



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FRUTICULTURA

APLICACIÓN FOLIAR Y AL SUELO DE
FUENTES DE SILICIO PARA MEJORAR LA
CALIDAD POSTCOSECHA EN LIMÓN PERSA
(*Citrus latifolia* Tan.)

ROSA OLIVIA ROMERO MARTINEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019

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

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe ROSA OLIVIA ROMERO MARTINEZ, 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 DR. SERGIO HUMBERTO CHÁVEZ FRANCO, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis APLICACIÓN FOLIAR Y AL SUELO DE FUENTES DE SILICIO PARA MEJORAR LA CALIDAD POSTCOSECHA EN LIMÓN PERSA (*Citrus latifolia* Tan.) 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 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 19 de junio de 2019

Firma del Alumno (a)

DR. SERGIO HUMBERTO CHÁVEZ FRANCO

Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

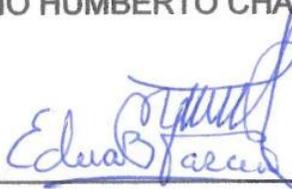
La presente tesis titulada: **APLICACIÓN FOLIAR Y AL SUELO DE FUENTES DE SILICIO PARA MEJORAR LA CALIDAD POSTCOSECHA EN LIMÓN PERSA (*Citrus latifolia* Tan.)** realizada por la alumna Rosa Olivia Romero Martinez, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FRUTICULTURA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO (A) 
DR. SERGIO HUMBERTO CHÁVEZ FRANCO

ASESOR (A) 
DR. EDUARDO GARCÍA VILLANUEVA

ASESOR (A) 
DR. LUIS ALFONSO AGUILAR PÉREZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio 2019

**APLICACIÓN FOLIAR Y AL SUELO DE FUENTES DE SILICIO PARA
MEJORAR LA CALIDAD POSTCOSECHA EN LIMÓN PERSA (*Citrus latifolia*
Tan.)**

**Rosa Olivia Romero Martinez, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2019**

RESUMEN

Veracruz cultiva 46,139 ha de limón persa (*Citrus latifolia* Tan.), es el principal productor de México. Se ha reportado al silicio como nutrimento mejorador de calidad y rendimiento en diferentes cultivos. En esta investigación se evaluó el efecto de la aplicación de silicio en características agronómicas y de calidad en limón persa. Los tratamientos aplicados en precosecha fueron: Testigo (T1), Silicato de calcio foliar (T2), Silicato de potasio foliar (T3), Silicato de calcio al suelo (T4) y Silicato de potasio al suelo (T5). La aplicación de silicio en las variables agronómicas de floración y amarre no tiene ningún efecto benéfico, en el rendimiento con la aplicación de silicato de calcio al suelo (T4) el rendimiento por árbol se incrementa hasta 26.6%. En las variables de calidad como peso fresco, apariencia, volumen de jugo, grosor de cáscara, acidez titulable (% ácido cítrico) y sólidos solubles totales (°Brix) no presenta ningún efecto benéfico. Con respecto al contenido nutrimental se muestra una hiperacumulación en frutos, mostrando valores de 13.2 y 18.1%. La aplicación de silicato de calcio al suelo (T4) y silicato potasio al suelo (T5) provocaron la producción de frutos con mayor firmeza presentando valores de 29.3 y 28.5 Newtons. La aplicación de silicato de potasio al suelo (T5) fue el que presentó mayor índice de redondez. Para la medición de color la aplicación silicato de potasio al suelo (T5) es el tratamiento que presentó un color verde oscuro. Se concluye que el suministro de silicio en combinación con calcio o potasio promueve la eficacia nutrimental del cultivo de limón. La mejor forma de aplicación de fuentes de silicio fue al suelo.

Palabras claves: silicatos, fertilización foliar, mejoramiento de suelos, calidad, rendimiento.

FOLIAR AND SOIL APPLICATION OF SILICON SOURCES TO IMPROVE POSTHARVEST QUALITY IN PERSIAN LEMON (*Citrus latifolia* Tan.)

Rosa Olivia Romero Martinez, M. Sc.
Colegio de Postgraduados, 2019

ABSTRACT

Veracruz cultivates 46,139 ha of Persian lemon (*Citrus latifolia* Tan.), being the main producer of Mexico. Silicon has been reported as a nutrient which improves quality and harvest yield in different crops. In this investigation, the effect of the application of silicon on agronomic and quality characteristics in Persian lemon were evaluated. The treatments applied pre-harvest were: Control (T1), Foliar Calcium Silicate (T2), Foliate Potassium Silicate (T3), Calcium Silicate to the soil (T4) and Potassium Silicate to the soil (T5). The application of silicon in agronomic variables like flowering and mooring did not have any beneficial effect, in harvest yield with the application of calcium silicate to the soil (T4) the harvest yield per tree increases up to 26.6%. In the quality variables such as fresh weight, appearance, juice volume, husk thickness, titratable acidity (% citric acid) and total soluble solids (° Brix) did not have any beneficial effects. In regard of nutritional content shows a hyperaccumulation in fruits, showing values of 13.2 and 18.1%. The application of calcium silicate to the soil (T4) and potassium silicate to the soil (T5) induce fruit production with greater firmness, presenting values of 29.3 and 28.5 Newtons. The application of potassium silicate to the soil (T5) had the highest roundness index. For color measurement, the application of potassium silicate to the soil (T5) was the treatment that presented a dark green color. It is concluded that the supply of silicon in combination with calcium or potassium promotes the nutritional efficacy of the lemon crop. The best way to apply silicon was to the soil.

Keywords: silicates, foliar fertilization, soil improvement, quality, yield.

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de México que a través del **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT) me brindaron el apoyo económico para la realización de mis estudios de Maestría en Ciencias.

Al **Colegio de Postgraduados**, institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas, por brindarme las facilidades para desarrollar el proyecto de investigación y por darme la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos.

Al **Dr. Sergio Humberto Chávez Franco** por brindarme la ayuda necesaria durante mis estudios y por dirigir el proyecto.

Al **Dr. Eduardo García Villanueva** por su paciencia, confianza y apoyo brindado para la realización de mis estudios de maestría.

Al **Dr. Luis Alfonso Aguilar Pérez** por la confianza y apoyo brindado para llevar a cabo la investigación.

Al **M. C. David Jaen Contreras** por la asesoría y el apoyo brindado en las evaluaciones realizadas en el laboratorio de Fisiología Postcosecha.

Al **M. C. Antonio Morgado González** por su amistad, enorme apoyo y paciencia durante la elaboración de este trabajo.

A **mis amigos** que estuvieron en los buenos y malos momentos, por el apoyo brindado en el momento que lo necesité, y hacer mi estancia placentera durante la maestría.

DEDICATORIA

Gracias a **Dios** por la vida que me ha regalado, por la familia que tengo, por mis amigos, por todas las personas que me permites conocer, por dejarme culminar una meta más en mi vida.

A mis padres

Sra. Eloina Martínez Rojas (†) y Sr. Rogelio Romero Morales, por su amor, por el apoyo que siempre me han brindado en las decisiones que he tomado, por su cariño y comprensión, por sus consejos, por el ejemplo invaluable de perseverancia y tenacidad.

A mi mamá

Marisela Romero Martínez, por su amor, trabajo y sacrificios en todos estos años, este trabajo también es tuyo, gracias a tí una meta más cumplida, gracias por el apoyo brindado a lo largo de mi vida.

A mis hermanos y sobrinos

Asael, Alejandro, Enma, Julio, Rogelio, Mara, Rogger, Cecilia, Axel, Jaziel, Jareth y Alexis; les agradezco no solo por estar presentes aportando buenas cosas a mi vida, sino por los grandes momentos de felicidad y de diversas emociones que siempre me han causado.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
DEDICATORIA	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE CUADROS.....	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	3
2.1. General.....	3
2.2. Específicos.....	3
III. HIPÓTESIS	3
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1. Taxonomía y descripción botánica	4
4.2. Fenología del cultivo.....	8
4.3. Requerimientos edafoclimáticos.....	8
4.4. Requerimientos nutrimentales.....	9
4.5. Silicio en el ecosistema	12
4.6. Importancia del silicio en las plantas.....	12
4.7. Impacto del silicio en la fisiología vegetal	13
4.8. Aplicación de silicio en cultivos.....	16
V. MATERIALES Y MÉTODOS	21
5.1. Localización del experimento	21
5.2. Material vegetal y manejo de la huerta	22
5.3. Tratamientos	23
5.4. Diseño experimental	24
5.5. Variables respuesta.....	25

5.5.1. Contenido nutrimental en frutos.....	25
5.5.2. Indicadores de productividad.....	26
5.5.3. Indicadores de calidad	27
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
6.1. Contenido nutrimental en frutos.....	31
6.2. Parámetros de rendimiento.....	33
6.2.1. Floración	33
6.2.2. Amarre de frutos	33
6.2.3. Rendimiento	34
6.3. Calidad en fruto	36
6.3.1. Peso fresco.....	36
6.3.2. Firmeza.....	38
6.3.3. Índice de redondez	40
6.3.4. Índice de color.....	41
6.3.5. Apariencia.....	43
6.3.6. Volumen de jugo	44
6.3.7. Grosor de cáscara	46
6.3.8. Sólidos solubles totales (°Brix).....	48
6.3.9. Acidez titulable (% ácido cítrico)	49
VII. CONCLUSIONES	51
VII. LITERATURA CITADA.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica del municipio de Cotaxtla, Veracruz. Fuente: INEGI, 2010.....	21
Figura 2. Gráfica de temperatura ambiental y precipitación “Los Capulines”, Cotaxtla, Veracruz. Fuente: CNA, 2010.	22
Figura 3. Características de la huerta comercial de limón persa (parcela experimental)..	23
Figura 4. Sólido de colores.	28
Figura 5. Escala de apariencia en frutos de limón persa (Citrus latifolia).	28
Figura 6. Desviación del Óptimo Porcentual nutrimental con respecto de los niveles de referencia.....	32
Figura 7. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en el porcentaje de amarre de frutos.....	34
Figura 8. Efecto de los tratamientos con silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en el rendimiento de limón persa.	35
Figura 9. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en el peso de los frutos.....	37
Figura 10. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en la firmeza de los frutos.	39
Figura 11. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en el índice de redondez.	40
Figura 12. Sólido de colores de los frutos de limón persa.	42
Figura 13. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en el contenido de jugo.....	45
Figura 14. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en el grosor de la cáscara.	47

Figura 15. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en sólidos solubles totales (°Brix). 48

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de plantas en función del contenido de silicio.....	14
Cuadro 2. Tratamientos aplicados de manera quincenal.....	24
Cuadro 3. Aplicación de tratamientos de manera quincenal.....	24
Cuadro 4. Distribución de las unidades experimentales en bloques al azar.	25
Cuadro 5. Comparación del contenido nutrimental en frutos de limón persa.....	31
Cuadro 6. Comparación de índice de saturación (IS) y ángulo Hue entre tratamientos y fechas de cosechas.	42
Cuadro 7. Índice de apariencia con escala del 1 al 10, propuesta por la OCDE.	44
Cuadro 8. Porcentaje de ácido cítrico presente en el jugo de frutos de limón.....	50

I. INTRODUCCIÓN

Los cítricos de manera general tienen su origen en el continente asiático, aunque su producción ha sido dispersada en diferentes regiones del mundo; dentro de estos las limas y limones tienen un papel importante, y actualmente se cultivan alrededor de 1,185, 689 ha, teniendo producción de 19, 659, 698 toneladas, los países con mayor superficie y producción son la India, México, China, Argentina, Brasil y España (FAO, 2016).

Según el SIAP (2017), en México se cultivan 193,787 ha entre limas y limones con rendimiento total de 2, 513, 391 ton, siendo Veracruz el estado con mayor superficie (46,319 ha). El limón persa botánicamente es una lima conocida como “lima persa” o “limón sin semilla” (Morton, 1987). Dentro de los municipios con mayor producción, se encuentran Martínez de la Torre, Atzalan, San Rafael, Tlapacoyan, Papantla, Cotaxtla, Carrillo Puerto y Cuitláhuac (SIAP, 2017). Para obtener rendimientos altos en una huerta de limón persa y con fruta de calidad, es necesario que en cada ciclo de producción se repongan los nutrimentos que el árbol extrae del suelo (Curtí-Díaz *et al.*, 2000).

En los últimos 20 años, la documentación científica que muestra los beneficios del silicio (Si) para los cultivos ha ayudado a establecer la fertilización como una práctica agronómica en diferentes suelos agrícolas del mundo (Tubana *et al.*, 2016). El silicio, es el mineral más abundante de la corteza terrestre (Rodrigues y Datnoff, 2015). Los compuestos de silicio ocupan más del 60% de la composición del suelo (Alcántar y Trejo, 2013). La única forma en que los organismos vivos asimilan el silicio, es cuando está presente como ácido silícico, a esta forma de silicio se le conoce como activo, bio-activo, reactivo o soluble (Ma *et al.*, 2006).

El silicio ha sido reconocido como un “elemento agronómicamente esencial” para la producción de arroz en Japón, y los fertilizantes de silicio se han aplicado en países como Brasil, China, Japón y Estados Unidos en caña de azúcar, trigo,

cebada, cucurbitáceas y banano (Rodrigues y Datnoff, 2015). Su absorción puede ocasionar efectos benéficos para algunos cultivos como son resistencia a plagas, tolerancia a la toxicidad por metales pesados, estrés hídrico y salino, menor evapotranspiración, promoción del crecimiento y de la nodulación en leguminosas, efecto en la actividad de enzimas y en la composición mineral (Castellanos-González *et al.*, 2015).

Con base en lo mencionado anteriormente, la presente investigación tuvo como finalidad evaluar la respuesta agronómica y de calidad poscosecha de limón persa, a la aplicación de silicato de potasio (K_2SiO_3) y silicato de calcio ($CaOSiO_2$), vía foliar y al suelo.

II. OBJETIVOS

2.1. General

- Determinar el efecto de la aplicación de silicato de potasio (Supa Silica®) y silicato de calcio (Barrier®) vía foliar y vía edáfica en árboles de limón persa.

2.2. Específicos

- Evaluar el efecto de dos fuentes de silicio aplicadas vía foliar y al suelo en el rendimiento, floración y amarre de frutos.
- Valorar el efecto que tiene el silicio en la nutrición del cultivo del limón sobre las variables cuantitativas de la calidad postcosecha en frutos.

III. HIPÓTESIS

El suministro de silicio previo a la floración plena vía suelo y foliar en plantas de limón persa mejora el rendimiento y calidad postcosecha de frutos.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Taxonomía y descripción botánica

El limón persa botánicamente es una lima conocida como lima persa o limón sin semilla, el origen es desconocido, es un probable híbrido entre lima (*C. aurantifolia*) y limón (*C. limon*) o la cidra (*C. medica*) (Morton, 1987). El limón persa pertenece a la familia rutaceae y al género *Citrus*.

La formación de flores en los cítricos ocurre en dos fases: diferenciación del meristemo y desarrollo de la flor, el limón persa en un frutal siempre verde o perenifolio, el cual, en los climas tropicales, puede producir flores durante todo el año, sin embargo, estas se presentan en diferentes intensidades (Curtí-Díaz *et al.*, 2000). Para las condiciones de Cuitlahuac, Veracruz, existen tres períodos de floración, el primero se presenta a inicios del año (enero-marzo), teniendo fruta en mayo; el segundo en abril y el tercer período en octubre; por lo que, para las condiciones locales, las plantaciones de limón persa, presentan floraciones durante todo el año, de ahí que los estímulos ambientales y el manejo agronómico, son fundamentales.

El control de la floración está estrechamente vinculado con las condiciones ambientales como lo son: temperatura, variedad del cultivo, humedad realitva y precipitación en las que cada especie ha evolucionado. Entre los factores que inducen floración en las plantas son el fotoperíodo, las bajas temperaturas, el estrés hídrico de la planta y sus respectivas combinaciones, es decir, la floración es un fenómeno multifactorial (Janick, 1990). De manera general, en las zonas subtropicales, la floración se produce después de un período de inactividad de los brotes, como resultado de la exposición a bajas temperaturas en invierno (Carr, 2012).

El limón persa produce frutos de manera continua, debido a que tiene varias floraciones durante el año; sin embargo, su volumen de producción no se reparte uniformemente sino que existe un periodo de alta producción (70% del total) que

comprende de mayo a septiembre y otro con menor volumen de fruta (30%) que ocurre de octubre a abril (Curtí-Díaz *et al.*, 2000). En la actualidad el bajo rendimiento y la calidad reducida del limón persa en la región de Martínez de la Torre, Veracruz, México, se atribuye principalmente al inadecuado manejo de la nutrición mineral de los huertos, alrededor del 70% de los productores de esta región alcanzan rendimientos promedios de 7 t ha⁻¹, el 30% obtienen rendimientos promedios de 14 t ha⁻¹, y sólo el 1% producen hasta 20 t ha⁻¹; Florida, EE. UU., registra rendimientos de fruta en promedio de 25 t ha⁻¹ (Schwentenius y Gómez, 2005).

Los atributos que se toman en cuenta para definir la norma de calidad son: tamaño, porcentaje de la superficie con el color verde oscuro, rugosidad de la cáscara, madurez y apariencia del fruto, el cual es de forma globosa a ovalada, con un diámetro polar entre 50 y 75 mm y entre 40 y 62 mm de diámetro ecuatorial, presenta una leve protuberancia estilar, de cáscara lisa gruesa y resistente, de color que va de verde oscuro brillante a amarillo, de pulpa jugosa y sabor ácido, sin semilla. Un fruto de buena calidad, es aquel que presenta la mejor apariencia física, bien formado y que cumple con un proceso de selección muy riguroso. El Pliego de Condiciones para el uso de la marca Calidad Selecta, define tres defectos: 1. Defecto menor: es aquel que no afecta en forma considerable la aceptación del limón por el consumidor; puede ser rozaduras, raspaduras, heridas cicatrizadas u otros que sean superficiales y de escasa extensión; 2. Defecto mayor: es aquel que reduce en forma considerable la aceptación del limón por el consumidor; puede presentar evidencias de plagas y enfermedades, magulladuras u otros que no afecten la pulpa de la fruta; 3. Defecto crítico: es aquel que afecta la pulpa del limón y puede ocasionar el rechazo mismo del consumidor; consiste en estados avanzados de ataques de plagas o enfermedades, grietas, heridas no cicatrizadas u otros (Norma Mexicana NMX-FF-077-1996).

En el Codex Stan 123 se definen cinco calibres con base en su diámetro ecuatorial: 58-67 mm (1), 53-62 mm (2), 48-57 mm (3), 45-52 mm (4) y 42-49 mm

(5) (Codex-Alimentarius, 2008). Alia *et al.* (2009) observó que durante los meses de octubre a diciembre el diámetro polar es superior a los 70 mm, mismos que disminuyeron en los frutos cosechados en enero, manteniéndose entre los valores de 58 y 67 mm hasta agosto, el diámetro ecuatorial mostró valores de 58 mm en los meses de octubre a febrero y se mantiene el resto de los meses entre 49.7 y 56.7 mm.

El color es un indicador visual de la calidad de las frutas y hortalizas a considerar en el mercado, de ahí que las investigaciones y en este caso los tratamientos deben cuidar de esta variable, la cual es determinada con el colorímetro, donde arroja los datos de L, a y b, considerando que L indica la luminosidad del color del fruto y a-b, ayudan a indentificar el color y su tonalidad con IS (Índice de Saturación) y °Hue, siendo el primero la saturación del color mostrado por °Hue indicador de color (Shewfelt, 2003). De acuerdo con la Norma Mexicana NMX-FF-077-1996 y el Pliego de Condiciones para el uso de la marca Calidad Selecta, el color debe ser verde oscuro. El porcentaje de superficie verde solicitada en los diferentes mercados de exportación son los siguientes: Estados Unidos: 70%, Europa 80% y Asia 90%. Se han desarrollado varias escalas para evaluar el color, la más utilizada es la escala del solido de colores (CIE L* a* b*) (Shewfelt, 2003).

En la apariencia de un fruto se pueden considerar diferentes factores, a su vez, existen múltiples escalas utilizadas de manera comercial, una de ellas es la propuesta por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) que nos indica la apariencia de un fruto, considerando su color y daños externos, sus valores de esta oscilan entre 1 y 10, siendo que este último valor es la máxima calificación o indicador de buena apariencia. En la práctica comercial, existen cinco categorías de clasificación de la fruta por su calidad, las cuales son determinadas de acuerdo con las exigencias de los diferentes mercados. De esta manera, se designa como “primera”, a la fruta destinada a Japón, “segunda” a la fruta correspondiente a Europa, “tercera” la que se destina a Estados Unidos, “cuarta” y “Torreón” al mercado nacional (Schwentesiuss y Gómez, 2005).

La Norma Mexicana NMX-FF-077-1996, indica que el contenido mínimo de jugo el limón persa debe ser de 42% en relación a su masa total del fruto (peso), para su comercialización. En un estudio realizado se obtuvieron valores superiores a 42% de jugo, dado que el valor mínimo fue de 46.3% en el mes de diciembre y el valor máximo fue de 52.3% en el mes de junio (Alia-Tejacal *et al.*, 2009).

De manera comercial, el grosor de la cáscara indica el contenido de jugo en los frutos, mediante una correlación negativa (Alia-Tecajal *et al.*, 2009). Castellanos *et al.* (2016) reportaron valores que oscilan entre 2.57 y 2.60 mm de grosor de cáscara en frutos de limón persa. En frutos de *Citrus aurantifolia* Swingle, Solís y Tomalá, (2010) reportan valores que van de 1.28 a 2.94 mm. Por otra parte, Undurraga *et al.*, (2007) reporta valores de 0.64 y 0.66 mm de grosor de cáscara en frutos de limón Eureka.

Avilán y Rengifo, (1998) mencionan que dentro de los parámetros importantes para calidad están los sólidos solubles totales (°Brix). De acuerdo con la Norma Mexicana NMX-FF-077-1996 los sólidos solubles totales deben estar en un rango mínimo de 6.8%. Solís y Tamalá (2010), en una investigación en *Citrus aurantifolia* Swingle, obtuvieron valores oscilantes entre 8.11 y 7.45 °Brix. Por otra parte, Castellanos *et al.* (2016) reporta un valor de 8.96 °Brix en limón persa.

Los ácidos son los sólidos solubles contenidos en mayor cantidad, después de los azúcares y tienen un papel importante en el sabor del jugo, pues lo acentúan. Los principales ácidos presentes en el jugo de limón, son el cítrico, málico y tartárico predominando el primero (Avilán y Rengifo, 1998). La Norma Mexicana NMX-FF-077-1996, indica que la acidez titulable mínima para el punto de sazón o de madurez en limón persa no debe ser menor a 7% de ácido cítrico. Aunque se han reportado valores de 6.0, 6.5, 6.7 y 7.9 en limón persa cosechados en regiones productoras de Brasil, India y Costa Rica (Alfredo *et al.*, 2007). Korndorfer y Lepsch (2001) mencionaron que al aplicar silicato de potasio en fresa se inducen cambios metabólicos en los frutos, incrementándose el ácido málico y cítrico, además disminuyen los contenidos de fructuosa, glucosa y sacarosa.

4.2. Fenología del cultivo

La mayor producción de limón se concentra en los meses de junio y julio, y debido a la alta producción, el precio de venta del producto se reduce. La cosecha más importante es producto de las bajas temperaturas del invierno, con lo que se presenta la mayor floración en febrero-marzo (Almaguer, 2002).

Los cítricos presentan una estacionalidad de la producción bien marcada, al respecto el limón persa presenta una temporada de baja producción durante los meses de invierno (alrededor del 15% del total anual) y un volumen abundante de fruta que se cosecha durante los meses de verano-otoño (Curtí-Díaz, 2009).

4.3. Requerimientos edafoclimáticos

El limón persa crece bien en las áreas bajas de las regiones cálidas tropicales y subtropicales de todo el mundo (Malo *et al.*, 2015). Pero se consideran una serie de factores independientes entre sí, que en conjunto determinan todas las condiciones óptimas de cada lugar; los factores tomados en cuenta son:

Temperatura: requiere temperaturas de 22 a 28°C, con mínima de 5 a 12°C y máxima de 37 a 39°C (Baradas, 1994).

Precipitación: requiere de 900 a 1,200 mm de precipitación anual para el desarrollo de la plantación, para no tener problemas hídricos se recomienda de 1,200 a 2,000 mm anuales (Benacchio, 1992).

Humedad relativa: influye en la calidad de la planta y fruta, entre 80 y 90%, es favorable para el crecimiento de los cítricos, ya que, la planta transpira menos y el requerimiento de agua es menor, sin embargo, también puede favorecer el desarrollo de enfermedades fungosas y algunas plagas (Albrigo, 1993).

Vientos: tienen influencia negativa en las plantaciones, ya que, provoca la caída de las flores o frutos, debido a que estos por lo general, se encuentran en las puntas de las ramas exteriores. También influye de manera negativa en la copa del

árbol, si se tienen árboles con producciones altas, las ramas tienden a quebrarse, y esto permite la entrada de enfermedades (Amorós, 1999).

Luz: la luminosidad es importante para los cultivos, les permite realizar una buena fotosíntesis, desarrollo de un buen color y brillo en los frutos, los cítricos requieren de 1,600 a 2,000 horas luz por año (Baradas, 1994).

Suelo: los prefiere del tipo calcáreo, se recomienda una profundidad efectiva, que sea superior a dos metros, para garantizar el desarrollo de raíces; el mal drenaje puede ocasionar problemas fitosanitarios y en ciertos casos salinización en el suelo; debe tener baja pedregosidad, tanto en la superficie como en el perfil del suelo, ya que limita la nutrición; libre de salinidad, ya que, influye en el crecimiento y producción (Vanegas, 2002).

pH: se desarrolla bien en suelos con pH entre 5.5 y 8.5, siendo el óptimo de 5.5 a 7.0 (Maldonado *et al.*, 2001).

4.4. Requerimientos nutrimentales

La demanda nutrimental está determinada por factores como edad de la plantación, portainjerto, producción, características físicas y químicas del suelo. Algunas herramientas que coadyuvan en el manejo de la nutrición son el cálculo de la remoción de nutrimentos por la cosecha y los programas de fertilización (Mellado-Vázquez *et al.*, 2015).

Los cítricos absorben nutrimentos durante todo el año, pero la absorción es más acentuada durante las etapas de floración, formación de fruta y posterior a la cosecha (Molina, 2000). Para obtener rendimientos altos en una huerta de limón persa y con fruta de calidad, es necesario que en cada ciclo de producción se repongan los nutrimentos que el árbol absorbe del suelo. El limón persa necesita de 15 elementos para su buen desarrollo, estos son: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), zinc (Zn), boro (B), hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu) y molibdeno

(Mo), las plantas toman los primeros tres elementos del aire y del agua, y los 12 restantes del suelo vía raíz (Curtí-Díaz *et al.*, 2000).

El nitrógeno es considerado fundamental en las plantas debido a que es constituyente de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, alcaloides y almidón y otras sustancias importantes (Bidwell, 1979). Tiene influencia en el crecimiento y rendimiento de las plantas (Wutscher y Smith, 1993). En limón persa, la deficiencia de este elemento se manifiesta por amarillamiento uniforme de las hojas, en un principio las hojas jóvenes presentan color verde claro (INIFAP, 1996).

El fósforo es parte esencial de muchos glucosfosfatos que participan en la fotosíntesis, la respiración y otros procesos metabólicos; también forma parte de nucleótidos (RNA y DNA) y de fosfolípidos presentes en las membranas. De igual manera es esencial en el metabolismo energético, debido a su presencia en las moléculas de ATP, ADP, AMP y pirofosfato (PPI) (Salisbury y Ross, 1994). La deficiencia de este elemento es más fácil de distinguirse en los frutos de limón persa que en las hojas, cuando los frutos han sobremadurado y son de color amarillo, tienen el lóculo hueco (INIFAP, 1996). De acuerdo con Servaz y Raymond, (2015) la disponibilidad de fosfato aumenta después de la fertilización con silicio.

El potasio es activador de muchas enzimas que son esenciales en la fotosíntesis y la respiración, además de que activa enzimas necesarias para formar almidón y proteínas, este elemento también es tan abundante que contribuye de manera importante al potencial osmótico de las células y, por lo tanto, a su turgencia (Salisbury y Ross, 1994). Se caracteriza por su gran movilidad dentro de la planta, esta siempre asociado a los tejidos, donde se producen cambios bioquímicos que requieren gran cantidad de energía como pueden ser las hojas y frutos jóvenes, también interviene en la traslación de carbohidratos, proteínas y otras sustancias (Vanegas, 2002).

Los cítricos contienen altas concentraciones de calcio (Rodríguez, 1996). De 70 a 80% del calcio en la planta es insoluble en agua, contrariamente al potasio; se

encuentra en formas de oxalato de calcio y pectato de calcio. Es un elemento de gran importancia en el desarrollo de las raíces, en el funcionamiento de la membrana celular y en la activación de enzimas como amilasas y fosfatasas (Vitti *et al.*, 2006). El calcio es, de los elementos esenciales, el más inmóvil; es uno de los principales componentes de la pared celular, particularmente de la sustancia cementante. Es esencial en la división y alargamiento celular y no es retribuido a tejidos jóvenes. La deficiencia de calcio en cítricos no es muy conocida (Du-Plessis, 1992).

Existen elementos benéficos que a pesar de no ser esenciales más que para un limitado de taxas, estimulan el crecimiento o mejoran los rendimientos en determinadas especies. La clasificación de elementos benéficos de acuerdo a su definición incluye elementos como el Sodio (Na), Silicio (Si), Cobalto (Co), Selenio (Se), Aluminio (Al), Vanadio (Va) y Titanio (Ti). (Kaur *et al.*, 2016).

El silicio forma parte del 40% de todos los minerales comunes. Los silicatos de aluminio, calcio y magnesio son los constituyentes principales de arenas, rocas y suelo en forma de feldespatos, anfíboles, piroxenos, micas y zeolitas (Alcantar y Trejo, 2013). Las formas de silicio activas, física y químicamente en el suelo son representadas por ácidos monosílicos solubles y rápidamente adsorbibles, ácidos polisílicos y compuestos organosilicados (Matichenkov y Ammosova, 1996). Las plantas y microorganismos principalmente absorben el silicio en manera de ácido monosilícico, que es producto de la disolución de minerales ricos en silicio (Matichenkov y Calvert, 2002).

La aplicación de silicio influye en la dinámica de diferentes elementos en el suelo, el resultado de las reacciones puede ser positivo aliviando la toxicidad por metales pesados, y puede ser negativo con la disponibilidad reducida de varios nutrientes esenciales para las plantas. La capacidad del silicio para influir en la dinámica de los elementos en el suelo se debe a la alta capacidad de adsorción de la forma de los materiales ricos en silicio que se encuentran comúnmente y se agregan al suelo (Servaz y Raymond, 2015).

Mellado-Vázquez *et al.* (2015) mencionan que por cada tonelada de fruta de limón persa producida, se extraen las siguientes cantidades de macronutrientes: 2.10 kg de N; 0.24 kg de P; 2.47 kg de K; 1.05 kg de Ca; 0.21 kg de Mg, mientras que de micronutrientes: 0.15 g de S; 1.29 g de Na; 0.75 g de Mn; 2.98 g de Fe; 1.37 g de Zn; 0.80 g de Cu y 1.92 g de B.

En cuanto a Silicio aún no se encuentran reportes de cuanto es lo que absorbe el cultivo de limón persa.

4.5. Silicio en el ecosistema

El silicio en la corteza terrestre está presente en muchos lugares. Hace más de 100 años, el hombre vinculó el silicio fundamentalmente a su estilo de vida con su uso en el hogar, en aplicaciones industriales y en la construcción (Vasanthi *et al.*, 2012).

El silicio (Si), es considerado el segundo elemento mineral más abundante en el suelo y en la corteza terrestre (Rodrigues y Datnoff, 2015). Los compuestos de silicio ocupan más del 60% de la composición del suelo y su concentración en la solución del mismo en la forma de ácido silícico oscila entre 3.5 y 40 mg de silicio por litro, encontrándose en suelos arenosos en mayor cantidad (Alcántar y Trejo, 2013).

En la agricultura, el silicio es un nutriente para el cual una enorme cantidad de literatura examina el valor de la fertilización con silicio para mejorar la productividad y la salud general de los cultivos. Es abundante en el suelo, pero se encuentra principalmente en forma inerte y, por lo tanto, no está disponible para la absorción de la planta (Epstein, 1999).

4.6. Importancia del silicio en las plantas

El silicio aún no figura en la lista de los elementos esenciales para el crecimiento de plantas superiores (Liang *et al.*, 2015). Aún cuando se ha demostrado que es un elemento "esencial desde el punto de vista agronómico" que

podría aumentar los rendimientos, en el cultivo de caña, en Hawai se ha incrementado el rendimiento de 10 a 50%, y la calidad en algunos cultivos por ejemplo en la fresa (Vulavala *et al.*, 2016).

De igual manera el silicio puede ocasionar efectos benéficos en cuanto a la tolerancia a la toxicidad por metales pesados, los silicatos pueden convertir las fracciones solubles e intercambiables de metales en el suelo en formas químicas estables, disminuyendo la biodisponibilidad del metal. Dicha reducción en la biodisponibilidad del metal se atribuye a la precipitación, la humificación y las reacciones redox (Sommer *et al.*, 2006).

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 (Ma *et al.*, 2006).

En los últimos 20 años, la documentación científica sobre los beneficios del silicio para los cultivos ha ayudado a establecer la fertilización con silicio como una práctica agronómica en muchos suelos agrícolas de todo el mundo (Tubana *et al.*, 2016).

Para promover la producción de cultivos, se han tomado varias fuentes de silicio como fertilizante de silicio, incluido el silicato a base de escoria, el potasio soluble o el silicato de sodio, el silicato de potasio de liberación lenta fabricado de mineral de silicato de aluminio (Liang *et al.* 2015).

4.7. Impacto del silicio en la fisiología vegetal

El silicio es un metaloide tetravalente (Epstein, 1994). Sin embargo, la mayoría del silicio existe en el suelo en forma de aluminosilicatos cristalinos insolubles, que no están disponibles directamente para las plantas (Liang *et al.*, 2015). Las plantas absorben el silicio en forma de molécula no disociada de ácido

silícico (H_4SiO_4), que es la única especie molecular que probablemente atraviese la membrana plasmática de la raíz de la planta a intervalos de pH fisiológicos (Raven, 2003).

El contenido de silicio en las plantas varía entre especies, oscilando, entre 0.1% y 10% del peso de biomasa seca (Ma *et al.*, 2002). Cien veces más alta que el fósforo disponible para la planta (Gunnarsson y Arnorsson, 2000). En las plantas superiores (Angiospermas), sólo unos pocos taxones muestran una acumulación de silicio alta (2% a 4% de silicio; Cucurbitales, Urticales y Commelinaceae) alta (> 4% de silicio; Cyperaceae, Poaceae y Balsaminaceae) a moderada nivel bajo (Hodson *et al.*, 2005).

Takahashi *et al.*, (1990) dividieron las plantas en función a su concentración de silicio en: 1. acumuladoras, 2. intermedias y 3. no acumuladoras (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación de plantas en función del contenido de silicio.

Tipo de planta	Concentración de Silicio %	Tipo de absorción	Ejemplos
Acumuladoras de silicio	10-15	Activa	Arroz
Intermediarias	1-5	Pasiva	Cereales, caña de azúcar
No acumuladoras de silicio	< 0.5	Excluyente	Mayoría de dicotiledóneas

Ancaltar y Trejo, 2013.

El transporte pasivo por difusión es facilitada a través de canales proteínicos, es un componente dependiente de la concentración de la captación de silicio, que está presente en todas las especies de plantas independientemente de su capacidad para acumular silicio (Raven, 2003). La absorción activa, un componente independiente de la concentración del transporte de silicio, se ha identificado en varias especies de plantas que acumulan silicio, incluyendo acumuladores tanto altos como intermedios (Yan *et al.*, 2018).

En células acumuladoras de zinc y silicio han sido identificadas invaginaciones citoplasmáticas y vesículas vacuolares. Las invaginaciones celulares están formadas por el plasmalema y el tonoplasto, incluyendo pequeñas partes del citoplasma entre ambas membranas (Neumann y Zur-Nieden, 2001). Sin embargo, en todos los casos sólo una membrana participa en tales procesos.

El silicio es translocado directamente desde el espacio extracelular hasta la vacuola, sin el paso por una membrana y citoplasma. Mediante este mecanismo las células son capaces de acumular grandes cantidades de silicio, alcanzando concentraciones que provocan su precipitación. En las plantas hiperacumuladoras de zinc, este metal es temporalmente almacenado como silicato de zinc en el citoplasma, el cual es inestable y lentamente degradado a SiO_2 ; los correspondientes precipitados fueron hallados en el citoplasma, mientras que los acumulados de zinc dentro de la vacuola; para la penetración de silicio en las células existen dos vías: 1. Absorción del citoplasma mediante un transportador y 2. Absorción directa en la vacuola mediante un nuevo proceso endocitótico (Neumann y De-Figueiredo, 2002).

El silicio absorbido por las raíces en forma de ácido monosilícico (H_4SiO_4) es transportado al vástago y depositado en las hojas, se incorpora a las células dentro de la pared celular, especialmente en la epidermis, células del estoma y del tricoma, o bien es depositado, junto con otros elementos, lo que resulta en un incremento de depósitos amorfos conocidos como fitolitos (Epstein, 1999). De manera generalizada se acepta que el ácido silícico penetra a las plantas de la misma forma en que lo hace el agua, es decir, acarreado mediante el flujo transpiratorio hacia las terminales de transpiración. Al evaporarse el agua, el ácido silícico se precipita como fitolitos, los cuales son depositados en las paredes celulares (Raven, 2003).

Usualmente el silicio es depositado en cantidades mayores en los tejidos que pierden más agua, lo que sugiere que es transportado de manera pasiva desde las raíces hasta los vástagos (Ma *et al.*, 2002).

Como acumulador de silicio típico y planta modelo en la investigación, el arroz podría acumular silicio en brote a un nivel alto en relación con otras plantas. Investigaciones recientes mostraron que la alta acumulación de silicio en arroz estaba relacionada con los transportadores de silicio y las bandas de Caspary (Sakurai *et al.*, 2015).

4.8. Aplicación de silicio en cultivos

El uso de silicio en los cultivos de gramíneas y frutales se ha ampliado porque puede reducir los ataques de plagas, aumentar la producción y mejorar la calidad del producto (Costa *et al.*, 2015).

Se ha informado que la mayoría de las monocotiledóneas, como arroz (Tamai and Ma, 2003), trigo (*Triticum aestivum*) (Rains *et al.*, 2006), hierba de campo (*Lolium perenne*) (Nanayakkara *et al.*, 2008), cebada (*Hordeum vulgare*) (Nikolic *et al.*, 2007), maíz (*Zea mays*) (Liang *et al.*, 2006) y banano (*Musa spp*) (Henriet *et al.*, 2006), así como algunas plantas ciperáceas, toman el silicio activamente. Por el contrario, la mayoría de las dicotiledóneas toman silicio de forma pasiva (Takahashi *et al.*, 1990), mientras que algunas dicotiledóneas como el pepino (*Cucumis sativus*) (Nikolic *et al.*, 2007), girasol (*Helianthus annuus* L.) y calabaza de cera (*Benincasa hispida* L.) (Liang *et al.*, 2006) toma silicio activamente. Por otro lado, se encuentra que algunas dicotiledóneas como el jitomate (*Lycopersicon esculentum*) y el haba (*Vicia faba*) excluyen el silicio de sus raíces (Nikolic *et al.* 2007).

En Costa Rica se realizó un estudio, en el cual se evaluó el efecto de la aplicación de silicio en la fertilidad del suelo, el rendimiento y la calidad molinera en la variedad de arroz CR-447. Dentro de los tratamientos establecidos se aplicó silicio al suelo y silicio foliar. Como fuente de silicio se utilizaron Tecnosilix® en polvo al 70% para ser aplicado al suelo y liquido concentrado (Tecnosilix® 40% SiO₂ y 36% MgO) aplicado a nivel de hojas del cultivo. Los resultados mostraron que no hubo efecto del silicio en la fertilidad del suelo, ni en las variables de rendimiento y calidad

molinera (entonces es inútil aplicar el silicio en arroz bajo las condiciones del estudio) (Parménides, 2012).

En Costa Rica se evaluó el uso de fertilizantes líquidos con silicio, calcio y magnesio sobre el crecimiento del sorgo (*Sorghum bicolor*) en un Utisol (suelos lixiviados y ácidos), bajo invernadero. Se utilizaron dos silicatos de potasio, carbonato de calcio y óxido de magnesio, todos en líquidos aplicados al suelo en dosis de 2 y 4 mL maceta. Las fuentes de silicio no tuvieron efectos significativos sobre la biomasa del sorgo, a excepción del silicato de potasio con calcio y magnesio en dosis de 4 mL maceta, que además produjo un incremento significativo en la absorción de potasio (Araya *et al.*, 2015).

En Chile se evaluó el fertilizante químico-orgánico Quick Sol® a base de silicio hidrosoluble, sobre el cultivo de ejote (*Phaseolus vulgaris*) cv. Magnum y su incremento en producción; el presente estudio se desarrolló bajo invernadero. En el ensayo de germinación se obtuvo un mejor resultado para el tratamiento con Quick Sol®, en el caso del porcentaje de emergencia se observaron diferencias significativas, a su vez para los parámetros productivos se obtuvo diferencias significativas para el número, largo, ancho y grosor de vainas, siendo la aplicación al suelo del fertilizante el que presentó mejores resultados, sin embargo para el peso de la vaina evaluado no se obtuvo diferencias significativas. Para el rendimiento final del cultivo se obtuvo una producción media de 2, 76 kg m⁻², observado con la aplicación al suelo del fertilizante (Saavedra y Fernández, 2011).

En México, en el cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.), se evaluó el efecto sobre rendimiento, estado nutrimental y calidad de frutos cosechados de fresa cuando se aplicaron siete diferentes concentraciones de silicio (0, 25, 50, 75 mg.L⁻¹ en solución nutritiva y 56, 112 y 224 mg.L⁻¹ al follaje). En donde los resultados mostraron que el rendimiento se incrementó en 2.3%, la mayor área foliar por planta se midió con la aplicación de 50 mg.L⁻¹ de silicio en solución nutritiva, incrementando el 30%. La concentración de azúcares solubles totales en el follaje, se incrementó 65.8% con la aplicación periódica de 224 mg.L⁻¹ de silicio asperjado al follaje. El

estado nutrimental de las plantas no se afectó en relación con el N, K, Ca y Mg; el P mostró una tendencia a incrementarse a la vez que la concentración de silicio en las aspersiones fue incrementándose. La acumulación de nutrimentos en el fruto no se afectó de manera significativa, excepto el Ca, el cual disminuyó cuando se aplicaron 224 mg.L⁻¹ de silicio al follaje. La calidad de los frutos cosechados no mostró diferencias, de tal forma que el contenido de sólidos solubles (°Brix), ácido cítrico y el índice de redondez fueron similares. La concentración de azúcares solubles totales en el fruto se incrementó cuando se aplicó el silicio a través de la solución nutritiva (Arce, 2012).

En Brasil, en cultivo de mango "Palmer". Diferentes cantidades de aplicaciones de Agrosilicio no influyeron en la enfermedad de antracnosis en hojas o la incidencia de plagas trips en inflorescencias o en el contenido de silicio, calcio y magnesio del suelo y en las hojas. La mayoría de las características vegetativas, productivas y de calidad de la fruta en mangos 'Palmer' no se vieron influenciadas por diferentes cantidades de Agrosilicio, pero hubo un aumento cuadrático en el diámetro de la fruta, en el cual el mayor diámetro se asoció con 1600 kg ha⁻¹ de agrosilicio (Costa *et al.*, 2015).

En Egipto, se realizó un estudio en naranjo Navel, se probó el efecto de diferentes concentraciones (0.05 y 0.1 y 0.2%) y las frecuencias de aplicación (dos veces o tres) de silicato de potasio en la fructificación. Llevar a cabo dos o tres pulverizaciones de silicato de potasio de 0,05 a 0,2% tuvo una promoción importante en todos los aspectos de crecimiento vegetativo, pigmentos de las hojas y nutrientes, porcentaje de fructificación, rendimiento y características físicas y químicas de las frutas durante el tratamiento de control. La promoción estuvo relacionada con el aumento tanto en las concentraciones como en las frecuencias de aplicación del silicato de potasio. Todas las características investigadas no se vieron afectadas por el aumento de las concentraciones de silicato de potasio de 0,1 a 0,2% y las frecuencias de aplicación de dos a tres veces. La realización de dos pulverizaciones de silicato de potasio al 0,1% a mediados de marzo y abril dio

los mejores resultados con respecto al rendimiento y la calidad de la fruta de los árboles de naranja Navel cultivados en Bani-Suef, Egipto (Randa, 2016).

En Egipto, se realizó un experimento en naranjos Olinda Valencia, estudiaron la influencia de la aplicación foliar de silicato de potasio y silicato de magnesio, cada una en dos concentraciones, ya sea solo o en combinación en el crecimiento vegetativo, el rendimiento, la calidad y el estado nutricional de la naranja Olinda Valencia. Todos los parámetros de crecimiento evaluados: (longitud del brote, diámetro, número de hojas por brote y medidas del dosel, es decir, altura del árbol, diámetro y volumen) se mejoraron con todos los tratamientos de silicato investigados, sin embargo, la combinación de fuentes de silicato de K y Mg cada una a su mayor concentración (4.0 y 0.8% respectivamente) fue el más efectivo particularmente con 3 parámetros de dosel (altura del árbol, diámetro y volumen). El porcentaje de fructificación y retención de los frutos cosechados por tonelada aumentaron significativamente con todos los tratamientos con silicato. Sin embargo, el de silicato de potasio solo al 2.0% tendió a ser más efectivo para aumentar el peso de los frutos por árbol. Las propiedades físicas de la fruta como peso promedio de la fruta, índice de forma, volumen de jugo, grosor de la cáscara, firmeza y color a medida que aumentaron los valores del ángulo de matiz por varios tratamientos de silicato, excepto por el índice de forma, el color de la cáscara fue mejorada. El silicato al 2,0% fue el más efectivo, excepto por el grosor de la cáscara y su firmeza. En cuanto a las propiedades químicas de la fruta como % de sólidos solubles totales, % de acidez, la proporción de sólidos solubles totales / ácido en la mayoría de los casos se redujeron significativamente con respecto al control (Fatma y Mustafa, 2017).

En Egipto, en naranjos Valencia se realizaron cuatro pulverizaciones de ácido bórico al 0,05% y/o sulfato de potasio al 0,5% solo o en combinación con la aplicación de silicato de potasio al 0,1% y selenito de sodio a 50 ppm. Los resultados revelaron que el uso de silicio y/o selenio junto con el boro y el potasio mejoran de manera efectiva los caracteres de crecimiento, el estado nutricional de los árboles,

el rendimiento, las características físicas y químicas de las frutas en comparación con el uso de boro y/o potasio solo. La pulverización de todos los nutrientes, ya sea individualmente o en todas las combinaciones, fue efectiva con respecto de la no aplicación (Ibrahim y Al-Wassfy, 2014).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Localización del experimento

La presente investigación se realizó en una huerta comercial de limón persa, perteneciente a la empresa “Limón Persa El Ensueño S. de S.S.”, localizada en el municipio de Cotaxtla, Veracruz, con ubicación geográfica entorno a las siguientes coordenadas geográficas 18°48' de latitud norte, 96°21' de longitud oeste y 72 m de altitud (Figura 1).

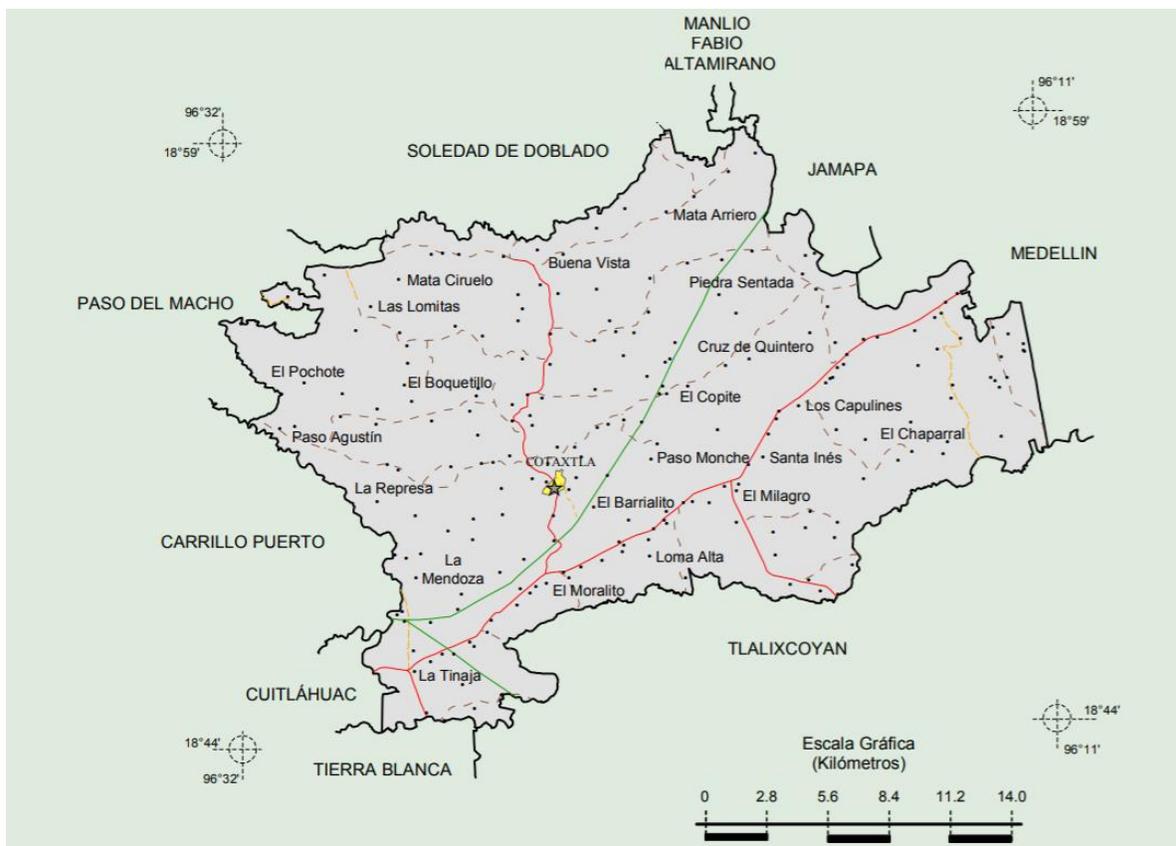


Figura 1. Localización geográfica del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

Fuente: INEGI, 2010.

El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw''_1 (w) (i') g); el régimen de lluvias comienza en el mes de mayo y termina en octubre, con

temperatura promedio anual de 25.8°C, máxima de 32.1°C y mínima de 19.6°C, con precipitación media anual de 1,123 mm (CNA, 2010); de acuerdo con la normal climatológica “Los Capulines”, Cotaxtla, Veracruz (1981-2010) la distribución anual de los mm de la lluvia y las temperaturas se muestran en la Figura 2.

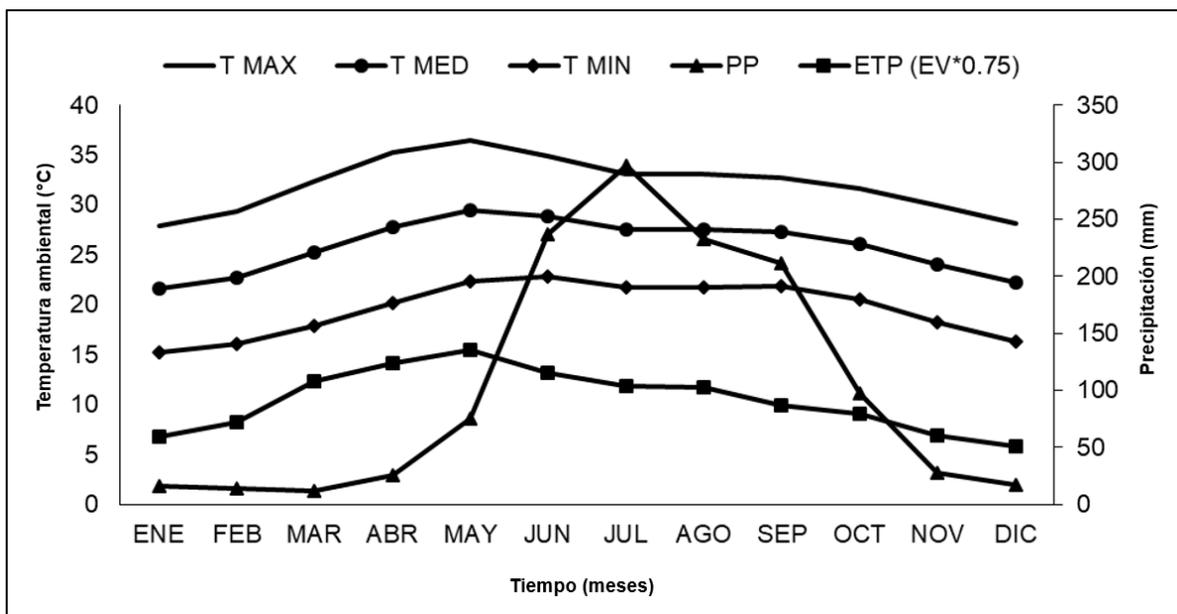


Figura 2. Gráfica de temperatura ambiental y precipitación “Los Capulines”, Cotaxtla, Veracruz.
Fuente: CNA, 2010.

5.2. Material vegetal y manejo de la huerta

Los tratamientos fueron aplicados en una huerta de limón persa en producción plena (*Citrus latifolia* Tan.) injertado en limón Volkameriano (*Citrus volkameriana* Pasq.), con seis años de ser establecida y marco de plantación de 6 x 7 m.

A los árboles se les suministró anualmente 1.2 kg de nitrógeno, 0.6 y 0.6 kg de fósforo y potasio, respectivamente, la fertilización fue suministrada en tres aplicaciones en los meses de agosto, diciembre y enero; en la primera aplicación se suministró el 33% del N, 100% de P y K; para la segunda y tercera aplicación el resto del N; las fuentes fertilizantes utilizadas fueron sulfato de amonio, fosfato

diamónico y cloruro de potasio; además, se suministraron micronutrientes de manera foliar con el producto comercial PoliquelMulti® en dos ocasiones (agosto y diciembre).

Previo al inicio del experimento (enero 2017) se realizó poda de sanidad y de formación del árbol; también se realizó el respectivo manejo fitosanitario. En cuanto a riego, la huerta contó con sistema de riego por microaspersión y riego por auxilio en épocas críticas de producción. En la Figura 3 se muestran de manera general las características de la parcela.



Figura 3. Características de la huerta comercial de limón persa (parcela experimental).

5.3. Tratamientos

Se aplicaron cinco tratamientos que se describen en el Cuadro 2; de manera general, se utilizaron dos productos comerciales a base de silicatos de calcio y potasio, estos fueron Supa Silica® de la empresa Agrichem (20% de silicio y 15% de potasio) y Barrier® de Cosmocel (24% de silicio y 10% de calcio).

Ambos productos fueron suministrados de manera quincenal (Cuadro 3) vía foliar y al suelo en forma de *drench* (mojado a la base del tallo), lo anterior hasta el momento de la cosecha (mayo 2017), resultando siete aplicaciones. A continuación se muestran los tratamientos aplicados, las dosis utilizadas y el testigo.

Cuadro 2. Tratamientos utilizados.

Tratamiento	Dosis
T1. Testigo	Sin aplicación
T2. Silicato de calcio (foliar)	250 ppm de Si (Barrier ® 1.30 mL L ⁻¹)
T3. Silicato de potasio (foliar)	250 ppm de Si (Supa Silica ® 1 mL L ⁻¹)
T4. Silicato de calcio (al suelo)	Barrier ® 37 mL árbol ⁻¹
T5. Silicato de potasio (al suelo)	Supa Silica ® 37 mL árbol ⁻¹

Cuadro 3. Aplicación de tratamientos de manera quincenal.

Mes	Día de aplicación	Días después de anthesis	Etapas fenológicas
Febrero	10	0	Inicio de floración
Marzo	10	30	Fruto en desarrollo “canica”
	24	45	Fruto en desarrollo
Abril	7	60	Fruto en desarrollo
	21	75	Fruto en desarrollo
Mayo	5	90	Fruto en desarrollo
	19	115	Fruto en desarrollo
	20	116	Cosecha
Junio	17	144	Cosecha

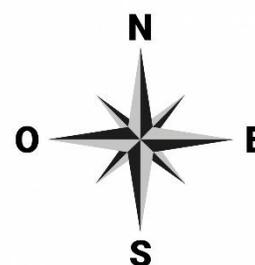
5.4. Diseño experimental

Los tratamientos fueron aplicados a las unidades experimentales (un árbol), con tres repeticiones por tratamiento, los cuales fueron arreglados en un diseño

experimental de bloques al azar, considerando que la dirección de bloques se encuentra ubicada de norte-sur y el factor de variación principal (pendiente) en dirección oeste-este, considerando al oeste como la parte más alta de la parcela. Bajo los anteriores supuestos, se consideró a cada línea un bloque o repetición, y por tanto en cada bloque fueron distribuidos de manera aleatoria los cinco tratamientos (la aleatorización fue realizada con el programa estadístico “R”). El croquis de las unidades experimentales se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Distribución de las unidades experimentales en bloques al azar.

BI	BII	BIII	BIV
T1	T5	T2	T4
T2	T1	T3	T5
T3	T2	T4	T3
T5	T4	T1	T2
T4	T3	T5	T1

5.5. Variables respuesta

5.5.1. Contenido nutrimental en frutos

Para el análisis mineral en tejidos (fruto entero), se colectaron 600 g de frutos frescos maduros y sanos de cada tratamiento, las muestras fueron depositadas en bolsas de plástico e identificadas con los números de los tratamientos, los frutos cosechados se homogenizaron hasta obtener una muestra, las cuales se analizaron en el laboratorio GISENA-LABS, el cual se encuentra ubicado en Texcoco, Estado de México.

Para la interpretación de los análisis y la generación de los índices de desviación del óptimo porcentual (DOP), se utilizó la ecuación: $DOP = A - a/a \times 100$. Donde “A” es la concentración del nutrimento en tejidos de fruto del análisis químico y “a” es la media del intervalo de suficiencia propuesta por Mellado-Vázquez *et al.* (2015).

5.5.2. Indicadores de productividad

Floración (número total): El conteo de flores fue realizado a los 18 días posteriores de la primera aplicación (18 DDA1) considerando una rama terminal en los cuatro puntos cardinales, de la parte media del árbol, cuando el 25% del dosel de los árboles se encontró cubierto con flores abiertas, se registraron los días a floración, y número de flores presentes. Para lo anterior se seleccionaron ramas vigorosas de un año con un aproximado de 20 cm, en cada punto cardinal de la parte media del árbol (cuatro brotes por árbol).

Amarre de frutos (%): para determinar el amarre de frutos se utilizaron los racimos florales previamente marcados y contabilizados; a los 23 días posteriores al conteo de flores se realizó el primer conteo (23 de marzo de 2017) de frutos amarrados, considerando al total de flores como 100%; el segundo muestreo (20 de abril de 2017) de amarre, se realizó 28 días posteriores del primero. Con el uso de la siguiente formula se estimó el porcentaje de frutos amarrados:

$$\text{Frutos amarrados (\%)} = \frac{\text{Total de frutos amarrados}}{\text{Número inicial de flores}} \times 100$$

Rendimiento (kg árbol⁻¹): las cosechas para determinar el rendimiento por árbol se realizaron a los 80 y 108 días después de la floración, se pesó el total de frutos obtenidos por árbol, utilizando báscula digital de diez kilos (Aisep, EY-2200P), los indicadores externos de cosecha considerados fueron los propuestos por la NMX-FF-077-1996 (tamaño, color, brillo y grosor de cáscara).

5.5.3. Indicadores de calidad

Peso fresco (g): se tomó de manera unitaria el peso de diez frutos por cada unidad experimental, utilizando una báscula digital de la marca (Ohaus Modelo AP210, New Jersey, USA), para posteriormente determinar un promedio.

Firmeza: se determinó a partir de los valores de compresión obtenidos mediante el uso de un texturómetro Force Five modelo FVD-30. Utilizando 10 frutos por tratamiento. Los valores obtenidos se reportarán en Newton (N) necesarios para comprimir los frutos en la zona ecuatorial.

Índice de redondez: para realizar esta determinación, se dividió el diámetro ecuatorial entre el diámetro polar por cada fruto y se obtuvo un promedio, para las medidas se utilizó un vernier digital (Metro Mek Scala).

Índice de color: se determinó con un colorímetro de reflexión Hunter Lab D-25 PC2 y con base en los parámetros L, a, b, se calculó el ángulo Hue [$\tan^{-1}(b/a)$], el índice de saturación [$S=(a^2+b^2)^{1/2}$] y el índice de luminosidad (L), de acuerdo con lo establecido por Little (1975). En el flavedo se definieron dos sitios opuestos en la zona ecuatorial de diez frutos, para realizar la medición. Para ubicar con mayor precisión el color de los frutos se realizó una gráfica tridimensional (porque señala 3 puntos: L, a, b) en SigmaPlot 13.0, y como referencia se utilizó la imagen (Figura 4) elaborada por el Dr. Sergio Chávez.

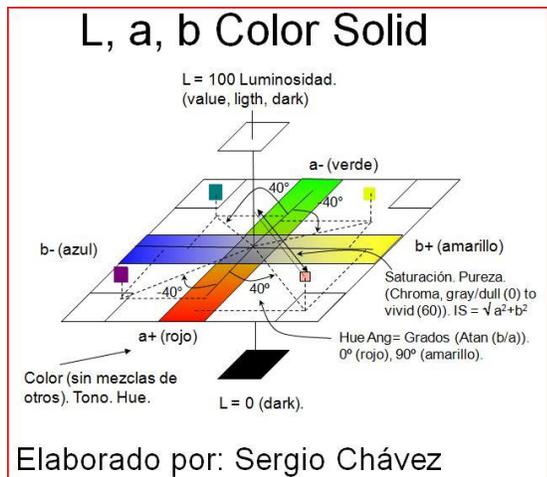


Figura 4. Sólido de colores.

Apariencia: se determinó mediante la toma de cuatro fotos por fruto, una por cada cara del fruto, se tomaron tres frutos por repetición de cada tratamiento. Las imágenes fueron tomadas por una cámara de celular Samsung, a una distancia de 25 cm. A los frutos se les asignó una calificación en base a la escala de apariencia externa propuesta por la OCDE (Figura 5).

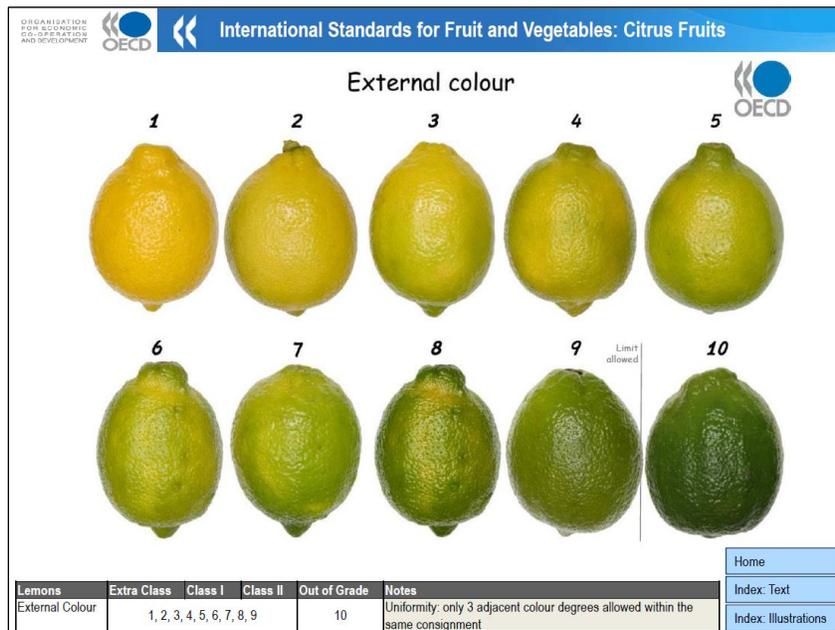


Figura 5. Escala de apariencia en frutos de limón persa (*Citrus latifolia*).
Fuente: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, 2010.

Grosor de cáscara (mm): se tomó el grosor de la cáscara (albedo y flavedo) de cinco frutos en corte transversal, esta variable fue medida con un vernier digital (Metro Mek Scala). Posteriormente, se determinó el promedio por cada repetición o unidad experimental.

Volumen de jugo (mL): se tomaron cinco frutos por cada repetición de los tratamientos, se extrajo el jugo, y se registró el volumen mediante una probeta de 100 mL.

Sólidos solubles totales (°Brix): estos se midieron por refractometría de acuerdo con la metodología propuesta por la AOAC (1980), se utilizó un refractómetro digital Atago® Modelo PR-100 en el cual se colocó una gota de jugo. Se evaluaron cinco frutos por repetición de los tratamientos.

Acidez titulable (% ácido cítrico): por titulación con NaOH 0.1N (AOAC, 1980), se determinó el porcentaje de ácido cítrico en cinco frutos por tratamiento. Se utilizaron 10 mL de jugo, se agregaron tres gotas de fenolftaleína y se titularon con NaOH con normalidad de 0.1, hasta lograr un vire a color púrpura.

Los datos se expresaron como porcentaje de ácido cítrico de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de Ácido Cítrico} = \frac{G \times N \times Mq}{mL \text{ de jugo}} \times 100$$

Donde:

G= Gasto de NaOH (mL)

N= Normalidad de NaOH (0.1)

Mq= Miliequivalentes del ácido cítrico (0.06404)

Análisis estadístico: se realizó análisis de varianza y prueba de comparación de medias (Duncan, $\alpha \leq 0.05$), para cada una de las variables antes descritas, mediante el paquete estadístico SAS® para Windows versión 9.0.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Contenido nutrimental en frutos

En el Cuadro 5, se muestra el efecto de los tratamientos en la concentración nutrimental en los tejidos de frutos, de manera general se observa que las bases intercambiales K, Ca y Mg son bajas en el fruto, y se ve reflejado en la concentración nutrimental de tejidos.

Cuadro 5. Comparación del contenido nutrimental en frutos de limón persa.

	Unidad	Referencia*	T	SiCa (f)	SiK (f)	SiCa (s)	SiK (s)
N	%	1.26	1.22	2.7	2.61	2.8	2.87
P	%	0.13	0.09	0.17	0.16	0.18	0.2
K	%	1.87	0.43	0.95	0.88	0.90	0.93
Ca	%	1.19	0.17	0.40	0.30	0.26	0.27
Mg	%	0.22	0.02	0.08	0.07	0.08	0.08
Si	%	0.22	0.0	18.13	13.21	16.60	15.32
B	ppm	1.33	4.34	10.34	7.84	6.16	7.41
Cu	ppm	0.52	1.16	2.6	2.16	4.38	3.31
Fe	ppm	2.04	6.09	12.44	9.89	14.75	12.65
Mn	ppm	0.93	1.40	3.74	2.87	2.43	2.75
Zn	ppm	1.06	3.45	6.69	5.64	6.69	8.27

T: testigo, SiCa(f): Silicato de Calcio foliar, SiK(f): Silicato de Potasio foliar, SiCa(s): Silicato Calcio al suelo, SiK(s): Silicato de Potasio al suelo. *Matichenkov y Calvert, 1999; Mellado-Vázquez *et al.*, 2015.

En la Figura 6, se muestra el porcentaje de desviación del óptimo porcentual (DOP) con respecto de los niveles nutrimentales referenciados por Mellado-Vázquez *et al.*, (2015), observando que los valores positivos muestran exceso del nutrimento y valores negativos de dicho elemento se encuentra en deficiencia, dado que entre más se acerca el valor a 0, las plantas se encuentran en menor desbalance posible. En cuanto a N se tiene exceso para los tratamientos a excepción del testigo, mostrando valor negativo de -3.71%; de la misma forma se observa en cuanto al P, fue el testigo el de mayor desbalance esto de manera

negativa (-30.7%). El K presenta valores negativos para todos los tratamientos y este no mejora con la aplicación ya sea foliar o vía suelo, lo que conllevaría a una deficiencia del cultivo de este macronutriente. El Ca y Mg presentan altas tasas negativas de desbalance, aunque en el caso del Ca es mejorado cuando se aplica vía suelo en forma de silicato de calcio. De manera general se observa que los nutrimentos (B, Cu, Mn y Zn) se encuentran disponibles para el cultivo, reflejando un exceso en los tejidos.

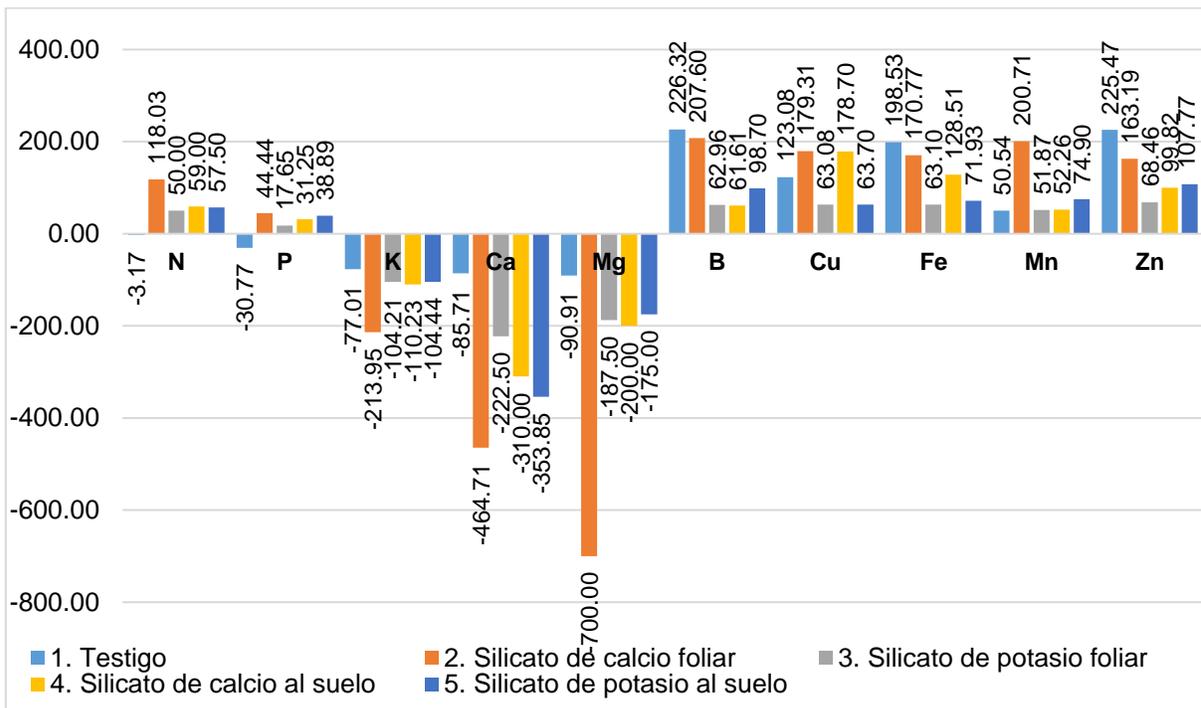


Figura 6. Desviación del Óptimo Porcentual nutrimental con respecto de los niveles de referencia.

En lo que respecta a la acumulación de silicio, se muestra hiperacumulación de dicho elemento cuando es aplicado de manera foliar o al suelo, mostrando valores de 13.2 a 18.1%, Matichenkov y Calvert (1999), reportaron que una concentración normal en tejido seco es de 0.22%. De acuerdo con Takahashi *et al.*, (1990) las plantas acumuladoras tienen una concentración de silicio de 10 a 15%, en base a los valores mostrados se puede considerar al árbol de limón como

acumulador de silicio. La influencia del silicio en la eficiencia de las plantas para absorber nutrimentos en etapas críticas, se relaciona con la hipótesis que señalan que este elemento tiene un papel de segundo mensajero, al unirse con grupos hidroxilo de proteínas involucradas en la señalización celular, participando de manera directa en la transducción de señales (Fauteux *et al.*, 2005). Y por tanto en la eficiencia de absorción de nutrimentos.

6.2. Parámetros de rendimiento

6.2.1. Floración

No existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, teniendo valores entre 12.19 y 13.23 de flores por rama. Es bien sabido que los nutrimentos esenciales para la floración son el N y P, en cuanto al efecto del silicio sobre la floración en cultivos, no existen indicios claros de que su aplicación pueda incrementar o tener algún efecto en esta variable, por lo que la aplicación del silicio no es útil para incrementar o modificar la floración en árboles de limón.

6.2.2. Amarre de frutos

Después de haber realizado dos aplicaciones de los tratamientos, se hizo la primera evaluación, en ramas previamente marcadas (considerando el 100% de floración), en la Figura 7, se observó que no hubo diferencias significativas entre tratamientos, teniendo valores fluctuantes entre 14.4% y 22.5%. Sin embargo, para la segunda evaluación, cuando ya se habían realizado 4 aplicaciones quincenales de los tratamientos. Se corroboró que fueron los tratamientos 2 y 4 estadísticamente superiores, con valores de 20.0 y 21.2% de frutos amarrados, ambos tratamientos son a base de silicato de calcio, ya sea aplicado de manera foliar o al suelo.

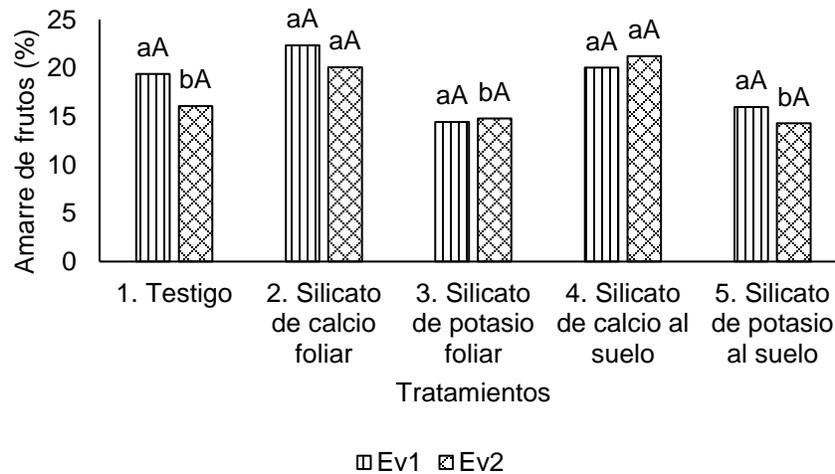


Figura 7. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en el porcentaje de amarre de frutos. Medias con literales mayúsculas diferentes presentan diferencias significativas dentro del tratamiento, en función del tiempo de evaluación; medias con literales minúsculas diferentes presentan diferencias significativas entre tratamientos (Duncan, $\alpha=0.05$). Ev1: Evaluación 1. 20 de mayo de 2017; Ev2: Evaluación 2. 19 de junio de 2017.

No se ha generado información sobre el efecto del silicio en el amarre de frutos de limón persa, sin embargo, en esta investigación se observó que los tratamientos a base de silicato de calcio, son los que obtuvieron mayor amarre. Se sabe que el Ca produce eficacia en los cultivos, lo que se ve reflejado en mayor amarre de frutos, con lo mencionado anteriormente podemos decir que los resultados de mayor amarre se deben a la presencia de Ca en los tratamientos y no necesariamente al silicio. El calcio en la célula tiende a formar compuestos quelatados (pectatos de calcio), que unen la lámina media con la pared celular y al mismo tiempo provee la elasticidad de las mismas (Marschner, 2002).

6.2.3. Rendimiento

La cosecha se realizó (81 días después de la floración), en la Figura 8 se observa que el tratamiento a base de silicato de calcio al suelo (T4) fue el que promovió el mayor rendimiento por árbol, con un valor de 10.5 kg, siendo

estadísticamente superior al resto de los tratamientos, los cuales fluctúan entre 7.7 y 9.1 kg, es decir, que al aplicar silicato de calcio en forma de drench en árboles de limón, el rendimiento por árbol se incrementa hasta por 26.6%.

Esto debido a que la aplicación de calcio al suelo mejora las características físico-químicas, aumentando el pH y neutralizando el Al intercambiable, incrementando el rendimiento de los cultivos especialmente aquellos susceptibles a la acidez del suelo (Spain *et al.*, 1975). El calcio tiene un papel importante en el metabolismo vegetal, su presencia es esencial para el crecimiento en densidad y longitud de los pelos radiculares, los cuales son de vital importancia para la absorción de nutrientes (Jaunin y Hofer, 1988).

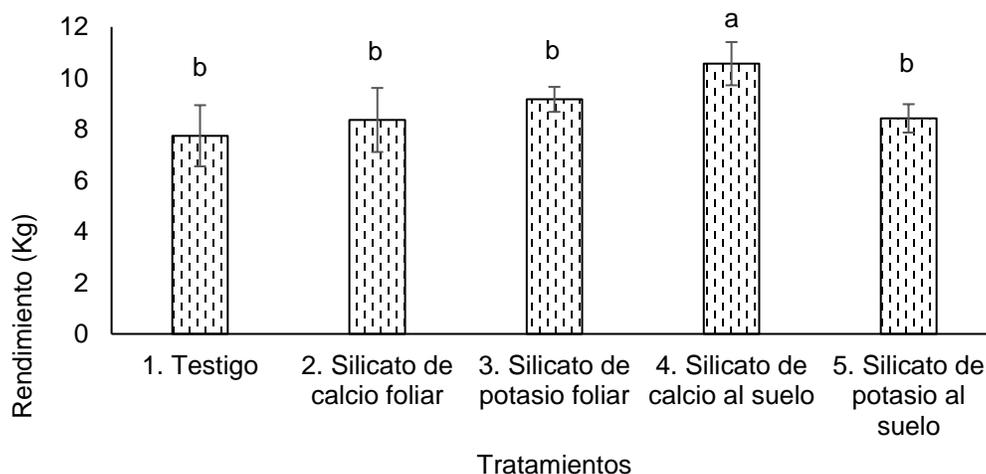


Figura 8. Efecto de los tratamientos con silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en el rendimiento de limón persa.

Ibrahim y Al-Wasfy, (2014) mencionaron que, con la aplicación de silicio en combinación con B, K y Se, en árboles de naranja Valencia, se obtuvieron rendimientos de 77.3 y 78.5 Kg, en comparación con el testigo que presentó 42 y 39.5 kg.

En cuanto al cultivo de ejote (*Phaseolus vulgaris*) cv. Magnum, Saavedra y Fernández, (2011) reportan que, en el rendimiento más alto al final del cultivo, se

obtuvo con la aplicación del tratamiento de silicio aplicado al suelo, con una producción media de 2,76 kg, en comparación con el testigo que fue de 1,79 kg.

De acuerdo con Randa, (2016) mencionó que el uso de silicato de potasio en el cultivo de naranjo navel, alcanzó el mayor rendimiento por árbol de 73.4 y 74.2kg, en comparación con el testigo de 55 kg.

Markovich *et al.* (2017) demostraron que el silicio aumentó la biosíntesis de las citocininas en el sorgo, dicho aumento puede contribuir fuertemente a retrasar la senescencia, a la formación de nuevos cloroplastos y, por tanto, mayor fotosíntesis, además de promover mayor división celular en órganos de interés que a su vez se relaciona con el rendimiento de los cultivos.

Kidd *et al.* (2001) mencionaron que al haber mayor disponibilidad de silicio en el suelo, las raíces exudan compuestos fenólicos como la catequina y la quercetina con alta actividad de quelatación de compuestos metálicos y elementos nutrimentales poco móviles como el P, lo anterior favorece la eficiencia de absorción de la planta cuando las condiciones físicas o químicas del suelo no son favorables para una óptima nutrición del cultivo, que a su vez se reflejara en una mejora productiva.

Con lo mencionado anteriormente por los distintos autores, podemos afirmar que la aplicación de silicio al suelo, es una manera efectiva para contribuir a incrementar el rendimiento.

6.3. Calidad en fruto

6.3.1. Peso fresco

Con respecto a los datos obtenidos en el peso fresco, se puede observar en la Figura 9, que los tratamientos no tuvieron ningún efecto en los frutos de limón persa, no se observan diferencias estadísticas en el peso individual de los frutos en ninguna de las dos cosechas, y cuando se comparó la variación de los tratamientos

en las fechas evaluadas, tampoco hubo diferencias; los calibres y por tanto el peso de los frutos fue similar, este fluctuó entre 90.8 y 103.1 g.

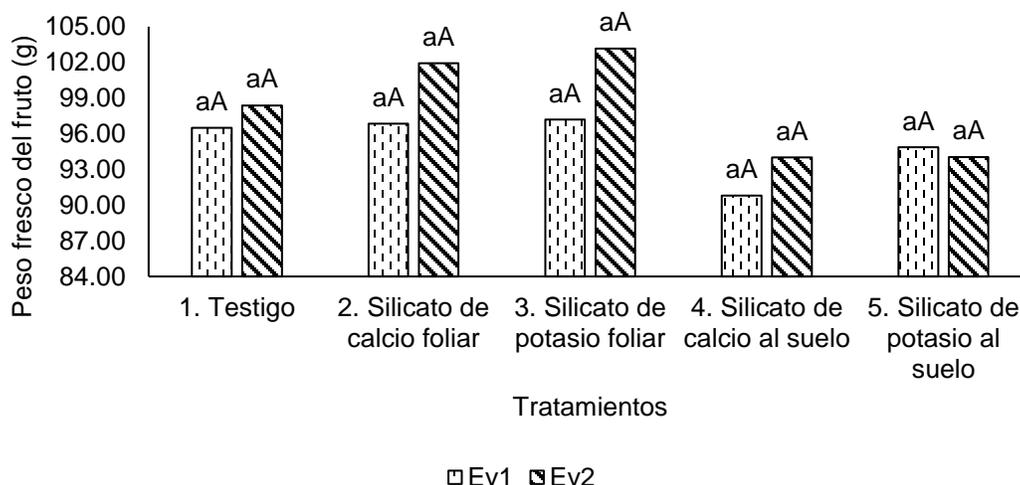


Figura 9. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en el peso de los frutos.

Medias con literales mayúsculas diferentes presentan diferencias significativas dentro del tratamiento en función del tiempo de postcosecha transcurrido; medias con literales minúsculas diferentes presentan diferencias significativas entre tratamientos (Duncan, $\alpha=0.05$). Ev1: Evaluación 1. 20 de mayo de 2017; Ev2: Evaluación 2. 19 de junio de 2017.

Esto se le atribuye a lo reportado por Alia-Tecajal *et al.* (2009), mencionaron que durante los meses de octubre a febrero el peso promedio del fruto de limón persa fue entre 101.4 y 109.3 g, el cual disminuyó posteriormente a valores entre 80.5 y 93.4 g en los meses de marzo a julio y ascendió finalmente a valores de 118.3 g. Por lo tanto, el peso de los frutos está en función de la carga del árbol y la competencia por nutrientes, es decir, a mayor número de frutos, el peso unitario es menor y viceversa; debido a las fuentes utilizadas en los tratamientos (silicatos, no están relacionados con el incremento en el tamaño de los frutos. Algunas hormonas (auxinas) están más relacionadas con el crecimiento, la elongación y la diferenciación celular, interactuando con otras fitohormonas, favoreciendo el tamaño y peso de los frutos (Jenik y Barton, 2005).

Teniendo en cuenta que la mayor producción de limón persa se tiene entre los meses de junio y julio, y de acuerdo con Alia-Tecajal *et al.* (2009) los frutos de esta investigación están dentro del rango promedio del peso de acuerdo con las fechas en las que se cosecharon los frutos.

Fatma y Mustafa, (2017) reportaron que el silicato de potasio tendió a ser más efectivo para aumentar el peso de los frutos.

Xu *et al.* (2015) sugirieron que, al aplicar fertilización a base de silicio, se mejora la absorción de K, se considera que existe una relación directa entre la absorción de silicio y K, lo que promueve un incremento en el peso de los frutos.

En esta investigación al no tener diferencias significativas entre tratamientos, no podemos asegurar que el silicio tenga efecto en el peso de cada fruto producido y cosechado.

6.3.2. Firmeza

En la Figura 10, se observó que los tratamientos no presentaron diferencias significativas en la primera evaluación en la firmeza obtenida del mesocarpio de los frutos, presentando valores que fluctúan entre los 28.1 y 31.6 Newtons respectivamente. Para la segunda evaluación, los árboles tratados con silicato de potasio foliar (T3) y silicato de calcio al suelo (T4), provocaron la producción de frutos con mayor firmeza alcanzando valores de 29.3 y 28.5 Newtons. La comparación entre cada tratamiento por fecha, de manera general, no presentó diferencias significativas.

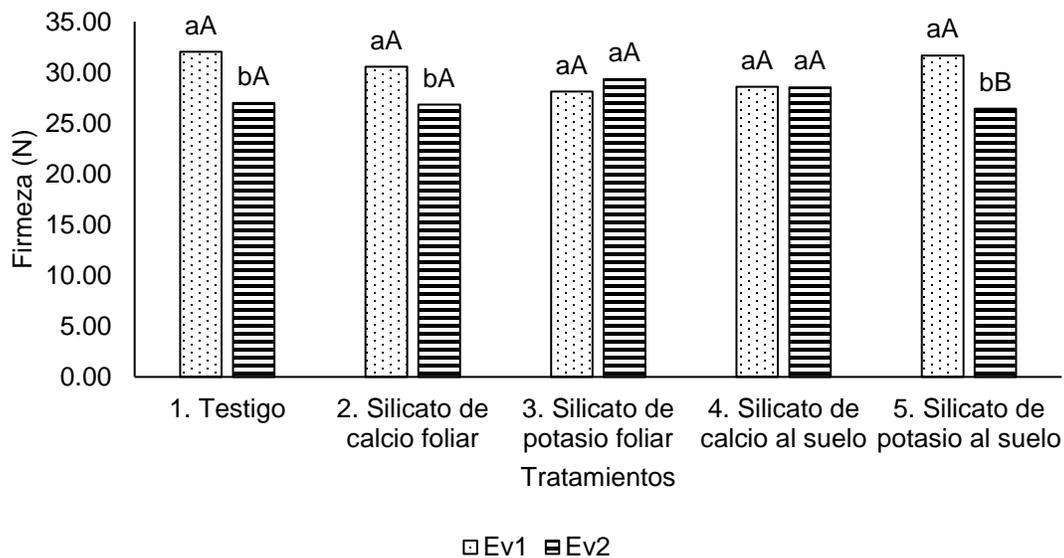


Figura 10. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en la firmeza de los frutos.

Medias con literales mayúsculas diferentes presentan diferencias significativas dentro del tratamiento en función del tiempo de postcosecha transcurrido; medias con literales minúsculas diferentes presentan diferencias significativas entre tratamientos (Duncan, $\alpha \leq 0.05$). Ev1: Evaluación 1. 20 de mayo de 2017; Ev2: Evaluación 2. 19 de junio de 2017.

La firmeza es considerada uno de los parámetros más importantes para determinar tanto la calidad como el efecto del manejo postcosecha y del empaque del producto (Villalba-Campos *et al.*, 2014). La disminución de la firmeza del fruto es el resultado de la hidrólisis de las pectinas de la pared celular (Landanilla, 2008). De manera general, se observó que los tratamientos a base de silicio presentan menor pérdida de agua conforme pasa el tiempo de cosecha, autores como Moreas *et al.* (2004), aseguraron que la deposición de silicio en las paredes celulares es determinante en la conservación del agua en los tejidos.

Debido a que el silicio se transporta con el agua y entrando a la vacuola se cristaliza, podemos decir que su presencia en conjunto con el potasio que fue el tratamiento 3 ayuda a tener un pericarpio firme. En cuanto al tratamiento 4 sabemos que el silicio tiene mayor facilidad para entrar por la raíz.

6.3.3. Índice de redondez

El índice de redondez es un parámetro de calidad al momento de la comercialización del limón, y se estimó mediante la división entre el diámetro ecuatorial y el diámetro polar del fruto.

En la Figura 11, se observa que en la primera evaluación, los frutos procedientes de árboles tratados con fuentes de silicato de potasio foliar (T3) y silicato de potasio aplicados al suelo (T5) presentaron valores de (0.831 y 0.835), estadísticamente superiores a los tratamientos: Testigo (T1), silicato de calcio foliar (T2), y silicato de calcio al suelo (T4). Cuando el efecto es comparado en la segunda evaluación, los tratamientos presentaron diferencias estadísticas, siendo el T4 (silicato de calcio aplicado al suelo) y T5 (silicato de potasio al suelo) los de mayor índice de redondez, con valores de 0.845 y 0.41, seguidos del T3 (silicato de potasio foliar) y T1 (Testigo) con valores de 0.833 y 0.834 respectivamente, el tratamiento de menor índice lo presentó el T2 (silicato de calcio foliar). Siendo el T5 (silicato de potasio al suelo), el que presentan mayor índice de redondez en ambas evaluaciones. Este índice nos hace saber que entre más cercano sea a 1, el fruto es más redondo.

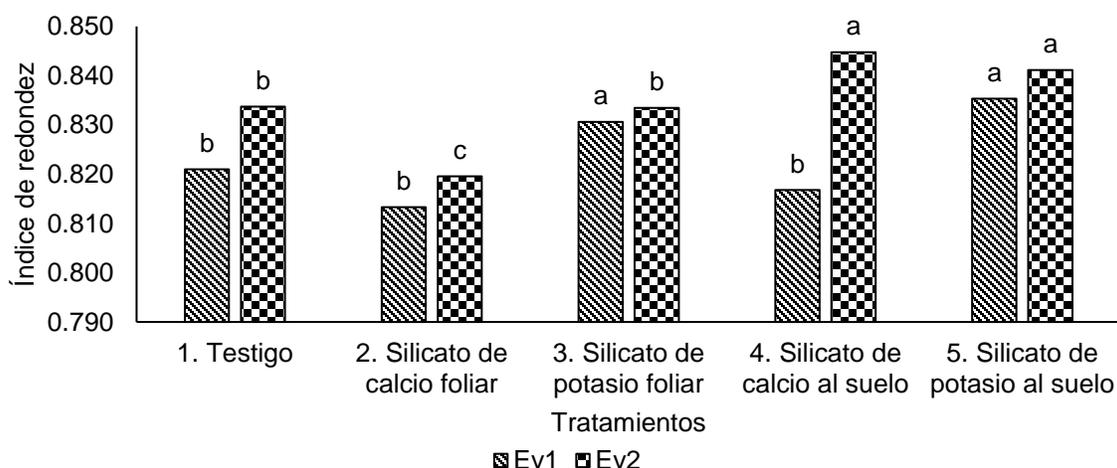


Figura 11. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en el índice de redondez.

Medias con literales diferentes presentan diferencias significativas dentro del tratamiento en función del tiempo de postcosecha transcurrido (Duncan, $\alpha \leq 0.05$). Ev1: Evaluación 1. 20 de mayo de 2017; Ev2: Evaluación 2. 19 de junio de 2017.

De acuerdo con el Codex Stan 123 se definen cinco calibres para el limón con base en su diámetro ecuatorial: 58-67 mm (1), 53-62 mm (2), 48-57 mm (3), 45-52 mm (4) y 42-49 mm (5) (Codex-Alimentarius, 2008). Los frutos cosechados del tratamiento 5 (con aplicaciones de silicato de potasio al suelo) en esta investigación estarían dentro de los calibres 3 y 4, considerados de buena calidad superando a los demás tratamientos.

6.3.4. Índice de color

En el Cuadro 6 se observa que para luminosidad (L), no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, esto para ambas fechas de corte, sin embargo, cuando es comparado el valor de L en la Evaluación uno y dos de cosecha, fueron los tratamientos de la primera cosecha estadísticamente superiores, es decir, en la Evaluación 1 se tienen frutos de un color más luminoso. Por otra parte, para determinar el color con el °Hue, cuando se analizan los tratamientos independientemente de las fechas de corte, se tiene que en la primera evaluación, todos presentan valores entre -58.0 y -60.5, es decir todos presentan un color verde, no así para los frutos de la Evaluación 2, donde se observa que fue el tratamiento a base de silicato de potasio aplicado al suelo el que presentó un valor de -60.5, es decir, un verde más intenso o un color verde con menos tendencia a un color amarillo, como el resto de los tratamientos para la evaluación. Al comparar las evaluaciones y su valor de °Hue, fueron de manera general los frutos de la Evaluación 2 los que presentaron un color verde con tendencia al amarillo, característica no favorable para el mercado nacional y de exportación. En cuanto al Índice de Saturación (IS) que nos indica la saturación del color verde, no existen diferencias entre tratamientos en ambas evaluaciones, pero si entre evaluaciones, ya que, los frutos de Evaluación 1 presentan un verde más intenso o menos opaco.

Cuadro 6. Comparación de índice de saturación (IS) y ángulo Hue entre tratamientos y fechas de cosechas.

TRATAMIENTOS	L		IS		°HUE	
	Ev1	Ev2	Ev1	Ev2	Ev1	Ev2
T1. Testigo	51.8 aA	43.4 aB	40.1 aA	23.9 aB	-58.6 aA	-68.3 bB
T2. Silicato de calcio (F)	54.0 aA	41.8 aB	40.4 aA	23.8 aB	-60.5 aA	-68.1 bB
T3. Silicato de potasio (F)	54.0 aA	42.1 aB	39.5 aA	24.9 aB	-59.8 aA	-68.2 bB
T4. Silicato de calcio (S)	53.0 aA	43.0 aB	39.7 aA	24.4 aB	-59.5 aA	-67.9 bB
T5. Silicato de potasio (S)	51.8 aA	42.5 aB	39.1 aA	23.5 aB	-58.0 aA	-60.5 aA

Ev1: Evaluación 1. 20 de mayo de 2017; Ev2: Evaluación 2. 19 de junio de 2017.

En la Figura 12, se muestra una gráfica tridimensional que muestra las dos evaluaciones de color realizadas en frutos de limón persa, los valores presentados son: L (ZData), a (XData), b (YData), donde L es la luminosidad, a son las coordenadas de rojo/verde (+a indica rojo, -a indica verde), b son las coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul), donde los frutos de la Evaluación 1 presentan un verde más intenso o menos opaco y en la Evaluación 2 presentan un verde más intenso o un color verde con menos tendencia a un color amarillo.

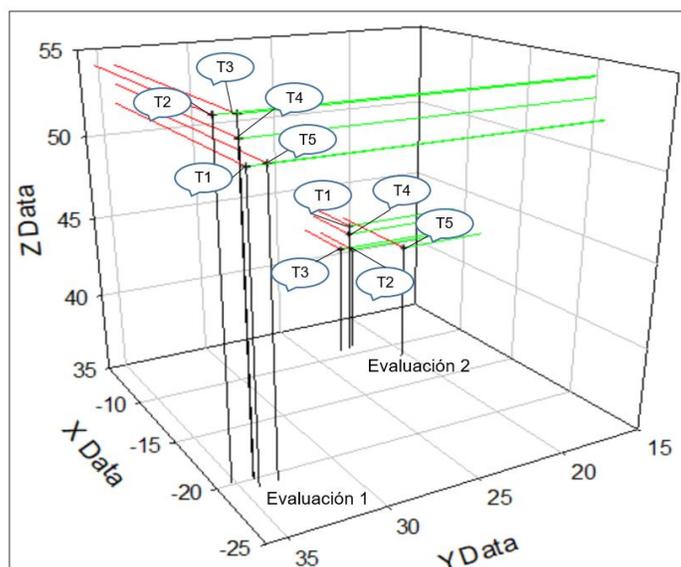


Figura 12. Sólido de colores de los frutos de limón persa.

T1. Testigo, T2. Silicato de calcio foliar, T3. Silicato de potasio foliar, T4. Silicato de calcio al suelo y T5. Silicato de potasio al suelo. YData=b, XData=a, ZData=L. Evaluación 1; 20 de mayo de 2017. Evaluación 2; 19 de junio de 2017.

De acuerdo con la Norma Mexicana NMX-FF-077-1996 y el Pliego de Condiciones para el uso de la marca Calidad Selecta, el color debe ser verde oscuro; con lo mencionado anteriormente sabemos que con la aplicación de los tratamientos, los frutos de la Evaluación 1 tienen el color requerido por la NMX-FF-077-1996.

Diversos estudios han reportado que la disponibilidad de silicio, mejora la fotosíntesis de las plantas, sobre todo en condiciones de estrés oxidativo, causado por factores endógenos y exógenos en los que las plantas se encuentran expuestas, el silicio estabiliza la estructura de los cloroplastos, la integridad y funcionamiento del Fotosistema II (PSII) y el aumento de la concentración de pigmentos (Nwugo y Huerta, 2008; Tripathi *et al.*, 2015). Lo anterior favorece la productividad de la planta y en este caso, el incremento del color de los frutos (color verde) lo que se refleja en mayor calidad de los mismos durante la postcosecha.

La aplicación silicato de potasio al suelo (T5), es el tratamiento que presentó un color verde oscuro, lo requerido por la Norma Mexicana NMX-FF-077-1996.

6.3.5. Apariencia

En el Cuadro 7, se observó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de las dos evaluaciones; más aún, no existen diferencias entre las evaluaciones realizadas. Se observó que la calificación de apariencia de frutos de la primera evaluación oscila entre los 6.8 y 7.8 y para la segunda evaluación entre los 7.2 y 7.9.

Cuadro 7. Índice de apariencia con escala del 1 al 10, propuesta por la OCDE.

Tratamientos	Ev1	Ev2
1. Testigo	7.8 aA	7.9 aA
2. Silicato de calcio foliar	7.0 aA	7.7 aA
3. Silicato de potasio foliar	6.8 aA	7.5 aA
4. Silicato de calcio al suelo	7.0 aA	7.2 aA
5. Silicato de potasio al suelo	7.5 aA	7.6 aA

Medias con literales mayúsculas diferentes presentan diferencias significativas dentro del tratamiento en función del tiempo de postcosecha transcurrido; medias con literales minúsculas diferentes presentan diferencias significativas entre tratamientos (Duncan, $\alpha \leq 0.05$). Evaluación 1. 20 de mayo de 2017; Evaluación 2. 19 de junio de 2017.

De acuerdo con lo anterior, los frutos cosechados de los árboles tratados junto con los de los no tratados con silicio, cumplen con las características de color y apariencia física marcada en las normas locales e internacionales, sin embargo, es importante que en el proceso de selección se excluyan frutos de mala calidad, debido al manejo en campo, cosecha y transporte, por lo tanto, según el presente trabajo, es inútil aplicar el silicio para modificar o mejorar la apariencia de los frutos de limón persa.

Una de las variables más importantes en la calidad de los frutos de limón es la apariencia de los frutos, debido a que después de 5 días de almacenamiento los frutos comienzan a cambiar de color tornándose amarillos lo que dificulta su comercialización ya que, en el mercado nacional como en el europeo, se demandan frutos con el flavedo en color verde (Dominguez *et al.*, 2003).

6.3.6. Volumen de jugo

En la Figura 13, se observó que entre tratamientos no existen diferencias estadísticamente significativas, entre los tratamientos aplicados, teniendo que el volumen de cinco limones para la primera evaluación fluctúa entre 186.0 y 219.5 mL (37.2 y 43.8 mL/fruto); no obstante, en la segunda evaluación se detectaron frutos con una producción mayor de jugo con respecto de la primera; el volumen estuvo entre 230.5 y 252.5 mL (46 y 50.4 mL/fruto). Lo anterior indica de manera general,

que los frutos de la segunda cosecha presentan mayor contenido de jugo, tomando esta diferencia de manera estadística para los tratamientos de ambos productos aplicados vía suelo y foliar, donde incrementan de una evaluación a otra, hasta el 23% del volumen de jugo.

La ligera ganancia no significativa en peso de los frutos en los tratamientos 2, 3 y 4, se debe principalmente al incremento del jugo contenido en los frutos.

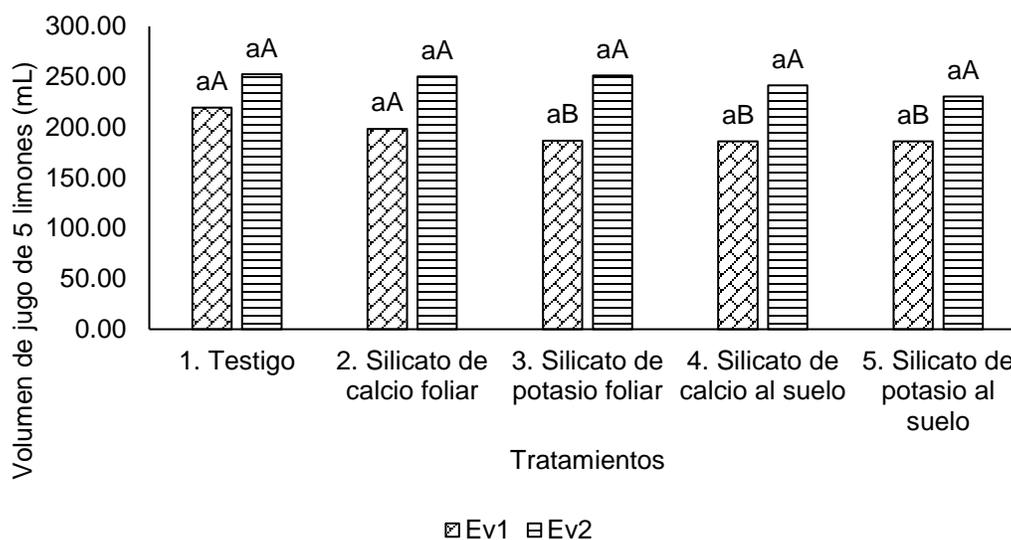


Figura 13. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en el contenido de jugo.

Medias con literales mayúsculas diferentes presentan diferencias significativas dentro del tratamiento en función del tiempo de postcosecha transcurrido; medias con literales minúsculas diferentes presentan diferencias significativas entre tratamientos (Duncan, $\alpha \leq 0.05$). Ev1: Evaluación 1. 20 de mayo de 2017; Ev2: Evaluación 2. 19 de junio de 2017. Evaluación 1. 20 de mayo de 2017; Evaluación 2. 19 de junio de 2017.

En cuanto a los resultados de esta investigación, considerando peso total del fruto y su volumen de jugo, se tiene que para la primera evaluación los frutos fluctúan entre 40.9 y 45.2% de jugo, mientras que para la segunda evaluación, el volumen de jugo en frutos fue mayor, con 48.9%. Si bien, no se demuestra que fueron los tratamientos los que influyeron de manera directa en el volumen de jugo producido, se encuentra bien documentado que el potasio influye de manera directa

en el transporte de azúcares, en la absorción de agua, además de regular la apertura y cierre de los estomas, lo que influye de manera directa en esta variable.

Con respecto al silicio Fatma y Mustafa, (2017), mencionan que con la aplicación de silicato de potasio obtuvieron 166 mL de jugo.

Hattori *et al.*, (2005) mencionan que el silicio mejoró la resistencia a sequia de los cultivos debido al incremento de la habilidad de la planta para extraer agua por el alargamiento de sus raíces; además de la regulación positiva de los genes de la acuaporina (proteína de membrana encargada del transporte de agua) (Liu *et al.*, 2015).

Los frutos obtenidos en la segunda cosecha presentan mayor cantidad de jugo, estos fueron frutos cosechados en el mes de junio, donde se tiene registrado la mayor precipitación en Cotaxtla, y al haber mayor cantidad de agua disponible, la planta la absorbe y el silicio tiene mayor movilidad dentro de la planta.

6.3.7. Grosor de cáscara

En la Figura 14, no se observan diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto al grosor de la cáscara del fruto. En la segunda evaluación, al haber menor grosor de cáscara, existe mayor volumen de jugo en el fruto, y viceversa. Los tratamientos aplicados al suelo de silicato de calcio y potasio provocaron la producción de frutos con el grosor de cáscara menor entre las dos evaluaciones realizadas, con valores de 1.64 y 1.68 mm, lo que equivale a un promedio de disminución de cáscara de 18%.

La acumulación de una mayor cantidad de jugo en los frutos de limón en la segunda evaluación provocó probablemente el aplastamiento de las células del albedo o mesocarpio, lo que se registró en el presente trabajo como una cáscara más delgada.

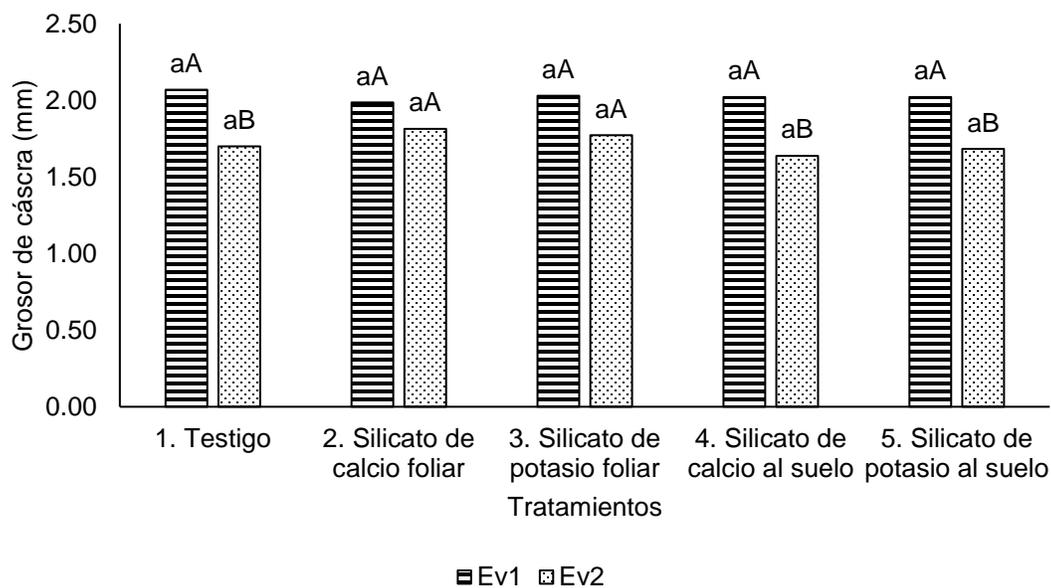


Figura 14. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en el grosor de la cáscara.

Medias con literales mayúsculas diferentes presentan diferencias significativas dentro del tratamiento en función del tiempo de postcosecha transcurrido; medias con literales minúsculas diferentes presentan diferencias significativas entre tratamientos (Duncan, $\alpha \leq 0.05$). Ev1: Evaluación 1. 20 de mayo de 2017; Ev2: Evaluación 2. 19 de junio de 2017.

De acuerdo con Castellanos *et al.* (2016), reportan valores del grosor de cáscara oscilan entre 2.57 y 2.60 mm.

De acuerdo con Solís y Tamalá, (2010), reportan valores del grosor de cáscara de 1.28 y 2.94 mm.

Con lo mencionado anteriormente podemos decir que los resultados obtenidos en esta investigación se encuentran en el rango por lo reportado por los autores antes mencionados.

Zhu y Gong, (2014) mencionaron que el silicio redujo la conductancia estomática de las plantas y lo relacionan con la pérdida de células protectoras causadas con la deposición de silicio y por ende la modificación de las propiedades de la pared celular; es decir, que al haber presencia de este elemento, regula la apertura y cierre estomática, que se relaciona de manera directa con la

transpiración, pérdida de agua, absorción de agua y nutrientes por las plantas, lo que favorece la eficiencia productiva de los cultivos.

Por otra parte, también es sabido que la deficiencia de calcio produce frutos con una cáscara delgada y menos resistente, entonces el silicio en combinación con calcio o potasio no favorecen el engrosamiento de la cáscara.

6.3.8. Sólidos solubles totales (°Brix)

En la Figura 15 se muestra el contenido de sólidos solubles totales o °Brix que nos indica el contenido de solutos presentes en el jugo, observando que para esta variable, no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ni entre las dos evaluaciones realizadas, se tienen valores que fluctúan entre los 7.90 y 8.35 °Brix.

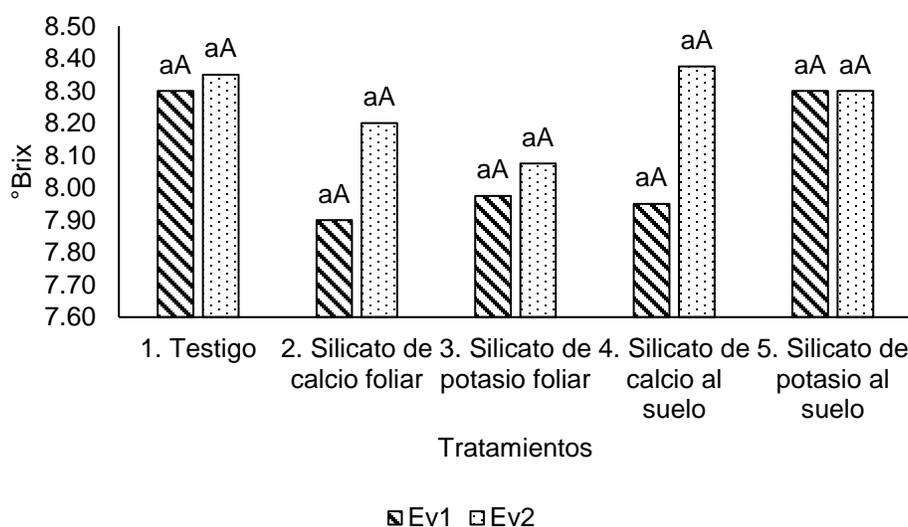


Figura 15. Efecto de los tratamientos a base de silicato de calcio y potasio vía foliar y al suelo en sólidos solubles totales (°Brix).

Medias con literales mayúsculas diferentes presentan diferencias significativas dentro del tratamiento en función del tiempo de postcosecha transcurrido; medias con literales minúsculas diferentes presentan diferencias significativas entre tratamientos (Duncan, $\alpha \leq 0.05$). Ev1: Evaluación 1. 20 de mayo de 2017; Ev2: Evaluación 2. 19 de junio de 2017.

De acuerdo con García-López *et al.* (2017), los °Brix de los frutos de limón persa en el centro del estado de Veracruz es de 7.46; esto quiere decir que los limones cosechados en este experimento se encuentran dentro de lo evaluado para la zona centro de Veracruz.

Lee *et al.* (2010) sugirieron que existe una estrecha relación positiva entre la presencia de silicio y el aumento en la concentración de ácido giberélico en las plantas. Al haber mayor concentración de ácido giberélico se favorece la elongación celular y el desdoblamiento de azúcares complejos a azúcares simples por medio de la alfa-amilasa, lo que impactará en un mayor tamaño del órgano de interés (fruto) y la acumulación de azúcares, variable que es medida por la concentración de °Brix.

Cabe recalcar que la cuantificación de sólidos solubles totales, refleja la concentración de azúcares (glucosa, fructosa y sacarosa) y ácidos orgánicos presentes en el jugo del fruto.

6.3.9. Acidez titulable (% ácido cítrico)

En el Cuadro 8, se observa la comparación en las concentraciones de ácido cítrico entre los tratamientos, esta fue determinada por el método de titulación con hidróxido de sodio al 0.1 N, utilizando como factor 0.06404 miliequivalentes.

No se puede asegurar de manera definitiva la influencia de los tratamientos o si se presenta alguna variación en la fecha de evaluación sobre la variable. Los valores fluctúan en ambas fechas entre 6.3 y 7.1% de ácido cítrico presente en el jugo de los limones cosechados.

Cuadro 8. Porcentaje de ácido cítrico presente en el jugo de frutos de limón.

Evaluación	Tratamientos				
	1. Testigo	2. Silicato de calcio foliar	3. Silicato de potasio foliar	4. Silicato de calcio al suelo	5. Silicato de potasio al suelo
1	6.5	6.4	6.3	6.5	7.1
2	6.7	6.4	6.7	6.5	6.5

De acuerdo con García-López *et al.* (2017), la Acidez Titulable de los frutos de limón persa en el centro del estado de Veracruz es de 6.75%. Con lo mencionado anteriormente podemos decir que los frutos observados en el presente trabajo tienen un porcentaje de ácido cítrico acorde con lo observado anteriormente por otros autores.

VII. CONCLUSIONES

El suministro de silicio en el cultivo de limón persa, favorece en cuestión agronómica el amarre y el rendimiento, en cuestiones de calidad postcosecha favorece el peso unitario del fruto, la firmeza, el color y el contenido de jugo. La forma óptima de aplicación es vía suelo, ya que, fue el tratamiento que en las variables antes mencionadas fueron las de resultados favorables.

Si bien no está documentado que el silicio mejora las condiciones del cultivo de limón persa, se observaron efectos sinérgicos, cuando es combinado con calcio y potasio. La combinación de silicio y calcio promueven amarre y rendimiento, mientras que en combinación con potasio favorece el incremento del peso unitario, mejora el color del fruto e incrementa el contenido de jugo.

Se mejoraron en la segunda evaluación, las variables: color y firmeza del fruto, además se incrementó el contenido de jugo, pero disminuyó el grosor de cáscara.

VII. LITERATURA CITADA

- Albrigo, L. 1993. Environmental influences on citrus fruit development. Memorias del II Simposium Internacional sobre más producción de cítricos. Chapingo, México. 321-330 pp.
- Alcántar-Gonzalez, G., L. I. Trejo-Téllez., F. C. Gómez-Merino. 2016. Nutrición de cultivos. Segunda edición. Bba biblioteca básica de agricultura. Colegio de postgraduados, Montecillo Edo de México. 443 p.
- Alfredo, K. R, M. L. Lye, F. E. Kazuhiro, A. J. Pedro and A. J. Saavedra. 2007. Chilling injury and quality of citric fruits submitted to thermal treatments and cold storage. Rev. Bras Frutic. 29: 233-238.
- Alia-Tecajal, I, M. Nicolás-Beltrán, A. Lugo-Alonso y R. Ariza-Flores. 2009. Calidad del limón persa y naranja en el estado de Morelos. SAGARPA. INIFAP. Centro de Investigación Regional Pacífico Sur Campo Experimental "Zacatepec". Zacatepec, Morelos, México. 4-10 pp.
- Almaguer, V. G. 2002. Fisiología y Morfología de Cítricos. En: La citricultura del norte de Veracruz: Estudios Técnicos, Económicos y Sociales. López M., S. y Mata G., B. (Eds.). Universidad Autónoma Chapingo y Universidad Veracruzana. México. 19-29 pp.
- Amorós, M. 1999. Producción de agrios. Segunda Edición Revisada y Ampliada. Ediciones, Mundi-Prensa. España.
- Araya, E.; Camacho, M.; Molina, E. y Cabalceta, G. 2015. Evaluación de fertilizantes líquidos con silicio, calcio o magnesio sobre el crecimiento del sorgo en invernadero. Agronomía Costarricense. 39(2): 47-59.
- Arce-Romero, M.H. 2012. Nutrición silíceá en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.). Tesis de maestría. Departamento de Fitotecnia. Posgrado de Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 1980. Official Methods of Analysis of the Association Chemists. Horwitz, W. (ed.). AOAC. 13ra. Ed. George Banta Company, Inc. Wisconsin, USA. pp. 1018.
- Avilán, L y C. Rengifo. 1988. Los Cítricos. 1 Ed. Caracas, Venezuela. 280-286 pp.
- Baradas, M. 1994. Crop requirements of tropical. Crops. Pp 189-202. In; Handbook of Agricultura Meteorology. J. F. Griffiths. Editor. Oxford. Univ. Press, New York. USA.
- Benacchio, S. S. 1992. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivos con potencial de producción en el trópico americano. FONAlA. Centro Nal. De Ind. Agropecuarias. Ministro de Agricultura y Cría. Macay, Venezuela. pp. 202.
- Bidwell, R. G. S. 1979. Fisiología vegetal. AGT Editor. México, D. F. pp. 784.
- Carr, M. K. V. 2012. The water relations and irrigation requirements of citrus (*Citrus* spp.): A Review. Cambridge University. 48(3): 347-377.
- Castellanos, G, R. Ramírez, V. Sindoni, J. Maria, L. Hidalgo, R. Pablo, M. E. Burgos, R. Marín, K. Castellano y L. Martínez. 2016. Efecto de la temperatura de almacenaje sobre las características organolépticas de frutos de limón persa (*Citrus latifolia* Tanaka). Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha. Hermosillo, México. 17: 8-14.
- Castellanos-González, L, R. De Mello-Prado y C. N. Silva-Campos. 2015. El silicio en la resistencia de los cultivos a las plagas agrícolas. Cultivos Tropicales. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. La Habana, Cuba. 36: 16-24.
- Codex-Alimentarius. 2008. CODEX STAN 123. Norma del Codex para Lima-Limón. <http://www.codexalimentarius.net/search/advancedsearch.do>. (Consulta: agosto 2018).

- Comisión Nacional del Agua – Normales Climatológicas (CNA).
<http://smn.cna.gob.mx/es/> (Consulta: agosto 2018).
- Costa, I. J. S., M. C. T. Pereira., G. P. Mizobutsi., V. M. Maia., J. F. Silva., J. A. A. Oliveira., M. B. Oliveira., V. N. R. Souza., S. Nietsche and E. F. Santos. 2015. Influence of silicon fertilization on 'palmer' mango tree cultivation. *Acta horticulturae*. 229-234.
- Curtí-Díaz, S. A, X. Loredó-Salazar, U. Díaz-Zorrilla, J. A. Sandoval y J. H. Hernández. 2000. Tecnología para producir limón persa. INIFAP-CIRGOC. Campo experimental Ixtacuaco. Libro Técnico Núm. 8. Veracruz, México. pp. 144.
- Curtí-Díaz, S. A. 2009. Experiencias para incrementar la producción de naranjo y limón persa durante los períodos de mayor rentabilidad en Veracruz. En: II Simposium Nacional de Producción Forzada en Frutales. I Curso de Producción Forzada en Frutillas y Durazno. Colegio de Posgraduados. México. 26-30 pp.
- Domínguez, E., Cortés, V., Avila, R., Olvera., L., Vernon, J., Bosquez, E., Domínguez, J. 2003. Aumento de la vida postcosecha del limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle) producido en Apatzingán, Mich., mediante el uso de recubrimientos naturales a diferentes temperaturas. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*. 5(2): 128-133.
- Du-Plessis, S. F. 1992. Relationship between nutritional elements, yield and fruit quality of citrus tree. International Seminar on Citrus Physiology. Bebedouro. Sao Paulo, Brazil. 139-158 pp.
- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 91: 11-17.

- Fatma, K. A. and 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*. 6: 45-56.
- Fauteux, F, W. Rémus-Borel, J. Menzies and R. R. Bélanger. 2005. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. *FEMS Microbiology Letters*. 249: 1-6.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2016. <http://www.fao.org/faostat/es/#home> (Consulta: agosto 2018).
- García-López, F.M., Herrera-Corredor, J.A., Pérez-Sato, J.A., Alatríste-Pérez, I. y Contreras-Oliva, A. 2017. Relación entre color y parámetros fisicoquímicos del limón persa (*Citrus latifolia* t.) del centro de Veracruz, México. *Agroproductividad*. 10 (9): 9-14.
- Gunnarsson, I and S. Arnorsson. 2000. Amorphous silica solubility and the thermodynamic properties of H_4SiO_4 degrees in the range of 0°C to 350°C at P_{sat} . *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 64: 2295-2307.
- Hattori, T., S. Inanaga, H. Araki, P. An, S. Morita, M. Luxová, and A. Lux. 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum*. 123(4): 459-466.
- Henriet, C., X. Draye., I. Oppitz., R. Swennen and B. Delvaux. 2006. Effects, distribution and uptake of silicon in banana (*Musa spp.*) under controlled conditions. *Plant and Soil*. 287: 359-374.
- Hodson, M. J., P. J. White., A. Mead and M. R. Broadley. 2005. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany*. 96: 1027-1046.
- Ibrahim, H. I. M. and M. M. Al-Wasfy. 2014. The promovite impact of using silicon and selenium with potassium and boron on fruiting of Valencia orange trees grown under Minia region conditions. *World Rural Observations*. 6(2): 28-36.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010. <http://www.inegi.org.mx/> (Consulta: agosto 2018).
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 1996. Manual de producción de limón persa. Campo experimental Ixtacuaco, Veracruz, México. 18-24 pp.
- INTAGRI. 2018. Funciones del Calcio (Ca) en la Nutrición Vegetal. Serie Nutrición Vegetal, Núm. 122. Artículos Técnicos de INTAGRI. 5p.
- Janick, J. 1990. Citrus flowering. Horticultura Reviews. University Florida. 349-407 pp.
- Jenik P. D. y M. K. Barton. 2005. Surge and destroy: the role of auxin in plant embryogenesis. *Development*. 132: 3577-3585.
- Kaur, S., Kaur, N., Siddique, K. H. 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.
- Kidd, P. S., M. Llugany, C. H. Poschenrieder, B. Gunse, J. Barcelo. 2001. The role of root exudates in aluminium resistance and silicon-induced amelioration of aluminium toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Experimental Botany*. 52(359): 1339-1352.
- Korndorfer, G. H. and I. Lepsch. 2001. Effect of silicon on plant growth and crop yield. Elsevier Science. 133-147 pp.
- Landanilla, M. S. 2008. Fruit morphology, anatomy and physiology. Capítulo 2-7. Citrus Fruit. Biology, Technology and Evaluation. First edition. Academic Press. India.
- Lee, S. K., E. Y. Sohn, M. Hamayun, J. Y. Yoon, and I. J. Lee. 2010. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. *Agroforestry systems*. 80(3): 333-340.

- Liang, Y. C., H. X. Hua., Y. G. Zhu., J. Zhang., C. M. Cheng and V. Romheld. 2006. Importance of plant species and external silicon concentration to active silicon uptake and transport. *New Phytologist*. 172: 63-72.
- Liang, Y. C., M. Nikolic., R. Belanger., H. J. Gong and A. L. Song. 2015. *Silicon in Agriculture: From Theory to Practice*. Springer, Dordrecht. 250 p.
- Little, C. A. 1975. A research note off on a tangent. *Journal of Food Science*. 40(2): 410-411.
- Liu, P. L. Yin, S. Wang, M. Zhang, X. Deng, S. Zhang, and K. Tanaka. 2015. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *Environmental and Experimental Botany*. 111: 42-51.
- Ma, J. F, K. Tamai, M. Ichii and G. F. Wu. 2002. A rice mutant defective in Si uptake. *Plant Physiol*. 130: 2111-2117.
- Ma, J. F., and N. Yamaji. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*. 11 (8): 392-397.
- Maldonado, R.T, J. D. Etchevers, G. G. Alcántar, J. A. Rodríguez y L. M. T. Colinas. 2001. Estado nutrimental del limón mexicano en suelos calciformos. *Terra* 19: 163-174.
- Malo, S. E, C. W. Campbell y C. F. Balerdi. 2015. El limón persa en Florida. *Horticultura Sciences*. Universidad de Florida. pp. 3.
- Markovich, O., E. Steiner, Š. Kouřil, P. Tarkowski, A. Aharoni, and R. Elbaum. 2017. Silicon promotes cytokinin biosynthesis and delays senescence in *Arabidopsis* and *Sorghum*. *Plant, cell and environment*. 40(7): 1189-1196.
- Matichenkov, V. y D. Calvert. 1999. Silicon fertilizers for citrus in florida. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*. 112: 5-8.

- Matinchenkov, V. V. and D. V. Calvert. 2002. Silicon as a beneficial element for sugarcane. *J. Am. Soc. of Sugarcane Technologist*. 22: 21-30.
- Matinchenkov, V. V. and J. M. Ammosova. 1996. Effect of amorphous silica on soil properties of a sod-podzolic soil. *Eurasian Soil Science*. 28(10): 87-99.
- Marschner, H. 2002. Mineral nutrition of higher plants. Second Edition. Academic Press. London, UK. 889pp.
- Mellado-Vázquez, A, C. Hernández-Guerra, S. Salazar-García y A. Álvarez-Bravo. 2015. Remoción de nutrimentos por la cosecha: herramienta para el manejo de la nutrición del limón persa en Nayarit. INIFAP, CIRPAC. Campo Experimental Santiago Ixcuintla. pp 57.
- Molina, E. 2000. Nutrición y fertilización de la naranja. *Informaciones agronómicas*. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. 40: 13.
- Moreas, J. C, M. M. Goussain, M. A. B. Basagli, G. A. Carvalho, C. C. Ecole and M. V. Sampaio. 2004. Silicon influence on the tritrophic interaction: Wheat plants, the greenbug *Schizaphis graminum* (Rondani) (Hemiptera: Aphididae), and its natural enemies, *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera: Chrysopidae) and *Aphidius colemani* viereck (Hymenoptera: Aphidiidae). *Neotrop. Entomol*. 33: 619-624.
- Morton, J. 1987. Tahiti Lime. In: *Fruits of Warm Climate*. Florida Flair Books. Miami, Estados Unidos. 172-175 pp.
- Nanayakkara, U. N., W. Uddin and L. E. Datnoff. 2008. Application of silicon sources increases silicon accumulation in perennial ryegrass turf on two soil types. *Plant and Soil*. 303: 83-94.
- Nemann, D. and U. Zur-Nieden. 2001. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. *Phytochemistry*. 56: 685-692.

- Neumann, D. and D. de Figueiredo. 2002. A novel mechanism of silicon uptake. *Protoplasma*. 220: 59-67.
- Nikolic, M., N. Nikolic., Y. C. Liang., E. A. Kirkby and V. Romheld. 2007. Germanium-68 as an adequate tracer for silicon transport in plants. Characterization of silicon uptake in different crop species. *Plant Physiology*. 143: 495-503.
- NMX-FF:077-1996. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano fruta fresco. Limón persa (*Citrus latifolia* L.). Especificaciones. Normas Mexicanas. Dirección General de Normas. pp. 10.
- Nwugo, C. C., and A. J. Huerta. 2008. Silicon-induced cadmium resistance in rice (*Oryza sativa*). *Journal of plant nutrition and soil science*. 171(6): 841-848.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). International standards for fruit and vegetables-citrus. <https://www.oecd.org/centrodemexico/laocde/> (Consultado: septiembre 2018).
- Parménides, F. B. 2012. Efecto del silicio en la fertilidad del suelo, en la incidencia de enfermedades y el rendimiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa*) var. CR 4477. Instituto Tecnológico de Costa Rica. San Carlos, Costa Rica.
- Rains, D. W., E. Epstein., R. J. Zasoski and M. Aslam. 2006. Active silicon uptake by wheat. *Plant and Soil*. 280: 223-228.
- Randa, Y. H. 2016. Response of navel orange trees to potassium silicate application. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*. 47(6-1): 164-172.
- Raven, J. A. 2003. Cycling silicon-the role of accumulation in plants. *New Phytologist*. 158: 419-421.
- Rodrigues, F. A. and L. E. Datnoff. 2015. Silicon and plant diseases. Springer International Publishing. New York, Estados Unidos. Ed. Springer. pp. 159.

- Rodríguez, F. 1996. Fertilizantes: nutrición vegetal. Editor AGT. D. F. México. pp. 154.
- Saavedra-Miranda, M. y Mamani-Fernández, I. 2011. Evaluación de un fertilizante químico-orgánico a base de silicio hidrosoluble (Quick sol®), sobre parámetros productivos de poroto verde (*Phaseolus vulgaris*) cv. Magnum, en condiciones de invernadero en el valle de Azapa, XV región. Tesis profesional. Facultad de ciencias agronómicas. Universidad de Tarapacá. Arica, Chile.
- Sakurai, G., A. Satake., N. Yamaji., N. Mitani-Ueno., M. Yokozawa., F. G. Feugier and J. F. Ma. 2015. In silico simulation modeling reveals the importance of the casparian strip for efficient silicon uptake in rice roots. *Plant and Cell Physiology*. 56: 631-639.
- Salisbury, F.B. y C. W. Ross. 1994. Fisiología vegetal. Grupo Editorial Interamericana. USA. 142-143 pp.
- Schwentenius, R. R. y C. M. A. Gómez. 2005. El limón persa: tendencias en el mercado mexicano. Universidad Autónoma Chapingo. PIAI-CIESTAAM. México. pp. 150.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2017. http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/ (Consulta: agosto 2018).
- Shewfelt, R. L. 2003. Color. In: Postharvest Physiology and Pathology Vegetables. Bartz, J. A., J. K. Bercht (eds.). Marcel Dekker. New York, USA. pp. 733.
- Solís, L. L. y M. E. C. Tomalá. 2010. Efecto de NPK en la producción de *Citrus aurantifolia* Swingle V. sutil en la zona de Sinchal-Barcelona, Cantón Santa Elena. La Libertad, Ecuador. pp. 108.
- Sommer, M., Kaczorek, D., Kuzyakov, Y., and Breuer, J. 2006. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes: a review. *Journal of Plant Nutrition Soil Science*. 169: 310-329.

- Spain, J. M, C. A. Francis, R. H. Howeler, y F. Calvo. 1975. Diferencias entre especies y variedades y pastos tropicales en su tolerancia a la acidez del suelo. En: E. Bornemiza y A. Alvaro (Eds.). Manejo de suelos en la America tropical. North Carolina State University. Raleigh, USA.
- Takahashi, E, J. F. Ma and Y. Miyake. 1990. The possibility of silicon as an essential element of higher plants. *Comments on Agricultural and Food Chemistry*. 2: 99-122.
- Tamai, K and J. F. Ma. 2003. Characterization of silicon uptake by rice roots. *New Phytologist*. 158: 431-436.
- Tripathi, D. K., V. P. Singh, S. M. Prasad, D. K. Chauhan, N. K. Dubey, A. K. Rai. 2015. Silicon-mediated alleviation of Cr (VI) toxicity in wheat seedlings as evidenced by chlorophyll florescence, laser induced breakdown spectroscopy and anatomical changes. *Ecotoxicology and environmental safety*. 113: 133-144.
- Tubana, B. S., T. Babu and 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: 393-411.
- Undurraga, P. L, J. A. Olaeta, J. B. Retamales y A. M. Toso. 2007. Manifestación de peteca y pérdida de calidad en limones Eureka bajo diferentes condiciones de almacenamiento refrigerado. *Agrociencia*. 41: 133-139.
- Vanegas, M. 2002. Guía técnica cultivo del limón pérsico. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Nueva San Salvador, El salvador. pp. 46.
- Vasanthi, N. D., Saleena, L. M. and Raj, S. A. 2012. Silicon in day today life. *World Appl Science Journal*. 17: 1425–1440.
- Villalba-Campos, L, A. O. Herrera-Arévalo y J. O. Orduz-Rodríguez. 2014. Parámetros de calidad en la etapa de desarrollo y maduración en frutos de

- dos variedades y un cultivar de mandarina (*Citrus reticulata* Blanco). Universidad de Los Llanos. Meta, Colombia. 18(1): 21-24.
- Vitti, G. C, E. Lima y F. Cicarone. 2006. Cálcio, magnésio e enxofre. In: MANLIO, S.F. (Ed.). Nutrição mineral de plantas. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 299-325 pp.
- Vulavala, V. K. R., R. Elbaum., U. Yermiyahu., E. Fogelman., A. Kumar and I. Ginzberg. 2016. Silicon fertilization of potato: Expression of putative transporters and tuber skin quality. *Planta*. 243: 217-229.
- Wutscher, H. K. and P. F. Smith. 1993. Citrus. Pp 166-167. In: Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants. W. F. Bennett (Editor). APS PRESS. St. Paul, Minnessota, USA.
- Xu, C. X., Y. P. Ma, and Y. L. Liu. 2015. Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. *South African Journal of Botany*. 98: 26-36.
- Yan, G., N. Miroslav., M. Ye., Z. Xiao and Y. Liang. 2018. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*. 17 (10): 2138-2150.
- Zhu, Y. and H. Gong. 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*. 34(2): 455-472.