011v32n1p103](https://doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32n1p103)
- Savvas, D., y G. Ntatsi. 2015. Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae*. 196: 66-81. [10.1016/j.scienta.2015.09.010](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.010)
- Savvas, D., I. Karapanos, A. Tagaris, y H.-C. Passam. 2009. Effects of NaCl and silicon on the quality and storage ability of zucchini squash fruit. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 84(4): 381-386. [10.1080/14620316.2009.11512536](https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512536)
- Silva, M., J. Resende, A. Trevizam, A. Figueiredo, y K. Schwarz. 2013. Influência do silício na produção e na qualidade de frutos do morangueiro Influence of silicon on production and fruit quality of strawberry. *Semina: Ciências Agrárias*. 34: 3411-3424. [10.5433/1679-0359.2013v34n6Supl1p3411](https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n6Supl1p3411)
- Stamatakis, A., N. Papadantonakis, D. Savvas, N. Lydakis-Simantiris, y P. Kefalas. 2003. Effects of silicon and salinity on fruit yield and quality of tomato grown hydroponically. *Acta Horticulturae*. (609): 141-147. [10.17660/ActaHortic.2003.609.18](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.609.18)
- Steiner, A.A. 1984. The universal nutrient solution. In *Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture*. Wageningen the Netherlands. ISOSC. 633-650.

- Tesfay, S. Z., I. Bertling, y J.P. Bower. 2011. Effects of postharvest potassium silicate application on phenolics and other anti-oxidant systems aligned to avocado fruit quality. *Postharvest Biology and Technology*. 60(2): 92-99. [10.1016/j.postharvbio.2010.12.011](https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.12.011)
- Toresano-Sánchez, F., A. Valverde-García, y F. Camacho-Ferre. 2012. Effect of the Application of Silicon Hydroxide on Yield and Quality of Cherry Tomato. *Journal of Plant Nutrition*. 35(4): 567-590. [10.1080/01904167.2012.644375](https://doi.org/10.1080/01904167.2012.644375)
- Van Winkel, A., J. Hofland-Zijlstra, C. Blok, A. Erstad-van der Vlugt, K. Erstad, y C. Van der Burg. 2014. The effect of different silicon fertilizers on the greenhouse cucumber production. *Acta Horticulturae*. (1034): 575-582. [10.17660/ActaHortic.2014.1034.73](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1034.73)
- Wang, S. Y., y G.J. Galletta. 1998. Foliar application of potassium silicate induces metabolic changes in strawberry plants. *Journal of Plant Nutrition*. 21(1): 157-167. [10.1080/01904169809365390](https://doi.org/10.1080/01904169809365390)
- Zhang, M., Y. Liang, y G. Chu. 2017. applying silicate fertilizer increases both yield and quality of table grape (*Vitis vinifera L.*) grown on calcareous grey desert soil. *Scientia Horticulturae*. 225: 757-763. [10.1016/j.scienta.2017.08.019](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.019)

CAPÍTULO II RESPUESTA FISIOLÓGICA DE LA FRESA A LA APLICACIÓN DE SILICIO

2.1 RESUMEN

El papel del silicio en la fisiología de las plantas está relacionado en mayor medida con la mitigación de estrés provocados por agentes bióticos o abióticos. Su rol como regulador de funciones fisiológicas en las que se incluyen la fotosíntesis y la absorción de elementos esenciales es un tema sin explorar, en especial en condiciones óptimas de crecimiento y en especies no acumuladoras. El presente estudio tuvo por objetivo analizar los cambios producidos por la aplicación de silicio, en variables asociadas con la absorción y acumulación de elementos esenciales y con el intercambio gaseoso. Se utilizaron plantas de fresa 'Festival' como material vegetal. Los tratamientos consistieron en la aplicación foliar (0.0, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 mM de Si) o en solución (1.0, 1.5, 2.5, 3.0, 4.0 de Si) de silicio con metasilicato de sodio como fuente. Los resultados muestran una baja concentración de silicio (<1% en materia seca) y mayor acumulación en las hojas que en los demás órganos. La aplicación de silicio también mejoró la absorción de elementos como el N, Ca, Cu, Fe y Mn mientras que disminuyó la absorción de K, B y Zn. La fotosíntesis neta y la transpiración fueron modificados con la aplicación foliar de silicio con mejores resultados en dosis entre 2.0 y 3.0, ya que con estas dosis disminuye la transpiración y se maximiza la fotosíntesis.

Palabras clave: *Silicio, fisiología, estrés, fresa, absorción, elementos esenciales, fotosíntesis.*

2.2 ABSTRACT

The role of silicon in the physiology of plants is related with the mitigation of stress caused by biotic or abiotic agents. Its role as a regulator of physiological functions in which photosynthesis and the absorption of essential elements are included is an unexplored subject, especially under optimum conditions of growth and non-accumulators species. The objective of this study was to analyze the changes produced by the application of silicon, in variables associated with the absorption and accumulation of essential elements and with gaseous exchange. Strawberry plants 'Festival' were used as plant material. The treatments consisted of foliar application (0.0, 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0 mM of Si) or in solution (1.0, 1.5, 2.5, 3.0, 4.0 of Si) of silicon with sodium metasilicate as source. The results show a low concentration of silicon (<1% in dry matter) and greater accumulation in the leaves than in the other organs. The application of silicon also improved the absorption of elements such as N, Ca, Cu, Fe and Mn while the absorption of K, B and Zn decreased. Net photosynthesis and transpiration were modified with the foliar application of silicon with better results in doses between 2.0 and 3.0, since with these doses transpiration decreases and photosynthesis is maximized.

Key words: *Silicon, physiology, stress, strawberry, absorption, essential elements, photosynthesis.*

2.3 INTRODUCCIÓN

La acumulación de silicio entre especies varía considerablemente debido a diferencias en la capacidad de absorción del elemento (Ma y Yamaji, 2006). Sin embargo, en la mayoría se encuentra en cantidades similares a otros macronutrientes como el calcio, el magnesio y el fósforo y en ocasiones en niveles superiores a otros constituyentes inorgánicos (Epstein, 1999).

La aplicación y acumulación de este elemento en algunos casos trae consigo cambios morfológicos y anatómicos en las plantas (Costa *et al.*, 2018; Meena *et al.*, 2014). Estos cambios, producen a su vez una respuesta en algunos parámetros fisiológicos, los cuales han sido estudiados y reportados en numerosos estudios (Ma y Takahashi, 2002).

Como respuesta a la aplicación de silicio, las investigaciones acerca de este tema muestran que los cultivos responden con cambios en la absorción y acumulación de macro y micronutrientes (Wiese *et al.*, 2007; Mehrabanjoubani *et al.*, 2015; Neu *et al.*, 2017; Cuong *et al.*, 2017) disminución en la tasa transpiratoria (Gao *et al.*, 2006), incremento en la fotosíntesis y en la concentración interna de carbono (Xie *et al.*, 2014) y disminución en la conductancia estomática (Agarie *et al.*, 1998). Esta respuesta se traduce en rendimientos más altos, una mayor producción de biomasa y mejor crecimiento en general.

Si bien, el silicio no es considerado un elemento esencial para la mayoría de las plantas, sus efectos en el crecimiento y desarrollo le otorgan un uso potencial en la agricultura. El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la influencia de la aplicación de silicio en la absorción de elementos esenciales en plantas de fresa. También se describe la acumulación y distribución *in planta* del silicio como respuesta a distintas dosis y formas de aplicación y se reportan los cambios producidos en variables relacionadas con la fotosíntesis y el intercambio de gases.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1 *Sitio experimental y material vegetal*

El experimento se realizó en un invernadero del Colegio de Postgraduados localizado a 19° 27' 28.4" N y 98° 54' 11.72" O, entre los meses de septiembre 2016 y mayo 2017. Durante el experimento la temperatura máxima, mínima y promedio fue de 41.2, 2.6 y 22.2 °C respectivamente. Se utilizaron plantas de fresa a raíz desnuda de la variedad Festival.

2.2.2 *Sustrato*

Para el establecimiento de las plantas se utilizaron contenedores tipo "slab" rellenos con 60 litros de una mezcla 2:1 de tezontle y fibra de coco. Previo a la realización de la mezcla se hicieron lavados a la fibra de coco con la finalidad de evitar la acumulación de sales. Estos lavados se suspendieron cuando el agua retenida por la fibra alcanzó una conductividad eléctrica similar al agua de riego.

2.2.3 *Tratamientos y diseño experimental*

Los tratamientos consistieron en distintas dosis de silicio aplicados en la solución nutritiva o al follaje. Se utilizaron cinco concentraciones de silicio vía foliar (0, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 mM de Si) y cinco concentraciones vía solución nutritiva (1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 mM). Se utilizó como fuente metasilicato de sodio (Na_2SiO_3) sigma Aldrich® grado reactivo. Para los tratamientos foliares se utilizó agua desionizada incluso para el control, para los tratamientos en solución se adicionó el silicato de sodio a la solución nutritiva descrita en el siguiente apartado.

Como diseño experimental, se utilizó parcelas divididas con la forma de aplicación como parcela grande y la dosis como parcela chica. Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones las cuales se aleatorizaron para su arreglo espacial. La unidad experimental consistió en un slab con seis plantas.

2.2.4 *Aplicación de los tratamientos y riego*

El riego se realizó diariamente de forma manual. Durante los primeros tres meses se regó cada planta con 500 mL de la solución nutritiva correspondiente. Los meses restantes el volumen incrementó a 700 mL. Los tratamientos en solución se aplicaron diariamente mediante el riego, mientras que los tratamientos foliares fueron aplicados únicamente una vez por semana.

Las soluciones nutritivas se formularon con base en el equilibrio iónico propuesto por [Steiner \(1984\)](#) al 60% a partir de reactivos grado técnico. La concentración de micronutrientes para todas las soluciones fue de: 5 mg L⁻¹ de Fe, 0.503 mg L⁻¹ de B, 0.19 mg L⁻¹ de Cu, 2.25 mg L⁻¹ de Mn, 0.16 mg L⁻¹ de Mo y 0.44 mg L⁻¹ de Zn. Para ello se consideró la concentración de nutrientes presentes en el agua y se complementó con distintas fuentes.

El pH de las distintas soluciones se ajustó a 6.2-6.4, con ácido sulfúrico grado reactivo.

2.2.5 Intercambio gaseoso

Se seleccionaron tres plantas homogéneas por repetición a las cuales se les hicieron mediciones de algunas variables relacionadas con el intercambio de gases

La medición fue única al final del ciclo de cultivo (en etapa productiva plena). Para ello se utilizó un dispositivo con sistema abierto de medidor de fotosíntesis (LICOR LI-6400 XT System). Las variables medidas con el aparato fueron la tasa de asimilación neta, referida en este documento como fotosíntesis, la conductancia estomática, la concentración intercelular de CO₂, y la transpiración.

Utilizando el mismo criterio para todos los tratamientos y cada una de sus repeticiones se seleccionó la hoja madura más reciente de dos plantas por repetición. A cada hoja se le realizaron tres mediciones, por lo que el análisis de datos es el promedio de seis datos por repetición. Estas mediciones se llevaron a cabo entre las 9:00 A.M. y las 12:00 P.M. en bloques a fin de disminuir la influencia de la luz o la temperatura sobre estas mediciones.

2.2.6 Concentración nutrimental

Se determinó la concentración nutrimental en tejido para todos los órganos (raíz, corona, hojas y frutos). Para realizar el análisis de N total se utilizó el método Kjeldahl descrito por [Alcántar y Sandoval \(1999\)](#), utilizando para la digestión una mezcla de ácido sulfúrico-salicílico. Para los elementos restantes se empleó una digestión húmeda a partir de ácido perclórico y nítrico, siguiendo la metodología propuesta por los mismos autores. La lectura de la concentración nutrimental en los extractos se realizó en un equipo de espectroscopia de emisión atómica de inducción por plasma (ICP-VARIAN 725-ES).

Para el silicio en particular se reporta la concentración de este elemento en cada órgano con el fin de especificar su acumulación y compartimentalización. En el caso de los elementos restantes se reporta su concentración en las hojas únicamente, debido a que este órgano es el más utilizado como estándar en el análisis nutrimental de tejidos ([Wolf, 1982](#)) y su composición mineral representa de manera efectiva la actividad biológica de los nutrimentos en la planta entera ([Lucena, 1997](#)).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1 Acumulación y compartimentalización de silicio

La Figura 5 ilustra la concentración de silicio en los distintos órganos de la planta, una vez que el elemento ha sido absorbido. En esta figura se muestra la distribución del elemento como promedio de todos los tratamientos incluido el tratamiento control, es decir la concentración del silicio en el órgano cuando este se suministra en solución o follaje en concentraciones que van de 0 a 4.0 mM.

Con base en la concentración máxima del elemento en la hoja, puede considerarse a la variedad Festival como una variedad no acumuladora de silicio de acuerdo a los criterios descritos por [Ma et al. \(2001\)](#), siendo más específicos puede incluirse en aquellas especies o variedades que limitan la absorción del elemento. Las concentraciones para todos los órganos están por debajo de las dicotiledóneas reportadas por [Takahashi y Miyake \(1976\)](#) con absorción restrictiva, y es doce veces menor al límite inferior señalado por [Epstein \(1999\)](#), aunque el mismo autor señala que no es extraño encontrar concentraciones inferiores a 0.1% ([Epstein, 1994](#)).

A pesar de esto, no puede clasificarse a la especie en general como una especie con baja acumulación puesto que otros investigadores han hallado concentraciones del elemento en tejidos comparables con elementos como el fósforo o el calcio. En este sentido, [Ouellette et al. \(2017\)](#) reportan valores cercanos al 3%, con una alta variabilidad asociada al cultivar y con una mayor acumulación del elemento en función de la edad de la planta. En cambio, [Miyake y Takahashi \(1986\)](#) encontraron valores entre 0.02 y 0.56% en la variedad Hokowase, como respuesta a la duración y suministro de silicio. Mientras que [Silva et al. \(2013\)](#) reportan valores comprendidos entre 0.004 y 0.0702 % en la variedad Milsei Tudla. Esta variabilidad en los rangos del elemento en el tejido vegetal se atribuye principalmente a una capacidad específica por parte de las raíces para absorber el elemento ([Liang et al., 2015](#)) y es cambiante incluso en especies acumuladoras ([Wu et al., 2006](#)), esto explicaría la diferencia en la capacidad de absorción de silicio entre especies, pero es claro que esa variabilidad tampoco es menor entre variedades.

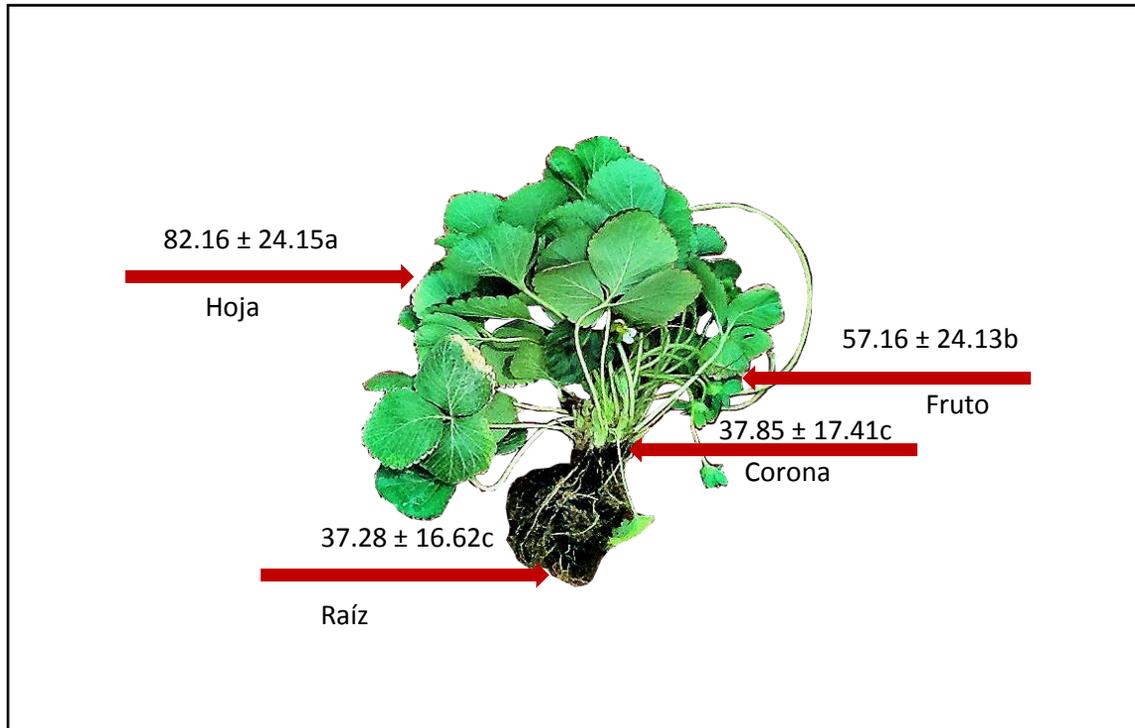


Figura 5 Concentración y distribución de silicio por órgano en planta de fresa. (El número para cada órgano representa la media con la correspondiente desviación estándar expresada en mg por kg de materia seca. Los órganos cuya concentración precede a letras iguales no difieren en su concentración de silicio.)

Como se observa en la Figura 5, la concentración en hojas es superior a la de los demás órganos, incluso duplica en concentración a la raíz y corona, los órganos con menos acumulación del elemento. La producción de biomasa correspondiente a hojas también es mayor al de los demás órganos (véase capítulo anterior) por lo que su contenido en esta parte de la planta también es mayor. Estos resultados concuerdan con los observados por otros investigadores dentro de la misma especie (Miyake y Takahashi, 1986), pero no es exclusiva, pues también se ha observado en otras especies como *Zinnia elegans* (Kamenidou, et al., 2009).

Aunque existen pruebas de la presencia de transportadores de silicio en las raíces de la fresa (Ouellette et al., 2017) es evidente que también se produce movimiento a través de la planta para que el elemento pueda acumularse en las hojas. El mecanismo más aceptado hasta ahora es el movimiento pasivo a través del xilema

con la consecuente acumulación en el tallo y las hojas (Guntzer *et al.*, 2012; Raven, 2003). No obstante, al comparar la concentración de silicio en el follaje con la tasa de transpiración (datos presentados más adelante) no existe una relación lineal entre ambas variables ($r=0.1752$), por lo que es posible que existe más de una vía en la cual el elemento es transportado dentro de la planta o bien la baja correlación puede atribuirse a la limitada concentración del elemento en las hojas.

2.3.2 Influencia del silicio sobre la acumulación de elementos en hojas

El análisis de tejido foliar tuvo una relación distinta para cada elemento con respecto al silicio como se muestra en el Cuadro 5. La correlación más baja lo muestra con los micronutrientes como el hierro, zinc y cobre. Mientras que los valores más altos del coeficiente de correlación son para el boro, fósforo y magnesio.

Con frecuencia la principal relación entre el silicio y algunos elementos esenciales especialmente aquellos considerados como metales pesados es la de regular su absorción y translocación dentro de la planta limitando así su toxicidad o aminorando los efectos de su deficiencia (Liang *et al.*, 2007). En el estudio que nos ocupa, las plantas no fueron sometidas a estrés, lo cual reduce la posibilidad de que la concentración de los elementos en el tejido se deba a relaciones distintas al antagonismo o sinergismo entre elementos provocado por estas causas.

Cuadro 5/Correlación entre la concentración de silicio y concentración de elementos esenciales en hojas de fresa

Elemento	Si	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	B	Cu	Zn
Si	1.0	0.349	0.669	0.532	0.500	0.500	0.473	-0.266	0.679	-0.215	0.089
Pr > r		0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0013	0.0001	0.0098	0.2857

Los Cuadros 6 y 7 muestran la forma en que influye la dosis de silicio y la vía en la cual se suministra en la absorción y acumulación del mismo elemento y de los elementos esenciales.

La concentración de silicio en las hojas, a pesar de ser el órgano de mayor acumulación es relativamente baja. Como puede observarse, existe respuesta a la dosis, pero no a la forma de aplicación (Figura 5). La mayor concentración del

elemento se produjo con la aplicación 1.0 mM de silicio vía foliar, sin embargo, los tratamientos para esta forma de suministro también presentaron mayor variabilidad. Contrario a lo que se espera, la acumulación no tuvo una respuesta lineal a la dosis de silicio. Estos resultados contradicen a los obtenidos por [Silva et al. \(2013\)](#), en cuyos datos puede observarse cierta tendencia cuadrática en la acumulación de silicio además de una mayor acumulación en los tratamientos en los cuales el silicio se aplicó al suelo. Estas discrepancias pueden ser atribuidas a diferencias entre las variedades en la capacidad de absorción de las raíces, puesto que los transportadores de silicio descritos hasta hoy se encuentran en este órgano ([Ouellette et al., 2017](#); [Mitani et al., 2009](#)). Aunque la baja tasa de absorción también puede estar relacionada con bajas temperaturas o inhibidores metabólicos como en la investigación realizada por [Liang et al. \(2006\)](#), pese a que las especies sean o no acumuladoras.

Es importante señalar que a pesar de que aún no se probado la existencia de transportadores de silicio en hojas, el suministro a través de aspersiones foliares permite acumular el elemento en dichos órganos. Así lo muestran los resultados obtenidos y estudios previos como el realizado por [Pilon, et al. \(2013\)](#) en papa, en dicho estudio las aplicaciones foliares fueron más eficientes en la concentración de silicio en las hojas comparadas con la aplicación al suelo, aunque, la acumulación fue similar para ambas formas. Esto prueba que los mecanismos de difusión pasiva son necesarios para la absorción y distribución del silicio al menos en las especies descritas.

La concentración de nitrógeno en las hojas por su parte también fue modificada en función de la dosis y la forma de aplicación del silicato. Resulta interesante que los valores más altos se situaran en las dosis extremas, y que tuvieran la misma tendencia aun cuando difieren en la forma de aplicación. A pesar de esto, no es posible considerar esta tendencia como una relación sinérgica entre ambos elementos en contraste con la investigación de [Lieten et al. \(2002\)](#) que hallaron una relación positiva entre la aplicación de silicio y la concentración de nitrógeno en las hojas de la variedad Elsanta. Mientras que investigaciones realizadas en otras

especies como *Zinnia elegans* (Kamenidou *et al.*, 2009) muestran respuesta a las dosis de silicio, pero con mayor dependencia a las fuentes. En una especie arbórea Ahmed *et al.* (2013) también reportan una mayor concentración de nitrógeno en las hojas cuando se suministra silicato de potasio en combinación con ácido salicílico, aunque como muestran sus resultados, al evaluar por separado la respuesta es notorio que está más relacionada al primer compuesto.

Los mecanismos en los que interviene el silicio para hacer más eficiente la absorción de otros elementos pueden ser condicionados por respuestas directas o depender de relaciones antagónicas o sinérgicas. No obstante, cuando la implicación del elemento es directa puede relacionarse con un uso más efectivo de los sistemas antioxidantes y una regulación más efectiva de la división celular (Ahmed *et al.*, 2013).

La vía foliar fue más efectiva en la acumulación de nitrógeno como se muestra en la Figura 5. A diferencia de lo que reportan autores como Pilon *et al.* (2013), en cuyo estudio la concentración entre los tratamientos foliares y en solución no produjeron concentraciones de nitrógeno diferentes incluso con respecto a control.

Cuadro 6/Concentración de silicio y macronutrientos en hojas de fresa y su relación con la dosis y la forma de aplicación de silicio

Aplicación	Dosis (mM Si)	N† (% ms ^λ)	mg kg ⁻¹ (MS)					
			Si	P	K	Ca	Mg†	S
Solución	1.0	2.193ab*	77.25b	6938.3ab	11919a	17407a	8336.5a	2921.9a
	1.5	1.995b	85.25ab	5930.2b	10767a	15619a	7901.5a	2738.8a
	2.0	1.942b	82.28ab	6739.9ab	12853a	15625a	8722a	3445.8a
	2.5	2.0125b	65.17b	6107.3ab	12740a	16684a	7986.6a	2905.2a
	3.0	2.123ab	80.56ab	6993.7ab	12161a	19107a	9112.6a	3408.4a
Foliar	0.0	2.170ab	74.32b	7038.2ab	11987a	15620a	7299.2a	3246.8a
	1.0	2.053ab	124.43a	9189.3a	13931a	16789a	7423.6a	2961.3a
	2.0	2.030b	79.40b	6406.3ab	14115a	19495a	8328.2a	3288.3a
	3.0	2.053ab	75.57b	7718.1ab	11504a	18083a	7152.7a	2873.3a
	4.0	2.345a	81.37ab	6334.1ab	12155a	17312a	6536.7a	2821.7a
Pr>F	0.0054	0.0166	0.0748	0.3623	0.2221	0.1935	0.3798	
DSH [†]	0.3030	44.963	3248.1	4338.2	5821.1	3133.8	1237.0	
Pr > I t l	Interacción [‡]	0.1556	0.8910	0.3572	0.2427	0.5455	0.412	0.0593

* Valores con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05)

† Estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05) entre las formas de aplicación (Foliar vs Solución)

‡ Diferencia significativa honesta [‡] Interacción entre la forma y la dosis de aplicación ^λ materia seca

La concentración de fósforo también fue influenciada por la dosis de silicio. Mas no existe una tendencia clara que relacione la dosis de silicio que se proporcionó con el contenido de fósforo porque los valores oscilan con las dosis, a pesar de que existe una correlación moderada ($r=0.669$) en el contenido de los dos elementos como se mostró en el Cuadro 5. Los valores más alto y más bajo de fósforo se observaron para 1.0 mM en aplicación foliar y 1.5 mM en aplicación en solución. Estos resultados, muestran similitud con los obtenidos por [Lieten et al. \(2002\)](#) en fresa, estos investigadores observaron pequeños cambios en la concentración de fósforo como respuesta a la dosis de silicio, pero sin que hubiera diferencia significativa en los contenidos. En un estudio previo [Ma y Takahashi, \(1990\)](#) tampoco observaron diferencias en la absorción de fósforo cuando se incorpora el silicio a la solución a una concentración 1.66 mM. En contraste a estos resultados [Neu et al., \(2017\)](#) observaron que a medida que se incrementaba el suministro de silicio aumentaba el contenido de fósforo en todos los órganos, pero principalmente

en las hojas exceptuando la hoja bandera. Es posible como mencionan [Sahebi et al. \(2015\)](#) y [Broadley et al. \(2012\)](#) que este efecto sea una consecuencia indirecta de la disminución en la disponibilidad de elementos (producida por el silicio) que limitan la accesibilidad interna del fósforo. En cuanto a la forma de aplicación, el contenido de fósforo fue mayor cuando el silicio se suministró a las hojas, pero sin que hubiera diferencias significativas entre las dos formas de aplicación como muestra la Figura 5.

Otros elementos como el potasio, el calcio y el azufre no difirieron entre dosis o formas de aplicación como se muestra en el Cuadro 6. Estudios previos muestran diferente respuesta de estos elementos. En zucchini y zinnia, [Tesfagiorgis y Laing \(2013\)](#) hallaron una respuesta positiva en el contenido de potasio y negativa en el caso del calcio, aunque en ambas especies el coeficiente de determinación fue bajo ($r^2=0.075-0.840$). En pepino de forma similar, [Callis et al. \(2017\)](#) observaron una disminución de la concentración de calcio y un ligero aumento en la concentración de potasio. A su vez el suministro de silicato de potasio produjo niveles más bajos de lignina y celulosa, los autores lo atribuyen a las condiciones de crecimiento, aunque junto con el calcio podría deberse a cierta sustitución del silicio en funciones estructurales. En el mismo cultivo, [Jarosz \(2012\)](#) descubrió una correlación antagónica entre la concentración de silicio en las hojas y la concentración de potasio y calcio, pues de forma independiente al sustrato utilizado, el incremento hasta 750 mg de Si por litro disminuyó la concentración en este órgano de ambos elementos. Estos resultados se asemejan a los reportados por [Abd-Alkarim et al. \(2017\)](#), en la disminución de la concentración de potasio cuando se aporta silicio como fertilizante. De forma similar a los datos presentados en la Figura 5, la aplicación foliar parece tener una menor incidencia en la concentración de estos macronutrientes en las hojas.

Con respecto a los resultados es posible que la menor concentración de estos elementos en los tejidos esté asociada a reacciones de fijación por compuestos

silicatados en la zona radical y dentro de las mismas estructuras vegetales como concluyen [Ma y Takahashi \(2002\)](#) y [Stamatakis et al., \(2003\)](#).

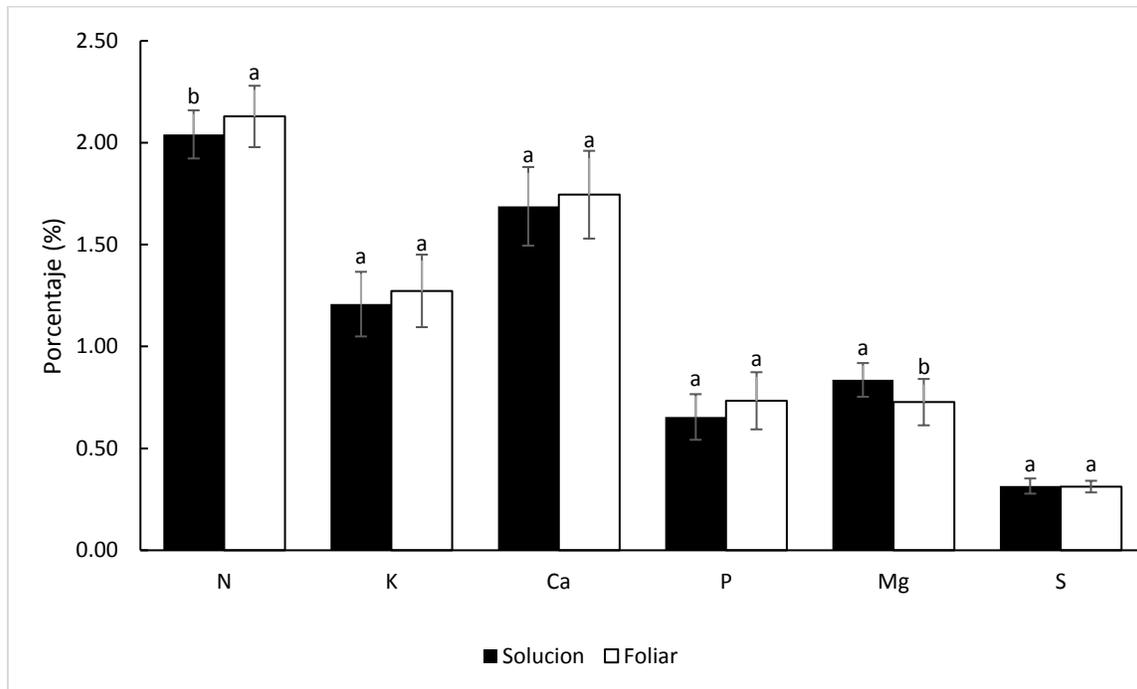


Figura 6 Concentración de macronutrientes en hojas de fresa como respuesta a la forma de aplicación de silicio. (Las barras representan la media para todos los tratamientos correspondientes a cada forma de aplicación. Letras diferentes muestran diferencias significativas (Tukey=0.05) en la concentración del elemento en las hojas. Las barras de error señalan la desviación estándar.)

A diferencia de los otros elementos descritos anteriormente, el magnesio fue el único que no respondió a la dosis de silicio, pero si a la forma de aplicación. Como se observa en la Figura 6. En *Helianthus annuus* [Kamenidou et al. \(2008\)](#) encontraron que la aplicación de silicato de potasio en solución disminuía la concentración de magnesio en las hojas a medida que se incrementaba la dosis del compuesto. Mientras que, aplicados al follaje en naranja, no producía efectos en la concentración del elemento a menos que la fuente utilizada sea silicato de magnesio ([Fatma y Mustafa, 2017](#)). La relación entre los dos elementos parece estar más influenciada por la especie vegetal o la forma química en la cual se suministra el silicio ([Lu et al., 2016](#)). Sin embargo, en aquellas plantas que muestran una relación

favorable entre ambos elementos es posible que el cambio en la concentración de magnesio en las hojas cuando se suministra silicio se deba a un incremento en la síntesis de clorofilas como muestran los resultados obtenidos por [Gerami et al., \(2012\)](#) o bien esté relacionado con mejoras en la arquitectura de la planta que facilitan la intercepción de luz e impiden el sombreado ([Marafon y Endres, 2013](#)).

Cuadro 7/Concentración de micronutrientos en hojas de fresa y su relación con la dosis y la forma de aplicación de silicio

Aplicación	Dosis (mM Si)	mg kg ⁻¹ (MS)				
		B	Cu	Fe	Mn	Zn†
Solución	1.0	140.34a*	4.19ab	247.56abcd	129.17a	10.76a
	1.5	120.06a	4.08ab	241.72bcd	102.52a	11.14a
	2.0	116.37a	4.16ab	218.59cd	115.97a	12.63a
	2.5	146.05a	4.27ab	333.86abcd	130.72a	11.69a
	3.0	144.38a	4.71ab	460.76a	145.89a	9.55a
Foliar	0.0	139.06a	4.73ab	217.46cd	114.49a	15.56a
	1.0	143.90a	5.99a	388.96abc	120.61a	17.44a
	2.0	138.79a	2.21b	318.37abcd	124.69a	13.87a
	3.0	128.18a	3.00ab	159.44d	106.34a	18.11a
	4.0	128.63a	5.16ab	446.78ab	135.08a	16.29a
Pr>F		0.5174	0.0173	0.0009	0.0251	0.0308
DSH ⁺		55.903	2.994	215.07	44.637	9.117
Pr > I t I	Interacción*	0.1639	0.4834	0.0302	0.2561	0.9703

* Valores con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05)

† Estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05) entre las formas de aplicación (Foliar vs Solución)

* Diferencia significativa honesta † Interacción entre la forma y la dosis de aplicación

En el caso de los micronutrientos, las concentraciones de hierro fueron las más susceptibles a las dosis de silicio; aun cuando no existan diferencias como respuesta a las formas de aplicación (Figura 6). Los valores más altos corresponden a las dosis más altas de cada aplicación sin que ello demuestre una relación lineal entre las dos variables. Los resultados de investigaciones previas también muestran una mayor respuesta de este elemento a la adición de silicio en solución. Para algodón, canola y trigo, el suministro de silicio mejoró la absorción de hierro en el corto y largo plazo a diferencia de otros elementos cuya absorción se relacionó de forma variable con la dosis de silicio ([Mehrabanjoubani et al., 2015](#)). Los mismos autores atribuyen este comportamiento a una mejora en la integridad y funcionalidad

de las membranas provocado por el silicio. En otros estudios ([Pavlovic et al., 2016](#)) se ha mostrado la incidencia del silicio en el metabolismo del hierro en condiciones de deficiencia, disminuyendo los síntomas visuales de clorosis y mejorando su remobilización, sin embargo, existe poca información acerca de los mecanismos que participan cuando no existen condiciones de estrés.

La concentración de zinc no respondió a la dosis de silicio, pero si a la forma de aplicación (Cuadro 7). La concentración de zinc como respuesta a la aplicación en solución mostró un máximo en la dosis 2.0 mM, y en los tratamientos subsecuentes esta concentración disminuyó. Los tratamientos correspondientes a la aplicación foliar presentaron mayor variación en la respuesta, pero en promedio fueron superiores a aquellos tratamientos en los cuales el silicio se añadió en la solución. En contraste en otras especies como la canola o el algodón muestran un incremento en el contenido de zinc como respuesta a la dosis de silicio ([Mehrabanjoubani et al., 2015](#)). Otra investigación realizada en fresa muestra una mayor concentración de zinc en el tejido foliar como respuesta a la aplicación de silicio en especial en estadios reproductivos ([Hajiboland et al., 2017](#)). Como señalan los mismos autores, esta respuesta puede atribuirse a similitud funcional entre los transportadores de silicio y de otros elementos como el hierro o bien a cambios estructurales o morfológicos descritos anteriormente.

La concentración de cobre en las hojas fue muy consistente en los tratamientos en los cuales el silicato de sodio se incorporó a la solución. Mientras que en los tratamientos foliares la variación fue muy superior. Los valores más alto y más bajo de todas las dosis se obtuvieron con la dosis 1.0 y 2.0 mM respectivamente. Por el contrario, existen reportes de la baja incidencia que tiene el silicio en las concentraciones de cobre en cultivos como el pepino ([Jarosz, 2012](#)).

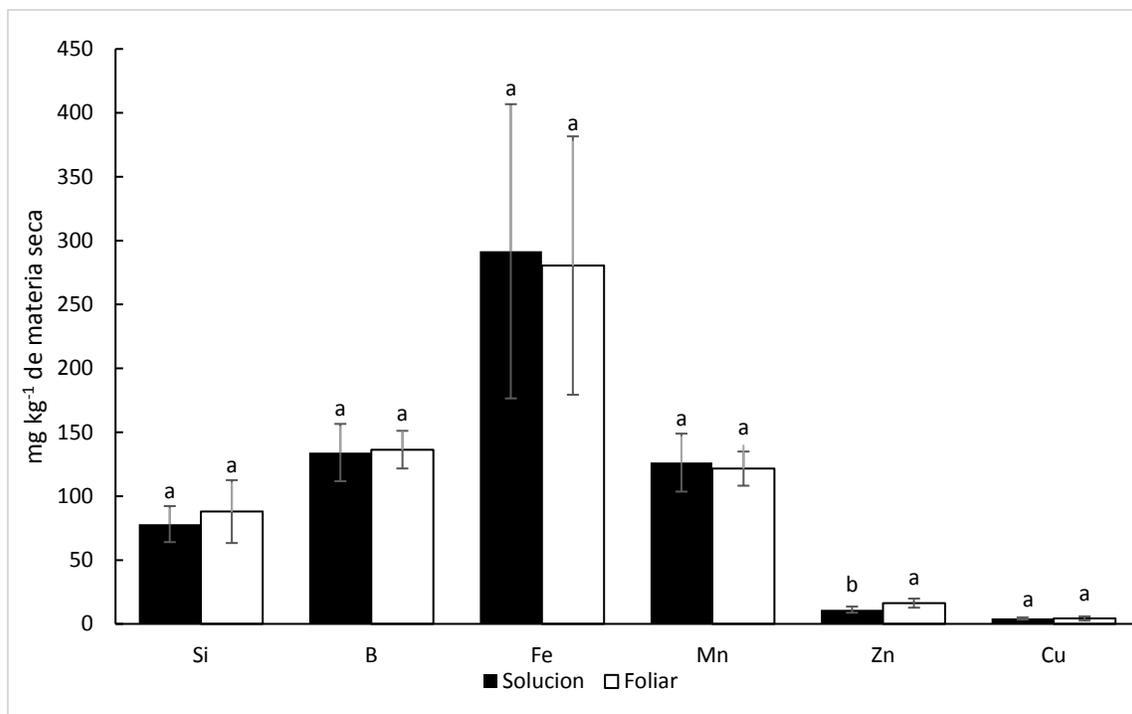


Figura 7 Concentración de silicio y micronutrientes en hojas de fresa como respuesta a la forma de aplicación de silicio. (Las barras representan la media para todos los tratamientos correspondientes a cada forma de aplicación. Letras diferentes muestran diferencias significativas (Tukey=0.05) en la concentración del elemento en las hojas. Las barras de error señalan la desviación estándar.)

En lo que respecta al manganeso no hubo respuesta a la forma de aplicación o a la dosis. A pesar de que no se observó diferencia en la concentración de magnesio entre los tratamientos, en el Cuadro 7 puede verse que las concentraciones más altas se obtuvieron con las dosis más altas de silicio en ambas formas de aplicación. En un estudio referido anteriormente, realizado por [Hajiboland et al. \(2017\)](#), los investigadores no encontraron diferencia significativa en las concentraciones de manganeso de plantas tratadas con silicio de aquellas que no fueron tratadas, a pesar de que la concentración del elemento en las primeras fuera ligeramente superior. Por el contrario, en pepino, la concentración de manganeso en las hojas responde favorablemente a la aplicación de silicio en concentraciones cercanas a 9.0 mM, a partir de la cual la concentración de manganeso disminuye ([Jarosz, 2012](#)). La respuesta de las especies provocadas por el silicio puede ser una

disminución en la absorción del manganeso o bien una distribución más uniforme lo que aminora su deficiencia o excesos (Wiese *et al.*, 2007).

El boro es uno de los micronutrientes con los que más se relaciona al silicio. Sin embargo, como muestra el Cuadro 7 no se observó relación alguna entre el contenido de boro y la dosis de silicio, independientemente de la forma de aplicación. No obstante, las concentraciones más altas del elemento tienen una tendencia opuesta en función de la forma de aplicación. Resultados similares obtuvieron Savic *et al.* (2013) en girasol, donde el silicio únicamente mejoró la absorción de boro cuando hubo una mayor disponibilidad del elemento en el medio, es decir con una dosis de boro deficiente pero no tan baja. Esto prueba además que la probabilidad de que el silicio pueda en condiciones de deficiencia cumplir las funciones del boro es baja. Con frecuencia el papel del silicio es el regular la absorción de otros elementos en función de su disponibilidad. En canola, por ejemplo, Liang *et al.* (1994) hallaron que el silicio mejoraba la absorción de boro cuando este era deficiente, pero disminuía su absorción si se encontraba en exceso. Debido a que la concentración de boro mostrada en el Cuadro 7 es superior al rango de suficiencia máximo (Bottoms *et al.*, 2013), la regulación únicamente puede darse en condiciones de exceso de boro y mostrar una tendencia similar a la que presentan los tratamientos foliares.

2.3.3 Variables relacionadas con el intercambio gaseoso

Como se muestra en el Cuadro 8, la tasa fotosintética se vio afectada por la dosis y forma de aplicación de silicio. Este Cuadro también muestra que a pesar de que existe diferencia en la tasa fotosintética con respecto a la forma de aplicación, la mayor tasa fotosintética se dio como respuesta a las dosis comprendidas entre 1.5 y 3.0 mM. La forma de aplicación foliar mostró incrementos en la fotosíntesis hasta la concentración 3.0 mM a partir de la cual disminuyó. Por el contrario, la aplicación en solución no produjo una tendencia en la fotosíntesis como respuesta a la dosis del elemento. Resultados similares hallaron en cacao (*Theobroma cacao* L.) Zanetti *et al.* (2016), en que muestran, un incremento en la tasa fotosintética cuando se

suministra silicio en déficit de humedad, mientras que en condiciones de humedad óptimas la respuesta es mínima sin diferencias significativas. Esta respuesta estaría relacionada con un incremento en la concentración de clorofilas. En contraste [Xie et al. \(2015\)](#) señalan que hubo respuesta del maíz a la aplicación de silicio cuando este se incorpora al suelo, para ello evaluaron la tasa fotosintética de esta especie creciendo en un medio alcalino sódico. Sus resultados muestran cambios en la tasa fotosintética en función de la dosis de silicio con valores más altos a dosis de 150 kg ha⁻¹, a pesar de utilizar silicato de sodio como fuente. En cambio, [Silva et al. \(2014\)](#) muestran que la respuesta fotosintética al suministro de silicio es fuertemente dependiente de la variedad, por lo que los parámetros relacionados al intercambio de gases están vinculados a la asimilación del silicio.

Entre los mecanismos que mejoran la tasa fotosintética como respuesta al suministro de silicio incluyen una mayor estabilidad en las hojas, así como un incremento en el contenido de clorofilas en función de la fuente utilizada ([Gerami et al., 2012](#)).

La conductancia estomática no difirió entre dosis o entre formas de aplicación como muestra el Cuadro 8. Tampoco se observó una tendencia en la conductancia estomática con respecto a la dosis de silicio. Esto contradice observaciones hechas en estudios anteriores como el de [Zanetti y colaboradores \(2016\)](#), que muestran una disminución en la conductancia estomática a medida que se incrementó la concentración de silicio, debido en parte a un engrosamiento cuticular que limita la difusión de gases. Sin embargo, otros estudios muestran baja respuesta de especies como la arúgula en la conductancia estomática a incrementos en la dosis de silicio, y únicamente en condiciones de estrés el efecto del silicio es considerable ([De Jesus et al., 2018](#)).

Cuadro 8/Variables fotosintéticas y relacionadas con el intercambio de gases como respuesta a la dosis y forma de aplicación de silicio.

Aplicación	Dosis (mM Si)	Fotosíntesis† ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Conductancia ($\text{Mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Concentración intercelular de CO_2 † ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol aire}^{-1}$)	Transpiración† ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Solución	1.0	9.96bc*	0.1423a	225.75a	3.095ab
	1.5	11.63abc	0.1568a	217.63a	3.326ab
	2.0	12.04ab	0.1300a	214.4a	2.731b
	2.5	8.89c	0.1747a	233.83a	2.980ab
	3.0	10.91bc	0.1329a	239.34a	2.825b
Foliar	0.0	10.71ac	0.1587a	241.95a	3.038ab
	1.0	11.81b	0.1433a	240.87a	3.054ab
	2.0	13.02a	0.1624a	242.75a	3.662a
	3.0	13.22a	0.1634a	245.18a	3.290ab
	4.0	11.88ab	0.1611a	246.71a	3.398ab
	Pr>F	0.002	0.0648	0.2842	0.0189
	DSH†	2.7963	0.0456	48.704	0.7993
Pr > I t I	Interacción*	0.5863	0.1108	0.2619	0.1704

* Valores con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05)

† Estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05) entre las formas de aplicación (Foliar vs Solución)

* Diferencia significativa honesta ** Interacción entre la forma y la dosis de aplicación

La concentración interna de carbono no difirió entre dosis, pero sí entre las formas de aplicación como muestra el Cuadro 8. La respuesta en ambas formas es similar con una disminución en las dosis medias y picos en los tratamientos extremos. La diferencia entre formas de aplicación, es muy notoria pues incluso el tratamiento control fue superior a todos los tratamientos en los que el silicio fue aplicado en solución. Otros reportes, sin embargo, muestran que la incidencia del silicio en este parámetro fisiológico es menor y únicamente en condiciones de limitada disponibilidad de agua aminora los efectos fisiológicos de este estrés (De Jesús *et al.*, 2018). De forma interesante otras investigaciones realizadas en fresa que involucran la aplicación de silicio muestran un resultado inverso a los aquí obtenidos. Dehghanipoodeh *et al.* (2016) encontraron que la aplicación de silicio en solución producía una concentración interna de carbono mayor que cuando se asperja al follaje. No obstante, las dosis que utilizaron triplican las utilizadas en este experimento. Por el contrario, en algodónero Silva *et al.* (2014) muestran que al

incrementar la dosis de silicio foliar disminuye de manera considerable la concentración interna de carbono. No obstante, debido a que la conductancia estomática no mostró diferencias significativas, difícilmente se observan cambios en la concentración interna de carbono.

La transpiración fue diferente entre las formas de aplicación, pero además también lo fue entre las dosis de silicio. Las dosis medias en aplicaciones foliares produjeron una tasa transpiratoria más alta mientras que el mismo efecto en aplicaciones en solución fue para las dosis bajas. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por [Dehghanipoodeh et al. \(2016\)](#) en fresa, donde muestran que de manera independiente a la fuente (nanosílice o silicato de potasio), la aplicación foliar produce tasas transpiratorias más altas, y también se observa una disminución en la transpiración a medida que se incrementa la dosis de silicio.

Al igual que otras variables que están relacionadas con el intercambio de gases, la transpiración es más variable en condiciones de estrés ([De Jesús et al., 2018](#)). En plantas acumuladoras, la respuesta en la transpiración se da incluso a dosis bajas de silicio en ambos lados de la lámina, provocada por la conductancia estomática paradójicamente sin cambios en la densidad o morfología de los estomas ([Gao et al., 2006](#)).

En otras especies bajo limitaciones en la disponibilidad de agua, la acumulación de silicio en las hojas permite la formación de una doble capa en la cutícula que reduce la transpiración a través de una disminución en la apertura estomática ([Marafon y Endres, 2013](#)). Otro mecanismo reportado con menos frecuencia es la acumulación del silicio en la cutícula, lo que confiere mayor rigidez a las paredes estomáticas y mantiene cerrado los estomas disminuyendo así la pérdida de agua ([Luz et al., 2006](#)). Además, la acumulación del elemento en los tejidos vasculares previene la compresión cuando la transpiración es alta ([Aziz et al., 2002](#)) lo que disminuye la posibilidad de daños mecánicos producidos por la cavitación.

2.6 CONCLUSIONES

Al analizar la absorción de silicio como respuesta a las formas de aplicación del elemento, puede concluirse que la absorción de silicio por la variedad Festival es baja, por debajo incluso de algunas especies reportadas con absorción restrictiva. A pesar de su baja absorción, la mayor acumulación se da en las hojas mientras que la más baja se produjo en la raíz.

La aplicación de silicio, en general modificó la absorción de elementos. La concentración de elementos como N, Mg y Zn en las hojas también fue alterada de manera significativa por la forma de aplicación. Aunque con diferencias mínimas las dosis altas utilizadas favorecieron la absorción de N, Ca, Cu, Fe y Mn, disminuyeron la de K, B y Zn, mientras que no hubo respuesta en la concentración de P, Mg y S.

La fotosíntesis neta y la transpiración se incrementaron con la aplicación foliar de silicio, aunque las dosis entre 1.5 y 2.0 aplicadas en solución parecen una mejor alternativa ya que reducen la transpiración y mantienen constante la tasa fotosintética.

Debido a los cambios producidos en la acumulación de elementos esenciales, así como en variables fotosintéticas, puede considerarse el uso potencial del silicio como fertilizante. Si bien esta investigación no profundiza en los mecanismos que vinculan al silicio con el metabolismo de las plantas, futuros estudios deberán encaminarse en este sentido a fin de describir su papel en la fisiología vegetal y hacer más amplio y eficiente su uso en la nutrición de los cultivos.

2.7 LITERATURA CITADA

- Abd-Alkarim, E., Y. Bayoumi, E. Metwally, y M. Rakha .2017. Silicon supplements affect yield and fruit quality of cucumber (*Cucumis sativus L.*) grown in net houses. *African Journal of Agricultural Research*. 12(31): 2518-2523. [10.5897/AJAR2017.12484](https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12484)
- Agarie, S., H. Uchida, W. Agata, F. Kubota, y P.B. Kaufman .1998. Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa L.*). *Plant Production Science*. 1(2): 89-95. [10.1626/pps.1.89](https://doi.org/10.1626/pps.1.89)
- Ahmed, F., A. Mansour, A. Mohamed, E. Mostafa, y N. Ashour .2013. Using silicon and salicylic acid for promoting production of hindy bisinnara mango trees grown under sandy soil. *Middle East Journal of Agriculture Research*. 2(2): 51-55.
- Alcántar, G. G., M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación Especial No. 10. SMCS. Chapingo, México. 150 p.
- Aziz, T., y M. Ahmad G. 2002. Silicon nutrition and crop production: a review. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 39(3): 181-187.
- Bottoms, T. G., M. P. Bolda, M.L. Gaskell, y T.K. Hartz .2013. Determination of strawberry nutrient optimum ranges through diagnosis and recommendation integrated system analysis. *Hort Technology*. 23(3): 312-318.
- Broadley, M., P. Brown, I. Cakmak, J.F. Ma, Z. Rengel, y F. Zhao. 2012. Chapter 8 - Beneficial Elements. In P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition)* (pp. 249-269). San Diego: Academic Press. [10.1016/B978-0-12-384905-2.00008-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00008-X)
- Callis-Duehl, K. L., H.J. McAuslane, A. J. Duehl, y D.J. Levey .2017. The effects of silica fertilizer as an anti-herbivore defense in cucumber. *Journal of Horticultural Research*. 25(1): 89-98. [10.1515/johr-2017-0010](https://doi.org/10.1515/johr-2017-0010)
- Costa S., B. N., I. de J. Costa S., G. de M. Dias G., F. A. Assis, L. A. Pio S., J.D. Soares R., y M. Pasqual. 2018. Morpho-anatomical and physiological alterations of passion

- fruit fertilized with silicone. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 53(2): 163-171. [10.1590/s0100-204x2018000200004](https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000200004).
- Cuong, T. X., H. Ullah, A. Datta, y T.C. Hanh .2017. Effects of silicon-based fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of rice in tropical zone of Vietnam. *Rice Science*, 24(5): 283-290. [10.1016/j.rsci.2017.06.002](https://doi.org/10.1016/j.rsci.2017.06.002)
- Dehghanipoodeh, S., C. Ghobadi, B. Baninasab, M. Gheysari, y S.S. Bidabadi, .2016. Effects of potassium silicate and nanosilica on quantitative and qualitative characteristics of a commercial strawberry (*Fragaria × ananassa* cv. 'camarosa'). *Journal of Plant Nutrition*, 39(4): 502-507. [10.1080/01904167.2015.1086789](https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1086789)
- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 91(1). 11-17.
- Epstein, E.1999. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 50: 641-664. [10.1146/annurev.arplant.50.1.641](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641)
- Fatma, K., y A.A. Mustafa .2017. Effect of silica compounds on vegetative growth, yield, fruit quality and nutritional status of 'Olinda' valencia orange. *Middle East Journal of Agriculture Research*. 06(01): 45-56.
- Gao, X., C. Zou, L. Wang, y F. Zhang .2006. Silicon Decreases Transpiration Rate and Conductance from Stomata of Maize Plants. *Journal of Plant Nutrition*. 29(9). 1637-1647. [10.1080/01904160600851494](https://doi.org/10.1080/01904160600851494)
- Gerami, M., F. Allahyar, R. Mohammad, y M. Khatami .2012. Study of potassium and sodium silicate on the morphological and chlorophyll content on the rice plant in pot experiment (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 4(10): 658-661.
- Guntzer, F., C. Keller, y J.D. Meunier .2012. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 32(1): 201-213. [10.1007/s13593-011-0039-8](https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8)
- Hajiboland, R., N. Moradtalab, Z. Eshaghi, y J. Feizy. 2017. Effect of silicon supplementation on growth and metabolism of strawberry plants at three

- developmental stages. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. 46(2): 144-161. [10.1080/01140671.2017.1373680](https://doi.org/10.1080/01140671.2017.1373680)
- Jarosz, Z. 2012. The effect of silicon application and type of substrate on yield and chemical composition of leaves and fruit of cucumber. *Journal of Elemntology*. 5: 403-414. [10.5601/jelem.2013.18.3.05](https://doi.org/10.5601/jelem.2013.18.3.05)
- De Jesus, E. G., R.T. de Fatima, R. T. de, A.C. Guerrero, J.L. de Araújo, M.E.Brito .2018. Growth and gas exchanges of arugula plants under silicon fertilization and water restriction. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 22(2): 119-124. [10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p119-124](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p119-124)
- Kamenidou, S., T.J. Cavins, y S. Marek. 2008. Silicon supplements affect horticultural traits of greenhouse-produced ornamental sunflowers. *HortScience*. 43(1): 236-239.
- Kamenidou, S., T.J. Cavins, y S. Marek. 2009. Evaluation of silicon as a nutritional supplement for greenhouse zinnia production. *Scientia Horticulturae*. 119(3): 297-301. [10.1016/j.scienta.2008.08.012](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.08.012)
- Liang, Y., H. Hua, Y.-G. Zhu, J. Zhang, C. Cheng, y V. Römheld. 2006. Importance of plant species and external silicon concentration to active silicon uptake and transport. *The New Phytologist*. 172(1): 63-72. [10.1111/j.1469-8137.2006.01797.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01797.x)
- Liang, Y., M. Nikolic, R. Belanger, H. Gong, y A. Song. 2015. Silicon uptake and transport in plants: physiological and molecular aspects. *In Silicon in Agriculture*.pp. 69-82. Springer, Dordrecht. [10.1007/978-94-017-9978-2_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2_4)
- Liang, Y., W. Sun, Y.-H. Zhu, y P. Christie. 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, 147(2) : 422-428. [10.1016/j.envpol.2006.06.008](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008)
- Liang, Y., y Z. Shen. 1994. Interaction of silicon and boron in oilseed rape plants. *Journal of Plant Nutrition*. 17(2-3): 415-425. [10.1080/01904169409364736](https://doi.org/10.1080/01904169409364736)
- Lieten, P., J. Horvath, y H. Asard. 2002. Effect of silicon on albinism of strawberry. *Acta Horticulturae*. 567: 361-364. [10.17660/ActaHortic.2002.567.78](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.78)

- Lu De., M. M., M. R. De Silva, E. K. Peralta, A. N. Fajardo, M.M. Peralta. 2016. Growth and yield of tomato applied with silicon supplements with varying material structures. *Philippine e-Journal for Applied Research and Development*. 6:10-18
- Lucena, J. J..1997. Methods of diagnosis of mineral nutrition of plants a critical review. *Acta Horticulturae*. 448: 179-192. [10.17660/ActaHortic.1997.448.28](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.448.28)
- Luz, J. M. Q., S.T. Guimarães, y G.H. Korndörfer. 2006. Hidroponic production of lettuce in hidroponic solution with or without silicon. *Horticultura Brasileira*. 24(3): 295-300. [10.1590/S0102-05362006000300005](https://doi.org/10.1590/S0102-05362006000300005)
- Ma, J. F., Y. Miyake, y E.Takahashi. 2001. Chapter 2 Silicon as a beneficial element for crop plants. En L. E. Datnoff, G. H. Snyder, y G. H. Korndörfer (Eds.), *Studies in Plant Science* (Vol. 8, pp. 17-39). Elsevier. [10.1016/S0928-3420\(01\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9)
- Ma, J. F., y E. Takahashi. 2002. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier.
- Ma, J. F., y N. Yamaji. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in plant science*. 11(8): 392-397. [10.1016/j.tplants.2006.06.007](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007)
- Ma, J., y E. Takahashi. 1990. Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. *Plant and Soil*. 126(1): 115-119. [10.1007/BF00041376](https://doi.org/10.1007/BF00041376)
- Marafon, A. C., y L. Endres (2013a). Silicon: fertilization and nutrition in higher plants. *Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences*. 56(4): 380-388. [10.4322/rca.2013.057](https://doi.org/10.4322/rca.2013.057)
- Meena, V. D., M.L. Dotaniya, V. Coumar, S. Rajendiran, S. Kundu, y A.S. Rao. 2014. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*. 84(3): 505-518.[10.1007/s40011-013-0270-y](https://doi.org/10.1007/s40011-013-0270-y)
- Mehrabanjoubani, P., A. Abdolzadeh, H.R. Sadeghipour, y M. Aghdasi. 2015. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants. *Pedosphere*. 25(2): 192-201. [10.1016/S1002-0160\(15\)60004-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60004-2)

- Miyake, Y., y E. Takahashi. 1986. Effect of silicon on the growth and fruit production of strawberry plants in a solution culture. *Soil Science and Plant Nutrition*. 32(2): 321-326. [10.1080/00380768.1986.10557510](https://doi.org/10.1080/00380768.1986.10557510)
- Neu, S., J. Schaller, y E.G. Dudel. 2017. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C: N: P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific reports*. 7. 40829. [10.1038/srep40829](https://doi.org/10.1038/srep40829)
- Ouellette, S., M.-H. Goyette, C. Labbé, J. Laur, L. Gaudeau, A. Gosselin, M. Dorais, R. K. Deshmukh, y R. R. Bélanger. 2017. Silicon transporters and effects of silicon amendments in strawberry under high tunnel and field conditions. *Frontiers in plant science*. 8: 949-960. [10.3389/fpls.2017.00949](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00949).
- Pavlovic, J., J. Samardzic, L. Kostic, K.H. Laursen, M. Natic, G. Timotijevic, M. Nikolic. 2016. Silicon enhances leaf remobilization of iron in cucumber under limited iron conditions. *Annals of Botany*. 118(2): 271-280. [10.1093/aob/mcw105](https://doi.org/10.1093/aob/mcw105)
- Pilon, C., R.P. Soratto, y L.A. Moreno. 2013. Effects of soil and foliar application of soluble silicon on mineral nutrition, gas exchange, and growth of potato plants. *Crop Science*. 53(4): 1605-1614. [10.2135/cropsci2012.10.0580](https://doi.org/10.2135/cropsci2012.10.0580)
- Raven, J. A. 2003. Cycling silicon – the role of accumulation in plants. *New Phytologist*, 158(3): 419-421. [10.1046/j.1469-8137.2003.00778.x](https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00778.x)
- Sahebi, M., M.M. Hanafi, A. S. Nor A., M. Rafii, M. Y., P. Azizi, F.F. Tengoua, J.N. Mayzaitul A., y M. Shabanimofrad. 2015. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed research international*. 25: 1-16. [10.1155/2015/396010](https://doi.org/10.1155/2015/396010)
- Savić, J., y A. Marjanović-Jeromela. 2013. Effect of silicon on sunflower growth and nutrient accumulation under low boron supply. *Helia*. 36(58). 61–68. [10.2298/hel1358061s](https://doi.org/10.2298/hel1358061s)
- Silva, M., J. Resende, A. Trevizam, A. Figueiredo, y K. Schwarz .2013. Influência do silício na produção e na qualidade de frutos do morangueiro Influence of silicon on

- production and fruit quality of strawberry. *Semina: Ciências Agrárias*. 34: 3411-3424. [10.5433/1679-0359.2013v34n6Supl1p3411](https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n6Supl1p3411)
- Stamatakis, A., N. Papadantonakis, D. Savvas, N. Lydakis-Simantiris, y P. Kefalas. 2003. Effects of silicon and salinity on fruit yield and quality of tomato grown hydroponically. *Acta Horticulturae*. (609): 141-147. [10.17660/ActaHortic.2003.609.18](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.609.18)
- Steiner, A.A. 1984. The universal nutrient solution. In *Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture*. Wageningen the Netherlands. ISOSC. 633-650.
- Takahashi, E., y E. Miyake. 1976. Comparative studies on the silica nutrition in plants, 5: Distribution of silica accumulator plants in the plant kingdom (1) Monocotyledons. *Journal of the Science of Soil and Manure*. 47:296-300.
- Tesfagiorgis, H. B., y M.D. Laing. 2013. The effects of silicon level in nutrient solution on the uptake and distribution of silicon in zucchini and zinnia, and its interaction with the uptake of selected elements. *African Journal of Biotechnology*. 12(14): 1617-1623. [10.5897/AJB2012.3038](https://doi.org/10.5897/AJB2012.3038)
- Wiese, H., M. Nikolic, y V. Römheld .2007. Silicon in plant nutrition. In Sattelmacher, Burkhard, Horst, Walter (Eds.) *The apoplast of higher plants: compartment of storage, transport and reactions* (pp. 33-47). Springer, Dordrecht. [10.1007/978-1-4020-5843-1_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5843-1_3)
- Wolf, B. 1982. A comprehensive system of leaf analyses and its use for diagnosing crop nutrient status. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 13(12): 1035-1059. [10.1080/00103628209367332](https://doi.org/10.1080/00103628209367332)
- Wu, Q.-S., X.-Y. Wan, N. Su, Z.-J. Cheng, J.-K. Wang, C.L. Lei, J.-M. Wan. 2006. Genetic dissection of silicon uptake ability in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Science: An International Journal of Experimental Plant Biology*. 171(4). 441-448. [10.1016/j.plantsci.2006.05.001](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.05.001)
- Xie, Z., F. Song, H. Xu, H. Shao, y R. Song .2014. Effects of silicon on photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) on alluvial soil. *The Scientific World Journal*, 2014. [10.1155/2014/718716](https://doi.org/10.1155/2014/718716)

Xie, Z., R. Song, H. Shao, F. Song, H. Xu, y Y. Lu. 2015. Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils. *The Scientific World Journal*. 2015. [10.1155/2015/245072](https://doi.org/10.1155/2015/245072)

Zanetti, L. V., C.R. Milanez, D., V.N. Gama., M.A. Aguilar G., C.A. Souza S., E. Campostrini, T. Ferraz M., F. A. M. M. Figueiredo de A. 2016. Leaf application of silicon in young cacao plants subjected to water deficit. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(3): 215-223. [10.1590/S0100-204X2016000300003](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000300003)

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La concentración de silicio en el tejido de fresa demuestra porque esta especie es considerada una especie no acumuladora. A pesar de la baja absorción de este elemento, las variables aquí analizadas entre las que se incluyen el rendimiento y la calidad del fruto fueron modificadas por la dosis de silicio suministrada, pero en mayor medida están relacionadas con la forma de aplicación del elemento.

Por otro lado la respuesta fisiológica es susceptible a las dosis y formas de aplicación. La concentración de algunos elementos esenciales en el tejido foliar también muestra cierta relación con la concentración de silicio en el mismo órgano. Otras variables entre las que se encuentran la fotosíntesis neta y la transpiración tuvieron una respuesta positiva a dosis bajas de silicio.

Los resultados encontrados en esta investigación muestran que el silicio puede ser recomendado como un elemento que complementa la fertilización de fresa aun en condiciones óptimas de crecimiento. Sin embargo, es necesaria más investigación que permita entender la razón de estos cambios, los procesos fisiológicos en los que participa el silicio y la forma maximizar su influencia a manera de hacer su uso más eficiente.

Las investigaciones futuras deben ser enfocadas a conocer los alcances que tiene el uso del silicio y de los demás elementos benéficos. Hasta ahora, los estudios realizados en elementos benéficos se han centrado en probar la esencialidad de estos elementos, pero no es necesario que estos sean considerados elementos esenciales para analizar la forma en que participan en el metabolismo vegetal. Las nuevas herramientas en la química analítica así como los grandes avances en ingeniería genética y otras ciencias relacionadas con la fisiología vegetal permitirán en un futuro no muy lejano determinar con exactitud la pertinencia del uso de este elemento.