

La aplicación de Silicio: Una alternativa eficaz en la producción de tomate (*Solanum Lycopersicum* L.)



La aplicación de Silicio: Una alternativa eficaz en la producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

Publicado por:	Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Dir. Av. Quito km 1½ vía a Santo Domingo de los Tsáchilas, Quevedo, Ecuador. www.uteq.edu.ec .
Derechos reservados:	© Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador 2023. Dirección de Investigación Ciencia y Tecnología (DICYT). Se autoriza la reproducción de esta publicación con fines educativos y otros que no sean comerciales sin permiso escrito previo detentar el derecho de autor, mencionando la cita.
Cita del libro:	Tipán H. y Reyes J. 2023. La aplicación de Silicio: Una alternativa eficaz en la producción de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.). 76 pp.
Revisión de Pares Externos:	Antonio Juárez Maldonado. Doctor en ciencias. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México. Sergio Florentino Rodríguez Rodríguez. Doctor en Ciencias Agrícolas. Universidad de Granma, Cuba.
Primera Edición:	Quevedo, Diciembre del 2023.
ISBN:	978-9978-371-96-1
Equipo Editorial:	Econ. Carlos Edison Zambrano, Ph.D. Director Ing. Javier Patiño Uyaguari, M.Sc. Revisión y Corrección Ing. J. Bladimir Mora Macías Edición y Diagramación

ISBN: 978-9978-371-96-1



Derechos de Autor © 2023
Hilda Cristhina Tipán Torres
Juan José Reyes Pérez

► PRESENTACIÓN

El Comité Editorial de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ) es la unidad encargada de promover, gestionar y administrar el conocimiento resultante de las actividades de investigación científica, la docencia y la vinculación de docentes y estudiantes. Dentro del procedimiento para el reconocimiento al profesorado y estudiantado de la UTEQ se contempla la publicación como libros de Tesis de grado y posgrado que se distingan por su innovación, metodología, rigor técnico o impacto social.

El Proyecto de Investigación en opción al grado de Ingeniera Agropecuaria de Hilda Cristhina Tipán Torres, obtenido en la “Universidad Técnica Estatal de Quevedo”, atiende a la normativa existente para ser publicado como libro y por ello el Comité Editorial de la UTEQ aprueba la visibilidad y acceso a la comunidad académica, científica y sociedad en general.



► **La aplicación de Silicio: Una alternativa eficaz en la
producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)**

AUTORES:

Hilda Cristhina Tipán Torres
Juan José Reyes Pérez



CONTENIDO GENERAL

INTRODUCCIÓN	12
--------------------	----

CAPÍTULO I.

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.1 Problema de Investigación	16
1.1.1 Planteamiento del problema	16
1.2. Objetivos	18
1.2.1 Objetivo General	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Justificación	19

CAPÍTULO II.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	20
2.1. MARCO TEÓRICO	21
2.1.1. El cultivo del tomate. Generalidades	21
2.1.2. Requerimientos edafoclimáticos y nutricionales del tomate ..	21
2.1.3. La producción de tomate en Ecuador	22
2.1.4. Silicio. Generalidades	23
2.1.5. Importancia del silicio en la absorción de las plantas	24
2.1.6. El silicio y su mecanismo de acción en la planta	25
2.1.7. El silicio como alternativa de fertilización en la agricultura ..	27
2.2. Marco referencial	28
2.2.1. Origen y características de <i>Solanum lycopersicum</i> L.	28
2.2.2. El cultivo de tomate en el Ecuador	29
2.2.2.1. Variedades de tomate más utilizadas	29
2.2.2.2. Siembra y trasplante	31
2.2.2.3. Riego	31
2.2.2.4. Fertilización	31
2.2.2.5. Indicadores morfoagronómicos del crecimiento del tomate	32
2.2.2.6. Rendimiento e indicadores de producción agrícola	32

2.2.2.7. Indicadores de calidad nutracéutica de los frutos	32
2.2.3. Antecedentes de fertilización con silicio	33

CAPÍTULO III.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	35
3.1. Localización	36
3.1.1 Condiciones agroclimáticas	36
3.2. Tipo de investigación	36
3.3. Método de investigación	37
3.3.1. Método inductivo	37
3.3.2. Método analítico	37
3.4. Fuente de recopilación de información	37
3.5. Diseño de la investigación	38
3.5.1. Tratamientos	38
3.5.2 Esquema del Análisis de varianza	38
3.6. Instrumento de investigación	39
3.6.1. Condiciones de cultivo del tomate	39
3.6.1.1. Tratamientos a la semilla	39
3.6.1.2. Obtención de las plántulas	39
3.6.1.3. Trasplante y establecimiento de la plantación	40
3.6.1.4. Control de arvenses	40
3.6.1.5. Riego	40
3.6.2. Variables evaluadas	40
3.6.2.1. Longitud del tallo (cm)	40
3.6.2.2. Diámetro del tallo (cm)	41
3.6.2.3. Longitud de la raíz (cm)	41
3.6.2.4. Biomasa fresca y seca de la parte aérea de la planta y la radícula (g)	41
3.6.2.5. Variables del rendimiento y sus componentes	42
3.6.2.6. Indicadores de calidad nutracéutica	42
3.7. Tratamientos de los datos	43
3.8. Recursos humanos y materiales	44
3.8.1. Recursos humanos	44

3.8.2. Materiales e insumos	44
-----------------------------------	----

CAPÍTULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
------------------------------	----

4.1 Variables morfoagronómicas	47
--------------------------------------	----

4.1.1 Longitud del tallo a los 30, 45 y 60 días después del trasplante	47
---	----

4.1.2 Diámetro del tallo a los 30, 45 y 60 días después del trasplante	48
---	----

4.1.3 Biomasa fresca y seca de las hojas	50
--	----

4.1.4 Biomasa fresca y seca del tallo	51
---	----

4.1.5 Longitud de la raíz	52
---------------------------------	----

4.1.6 Biomasa fresca y seca de la raíz	53
--	----

4.2. Rendimiento y variables relacionadas	54
---	----

4.2.1 Número de frutos por racimo y número de frutos por planta .	54
---	----

4.2.2 Diámetro polar y ecuatorial del fruto	55
---	----

4.2.3 Biomasa fresca del fruto y rendimiento agrícola	57
---	----

4.2.4 Porcentaje de acidez en el fruto	58
--	----

4.2.5 Porcentaje de sólidos solubles totales del fruto (brix)	59
---	----

4.2.6 Contenido de ácido ascórbico en el fruto	61
--	----

CAPÍTULO IV.

CONCLUSIONES	65
--------------------	----

5.1 Conclusiones	66
------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA	67
--------------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del cultivar de tomate Acerado 3590 30

Tabla 2. Tratamientos con aplicación de silicio empleados en la
investigación 38

Tabla 3. Esquema del Análisis de varianza (ANDEVA) para
Diseño Completamente al Azar DCA 38

Tabla 4. Materiales, equipos e insumos utilizados 44

Tabla 5. Coeficientes de correlación de Spearman entre las
variables número de frutos por racimo (NF/R) 62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Valores promedios de longitud del tallo (cm)	47
Figura 2. Valores promedios del diámetro del tallo (cm)	49
Figura 3. Valores promedios de la biomasa fresca de hojas (a)	50
Figura 4. Valores promedios de la biomasa fresca del tallo (a)	51
Figura 5. Valores promedios de la longitud de la raíz (cm)	52
Figura 6. Valores promedios de la biomasa fresca de la raíz (a)	54
Figura 7. Valores promedios del número de frutos por racimo (a) ..	55
Figura 8. Valores promedios del diámetro polar del fruto (a)	56
Figura 9. Valores promedios de longitud del tallo (cm)	57
Figura 10. Valores promedios de acidez en el fruto para los distintos tratamientos	58
Figura 11. Valores promedios del porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix)	59
Figura 12. Valores promedios del contenido de ácido ascórbico (vitamina C)	62

INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza de mayor aceptación y consumo del mundo, en el año 2020, su producción mundial alcanzó 186.821 millones de kilos de tomates según datos de la FAO (1). En el Ecuador se produjeron en 2015, 71 935 toneladas de tomate, en siembras distribuidas en la provincia de Santa Elena y en los valles de Azuay, Imbabura y Carchi, mientras en la sierra ecuatoriana, el cultivo de tomate de mesa se realiza bajo invernadero, puesto que es una especie que necesita una temperatura mínima de 18 °C, para tener una producción y desarrollo adecuado (2).

La importancia del tomate radica en su valor nutricional y su gran prestigio en la alimentación. En la actualidad se reconoce su valor, debido a su contenido de vitamina C. Además, posee propiedades terapéuticas como analgésico, anti-inflamatorio y antioxidante (1). Incluso su alto contenido de vitaminas y minerales es apetecido dentro del arte culinario, lo que favorece que esté presente en recetas de cocina a nivel del mundo. Su popularidad crece cada día, siendo esta una de las especies vegetales más consumidas en todos los países. Según FAOSTAT (1), China ocupó el primer lugar en el mundo con una producción de tomate de 46.2 % del total. Es importante mencionar que Ecuador no está entre los 30 mayores productores del mundo, no obstante, el tomate es una de las principales hortalizas producidas a nivel nacional (2).

La nutrición se considera el segundo factor que más influye en el manejo del tomate, después de la disponibilidad de agua (3). Consecuentemente, se emplean fertilizantes químicos para la fertilización convencional, pues se reconoce la importancia de los macroelementos nitrógeno, fósforo potasio y algunos microelementos como, azufre, magnesio y calcio. Sin embargo, investigaciones recientes también han demostrado en varias especies vegetales, la importancia de la fertilización con silicio para una mayor producción agrícola, menor incidencia de plagas y enferme-

dades, así como, el incremento de la calidad nutricional de los frutos (4). El silicio (Si) es considerado el segundo elemento de mayor abundancia en el suelo, después del oxígeno que comprende aproximadamente el 28 % de la corteza terrestre (5). A pesar de la abundancia, el (Si) no puede ser absorbido directamente por las plantas, debido a que está disuelto en la solución del suelo (4). La forma disponible de (Si) para la planta es el ácido monosilícico (H_4SiO_4), que está presente en la solución del suelo, en concentraciones que oscilan entre 0.1 y 0.6 mM. Aunque se considera un nutriente no esencial para la mayoría de las plantas, los beneficios del silicio incluyen: aumentar la resistencia a plagas y enfermedades, la tolerancia a la sequía y a los metales pesados (5). El silicio químicamente activo restaura el daño y optimiza la fertilidad del suelo, mantiene los nutrientes en forma disponible para la planta y mejora la capacidad de intercambio catiónico, sobre todo en pH mayor a 7,0 (4).

En el presente trabajo se evaluará los efectos de la aplicación de silicio en el cultivo del tomate. Específicamente sobre la variación de sus indicadores morfoagronómicas, el rendimiento y sus componentes, así como la calidad nutracéutica de los frutos.





CAPÍTULO I.

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Problema de Investigación

1.1.1 Planteamiento del problema

La mayoría de la producción agrícola en el Ecuador se basa fundamentalmente en el uso cada vez más creciente y excesivo de agroquímicos, lo que provoca consecuencias indeseables a largo plazo, como la salinización de los suelos y la pérdida de su fertilidad (6). Sin embargo, aún no se logra en el tomate, los rendimientos deseados y los frutos no siempre poseen la calidad nutracéutica adecuada (7). Adicionalmente es alta la incidencia de plagas y enfermedades, lo cual obliga a nuevas aplicaciones. Dentro de las causas que originan este problema se encuentra el desconocimiento por los agricultores de la demanda correcta de fertilizantes que necesita el cultivo del tomate. Los fertilizantes químicos sintéticos generalmente contienen los macro y microelementos que tradicionalmente se han utilizado en la agricultura convencional. Sin embargo, no contienen otros elementos útiles que influyen de forma importante en el metabolismo de las plantas, tal como, el silicio.

Por lo tanto, en muchas ocasiones, el silicio se encuentra en forma no asimilable por las plantas, resultando en una carencia de este elemento, a pesar que es el segundo elemento más abundante de la naturaleza. Consecuentemente se necesita su suministro exógeno para lograr un correcto funcionamiento del metabolismo celular y de la producción agrícola.

Las frecuentes deficiencias en el cultivo de algunos elementos como el fósforo debido a que no se encuentre formas asimilables por las plantas, es otro de los problemas que motivan la fertilización a base de silicio, pues libera al fósforo de los componentes del suelo y lo convierte a una forma asimilable para las plantas, lo cual aumenta la eficiencia agronómica de los fertilizantes y reduce sus dosis. También la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo, es otro problema que existe que el silicio puede contribuir a solucionar al crear barreras mecánicas en las

estructuras vegetales, que dificultan su ataque. Por lo tanto, se disminuiría el uso de insecticidas y fungicidas químicos que reducen la calidad nutracéutica de los frutos.

Adicionalmente, el silicio confiere dureza a las estructuras de las plantas, lo que contribuye a solucionar el problema de la disposición correcta de las hojas para realizar una fotosíntesis más eficiente además de influir decisivamente en el problema actual de falta de resistencia mecánica de las plantas ante el viento y estreses abiótico. Sin embargo, al no efectuarse la aplicación de silicio en el tomate, también en el Ecuador persisten estos problemas.

Diagnóstico

En el Ecuador no hay registro oficial de fertilización con silicio, en prácticamente ningún cultivo, consecuentemente tampoco, se realiza en el tomate. En el país se siembran alrededor de 3000 ha de tomate en el país que pueden beneficiarse de esta práctica. La carencia de información disponible acerca del efecto del silicio, en el aumento de la productividad de las plantas, es el aspecto fundamental que limita la introducción de esta práctica. De esta forma los resultados de esta tesis pueden favorecer la aplicación de este elemento en mayor extensión.

Pronóstico

La aplicación de fuentes de silicio en el cultivo del tomate se espera estimule la mejora de variables morfoagronómicas del crecimiento de las plantas, Adicionalmente se espera que disminuya la incidencia de plagas y enfermedades y por ende disminuya el uso de plaguicidas químicos. Todos estos efectos beneficiosos deben incrementar el rendimiento y sus componentes. Adicionalmente se espera se mejore la calidad nutracéutica de los frutos.

1.1.2. Formulación del problema

- ¿Cuál es el efecto de la aplicación de silicio en el crecimiento y productividad de plantas de tomate, así como en la calidad nutracéutica de sus frutos?
- ¿Mediante la aplicación de silicio se influirá en el crecimiento y productividad de plantas de tomate, así como en la calidad nutracéutica de sus frutos?

1.1.3. Sistematización del problema

- ¿Cuál será el efecto del silicio en las variables morfoagronómicas de crecimiento vegetal, el rendimiento y los indicadores de calidad nutracéutica de los frutos?
- ¿Cuál será el efecto del silicio en el rendimiento de las plantas de tomate y sus componentes?
- ¿Qué respuestas tendrán los indicadores de calidad nutracéutica del fruto en tomates provenientes de plantas aplicadas silicio?

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Evaluar el efecto de diferentes dosis de silicio en el crecimiento, productividad y calidad nutracéutica en tomate.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de diferentes dosis del silicio en el crecimiento de plantas de tomate.

- Determinar la mejor dosis de silicio en la productividad de plantas de tomate.
- Analizar el efecto del silicio en indicadores de calidad nutracéutica en frutos de tomate.

1.3. Justificación

El tomate es la hortaliza de mayor consumo en el Ecuador (2). Por lo tanto, su producción agrícola demanda altos rendimientos y una adecuada calidad nutracéutica de sus frutos. Ante esta situación se necesita buscar nuevos enfoques que garanticen lograr estas metas. Consecuentemente, las investigaciones recientes (8) han mostrado la importancia del silicio para las plantas, tanto para su metabolismo celular como en funciones que mejoran su productividad agrícola, tales como, la disposición correcta de las hojas para realizar una fotosíntesis más eficiente y el incremento de la resistencia mecánica ante el viento y estreses abiótico (9,10). Adicionalmente, el silicio confiere dureza a las estructuras de las plantas, lo cual disminuye la incidencia de plaga y enfermedades, al crear barreras mecánicas en las estructuras vegetales que dificultan su ataque. Sin embargo, a pesar de estos beneficios, aún se desconoce por los productores las mejores dosis de aplicación y cómo influyen en las variables morfoagronómicas del tomate, la aplicación de este elemento en las condiciones del Ecuador. Tampoco se conoce el comportamiento del rendimiento y sus componentes con la aplicación de silicio, ni el efecto en la calidad nutracéutica de los frutos. Todas estas interrogantes motivan la realización de esta tesis.



CAPÍTULO II.

**FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA
DE LA INVESTIGACIÓN**

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. El cultivo del tomate. Generalidades

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) pertenece a la familia Solanaceae y es considerado una de las hortalizas más importantes a nivel mundial. La gran demanda del tomate se deriva por su consumo tanto como producto fresco y procesado. El tomate es originario de la región sur de Colombia y norte de Chile. Durante el siglo XVI, el tomate se introdujo por primera vez en Europa; sin embargo, la siembra comercial, industrialización y la diferenciación de las variedades para mesa e industria comenzaron a principios del siglo XIX (11). Estos productos son fuente importante de vitaminas y antioxidantes, los cuales se destacan por sus propiedades anti carcinogénicas (12).

El tomate tiene buena calidad nutritiva posee entre 3,4 y 8 % de materia seca, 2,4- 6,6 % de azúcares, 0,95 % de albumina, también es relativamente rico en vitaminas contiene entre 20 y 45 mg de Vitamina C, 0,045 mg de Vitamina B2, entre otras. En los frutos también se encuentran pequeñas cantidades de ácido cítrico, málico y pectinas (12).

Esta hortaliza a nivel mundial es cultivada aproximadamente en 5 millones de ha, con una producción de 186.08 millones de toneladas de tomate fresco. Actualmente, Asia domina el mercado de tomate, con prácticamente un 60 % de la producción mundial, seguido por América, Europa, África y por último Oceanía, con apenas un 0.15 % de la producción mundial (1).

2.1.2. Requerimientos edafoclimáticos y nutricionales del tomate

La planta de tomate no es muy exigente en cuanto al tipo de suelos, excepto en lo que se refiere al drenaje, aunque prefiere suelos sueltos de textura silíceo-arcillosa y ricos en materia orgánica. No obstante, se

desarrolla perfectamente en suelos arcillosos enarenados En cuanto al pH, los suelos pueden ser ligeramente ácidos hasta ligeramente alcalinos cuando están enarenados (13).

Dentro del género *Solanum*, el tomate es uno de los cultivos más importantes alrededor del mundo, se ha destinado un número de recursos considerablemente alto para la producción de este. Sin embargo, una gran parte de los cultivos se ve afectado por el estrés salino causando reducción en la cantidad, calidad y rendimiento de la producción (15).

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es moderadamente sensible a la salinidad en todas las etapas del desarrollo de la planta incluyendo la germinación, el crecimiento de la planta, calidad de fruta y rendimiento del cultivo. Debido a que el estrés salino provoca grandes pérdidas a nivel mundial uno de los objetivos en la actualidad es incorporar nuevos productos que contrarresten la salinidad (16).

La temperatura y el riego son de los principales aspectos que provocan pérdidas en el tomate. Temperaturas extremas, fuera del rango de 10 - 30 °C son perjudiciales, especialmente si se combinan con la sequía que es muy dañina. En cualquiera de los casos, las plantas necesitan activar mecanismos bioquímicos y fisiológicos para mitigarla (17). En muchos de estos mecanismos, el silicio tiene un importante papel, Sin embargo, este elemento no se consideraba importante, hasta hace poco tiempo, ni en mundo, ni en Ecuador.

2.1.3. La producción de tomate en Ecuador

El cultivo de tomate de mesa en el Ecuador es de suma importancia. Es un producto de la canasta básica familiar y de gran valor para la agricultura del país En el país hay 3 mil hectáreas de tomate. La producción es de aproximadamente 62 mil toneladas al año. La mayoría de tomateras está ubicada en la provincia de Santa Elena y en los valles de Azuay,

Imbabura y Carchi (18).

En la sierra ecuatoriana, el cultivo de tomate de mesa se realiza bajo invernadero, puesto que es una especie que necesita una temperatura mínima de 18 °C para tener una producción y desarrollo adecuado. Cada ecuatoriano consume, en promedio, 5 kilos de tomate al año (19).

Por otra parte, el tomate en el año 2018 ocupó una extensión a nivel mundial de 4'734.000 millones de hectáreas, con una producción de 163 millones de toneladas; donde China es el primer productor con 50 millones de toneladas, seguido por India con 18 millones de toneladas, Estados Unidos con 12 millones de toneladas. Ecuador no se encuentra entre los 30 primeros productores a nivel mundial (1). Sin embargo, el tomate de mesa tiene una gran demanda y ha incrementado su precio en 2020 hasta 0,37 USD/kg a campo abierto y 0,86 USD en invernadero (20).

2.1.4. Silicio. Generalidades

El silicio (Si) es el segundo elemento de mayor abundancia en la tierra después del oxígeno, que comprende aproximadamente el 28 % de la corteza terrestre (21).

Sin embargo, pese a su abundancia el (Si) no puede ser absorbido directamente por las plantas debido a que no se encuentra disuelto en la solución del suelo (22). Cabe mencionar, que en el suelo los minerales se someten química y físicamente a la intemperie, lo que resulta en la liberación de (Si), el cual permanece en muy pequeñas cantidades en solución debido a que precipita con otros elementos, como el Al y en menor grado Fe y Mg, para forman minerales arcillosos, los cuales son liberados hacia los arroyos y los océanos. A pesar de esto, la mayoría de las fuentes de (Si) en el suelo están presentes como aluminosilicatos cristalinos, que son insolubles y no están disponibles directamente

para las plantas. La forma disponible de (Si) para la planta es el ácido monosilícico (H_4SiO_4), que está presente en la solución del en concentraciones que oscilan normalmente entre 0.1 y 0.6 mM. Aunque se considera un nutriente no esencial para la mayoría de las plantas, los beneficios del silicio incluyen aumentar la resistencia a plagas y patógenos, la tolerancia a la sequía y los metales pesados, y la calidad y el rendimiento de los cultivos agrícolas (23).

Los fertilizantes a base de silicio son una alternativa que contribuye a la sostenibilidad de la agricultura en zonas áridas y semiáridas y atenúan el impacto de los factores que causan la desertificación. Además, el silicio favorece en el sistema planta-suelo. En la planta, refuerza la capacidad de almacenamiento y distribución de carbohidratos que requiere para su óptimo crecimiento vegetativo. Así mismo, el (Si) estimula dos mecanismos fundamentales en la planta: protección contra plagas y enfermedades, el desarrollo y actividad de estructuras poliméricas en cutículas (24).

2.1.5. Importancia del silicio en la absorción de las plantas

El Silicio se ha clasificado como uno de los elementos que benefician, a diferentes tipos de cultivos, incluso si se encuentra bajo algún tipo de estrés. Estudios han demostrado la implicación del silicio en las plantas en diferentes aspectos morfológicos y fisiológicos, cuando las plantas toman el (Si) en forma de ácido silícico se polimeriza como gel de sílice en la superficie de las hojas y tallos; aunque su función fisiológica no es evidente, sus efectos benéficos si son percibidos en plantas acumuladoras de este elemento en condiciones de estrés. Todas las plantas contienen algún grado de silicio en sus tejidos, aunque las monocotiledóneas tienden a acumular más silicio que las plantas dicotiledóneas, aparentemente por la capacidad de las raíces de absorber silicio cuando se encuentra en el suelo. El (Si) es el único elemento que no causa lesiones graves en cantidades excesivas, ya que tiene la cualidad de acoplarse formando

una cutícula de Silicio, con “células silificadas” y como “cuerpos de silicio” los cuales se forman con altas cantidades del elemento (25).

Según Emamverdian et al. (26) exponen que el silicio una vez dentro de la planta se localiza en diferentes estructuras, se difunde a través de los tejidos y forma una capa continua entre la cutícula y la epidermis compuesta por dos subcapas, una como gel de silicio y otra en complejo silico-celulosa. Ambas capas con un espesor de 5 micras aproximadamente, la cual aísla y defiende la planta de los factores adversos del medio ambiente. Además, el silicio proporciona una protección mecánica a la epidermis, lo que disminuye la transpiración y reduce el potencial hídrico de las células.

En el suelo, mejora las propiedades físicas como la disponibilidad del agua y químicas que mantiene los nutrientes en forma disponible para la planta. La aplicación de productos a base de silicio es una alternativa que puede considerar efectiva en cualquier tipo de suelo, sobre todo en aquellos donde el pH es inferior a 6,0 La forma disponible de (Si) para la planta es el ácido monosilícico (H_4SiO_4), que está presente en la solución del suelo en concentraciones que oscilan entre 0.1 y 0.6 mM. Aunque se considera un nutriente no esencial para la mayoría de las plantas, los beneficios del silicio incluyen: aumentar la resistencia a plagas y enfermedades, la tolerancia a la sequía y a los metales pesados (27).

2.1.6. El silicio y su mecanismo de acción en la planta

Tal como lo corrobora Iglesias et al. (28) se considera que el (Si) no es un elemento esencial, sin embargo, tiene varias funciones importantes en la fisiología de plantas, por lo que se le ha considerado como elemento benéfico. La aplicación de este elemento como fertilizante, ha beneficiado el crecimiento y desarrollo de diversos cultivos de importancia económica, como pepino, arroz, tomate, trigo, maíz, entre otros Normalmente las plantas toman el (Si) en forma de ácido monosilícico y esto a su vez se precipita en las partes internas de la planta, como la pared celular,

otorgando mayor rigidez y elasticidad. Gran parte de las especies vegetales acumulan concentraciones adecuadas de (Si), en sus tejidos y mejoran su crecimiento, su fertilidad cuando se aplican cantidades adecuadas del mismo. Cabe mencionar, que el mecanismo de acción de dicho elemento está involucrado en toda la planta el (Si) se deposita en el retículo endoplasmático, pared celular y en los espacios intracelulares, además se acumulan en las células epidérmicas. De tal manera que forman complejos con polifenoles protegiendo la pared celular de la planta. El (Si) activa genes involucrados en la producción de compuestos secundarios del metabolismo, como los polifenoles y enzimas relacionadas con los mecanismos de defensa de las plantas (29).

De tal manera, que el (Si) al ser tomado por la planta, actúa como elicitador o inductor de proteínas de defensa, por lo que hoy en día se ha venido incorporando el uso de silicato de potasio como alternativa para una agricultura sostenible. Además, existen diferentes mecanismos y vías por las cuales el silicio elimina las ROS y mejora los metales pesados. En los medios de crecimiento, es decir en el cultivo de tejidos. El silicio disminuye las actividades de los iones y limita la absorción y la translocación de metales de las raíces a los brotes. En la estructura celular, el silicio mejora el estrés por metales pesados a través de diversos mecanismos, como la regulación de la expresión génica implicada en el transporte de metales y estimula la actividad de las enzimas antioxidantes (30).

El (Si) actúa cuando las plantas están sometidas bajo algún tipo de estrés, la aplicación de (Si) ha mostrado efectos que benefician sobre diferentes tipos de cultivos. Además, se han encontrado efectos positivos del (Si) cuando las plantas están sometidas bajo condiciones salinas, toxicidad por metales pesados, desbalance de nutrientes, sequía, inundación, radiación y congelamiento (9).

El (Si) es absorbido en un rango de pH de 2 hasta 9, siendo tomado

por las raíces en la solución como ácido monosilícico ($\text{Si}(\text{OH})_4$) para ser acumulado en las células epidermales. Además, desempeña un papel importante en la resistencia a factores de estrés abiótico tales como toxicidad por metales pesados, salinidad y sequía, y puede reducir la generación de especies reactivas de oxígeno, debido al aumento de enzimas antioxidantes (29).

Experimentos recientes han demostrado que el (Si) exhibe efectos extraordinarios en el crecimiento y desarrollo de las plantas sin igual por cualquier otro nutriente vegetal no esencial, lo que destaca la subestimación actual de este elemento omnipresente (9, 21). Además, dicho conocimiento sobre los efectos benéficos de (Si) ha evolucionado considerablemente en lo que respecta a la resistencia de las plantas al estrés (31).

2.1.7. El silicio como alternativa de fertilización en la agricultura

El silicio como ya se ha mencionado anteriormente, es el segundo elemento de mayor abundancia en el suelo después del oxígeno. El silicio químicamente activo restaura el daño y optimiza la fertilidad del suelo, manteniendo los nutrientes en forma disponible para la planta y mejorando la capacidad de intercambio catiónico, sobre todo en pH mayor a 7,0 (5). Además, el contenido de silicio junto con el aluminio se relaciona con el pH de la solución del suelo a medida que el pH se eleva, el contenido de silicio se incrementa a una relación de 79,05 t/ha de silicio elemental, cantidad que es removido por requerimientos del cultivo y la erosión hídrica causada por la lluvia (9). Al ser removido el silicio se incrementan problemas de acidez y posible toxicidad a las raíces de los cultivos. En los suelos, el Si se libera lentamente en pequeñas cantidades a través de la acidificación de los silicatos por medio del ácido carbónico producido por la respiración de los microorganismos del suelo, además se acidifican los silicatos con los ácidos orgánicos débiles y enzimas producidos por las raíces de las plantas y los microorganismos (21).

Cabe señalar que, las superficies tropicales normalmente son ácidas o con tendencia a la acidez, esto a su vez causa una baja fertilidad de los suelos. Dicha presencia es común en América Latina, por lo que conllevan a buscar alternativas que mejoren la calidad de los suelos. Actualmente se están empleando investigaciones con productos de origen mineral, tal es el caso del silicio que ayuda a restaurar la fertilidad de los suelos al elevar la capacidad de intercambio catiónico, además ayuda a mejorar el contenido de calcio, magnesio, fósforo, entre otros elementos (31).

La elevación de la concentración del silicio actúa sobre disminución de la toxicidad por hierro (Fe) y manganeso (Mn) en el cultivo de importancia comercial y económica. Sin embargo, el silicio no solo tiene un efecto bioprotector en el suelo, sino también sobre la planta, hace que en las hojas y tallos se incremente la cantidad de oxígeno, el cual es impulsado hacia el parénquima de las raíces, oxidando la rizosfera, y logrando que el Fe y el Mn reducido se oxide, evitando una excesiva toma de estos elementos por parte de las plantas (8).

2.2. Marco referencial

2.2.1. Origen y características de *Solanum lycopersicum* L.

El origen del género *Lycopersicum* se encuentra situada en la región Andina, que se extiende desde el Sur de Colombia al Norte de Chile, y desde la costa del Pacífico a las estribaciones orientales de los Andes, comprendiendo los países de Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Chile. Sin embargo, en México fue donde se cultivó el tomate a partir de *L. esculentum* var. *cerasiforme*, único *Lycopersicum* de especie silvestre que crece como una planta no deseada (mala hierba) y que se encuentra fuera del área de distribución del género. Cabe mencionar que la llegada de los españoles a América, el tomate estaba integrado en la cultura azteca y en la de otros pueblos del área mesoamericana, existiendo diversidad

de tamaños, formas y colores del fruto por lo que se considera que se había formado un centro de diversificación secundario de la especie (11). El tomate no era conocido en la Unión Europea ni en el resto del Mundo, antes del descubrimiento de América. Los primeros tomates llegaron a Europa a través de los conquistadores españoles en el siglo XVI. Cuando el tomate fue introducido en el viejo continente tuvo una aceptación muy desigual. Así, a finales del siglo XVII, en España, Portugal e Italia el tomate se convierte en la base de la actual dieta mediterránea, adaptando rápidamente este ingrediente a sus platos. Por lo tanto, el tomate es considerado una de las hortalizas más importantes en el mundo por su gran demanda para el consumo fresco y como producto industrial.

El tomate es una planta anual con un sistema radicular pivotante y raíces adventicias. El tallo es cilíndrico y su crecimiento depende del tipo de variedad. Sus hojas son alternas y su tamaño también depende de su diferenciación varietal. Su fruto es una baya dividida en locus donde se encuentran numerosas semillas. El color y el tamaño del fruto también se define por la variedad sembrada y las condiciones de cultivo.

2.2.2. El cultivo de tomate en el Ecuador

2.2.2.1. Variedades de tomate más utilizadas

Las variedades de tomate atendiendo a su crecimiento se dividen en dos grupos: las de crecimiento determinado, cuyas plantas limitan el crecimiento vertical y las de crecimiento indeterminado donde las plantas no detienen el crecimiento vertical del tallo principal. Las de crecimiento determinado se siembra preferiblemente a cielo abierto, mientras que las del segundo grupo se siembran en invernadero. Como se ha mencionado anteriormente en la sierra ecuatoriana, el cultivo de tomate de mesa se realiza bajo invernadero, puesto que es una especie que necesita una temperatura mínima de 18 °C para tener una producción y desarrollo adecuado. En el Ecuador ocho variedades tienen la mayor acogida:

fortuna, Sheila, charleston, titán, Pietro, fortaleza, churri y conto. Sin embargo, también se siembran otras de reconocimiento internacional como Floradade, Saladette y Pomodoro (2).
Productores líderes (33) informan que, en condiciones de invernadero, dan buenos resultados las variedades fortaleza, fortuna y Sheila, mientras que en campo abierto se cultivan mejor las especies pietro, sheila y titán.

Actualmente se emplean nuevos cultivares como el tomate Acerado cuyas características se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del cultivar de tomate Acerado 3590.

Aspectos	Características
Aspectos Generales	Variedad productiva determinado redondo/globosa, frutos con buena firmeza, adaptable a diferentes fechas de plantío, buen cuaje. Variedad para campo abierto, apta para llevar el número de brazos que el agricultor disponga muy resistente a la post cosecha.
Planta	Tipo de Crecimiento: Determinado Vigor: Fuerte Madurez Relativa: Precoz Sistema de acerado: Campo Abierto Sistema de Producción: Estacado
Fruto	Forma: Globoso Peso Promedio: 160-200 gr Color: Rojo Intenso Larga Vida: Muy Prolongada Firmeza: Muy Buena Hombros Verdes: No
Resistencia a enfermedades	Verticillium (Vd) Fusarium (Fol (raza 1 y 2)) Virus del Mosaico del Tomate (ToMV) Nemátodos (Mi) Virus de la Cuchara (TYLCV) Virus del Bronceado del Tomate (TSWV)

Fuente bibliográfica (34)

2.2.2.2. Siembra y trasplante

El tomate puede sembrarse a partir de su semilla botánica, en campo abierto, invernadero o en sustrato artificial. En todos los casos se necesita cumplir con sus requerimientos de agua luz y nutrición para garantizar plántulas vigorosas y una buena producción. Usualmente se hacen siembras en un semillero y cuando las plántulas tengan aproximadamente entre 15 y 18 cm de altura se trasplantan para garantizar una adecuada distancia de plantación que tenga abundante luz, espacio y disponibilidad de nutrientes, Normalmente, el trasplante debe realizarse antes de los 25 días, aunque puede variar dependiendo de la variedad.

2.2.2.3. Riego

El tomate tiene una exigencia hídrica media, no resiste los encharcamientos y el exceso de humedad aumenta la incidencia de plagas y enfermedades, Por su parte, la falta del adecuado suministro hídrico afecta sensiblemente su normal desarrollo vegetativo y reproductivo y su producción agrícola.

2.2.2.4. Fertilización

La función de cada uno de estos elementos en la planta se ha determinado que es muy importante para las cosechas. De esta forma, el suministro adecuado de nitrógeno es vital para el crecimiento y fructificación, mientras que el fósforo ayuda a la regulación de los órganos vegetativos y generativos, así como es imprescindible para garantizar la calidad del fruto. Respecto al potasio ayuda fundamentalmente en el aumento de materia sólida y carbohidratos en el fruto, así como está directamente ligado a su correcta coloración y calidad (3).

2.2.2.5. Indicadores morfoagronómicos del crecimiento del tomate

Los principales indicadores morfométricos del crecimiento del tomate son la altura de la planta, longitud de la raíz, diámetro del tallo, número de hojas entre otros. Adicionalmente para los análisis de crecimiento, se registran varios indicadores relacionados con la producción de biomasa vegetal, tales como peso fresco de la raíz, de la parte foliar y de la planta en su totalidad. Una medida más confiable es la determinación de la masa seca de estas estructuras, Para esta determinación se elimina el agua contenida en esos tejidos, lo cual permite apreciar realmente la producción de materia seca de las plantas. En esta medición se elimina fundamentalmente el agua cuya presencia puede cambiar en dependencia del estado hídrico de las plantas y aportar resultados más variables.

2.2.2.6. Rendimiento e indicadores de producción agrícola

Los frutos del tomate tienen diferentes formas, tamaños y cualidades gustativas, dependiendo de la variedad. En sentido general la caracterización morfológica de los frutos se realiza por los indicadores diámetro ecuatorial, diámetro polar, número de lóculos, Adicionalmente, también se estudian medidas relacionadas con la producción de biomasa como el rendimiento entendido como producción total en una determinada área. La masa fresca de los frutos, como un componente directo que influye en el rendimiento. De forma similar se registra la masa seca de los frutos como una medida de la biomasa producida en los frutos sin la influencia del contenido relativo de agua.

2.2.2.7. Indicadores de calidad nutracéutica de los frutos

Por su parte, la calidad nutritiva y culinaria de los frutos también se caracteriza por varios indicadores. El pH y el índice de acidez del jugo son dos mediciones muy frecuentes para caracterizar la calidad nutracéutica del fruto. Otro indicador muy importante por su incidencia

nutricional, es el contenido de Vitamina C. Esta determinación no solo refleja calidad nutritiva de los frutos sino también se toma en cuenta como, una medida de su poder antioxidante.

2.2.3. Antecedentes de fertilización con silicio

A pesar de los argumentos de la esencialidad del Silicio, se ha sabido desde casi un siglo, que el (Si) ejerce efectos benéficos en el crecimiento de las plantas. Muchos efectos benéficos del (Si) han sido reportados, incluyendo el incremento en la actividad fotosintética, el incremento a la resistencia a plagas y enfermedades, reducción a la toxicidad mineral, mejoramiento en el desequilibrio nutricional y el mejoramiento o aumento a la tolerancia a la sequía y a las heladas (4). En total, los efectos benéficos del Silicio muestran dos características. Una es que los efectos benéficos difieren con la especie de planta. Los efectos benéficos son usualmente obvios en las plantas que acumulan altos niveles de Silicio en sus partes aéreas como el arroz (10). La otra característica es que los efectos benéficos del Silicio son por lo general expresados más claramente en las plantas sujetas a varios estreses bióticos y abióticos.

Se ha demostrado que, a pesar de no ser un elemento esencial para la planta, tiene cualidades que ayudan en el desarrollo y rendimiento de algunas especies como lo señala Villalón et al., (35), quienes realizaron la fertilización con silicio en plantas de chile piquín y obtuvieron un mayor incremento de altura de planta, a 14 cm y 12.8 cm, respectivamente; seguido del tratamiento control con 11.25 cm.

Algunos autores han reportado el efecto benéfico del (Si) en la emergencia, tal es el caso de Haghighi et al., (31), quienes reportaron que en (*Solanum lycopersicum* L.) el (Si) mantuvo el porcentaje de emergencia en niveles bajos y moderados de salinidad, mientras que, en un nivel alto de salinidad, una concentración de 1 mM incrementó dicha variable. Por otra parte, la presencia de (Si) en la solución nutritiva incrementó la

concentración de proteína en hoja de tomate, principalmente cuando la planta es sometida a estrés salino (25). La aplicación de (Si) disminuyó la concentración de Na^+ y aumenta la concentración del K^+ en raíces y brotes de plantas. Por lo tanto, la aplicación de estos oligoelementos (especialmente silicio) en condiciones salinas podría ser una mejor estrategia para mantener la productividad de los cultivos.



CAPÍTULO III.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en el invernadero del Campus Experimental “La María” ubicado en el km 7.5 de la vía Quevedo – Mocache en el cantón Mocache, provincia de Los Ríos, la ubicación geográfica es 1°04'48.6" latitud Sur y 792°30'04.2" longitud Oeste, a una altitud de 75 metros sobre el nivel del mar.

3.1.1 Condiciones agroclimáticas

El predio se encuentra en una zona climática tropical húmeda, con temperatura media anual de 25,4 °C, precipitación media anual de 3029.30 mm; 88.0 % de humedad relativa y 894.0 horas luz. año⁻¹. El suelo presenta una topografía plana, textura franco-limoso con un pH promedio de 5.5. Una caracterización más amplia del suelo se encuentra en los anexos 1 y 2.

3.2. Tipo de investigación

La investigación pertenece al área de la Agricultura y subárea de horticultura, corresponde a una investigación experimental de campo, para un mejoramiento de la calidad nutracéutica de los alimentos, en la cual se recomiendan las dosis de silicio más adecuadas para lograr una mayor productividad del cultivo, con alternativas amigables para el medio ambiente.

La aplicación de esta fertilización en el tomate se ejecutó a través de una investigación experimental que comprende la evaluación de dos formas de aplicación de silicio, así como tres dosis con las cuales se evaluaron las variantes y se seleccionaron las que indujeron en el cultivo del tomate mayor crecimiento, rendimiento y calidad nutracéutica.

3.3. Método de investigación

3.3.1. Método inductivo

Este método permitió el conocimiento general y específicos, con la finalidad de evaluar distintas dosis y formas de aplicación de silicio en tomate a través de algunas variables morfoagronómicas y nutraceuticas asociadas al crecimiento y rendimiento del cultivo, y de la calidad nutraceutica de los frutos. Este enfoque integral permitió una mejor comprensión de los mecanismos de acción que condicionan las respuestas metabólicas de las plantas que deciden la productividad y calidad agrícola. Adicionalmente constituye una alternativa amigable con el medio ambiente que ayuda a reducir el estrés biótico y abiótico en el tomate, lo que reduce el impacto ambiental en el cultivo de esta hortaliza respecto a los métodos convencionales que comúnmente se emplean.

3.3.2 Método analítico

Este método permitió realizar análisis de variables morfoagronómicas del crecimiento de las plantas, y al rendimiento y sus componentes, así como análisis bromatológicos relacionadas con la calidad nutraceutica de los frutos.

3.4. Fuente de recopilación de información

Las fuentes fueron dos, la primera es la de información que se recolectó en el tiempo de investigación. La segunda fue la información tomada de las bibliográficas que fueron consultadas en la web y otros medios como tesis, documentales, libros, revistas artículos científicos.

3.5. Diseño de la investigación

3.5.1. Tratamientos

Los tratamientos que se utilizaron en la investigación fueron los siguientes (tabla 2).

Tabla 2. Tratamientos con aplicación de silicio empleados en la investigación.

Tratamientos		Descripción
Código	Dosis de silicio (g. planta ⁻¹)	
T1	0	Aplicación de agua destilada. Control
T2	0,15	Aplicación de dosis baja de Silicio
T3	0,25	Aplicación de dosis media de Silicio
T4	0,35	Aplicación de dosis alta de Silicio

3.5.2 Esquema del Análisis de varianza

Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) de cuatro tratamientos con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental estuvo conformada por 10 plantas, para a un total de 40 plantas por tratamiento. El croquis del experimento aparece en el anexo 3.

El esquema del Análisis de varianza para diseño completamente al azar DCA, se indica en la tabla siguiente (tabla 3):

Tabla 3. Esquema del Análisis de varianza (ANDEVA) para Diseño Completamente al Azar DCA.

Fuente de variación	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada
Dosis de silicio (T)	T-1	3	$SCT = \frac{\sum r^2}{r^2} - FC$	CMT = SCT/GL
Error experimental	T(r-1)	12	SCE= SC Total – SC T	CMT/CME
Total	T.r-1	15	SC Total = $\sum x^2 - \frac{\sum (x)^2}{n}$	

Nota: $FC = \frac{\sum (x)^2}{n}$ = Factor de corrección

Modelo estadístico

El modelo estadístico para un DCA (Galo 31), es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_j + \beta_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

μ = es la media de la variable en estudio

T_i = Efecto de los tratamientos

ε_{ij} = Efecto del error experimental

3.6. Instrumento de investigación

3.6.1. Condiciones de cultivo del tomate

3.6.1.1. Tratamientos a la semilla

Se utilizaron semillas certificadas de tomate del cultivar Acerado 3059 de crecimiento determinado. Las semillas de tomate fueron desinfectadas en hipoclorito de sodio al 5.0 % por 10 minutos dándole un reposo de 3 a 4 horas antes de la siembra en el semillero.

3.6.1.2. Obtención de las plántulas

Para ello, las semillas se sembraron en charolas de polietileno de 200 cavidades, las cuales contenían el sustrato comercial Sogemix.

Las semillas se plantaron a razón de una semilla por cavidad a una profundidad correspondiente a dos volúmenes de la semilla. El riego aplicado a las charolas se realizó diariamente para una emergencia homogénea de las plántulas.

3.6.1.3. Trasplante y establecimiento de la plantación

El trasplante se realizó bajo condiciones de sombra, cuando las plántulas presentaron una altura entre 10 a 15 cm, en bolsas de 1 kg. El sustrato utilizado consistió en una mezcla de arena gruesa de arroyo más el sustrato comercial con una proporción de 1:1.

En cada bolsa se colocaron dos plantas con el fin de asegurar el éxito del trasplante, y luego se eliminó una, dejando las de mejores características y con más homogeneidad entre toda la población.

Una vez realizado el trasplante, se inició la aplicación diaria del riego, con el empleo de agua potable. Se realizaron todas las labores recomendadas en el cultivo del tomate, con la excepción de la aplicación de los tratamientos de silicio al momento del trasplante.

3.6.1.4. Control de arvenses

El control de arvenses se realizó teniendo en cuenta la presencia de las mismas, de forma manual y con el fin de evitar cualquier interferencia sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas dentro de la estructura del ensayo o experimento.

3.6.1.5. Riego

Se efectuaron riegos diarios hasta la capacidad de campo, evitando de esta manera estrés hídrico en las plantas. La aplicación del agua se realizó humedeciendo el sustrato en su totalidad.

3.6.2. Variables evaluadas

3.6.2.1. Longitud del tallo (cm)

Se determinó extendiendo la planta sobre una superficie plana y midiendo con una cinta milimetrada desde el punto de unión del tallo con la raíz hasta la punta del tallo. Se realizó a los 30, 45 y 60 días después del trasplante (DDT).

3.6.2.2. Diámetro del tallo (cm)

Se determinó en el punto medio del tallo, midiendo el grosor del tallo con un pie de rey marca Mitutoyo 53 (Mitutoyo Japón). Se realizó a los 30, 45 y 60 días después del trasplante (DDT).

3.6.2.3. Longitud de la raíz (cm)

Se determinó extendiendo la planta sobre una superficie plana y midiendo con una cinta milimetrada desde el ápice de la raíz hasta el punto de unión con el tallo. Se evaluó a los 120 días después del trasplante.

3.6.2.4. Biomasa fresca y seca de la parte aérea de la planta y la radícula (g)

La biomasa de tallos, hojas y raíces se determinó al separar de cada planta los tallos, hojas y área radicular luego con la ayuda de una balanza analítica digital marca (Sartorius, USA). Estas medidas se expresaron en gramos de masa fresca del tallo (MFT), masa fresca de hojas (MFH) y masa fresca de raíces (MFR). Se evaluaron a los 120 días después del trasplante.

Para las variables masa seca del tallo (MST), masa seca de hojas (MSH) y masa seca de la raíz (MSR), las muestras se colocaron en bolsas de

papel y se introdujeron en una estufa de secado, marca FED 115, (Binder, Alemania) a una temperatura de 65.0 °C durante 72 horas hasta obtener masa constante. Finalmente se pesaron en balanza analítica.

3.6.2.5. Variables del rendimiento y sus componentes

La evaluación de los frutos se realizó en la primera cosecha, en el estado de madurez fisiológica. Se evaluaron a los 120 días después del trasplante.

Diámetro polar de los frutos (cm). Se determinó por cada tratamiento. Se seleccionaron 40 frutos y se midió con un pie de rey.

Diámetro ecuatorial (cm): Por cada tratamiento se seleccionarán 40 frutos y se midieron con un pie de rey.

Número de fruto por planta (cm): Se realizó por conteo, cuando fructificaron el 50.0% de los frutos cuajados en cada planta individualmente por cada tratamiento y se utilizó el valor promedio.

Biomasa fresca del fruto: Por cada tratamiento se seleccionaron 40 frutos pesados en balanza analítica.

Rendimiento agrícola (kg. planta⁻¹): La producción agrícola del cultivo en cada cosecha se determinó por peso directo de los frutos en cada parcela.

3.6.2.6. Indicadores de calidad nutracéutica

Para la determinación de los indicadores de calidad nutracéutica se tomaron muestras de 10 frutos por tratamiento y se enviaron al laboratorio donde se determinaron las variables pH, porcentajes de acidez del fruto, sólidos solubles totales y contenido de Vitamina C.

Se evaluaron a los 120 días después del trasplante.

- **Sólidos solubles o brix. (%)**. Se determinó en forma directa utilizando el refractómetro Carl Zeiss (Jena, Alemania) con una escala entre 0 y 30 grados Brix.

- **Acidez del fruto**. Se determinó utilizando una mezcla de 40 g de agua destilada y 10 g de jugo de tomate, la cual se titula con hidróxido de sodio 0.1N y usando fenoftaleína como indicador. Se determinó el punto final de valoración con un pHmetro digital.

- **Contenido de Vitamina C en los frutos**: Se realizó por determinación espectrofotométrica en el Laboratorio de Suelos, Tejidos Vegetales y Agua del INIAP, Ecuador. Todos los análisis realizados para las variables de calidad nutracéutica fueron de acuerdo a las metodologías establecidas por el Laboratorio de Suelos, Tejidos Vegetales y Agua (32).

3.7. Tratamientos de los datos

En primer lugar, los datos se procesaron estadísticamente para verificar el cumplimiento de las premisas del análisis de varianza, la distribución normal de los datos por la prueba de ShapiroWilk modificada y la prueba de Levene para la homogeneidad de las varianzas. Todas las variables analizadas incumplieron al menos una de estas premisas, aún después de probar varias ecuaciones de transformación de datos, por lo que se recurrió a la estadística no paramétrica por Kruskal-Wallis, y como prueba de comparación múltiple entre los tratamientos en el caso de arrojar significación fueron a través de Conover (36), la cual realiza las comparaciones entre tratamientos a través de las diferencias entre las medias de los rangos. Se utilizó un nivel de significación del 5.0 % ($p < 0.05$).

Se realizó un análisis de correlaciones parciales por Spearman dado que para algunas variables sus valores no se ajustan a una distribución normal. La finalidad del análisis fue determinar el grado y la magnitud de las relaciones entre variables del rendimiento y calidad nutracéutica del fruto como el número de frutos por racimo y por planta, diámetro polar, ecuatorial y biomasa fresca de los frutos, rendimiento agrícola, y del jugo de los frutos, la acidez y el contenido de sólidos solubles totales o brix. Se muestra el coeficiente de correlación y la significación para $p \leq 0,05$.

Para el procesamiento automatizado de los datos se utilizó el paquete estadístico Infostat 2019 (37).

3.8. Recursos humanos y materiales

3.8.1. Recursos humanos

Hilda Cristina Tipán Torres (Autor del proyecto de investigación).
Ing. Juan José Reyes Pérez, Ph.D. (Tutor del proyecto de investigación).

3.8.2. Materiales e insumos

A continuación, se mencionan materiales, equipos e insumos que se utilizaron para la investigación (tabla 4).

Tabla 4. Materiales, equipos e insumos utilizados.

Material/Concepto	Unidad	Cantidad
Semilla de tomate	g	20
Fertilizante de silicio	kg	50
Sustrato comercial	kg	50
Materia orgánica	kg	100
Mochila de aspersión	una	1

Regla	una	5
Regadera	una	3
Cuchillo	uno	2
Balanza analítica	uno	1
Cronómetro	uno	2
Tamiz	una	4
Estufa	una	1
Bitácora		
Computadora	una	1
Esfero	uno	5
Pizarra	una	1
Tijera	una	3
Marcador	una	10



CAPÍTULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Variables morfoagronómicas

4.1.1 Longitud del tallo a los 30, 45 y 60 días después del trasplante

Para la longitud del tallo a los 30, 45 y 60 días después del trasplante (figuras 1a, 1b y 1c) se encontraron diferencias significativas entre los distintos tratamientos estudiados.

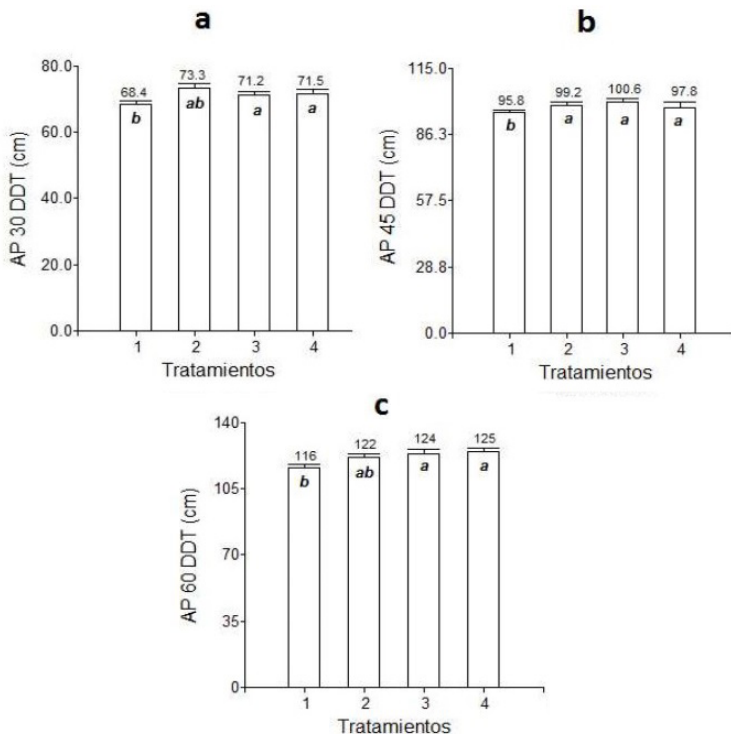


Figura 1. Valores promedios de longitud del tallo (cm) para los distintos tratamientos. T1 (tratamiento control), T2 (tratamiento 0,15 g. planta⁻¹ de silicio) y T4 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ de silicio), T3 (tratamiento 0,25 g. planta⁻¹ de silicio) a los 30 día después del trasplante (a), a los 45 días después del trasplante (b) y a los 60 días después del trasplante (c). Letras distintas indican diferencias significativas para p < 0,05 a través de Conover (36).

A los 30 días después del trasplante la mayor longitud del tallo se alcanzó en los tratamientos donde se aplicaron concentraciones de silicio de $0,15 \text{ g.planta}^{-1}$, $0,25 \text{ g.planta}^{-1}$ y $0,35 \text{ g.planta}^{-1}$ respectivamente, sin diferencias significativas entre ellos, los cuales superaron significativamente al tratamiento control en el cual no se aplicó silicio. Resultados similares se alcanzaron a los 45 y 60 días después del trasplante, lo que denota un incremento significativo del efecto del silicio en el crecimiento de la longitud de las plantas de tomate.

Peñazola (38) al estudiar la respuesta agronómica del cultivo del tomate del tipo riñón a la aplicación del dióxido de silicio en Ambato, Ecuador, con el empleo de dos fuentes del elemento, Diatomax Agri y Bilnet 40 cc.L^{-1} de agua aplicados cada 15 y 21 días encontraron que para las aplicaciones realizadas cada 15 días la altura de la planta varió por el tipo de producto y por la fecha de las seis evaluaciones realizadas con un intervalo de 15 días. Los mejores resultados de forma general se alcanzaron cuando se aplicó Bilnet. A los 15 días o primera evaluación no se apreciaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos y el control o no aplicación, diferencias que comenzaron a ser palpables a partir de los 30 días o de la segunda evaluación.

4.1.2 Diámetro del tallo a los 30, 45 y 60 días después del trasplante

Para el diámetro del tallo a los 30 días después del trasplante (Figura 2a) no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, por lo que se puede deducir que a esa edad del ciclo del cultivo no se produce un marcado efecto del silicio en esta variable.

Sin embargo a los 45 y 60 días después del trasplante (figuras 2 b y c) el efecto de las aplicaciones del silicio provocó diferencias significativas en el diámetro de los tallos, aunque sin una marcada diferencia entre los cuatro tratamientos. Fueron muy similares el diámetro de los tallos de los tratamientos con silicio a $0,25$ y $0,35 \text{ g.planta}^{-1}$, incluso sin una marcada

diferencia respecto al tratamiento donde no se aplicó silicio o tratamiento control. Se resalta que a los 45 y 60 días después del trasplante no existe un efecto de las aplicaciones de silicio a 0,15 g.planta⁻¹ en el diámetro de los tallos de las plantas de tomate.

García *et al* (39) demostraron el efecto de la fertilización complementada con tres fuentes de silicio, Potencializador Solubilizador (PSD), Silifertidol Ultra y Fosfosilidol, en las variedades Cid F1 y Pony Expres, en Peñuela, Veracruz, México. Para ambas variedades se alcanzó un diámetro del tallo estadísticamente superior cuando se aplicó Fosfosilidol con un 20 % por encima de la dosificación establecida para dicho producto a los 57 días del transplante.

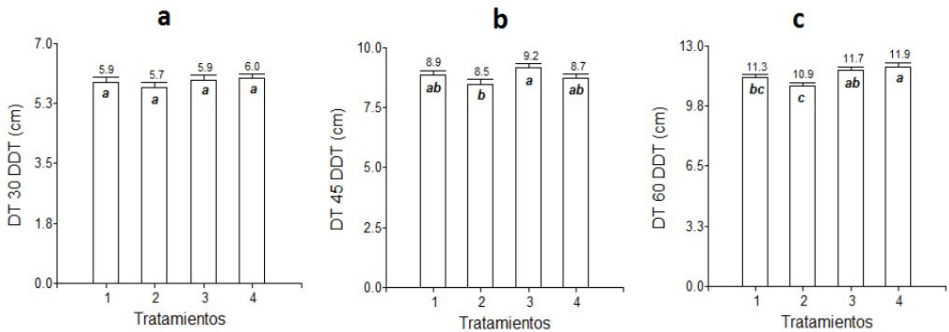


Figura 2. Valores promedios del diámetro del tallo (cm) para los distintos tratamientos. T1 (tratamiento control), T2 (tratamiento 0,15 g. planta⁻¹ de silicio) T3 (tratamiento 0,25 g. planta⁻¹ de silicio) y T4 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ de silicio) a los 30 días después del trasplante (a), a los 45 días después del trasplante (b) y a los 60 días después del trasplante (c). Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de a través de Conover (36).

4.1.3 Biomasa fresca y seca de las hojas

Respecto a la biomasa fresca foliar (figura 3a) los distintos tratamientos mostraron diferencias significativas. Los mayores valores de biomasa fresca foliar se alcanzaron en los tratamientos en que el silicio se aplicó a 0,15; 0,25 y 0,35 g.planta⁻¹, sin diferencias significativas entre ellos, con valores de biomasa foliar de 92,6; 77,1 y 75,7 respectivamente, a su vez los tratamientos con 0,25 y 0,35 g.planta⁻¹ no presentaron diferencias significativas con el tratamiento control.

Para el caso de la biomasa seca foliar (Figura 3b) no se encontraron diferencias significativas entre los cuatro tratamientos estudiados, por lo que no parecen tener efecto las dosis de silicio aplicadas en la formación de biomasa seca foliar.

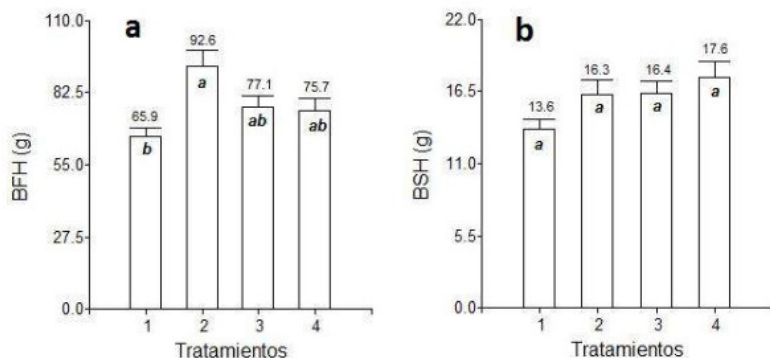


Figura 3. Valores promedio de la biomasa fresca de hojas (a) y biomasa seca de hojas (b) para los distintos tratamientos. T1 (tratamiento control), T2 (tratamiento 0,15 g. planta⁻¹ de silicio), T3 (tratamiento 0,25 g. planta⁻¹ de silicio) y T4 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ de silicio). Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de Conover (36). Aplicaciones exógenas de silicio en plantas en condiciones de estrés por altas temperaturas mejoran el contenido relativo de agua, la cantidad de pigmentos fotosintéticos y por consiguiente la biomasa de la planta (40), por su efecto bioestimulante del desarrollo vegetal como el incremento del largo de las hojas (41) y la biomasa (42).

4.1.4 Biomasa fresca y seca del tallo

Para la biomasa fresca y seca del tallo (figura 4a y b), los tratamientos mostraron diferencias significativas en ambas variables. Los mayores niveles de biomasa correspondieron a los tratamientos con 0,25 g. planta⁻¹ y 0,35 g. planta⁻¹ de silicio, sin diferencias significativas entre ellos, seguido del tratamiento en el cual se aplicó silicio a 0,15 g.planta⁻¹, mientras que los menores valores de biomasa fresca y seca del tallos correspondieron al tratamiento control.

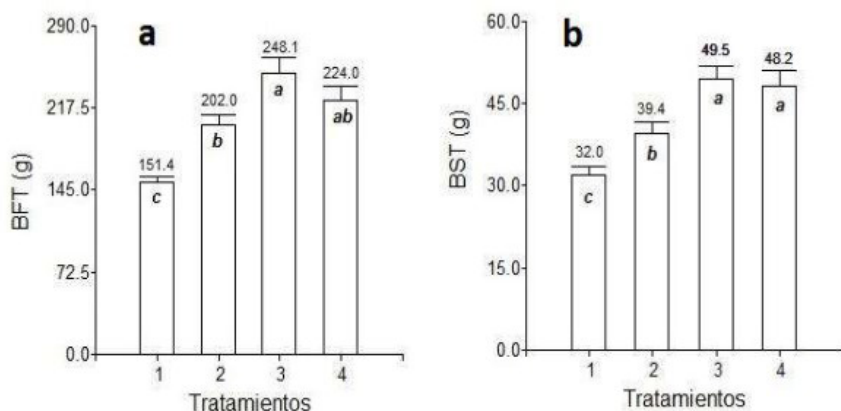


Figura 4. Valores promedios de la biomasa fresca del tallo (a) y biomasa seca del tallo (b) para los distintos tratamientos. T1 (tratamiento control), T2 (tratamiento 0,15 g. planta⁻¹ de silicio), T3 (tratamiento 0,25 g. planta⁻¹ de silicio) y T4 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ de silicio). Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de Conover (36). Alsaeedi et al (43) al aplicar nanopartículas de silicio en semillas de pepino (*Cucumis sativus*) y evaluar tres semanas después de la germinación la longitud de los brotes y raíces, y la masa fresca y seca de brotes y raíces, encontraron una estimulación mayor en estas variables fisiológicas cuando se aplicó el silicio a 200 m.L⁻¹. Resultados similares con la aplicación de nanosilicio se han obtenido en plántulas de tomate (44, 45) y en maíz (*Zea mays*) por (46).

4.1.5 Longitud de la raíz

Para la longitud de la raíz (figura 5), las aplicaciones de silicio provocaron una marcada diferencia significativa entre los tratamientos. Las raíces con mayores longitudes se alcanzaron en los tratamientos cuando el silicio se aplicó a 0,25 y 0,35 g.planta⁻¹ con longitudes de raíces cercanas a los 50 cm, que superaron significativamente al tratamiento control e incluso al tratamiento de 0,15 g.planta⁻¹ de silicio, estos últimos sin diferencias significativas entre ellos, cuyas longitudes de las raíces alcanzaron valores alrededor de los 35 cm.

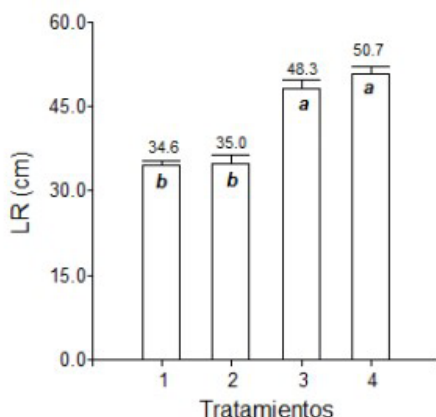


Figura 5. Valores promedios de la longitud de la raíz (cm) para los distintos tratamientos. T1 (tratamiento control), T2 (tratamiento 0,15 g. planta⁻¹ de silicio), T3 (tratamiento 0,25 g. planta⁻¹ de silicio) y T4 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ de silicio), . Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de Conover (36).

La estimulación que produce el silicio en el crecimiento de las raíces en los tratamientos con 0,25 y 0,35 g. planta⁻¹, con relación al control y al tratamiento con 0,15 g. planta⁻¹, puede estar relacionado a que este elemento químico se puede acumular en la fracción citoplasmática o en la pared celular de las raíces de las plantas de tomate y de otras especies vegetales (47).

Por otro lado, la presencia del Si en la pared de las células de las raíces afecta la penetración de *F. oxysporum f.sp. radicis-lycopersici*, debido a la influencia del elemento químico en la creación de una barrera física defensiva que favorece el incremento de la resistencia de la planta a la penetración del patógeno (48).

4.1.6 Biomasa fresca y seca de la raíz

Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para las variables biomasa fresca de raíz y biomasa seca de raíz (figura 6a y b). En la variable biomasa fresca de raíz (figura 6a) las aplicaciones de silicio a 0,25 g. planta⁻¹ superaron significativamente al resto de los tratamientos, con valores por encima de los 140 g, seguido de los tratamientos con 0,15 g. planta⁻¹ y de 0,35 g. planta⁻¹ sin diferencias significativas entre estos dos últimos y valores de biomasa fresca cercanos a los 90 g.

El tratamiento control sólo alcanzó valores de biomasa fresca de la raíz de 72,0 g. Una respuesta muy similar se produjo para la biomasa seca de la raíz (figura 6b) en la cual el tratamiento con 0,25 g. planta⁻¹ de silicio superó significativamente al resto de los tratamientos con valores por encima de los 60,0 g, le siguieron en orden de mérito el tratamiento con silicio a 0,35 g.planta⁻¹, seguido del tratamiento con 0,15 g.planta⁻¹, mientras que la menos biomasa seca de las raíces correspondió al tratamiento control o donde no se aplicó silicio.

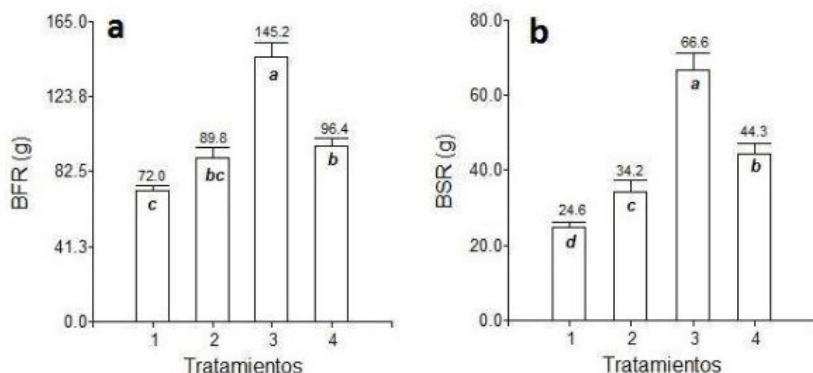


Figura 6. Valores promedios de la biomasa fresca de la raíz (a) y biomasa seca de raíz (b) para los distintos tratamientos. T1 (tratamiento control), T2 (tratamiento 0,15 g. planta⁻¹ de silicio), T3 (tratamiento 0,25 g. planta⁻¹ de silicio) y T4 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ de silicio). Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de Conover (36). En aplicaciones de silicio para inducir termotolerancia en plántulas de tomate (45), explicaron que las aplicaciones de silicio mejoraron significativamente la longitud, biomasa fresca y seca del sistema radical en comparación con el control y en condiciones de estrés por altas temperaturas.

4.2. Rendimiento y variables relacionadas

4.2.1 Número de frutos por racimo y número de frutos por planta

Tanto para el número de frutos por racimo (figura 7a) como para el número de frutos por planta (figura 7b) existió diferencias significativas entre los tratamientos. El mayor número de frutos por racimo y número de frutos por planta correspondió al tratamiento en el cual el silicio se aplicó a 0,35 g.planta⁻¹, seguido por orden de significación descendente por los tratamientos a 0,25 g.planta⁻¹ y 5 g.planta⁻¹. Los menores valores correspondieron al tratamiento control.

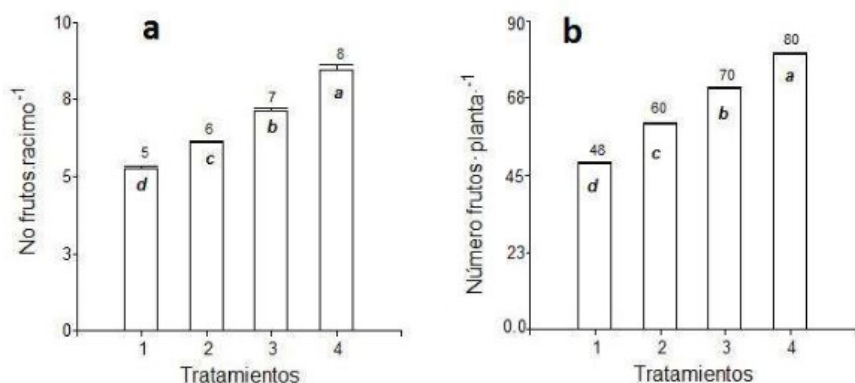


Figura 7. Valores promedios del número de frutos por racimo (a) y número de frutos por planta (b) para los distintos tratamientos. T1 (tratamiento control), T2 (tratamiento 0,15 g. planta⁻¹ desilicio), T3 (tratamiento 0,25 g. planta⁻¹ de silicio) y T4 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ d e silicio). Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de Conover (36).

Sin embargo, Peñazola (38) no encontró diferencias significativas al aplicar dos formulaciones a base de silicio con relación al no aplicado respecto al número de flores, número y peso de los frutos, tal vez por la diferencia con relación a esta investigación respecto al cultivar de tomate empleado, las formulaciones de silicio y los momentos de aplicación y evaluación. Para el cultivo del pepino 49 detectaron incremento del peso promedio de los frutos desde los 70 días después del trasplante, cuando el silicio fue aplicado de forma foliar.

4.2.2 Diámetro polar y ecuatorial del fruto

El mismo patrón de respuesta con diferencias significativas entre los tratamientos, y el mismo orden de mérito de los tratamientos se alcanzó para las variables diámetro polar (figura 8a) y diámetro ecuatorial del fruto (figura 8b), biomasa fresca del fruto (figura 9a) y del rendimiento agrícola (figura 9b).

Estos resultados contrastan para ambos diámetros con lo logrado por (38), en el cual no alcanzaron demostrar estadísticamente ($p = 0,5314$) diferencias al efecto de aplicaciones de silicio cuando utilizaron el óxido de silicio tanto para el diámetro ecuatorial como polar de los frutos de tomate, aunque evidenciaron una variación de 6,58 cm para el diámetro ecuatorial y de 5,94 cm para el diámetro polar en plantas que fueron tratadas con el portador de silicio Diatomax Agri, y de 6,86 x 6,13 cm para ambas variables cuando se aplicó Bilmot. Con relación al tratamiento donde no se aplicó silicio, la variación fue de 6,62 y 5,82 cm respectivamente.

Esta diferencia en los resultados respecto sí se compara con lo logrado con esta investigación pueden ser consecuencia del empleo de diferentes portadores de silicio utilizados, las diferencias edafoclimáticas y el cultivar de tomate utilizado.

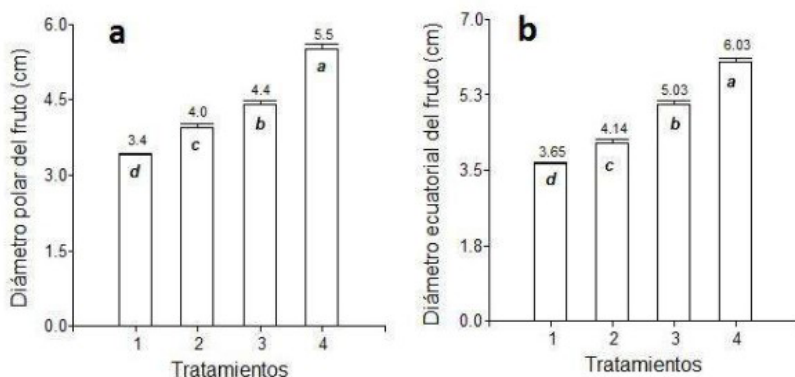


Figura 8. Valores promedios del diámetro polar del fruto (a) y del diámetro ecuatorial del fruto (b) para los distintos tratamientos. T1 (tratamiento control), T2 (tratamiento 0,15 g. planta⁻¹ de silicio), T3 (tratamiento 0,25 g. planta⁻¹ de silicio) y T4 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ de silicio). Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de Conover (36).

4.2.3 Biomasa fresca del fruto y rendimiento agrícola

Para la biomasa fresca del fruto (figura 9a) y el rendimiento agrícola (figura 9b), y al igual que para las variables diámetro polar y ecuatorial del fruto se encontraron diferencias significativas entre los cuatro tratamientos, y los valores de estas variables aumentaron a medida que se incrementaron las dosificaciones de silicio a las plantas de tomate (0,15; 0,25 y 0,35 g. planta⁻¹), superior estadísticamente al tratamiento en el cual no se aplicó silicio.

El rendimiento temprano y el rendimiento comercial del pepino cultivado en invernadero registró los valores mayores (2,94 – 3,60 kg. fruto.m⁻²) cuando se aplicó silicio con un incremento significativo de 14,4 % y 18,9 % respectivamente en los años 2017 y 2018 con relación a las plantas no tratadas. Respecto a los rendimientos considerados no comerciales con valores de 0,45 y 0,57 kg. fruto.m⁻² en ambos años se alcanzaron en aquellos tratamientos en los cuales se aplicó silicio (49).

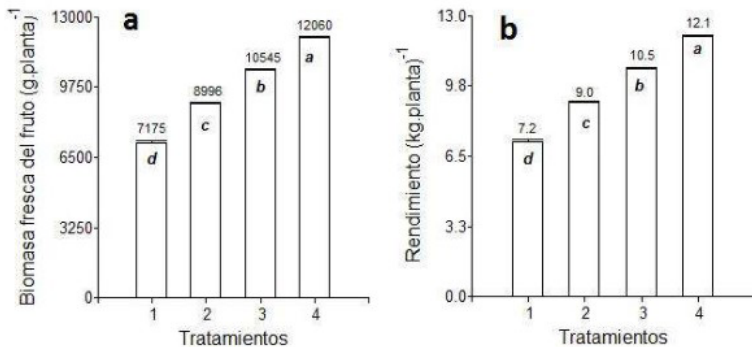


Figura 9. Valores promedios de la biomasa fresca del fruto (a) y del rendimiento agrícola (b) para los distintos tratamientos. T1 (tratamiento control), T2 (tratamiento 0,15 g. planta⁻¹ de silicio) y T4 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ de silicio). Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de Conover (36).

Aplicaciones de silicio a las plantas benefician el crecimiento, desarrollo y producción vegetal (50 y 51), debido a su efecto promotor y bioestimulante de procesos fisiológicos (52), con el consiguiente incremento del rendimiento agrícola en cultivos como el arroz (*Oryza sativa*) y la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) (52 y 53).

4.2.4 Porcentaje de acidez en el fruto

Para la acidez del fruto se demostraron diferencias significativas entre los tratamientos (figura 10). Los mayores niveles de acidez correspondieron al tratamiento en el cual a las plantas no se aplicó silicio, seguido de los tratamientos con silicio aplicado a 0,15 y 0,35 g. planta⁻¹, aunque sin diferencias significativas entre estos dos tratamientos. El tratamiento con menores niveles de acidez correspondió al tratamiento con silicio a 0,25 g. planta⁻¹.

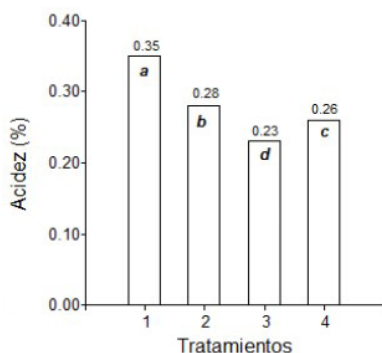


Figura 10. Valores promedios de acidez en el fruto para los distintos tratamientos. T1 (tratamiento control), T2 (tratamiento 0,15 g. planta⁻¹ de silicio), T3 (tratamiento 0,25 g. planta⁻¹ de silicio) y T4 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ de silicio). Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de Conover (36).

Yaghubi *et al.* (54) al evaluar los cultivares de fresa Kurdistan y Paros a las aplicaciones de silicato de potasio en Irán en diferentes dosificaciones, detectaron un incremento de la acidez titulable y lo atribuyen a un incremento en el contenido de ácido ascórbico.

Los autores antes mencionados asocian los incrementos de la acidez titulable con los aumentos de los sólidos solubles totales y que valores elevados de ambos parámetros en los frutos representan criterios a la hora de seleccionar el sabor de los frutos de fresa, además la relación sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable (AT) es comúnmente utilizada para la mejora del gusto y la madurez fisiológica en frutos de cultivo como la fresa (55), y atribuyen desde el punto de vista fisiológico los incrementos de los SST y la AT a los efectos que provoca el silicio en el incremento de los contenidos de clorofila y la mejora en la eficiencia fotosintética a partir de la elaboración de azúcares y compuestos orgánicos elaborados en las hojas y que son trasladados a los frutos, aspectos estos que tienen relación con los resultados encontrados por (56, 57 y 58).

4.2.5 Porcentaje de sólidos solubles totales del fruto (brix)

Contrario a los resultados encontrados en la variable acidez del fruto para el porcentaje de sólidos solubles totales °Brix (figura 11), los tratamientos con menores valores de acidez del fruto fueron los que alcanzaron los mayores porcentajes de sólidos solubles totales.

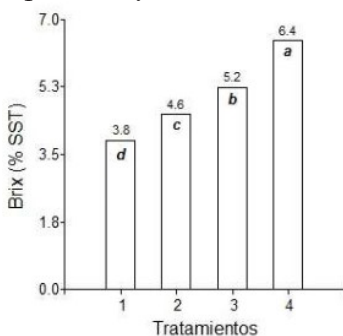


Figura 11. Valores promedios del porcentaje de sólidos solubles totales (°brix) en el fruto para los distintos tratamientos. T1 (tratamiento control), T2 (tratamiento 0,15 g. planta⁻¹ de silicio), T3 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ de silicio). y T4 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ de silicio). Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de Conover (36).

Con diferencias significativas entre ellos, el mayor porcentaje de sólidos solubles totales lo logró el tratamiento en el cual se aplicó el silicio a $0,35 \text{ g. planta}^{-1}$, con un brix de 6,4 %, y a medida que disminuyó la cantidad de silicio aplicado por planta ($0,25 \text{ g. planta}$ y $0,15 \text{ g. planta}^{-1}$), descendieron los valores de los sólidos solubles totales o brix en el fruto de tomate. El menor contenido de brix se alcanzó en el tratamiento control o donde no se aplicó silicio con valores de 3,8 % de sólidos solubles totales.

Estos resultados demuestran que el silicio en las distintas dosificaciones empleadas en esta investigación estimulan procesos bioquímicos y fisiológicos que incrementan los sólidos solubles totales en el fruto de tomate, y un estímulo a los procesos de síntesis del ácido ascórbico en el fruto (figura 12), con diferencias significativas entre los tratamientos, en que los tratamientos con mayores niveles de brix en el fruto, fueron también los frutos de tomate con niveles más elevados de ácido ascórbico.

En Egipto en aplicaciones foliares de diferentes compuestos nutricionales en calabaza (*Cucurbita pepo*), entre los cuales se empleó el silicato de potasio concluyeron (59) que los valores mayores de sólidos solubles totales se encontraron cuando se aplicó el silicio a 100 ppm.

Talebi et al (60) estudiaron los efectos del silicato de potasio en Irán en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) a la concentración de 0,5 mM en solución asperjada y corroboraron que la concentración empleada incrementó significativamente los contenidos de clorofila b, carotenoides y azúcares solubles, mientras que el contenido de azúcares insolubles en las hojas y las proteínas no mostraron diferencias significativas. Los azúcares o carbohidratos que fueron determinados en la mencionada investigación son considerados como sólidos solubles y están relacionados con el aumento de los sólidos solubles totales °Brix.

4.2.6 Contenido de ácido ascórbico en el fruto

Existen investigaciones recientes donde no se encontraron variaciones significativas a las aplicaciones de silicio en plantas, tal es lo encontrado por 61 en una investigación conducida en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México, al evaluar el efecto de tres fuentes de fertilización orgánica y dos concentraciones de silicio (15 y 20 ppm) en parámetros fisiológicos, del crecimiento y de la calidad nutracéutica en frutos de fresa (*Fragaria spp*), cultivar Camino Real, encontraron que la actividad del silicio a las dosis que evaluaron respecto a la calidad nutracéutica como los sólidos solubles totales o brix, el porcentaje de acidez titulable, contenido de vitamina C, fenoles, flavonoides y capacidad de antioxidantes, no detectaron estadísticamente variaciones significativas con la aplicación de silicio respecto al control.

En aplicaciones foliares con silicato de potasio en el desarrollo y calidad del rendimiento temprano en fresa, cultivar Fortuna, en Egipto (61), al evaluar tres concentraciones (0.2, 0.4 y 0.6 g.L⁻¹) se incrementó en los frutos significativamente el porcentaje de sólidos solubles totales °Brix, los azúcares totales, la acidez y los contenidos de vitamina C y antocianina con relación al control, con una tendencia al incremento de estas variables a medida que se incrementaron las concentraciones en la investigación.

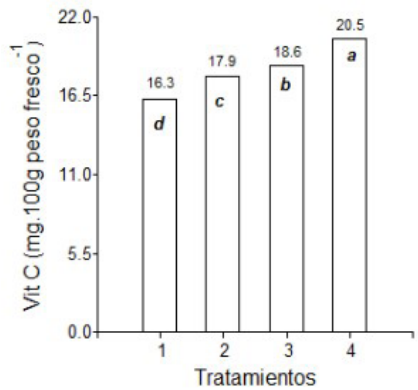


Figura 12. Valores promedios del contenido de ácido ascórbico (vitamina C) en el fruto para los distintos tratamientos. T1(tratamiento control), T2 (tratamiento 0,15 g. planta⁻¹ de silicio), T3 (tratamiento 0,25 g. planta⁻¹ de silicio) y T4 (tratamiento 0,35 g. planta⁻¹ de silicio). Letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ a través de Conover (36).

Tabla 5. Coeficientes de correlación de Spearman entre las variables número de frutos por racimo (NF/R), número de frutos por planta (NF/P), diámetro polar (DP), diámetro ecuatorial (DE), biomasa fresca del fruto (BFF), rendimiento agrícola (Rend), acidez del fruto (Acidez) y el contenido de sólidos solubles totales (Brix). ** indican diferencias altamente significativas para $p \leq 0,05$.

	NF/R	NF/P	DP	DE	BFF	Rend	Acidez	Brix
NF/P	0,89**							
DP	0,74**	0,83**						
DE	0,77**	0,85**	0,95**					
BFF	0,88**	1,0**	0,83**	0,85**				
Rend	0,88**	1,0**	0,83**	0,85**	1,00**			
Acidez	-0,74**	0,77**	-0,63**	-0,72**	-0,77**	-0,77**		
Brix	0,90**	0,97**	0,86**	0,89**	0,97**	0,97**	-0,80**	
Vit C	0,90**	0,97**	0,86**	0,89**	0,97**	-0,80**	-0,80**	1,00**

El análisis de correlación (Tabla 5) demostró que el número de frutos por racimos correlacionó de forma altamente significativa, con signo positivo y altos coeficientes de correlación con el número de frutos por planta, el diámetro ecuatorial, biomasa fresca del fruto, rendimiento agrícola, contenido de sólidos solubles totales y el contenido de ácido ascórbico, indicativo de que a medida que los valores de cada una de estas variables se incrementa, en la misma medida se incrementa también el número de frutos por racimo y viceversa. Para la acidez del fruto, el número de frutos por racimo correlacionó también, pero con signo negativo o correlación inversa y se explica que cuando se incrementa el número de frutos por racimo, desciende el contenido de acidez dentro de los frutos de tomate, cultivar Acerado 3590.

Para el resto de las correlaciones entre las variables se observó la misma tendencia que lo explicado anteriormente, en la que la acidez del jugo de los frutos mantuvo correlaciones altamente significativas, altas e inversas o de signo negativo con el resto de las variables. Se destaca el valor del coeficiente de correlación máximo que alcanzaron los coeficientes de correlación entre el número de frutos por planta, la biomasa fresca del fruto y el rendimiento, entre la biomasa fresca del fruto y el rendimiento agrícola, y entre el contenido de ácido ascórbico y el porcentaje de sólidos solubles totales.

Norge y Loría (63) determinaron coeficientes de correlación de Pearson en 63 genotipos de tomate producidos en condiciones de invernadero en Costa Rica, estudio en el que incluyeron siete variables cuantitativas. Encontraron correlaciones significativas altas y medias e inversas entre el peso de los frutos, número de frutos por racimo, rendimiento agrícola y el porcentaje de sólidos solubles totales. Mostraron además correlaciones significativas, altas y positivas entre el número de frutos por racimo y el brix, entre el rendimiento agrícola y el peso de los frutos. Correlaciones significativas, negativas de magnitudes altas y medias entre el número de frutos por racimo, el peso de los frutos y el rendimiento agrícola.

Se señala en la investigación anterior que entre el porcentaje de sólidos solubles totales y el pH del jugo en unos casos las correlaciones fueron significativas, positivas, pero de magnitud baja en su conjunto, e incluso fueron no significativas cuando el análisis de correlaciones se efectuó en los dos períodos de siembra estudiados de forma independiente, lo que evidenció no coincidencia en esos resultados y la presente investigación, al parecer por la diferencia en los genotipos evaluados y en las condiciones en que se desarrollaron los experimentos.

Los resultados alcanzados en esta investigación demuestran los efectos benéficos del silicio en la fisiología del crecimiento y desarrollo del cultivo del tomate, que, aunque no es catalogado como un elemento esencial, su adecuado empleo en la producción agrícola desde el inicio del proceso vegetativo del cultivo ha demostrado mejoras en parámetros morfoagronómicos, del rendimiento agrícola y en la calidad nutracéutica del cultivo.



CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

1. Las dosis de silicio a 0,15, 0,25 y 0,35 g. planta⁻¹ no presentan marcadas diferencias significativas entre ellas, pero superior al tratamiento en que no se aplicó, para las variables altura de la planta y diámetro del tallo a los 30, 45 y 60 días después del trasplante, con tendencia similar para el resto de las variables morfoagronómicas, pero con mejores resultados a medida que se incrementa la cantidad de silicio aplicado por planta.
2. El rendimiento del cultivo y las variables de productividad alcanzan los mejores resultados en la misma medida que se incrementa la dosis de silicio a 0,35 g. planta⁻¹.
3. Las diferentes dosificaciones de silicio por planta no producen variaciones, y sí un incremento en los valores de los sólidos solubles totales y del ácido ascórbico a medida que se incrementa la dosis de silicio, pero inverso para la acidez de los frutos.

BIBLIOGRAFÍA

1. HORTOINFO La producción de tomate en todo el mundo supera ya los 186.000 millones de kilos. Fecha de Consulta. 26/2/2022. Disponible en <https://www.hortoinfo.es/index.php/11115-produccion-mundial-tomate-291221>.
2. INEC (2016). Instituto Nacional de Estadísticas Ecuador Informe Datos ESPAC 2015. [www.ecuadorencifras@gob.ec](http://www.ecuadorencifras.gob.ec) consultado 12 de Febrero de 2022.
3. Juárez M, BenavidesA, AlbaK,.. MoralesA. Dynamic modeling of mineral contents in greenhouse tomato. Crop Agric Sci 2014; 5(2): 1-10. DOI:10.4236/as.2014.52015
4. Sahebi M, Hanafi M, Abdullah S, Rafii M, Azizi P, Tengoua F, Azwa J, Shabanimofrad M. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. BioMed Res. Int. 2015. Article ID 396010: 1-16. | <https://doi.org/10.1155/2015/396010>
5. Imtiaz M, Rizwan M, Mushtaq M, Ashraf M, Shahzad S, Yousaf B, Anser D. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. J. Environ. Manage. 2016; 183: 521-529.
6. Mogollón J, Martínez A, Torres D. Efecto de la aplicación de vermicompost en las propiedades biológicas de un suelo salino-sódico del semiárido venezolano. Bioagro 2016; 28(1): 29-36.
7. Reyes J, Enríquez EA, RamírezMA, Zuñiga E, LaraL, HernándezLG. Efectos de quitosano sobre variables del crecimiento, rendimiento y contenido nutricional del tomate. Rev. Mex. Cien. Agri, 2020; 11(3).
8. Savvas D, Ntatsi G. Actividad bioestimulante del silicio en horticultura. Sci. Hortic. 2015; 196: 66-81.
9. Coskun D, Britto DT, Huynh WQ, Kronzucker HJ. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. Front. Plant Sci. 2016; 7: 1072. doi:10.3389/fpls.2016.01072

10. Kim, Y, Khan, A y Lee I. Silicon: a duo synergy for regulating crop growth and hormonal signaling under abiotic stress conditions. Crit. Rev. Biotechnol. 2016; 36(6): 1099-1109.
11. Délices G, Leyva O, Mota C, Pastrana R, Gámez R, Meza P, Serna R. Biogeografía del tomate *Solanum lycopersicum* var. cerasiforme (Solanaceae) en su centro de origen (sur de América) y de domesticación (México). Rev. Biol. Tropical. 2019; 67(4): 1023-1036.
12. Socarrás Y, Terry E, Díaz M. Mejoras tecnológicas para las producciones más limpias de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en tecnología de cultivo protegido. Sist. Prod. Sost. 2018; 1(6): 54-61.
13. Reyes J, Enríquez E, Luna R, Ramírez M, Rodríguez A, Lara L, Hernández L. Capítulo 5. La fertilización orgánica del cultivo de tomate en Ecuador : 06. In Agricultura orgánica en México ed. Ignacio Orona Castillo Juan Antonio Leos Rodríguez Orona C., I., & Leos R., J.A. (coords.). ISBN: 978-607-12. Universidad Autónoma Chapingo, CIESTAAM, México; 2019.
14. Betancourt P, Pierre F. Extracción de macronutrientes por el cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* Mill. var Alba) en casa de cultivos en Quibor, estado Lara. Bioagro 2013; 25(3): 181-188.
15. De la Torre A, León E, Albacete A, Blasco B, Ruiz J. Study of phytohormone profile and oxidative metabolism as key process to identification of salinity response in tomato commercial genotypes. J. Plant Physiol. 2017; 216: 164–173.
16. Tomescu D, um lan R, Copolovici L, Copolovici D. The influence of soil salinity on volatile organic compounds emission and photosynthetic parameters of *Solanum lycopersicum* L. varieties. Open Life Sci. 2017; 12(1): 135–142.
17. López G., López R, León J. Análisis de la influencia de factores climatológicos en la pérdida de superficie sembrada de cultivos transitorios en el Ecuador. Rev. Cien Agroecosist, 2017; 5(1-Ext): 176-183. Disponible en <http://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/index> Fecha 25 de Febrero 2022

18. Agrobayer Cultivo de tomate 2020 disponible en <https://agro.bayer.ec/cultivos/tomate> Fecha de consulta: 25de Febrero 2022
19. FAOSTAT. Anuario estadístico de la FAO. 2018. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
20. MAG. Resumen Ejecutivo de los Diagnósticos Territoriales del Sector Agrario. Ministerio de Agricultura y Ganadería – Coordinación General de Planificación y Gestión Estratégica. Quito – Ecuador [Internet]. 2018[Consultado 30 de Enero 2022]
21. Liang Y, Nikolic M, Bélanger R, Gong H, Song A. Silicon in agriculture. From theory to practice. Springer 2015; 123-125. ISBN:978-94-017-9978; 2015.
22. Pontigo S, Ribera A, Gianfreda L, de la Luz Mora M, Nikolic M, Cartes P. Silicon in vascular plants: uptake, transport and its influence on mineral stress under acidic conditions. *Planta*. 2015; 242(1): 23-37.
23. Tubana B, Babu T, Datnoff L. A review of silicon in soils and plants and its role in US Agriculture: History and future perspectives. *Soil Sci*. 2016; 181(10): 393- 411.
24. Gengmao Z, Shihui L, Xing S, Yizhou W, Zipan C. The role of silicon in physiology of the medicinal plant (*Lonicera japonica* L.) under salt stress. *Sci. Rep*. 2015; 5: 1-11.
25. Li H, Zhu Y, Hu Y, Han W, Gong H. Beneficial effects of silicon in alleviating salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. *Acta Physiol. Plant*. 2015; 37(4): 19.
26. Emamverdian A, Ding Y, Xie Y, Sangari Y. Mecanismos de silicio para mejorar el estrés por metales pesados en plantas. *Biomed Res Int*. 2018; 1: 2-10
27. Castellanos L, De Mello R, Silva CD. El Silicio en la resistencia de los cultivos. *Cult. Trop*. 2015; 36(1): 16-24. <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script>
28. Iglesias M, García J, Collados J, López F, Díaz M, Toresano F, Camacho F. Differential response to environmental and nutritional factors of high quality tomato varieties. *Food Chem*. 2015; 176: 278-287.

29. Al-Aghabary K, Zhu Z, Shi Q. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *J Plant Nutr.* 2004; 12: 2101–2115. <https://doi.org/10.1081/PLN-200034641>
30. Debona D, Rodrigues F, Datnoff L. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. *Annu. Rev. Phytopathol.* 2017; 55: 85–107
31. Haghighi M, Afifipour Z, Mozafarian M. The effect of N-Si on tomato seed germination under salinity levels. *J. Biol. Environ. Sci.* 2012; 6(16): 87-90.
32. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Ecuador. Repositorio Digital INIAP: Bienvenido a la Estación Experimental Tropical Pichilingue [Internet]. 2018, [Consultado 30 de Enero 2022] Disponible en: <https://repositorio.iniap.gob.ec/jspui/handle/41000/1639>
33. El tiempo. Ocho variedades de tomates están en los mercados locales [Internet]. 2011, [Consultado 28 de Febrero 2022] Disponible en: <https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/ocho-variedades-de-tomaterinon.html>
34. Agroverde. Acerado. [Internet]. 2011, [Consultado 28 de Febrero 2022] Disponible en: <https://www.agroverde.com.ec/semi-llas-de-alta-genetica/acerado-ha-3059.html>
35. Villalón H, Castillo MA, Garza F, Guevara JA, Sánchez L. Silicon dioxide as a stimulant of the quality index of nursery-grown pequin pepper (*Capsicum annuum* L. var. *Glabriusculum*) plants *Rev. Mex. Cienc. Forest.* [Internet]. 2018; [Consultado 28 de Febrero 2022] 9(50). DOI: Disponible en: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.247>.
36. Conover WJ. Practical Nonparametric Statistics. John Wiley & Sons, Inc., New York; 1999.
37. Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. InfoStat versión 2019. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 2019. URL <http://www.infostat.com.ar>

38. Peñazola M. Evaluación del comportamiento agronómico del cultivo del tomate riñón (*Solanum lycopersicum*) con aplicación de dióxido de silico (SiO_2). Documento final del proyecto de investigación como requisito para obtener el grado de ingeniero agrónomo. Carrera de Ingeniería Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador. 76 p; 2019.
39. García Y, Galindo M, Murguía J, Landero I, Leyva O. Fertilización complementada con sílice en la resistencia del tomate a *Fusarium oxysporum* Schtdl. Agron. Mesoam. 2018. Enero-abril; 29(1): 41-52. doi:10.15517/ma.v29i1.27002
40. Hasanuzzaman M, Nahar K, Rohman MM, Anee TI, Huang Y, Fujita M. Exogenous silicon protects *Brassica napus* plants from salinity-induced oxidative stress through the modulation of AsA-GSH pathway, thiol-dependent antioxidant enzymes and glyoxalase systems. Gesund Pflanzen. 2018; 70: 185–194. <https://doi.org/10.1007/s10343-018-04303>
41. McNaughton SJ. Ecology of a grazing ecosystem: the Serengeti. Ecological Monographs. 1985; 55: 259–294.
42. Epstein E. Silicon: its manifold roles in plants. Ann. Appl. Biol. 2009; 155: 155-160.
43. Alsaeedi AH, Elgarawany MM, El-Ramady H, Alshaal T, AL-Otaibi AOA. Application of Silica Nanoparticles Induces Seed Germination and Growth of Cucumber (*Cucumis sativus*). JKAU: Met., Env. & Arid Land Agric. Sci. 2019; 28(1) : 57 – 68 . Doi: 10.4197/Met. 28-1.6
44. Siddiqui MH, Al-Whaibi MH. Role of nano- SiO_2 in germination of tomato seeds (*Lycopersicum esculentum* Mill.). Saudi J. Biol. Sci. 2014; 21: 13–17.
45. Khan A, Khan AL, Imran M, Asaf S, Kim YH, Bilal S, Numan M, Al-Harrasi A, AlRawahi A, Lee IJ. Silicon-induced thermotolerance in *Solanum lycopersicum* L. via activation of antioxidant system, heat shock proteins, and endogenous

- phytohormones. BMC Plant Biology. 2020; 20: 248. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02456-7>
46. Suriyaprabha R, Karunakaran G, Yuvakkumar R. Silica nanoparticles for increased silica availability in maize (*Zea mays* L.) seeds under hydroponic conditions. Curr Nanosci. 2012; 8: 1–7.
 47. Heine G, Tikum G, Horst WJ. Silicon nutrition of tomato and bitter gourd with special emphasis on silicon distribution in root fractions. J Plant Nutr Soil Sci. 2005; 168: 600–606.
 48. Cai K, Gao D, Chen J, Luo S. Probing the mechanisms of silicon-mediated pathogen resistance. Plant Sig Behav. 2009; 4: 1–3.
 49. Shalaby T, Abd-Alkarim E, El-Aidy F, Hamed E, Sharaf M, Taha, N, El-Ramady H, Bayoumi Y, Rodrigues A. Nano-selenium, silicon and H₂O₂ boost growth and productivity of cucumber under combined salinity and heat stress. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021; 212: 111962. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111962>
 50. Liang YC, Sun W, Zhu YG, Christie P. Mechanisms of silicon mediated alleviation of abiotic stress in higher plants: A review. Environ Pollut. 2007; 147: 422-428.
 51. Ma JF, Yamaji N. Functions and transport of silicon in plants. Cell Mol Life Sci. 2008; 65: 3049–3057.
 52. Korndorfer G, Snyder GH, Ulloa M, Powell G, Datnoff LE. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. Journal of Plant Nutrition. 2001; 24(7): 1071- 1084.
 53. Savant NK, Korndorfer GH, Datnoff LE, Snyder GI. Silicon nutrition and sugarcane production: A review 1. Plant Nutr. 1999; 22: 1853-1903.
 54. Yaghubi K, Vafaei Y, Ghaderi N, Javadi T. Potassium silicate Improves salinity resistant and affects fruit quality in two strawberry cultivars grown under salt stress. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2019; 50(12): 1439-1451.

[https://DOI:10.1080/00103624.2019.1621333](https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1621333)

55. Keutgen AJ, Pawelzik E. Modifications of taste-relevant compounds in strawberry fruit under NaCl salinity. *Food Chemistry*. 2007; 105(4): 1487–94. doi:10.1016/j.foodchem.2007.05.033
56. Dallagnol LJ, Rodrigues FA, Chaves ARM, Vale FXR, DaMatta FM. Photosynthesis and sugar concentration are impaired by the defective active silicon uptake in rice plants infected with *Bipolaris oryzae*. *Plant Pathology*. 2013; 62(1): 120–29. doi:10.1111/j.13653059.2012.02606.x
57. Bybordi A. Influence of zeolite, selenium and silicon upon some agronomic and physiologic characteristics of canola grown under salinity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2016; 47(7): 832–50. doi:10.1080/00103624.2016.1146898.
58. Marodin JC, Resende JT, Morales RG, Faria MV, Trevisan AR, Figueiredo AS, Dias DM. Tomato post-harvest durability and physicochemical quality depending on silicon sources and doses. *Horticultura Brasileira*. 2016; 34 (3): 361–66. doi:10.1590/S010205362016003009.
59. El-Shoura AM . Effect of foliar application with some treatments on summer squash (*Cucurbita pepo*, L.) tolerance to high temperature stress. *Middle East Journal of Agriculture Research*. 2020; 9(2): 468-478.
60. Talebi S, Majd A, Mirzai M, Jafari S, Abedini M. The study of potassium silicate effects on qualitative and quantitative performance of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Research Journal of Biological Sciences*. 2020; 15(3): 64-68.
61. Hernández RD, Juárez A, Pérez A, Lozano CJ, Zermeño A, González JA. Influencia de fertilizantes orgánicos y del silicio sobre la fisiología, el rendimiento y la calidad nutracéutica del cultivo de fresa. *Nova Scientia*. 2022; 14(28): 1-16. <https://doi.org/10.21640/ns.v14i28.3032>

62. Nada M. Effect of Foliar Application with Potassium Silicate and Glycine Betaine on Growth and Early Yield Quality of Strawberry Plants. *Journal of Plant Production*. 2020; 11(12): 1295-1302. <https://dx.doi.org/10.21608/jpp.2020.1498>
63. Monge J, Loria M. Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables. *Revista Tecnología en Marcha*. 2019; 32(3): 37-54.



Dr. EDUARDO DÍAZ OCAMPO, Ph.D.
RECTOR

Ing. YENNY GUISELLI TORRES NAVARRETE, Ph.D.
VICERRECTORA ACADÉMICA

Ing. BOLÍVAR ROBERTO PICO SALTOS, M.Sc.
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO

Econ. CARLOS EDISON ZAMBRANO, Ph.D.
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN - DICYT
