

Efecto de la concentración de silicio en suelo sobre el rendimiento agrícola en cultivos de frutilla *Fragaria* × *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier en Areguá, Pirayú, Capiatá y J. Augusto Saldívar, Paraguay

Effect of Silicon concentration in Soil on Agricultural Yield in Strawberry Crops *Fragaria* × *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier in Areguá, Pirayú, Capiatá, and J. Augusto Saldívar, Paraguay

Fernando Garcete¹, Luz Bóveda¹, María Leticia Montiel¹, Jonny Toledo², Ana Aguilar Rabito³, Daisy Ramírez⁴ y Javier Michajluk¹*



10.57201/ieuna2424627

Sección: Artículo original

*Autor correspondiente:
jmichajluk@yahoo.es

Editor de área:
Griselda Meza , Universidad Nacional de Asunción (UNA). Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas. San Lorenzo, Paraguay.

Recibido:
23 de agosto de 2024
Revisado:
14 de octubre de 2024
Aceptado:
9 de diciembre de 2024
Recibido en versión modificada:
05 de diciembre de 2024

Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una Licencia Creative Commons "CC BY 4.0".



Declaración de conflicto: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

e-ISSN 2709-0817

Como citar: Garcete, F., Bóveda, L., Montiel, M. L., Toledo, J., Rabito, A. A., Ramírez, D. y Michajluk, J. (2024). Efecto de silicio en suelo sobre el rendimiento agrícola en cultivos de frutilla *Fragaria* × *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier en Areguá, Pirayú, Capiatá y J. Augusto Saldívar, Paraguay. *Revista investigaciones y estudios – UNA*, 15(2), pp. 66-79.

¹Universidad Nacional de Asunción. Facultad de Ciencias Químicas. Dirección de Investigaciones, Departamento de Técnicas Nucleares. San Lorenzo, Paraguay.

²Universidad Nacional de Asunción. Facultad de Ciencias Químicas. Dirección Académica. Departamento de Estadística. San Lorenzo, Paraguay.

³Universidad Nacional de Asunción. Facultad de Ciencias Químicas. Dirección de Investigaciones. Departamento de Nutrición. San Lorenzo, Paraguay.

⁴Universidad Nacional del Este. Facultad de Ingeniería Agronómica. Departamento de Gestión Ambiental. Ciudad del Este, Paraguay.

Resumen. La frutilla *Fragaria* × *ananassa* destaca por su valor nutritivo, alto contenido de antioxidantes y su creciente explotación comercial a nivel nacional. La producción en los últimos años ha alcanzado alrededor de 3.581 toneladas, beneficiando principalmente a 350 productores en la zona de Areguá y sus alrededores. Un suelo rico en silicio proporciona cierto grado de resistencia y protección contra factores bióticos y abióticos en las plantas. Por otro lado, su deficiencia reduce la tasa de crecimiento y, en última instancia, afecta a la producción. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del contenido de silicio en suelo sobre el rendimiento agrícola en cultivos de frutilla. Se seleccionaron 10 puntos de muestreo en las ciudades de Areguá, Pirayú, Capiatá y Julián Augusto Saldívar, y se consideraron como variables agronómicas el peso de los frutos, la longitud de tallo y el ancho y largo de las hojas. La cuantificación del silicio en el suelo se realizó mediante la técnica de análisis por activación neutrónica empleando una fuente isotópica de neutrones de Americio-Berilio con flujo de neutrones de $5,0 \cdot 10^7 \text{ ns}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, un detector de centelleo de yoduro de sodio de 2" x 2" acoplado a una tarjeta multicanal Accuspec y un estándar de silicio de procedencia alemana, con 97,5% de pureza. Se analizaron las concentraciones de silicio en suelo y los parámetros de rendimiento agrícola. Los resultados mostraron variaciones significativas en las concentraciones de silicio que oscilaron entre 41,2 g/100 g el punto de muestreo M10 de Areguá y 52,6 g/100 g en el punto de muestreo M8 de J. Augusto Saldívar. Además, sugirieron que el silicio contribuye significativamente al incremento del peso de los frutos en el ciclo agrícola de la frutilla.

Palabras clave: frutilla, variables agronómicas, técnicas nucleares.

Abstract. Strawberry *Fragaria* × *ananassa* stands out for its nutritional value, high antioxidant content, and growing commercial exploitation at the national level. In recent years, production has reached approximately 3,581 tons, benefiting mainly 350 producers in the area of Areguá and its surroundings. Soil rich in silicon provides a certain degree of resistance and protection against biotic and abiotic factors in plants. On the other

hand, silicon deficiency reduces the growth rate and ultimately affects production. The objective of this research was to evaluate the effect of silicon content in soil on the agricultural yield in strawberry cultivation. 10 sampling points were selected in the cities of Areguá, Pirayú, Capiatá, and Julián Augusto Saldívar, which are high strawberry production areas in the Central Department. Agronomic variables considered included fruit weight, stem length, and leaf width and length. The quantification of silicon in the soil was carried out using the neutron activation analysis technique, employing an Americium-Beryllium neutron source with a neutron flux of $5,0 \cdot 10^7 \text{ ns}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ and a 2" x 2" sodium iodide scintillation detector coupled to an Accuspec multichannel card and a silicon standard of German origin, with 97.5% purity. Silicon concentrations in the soil and agricultural yield parameters were analyzed. The results showed significant variations in silicon concentrations, varying from 41.2 g/100 g at sampling point M10 in Areguá to 52.6 g/100 g at sampling point M8 in J. Augusto Saldívar. Additionally, the results suggested that silicon contributes significantly to the increase in fruit weight during the strawberry growing cycle.

Keywords: Strawberry, agronomic variables, nuclear techniques

Introducción

La frutilla *Fragaria* × *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier, perteneciente a la familia de las Rosáceas, se destaca por su valor nutritivo, composición de vitaminas, minerales, folato, fibra y alto contenido de antioxidantes en especial fenoles, que podrían proporcionar beneficios frente a enfermedades mediadas por estrés oxidativo (Zhang et al., 2008; Chiqui y Lema, 2010; Skrovankova et al., 2015; Bareiro, 2019).

Conscientes de estos beneficios y de las características fisiológicas y nutricionales de la frutilla, Paraguay ha incrementado significativamente su producción. En 2012, la superficie de cultivo era de 217 hectáreas, y actualmente ha aumentado a aproximadamente 424 hectáreas, lo que refleja un crecimiento notable en la industria frutícola. El Departamento Central concentra la mayor producción, con Areguá, J. Augusto Saldívar, Pirayú y Capiatá como las principales áreas de cultivo. Areguá destaca por tener la mayor superficie dedicada a esta fruta. De las 4.639 toneladas de frutillas producidas en Paraguay, el Departamento Central aporta 2.839 toneladas, representando el 61% del total nacional. Esta expansión del área cultivada y el aumento de la producción evidencian el potencial y la adaptación de las técnicas agrícolas en Paraguay, consolidando al Departamento Central como el principal productor de frutillas y fortaleciendo la industria frutícola nacional (INE, 2021).

Según López Gorostiaga et al. (1995), los suelos de las zonas de los distritos de Areguá y Capiatá fueron clasificados como Rhodic Kandudalf de acuerdo con la clasificación de Soil Taxonomy y corresponden a la clase III de capacidad de uso de la tierra de la clasificación USDA. En la ciudad de J. Augusto Saldívar, el tipo de suelo en el área de estudio se clasifica dentro del subgrupo taxonómico de Alfisol.

El principal obstáculo durante el proceso de producción es el ataque de plagas, así como la falta de productos eficaces y el alto costo de insumos para combatir este problema. Además, las áreas destinadas para la producción de este cultivo han sido utilizados por largos períodos en monocultivo,

lo que provoca el empobrecimiento del suelo y, en consecuencia, bajos rendimientos y frutos de mala calidad. Por lo tanto, es necesario buscar nuevas alternativas de fertilización (Apaza Mamani, 2006; Vargas Ferreira et al., 2018). Un suelo rico en silicio puede proporcionar un grado de resistencia y protección tanto biótica como abiótica, aumentando la resistencia mecánica de las plantas y mejorando la eficiencia en el consumo de agua (Araya et al., 2015). La deficiencia de silicio, por su parte, reduce la tasa de crecimiento y provoca retrasos en el desarrollo, afectando el rendimiento (Anamarija, 2013; Cruz, 2018).

Las plantas adquieren silicio (Si) a través de la meteorización de minerales, lo que libera el elemento en la solución del suelo en forma de Si(OH)_4 soluble, con una concentración que varía entre 14 y 20 mg/L. La distribución de silicio en la planta es diversa; puede ser tan baja como 0,001% en la pulpa del fruto y alcanzar hasta un 15% en el tejido epidérmico. Estos tejidos contienen altas concentraciones de ácidos mono y polisilícicos en la savia, lo que les otorga funciones de protección mecánica y fisiológica (Michajluk et al., 2019).

Según Navarro y Navarro (2003), la importancia del silicio en las plantas sigue siendo un tema debatido. Aunque no se ha establecido claramente su función exacta, su similitud química con el fósforo y el boro ha llevado a algunos investigadores a considerar la posibilidad de que el silicio pueda sustituir o afectar ciertas funciones de estos elementos. Por ejemplo, se ha observado una fuerte correlación entre el silicio y el fósforo en el suelo. La aplicación de fertilizantes silíceos solubles ha demostrado aumentar la asimilación de fósforo por parte de las plantas, posiblemente debido a un intercambio de fosfatos adsorbidos por hidróxidos con silicatos. En suelos deficientes en silicio, se recomienda agregar escorias básicas de desfosforilación que, junto con cantidades variables de calcio, magnesio, manganeso y silicio, ayudan a mejorar el pH del suelo y promueven la asimilación de fosfato. La acidez del suelo representa un desafío significativo para el crecimiento y la productividad de los cultivos, ya que el aluminio compromete la integridad de las membranas celulares, la síntesis de ADN y afecta diversos procesos metabólicos en las plantas. Aunque algunas especies muestran cierta tolerancia, esta capacidad varía considerablemente. En suelos altamente ácidos, tanto el crecimiento de las plantas como el desarrollo de los frutos se ven notablemente reducidos. La aplicación de fertilizantes de silicio emerge como una estrategia efectiva, elevando el pH del suelo y mitigando así la toxicidad del aluminio, revitalizando el potencial de las raíces y favoreciendo un mejor crecimiento vegetal en condiciones ácidas (Kostic et al., 2017; Méndez et al., 2016).

Investigaciones recientes, así como avances en fisiología vegetal, bioquímica y genética, han sugerido que el silicio posee un notable potencial para inducir tanto resistencia como tolerancia en las plantas, especialmente en el caso del arroz. Este potencial se manifiesta frente a diversas formas de estrés biótico, como ataques de insectos, plagas y enfermedades, así como frente a estrés abiótico, que incluye la toxicidad causada por elementos como el aluminio, el hierro y el manganeso, además de daños provocados por la salinidad, el encamado y otros factores adversos. Debido a estos efectos

beneficiosos, se ha llegado a un consenso amplio en la comunidad científica de que el silicio puede ser considerado un elemento casi esencial para el cultivo del arroz y otras plantas (Patel et al., 2017).

El análisis por activación neutrónica es un método nuclear de análisis elemental que consiste en irradiar átomos estables con neutrones, induciendo reacciones nucleares. Esto permite la detección, identificación y cuantificación de núcleos radiactivos mediante la medición de la radiación gamma emitida durante el decaimiento de estos núcleos. Esta técnica es altamente sensible y tiene la ventaja de no alterar ni destruir el material de estudio, permitiendo que la muestra se utilice para otros análisis posteriores. A diferencia de otros métodos no destructivos, como la emisión de rayos X inducida por partículas, que solo analizan capas superficiales, el análisis por activación neutrónica permite evaluar con precisión la composición en profundidad de muestras homogéneas. La cuantificación de minerales mediante este método se realiza sin destruir las muestras, no requiere disolución de las mismas y presenta menos problemas de contaminación, dado que no necesita digestión química previa (Michajluk et al., 2019; Bóveda et al., 2020).

En este contexto, resulta fundamental identificar los efectos beneficiosos del silicio y la respuesta de las plantas de frutilla, con el fin de ampliar el conocimiento sobre sus procesos fisiológicos, calidad y rendimiento. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del contenido de silicio en el suelo sobre el rendimiento agrícola en el cultivo de frutilla.

Materiales y Métodos

Para la determinación de silicio se seleccionaron mediante un muestreo aleatorio por conveniencia 10 puntos de muestreo en las ciudades de Areguá, Pirayú, Capiatá y J. Augusto Saldívar. El muestreo se realizó en el tercer trimestre del año 2021, tomando en cuenta la disponibilidad de los propietarios de las fincas productoras de frutilla. Las muestras se codificaron mediante un sistema alfanumérico, empleando la letra "M" seguida de un número secuencial que indicaba el orden de recolección. Se adoptó un patrón de zig-zag para la toma de muestras, extrayendo 20 submuestras simples de 500 gramos de suelo a una profundidad de 20 cm en cada punto de muestreo, adecuado para cultivos de siembra directa. Cada punto de muestreo se realizó a una distancia de 10 cm de la planta. Estas submuestras fueron cuidadosamente homogenizadas para obtener una muestra compuesta, de la cual se extrajo una porción representativa de un kilogramo. Cada muestra compuesta fue etiquetada con su código alfanumérico correspondiente, asegurando una identificación precisa y un seguimiento riguroso de cada sitio de muestreo. Los puntos de muestreo fueron obtenidos por zonas utilizando la plataforma Qgis 3.16, donde se identificaron las coordenadas de los productores de frutilla de las ciudades estudiadas (Figura 1). Esta metodología asegura la representatividad y precisión en el análisis de las propiedades del suelo en los diferentes puntos de muestreo.

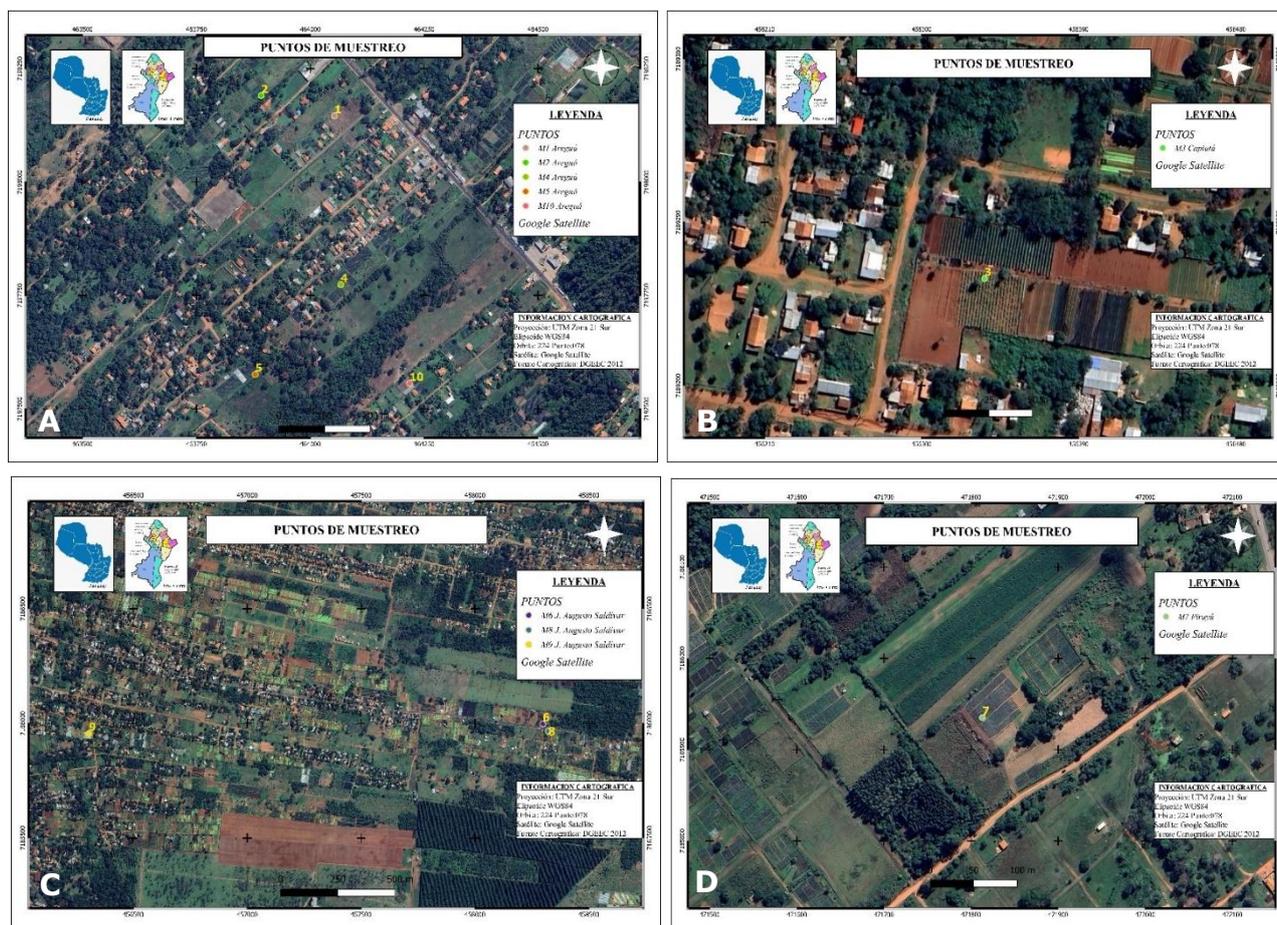


Figura 1. Puntos de muestreos obtenidos con la plataforma Qgis 3.16 de los diez puntos de las ciudades de A. Areguá (M 1;2;4;5;10), B. Pirayú (M 7), C. Capiatá (M 3) y D. J. Augusto Saldívar (M 6;8;9).

Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Técnicas Nucleares de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción, donde se secaron a la sombra durante 48 h. Posteriormente, las muestras se trituraron hasta obtener un polvo fino, se homogeneizaron y se tamizaron mediante una malla de un milímetro de diámetro, para luego ser almacenadas en un entorno libre de humedad y contaminantes. Las muestras de suelo se conservaron en un área designada dentro del laboratorio, mientras que los frutos recolectados fueron refrigerados a 4°C inmediatamente para mantener su integridad hasta el momento de su análisis. Para determinar el rendimiento agrícola, se seleccionaron 40 plantas en fase de maduración por cada punto de muestreo y se procedió a su transporte y almacenamiento refrigerado para posterior medición.

El proceso de secado del suelo se realizó en estufa a 105 °C por una hora, posteriormente las muestras se colocaron en un desecador durante una hora. Las muestras fueron cargadas de manera compacta en viales previamente lavados y secos, se evitó la presencia de burbujas de aire que pudieran interferir en el análisis. Para la determinación cuantitativa se utilizó un estándar de silicio elemental de la marca Riedel de Haen 13732 de concentración equivalente a 97,5% de pureza, el mismo, fue secado aplicando el mismo método empleado para las muestras. La cuantificación de silicio en suelo fue realizada por triplicado y se empleó la técnica de análisis por activación neutrónica, sometiendo las muestras a un flujo de neutrones de $5,0 \cdot 10^7 \text{ ns}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ en una fuente isotópica de $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ para su

irradiación en un portamuestras de cadmio durante un tiempo de 10 min. A continuación, se realizó la medición por espectrometría gamma usando un detector de centelleo sólido de ioduro de sodio activado con talio NaI (TI) de 2" x 2" acoplado a un multicanal Accuspec. Esta técnica se basa en la detección de fotones gamma generados por el ^{28}Al , isóbaro radiactivo producido por el bombardeo neutrónico del ^{28}Si (Michajluk et al., 2019).

Para la evaluación del rendimiento del cultivo, se seleccionaron cuidadosamente las siguientes variables: peso de los frutos, longitud del tallo y dimensiones de las hojas (largo y ancho), la variedad de frutilla estudiada fue Sweet Charlie. Cada una de estas variables fue analizada mediante un muestreo riguroso, considerando un tamaño de muestra de 40 unidades por muestreo, lo que garantiza la representatividad de los datos obtenidos. El peso de los frutos se registró en gramos (g), mientras que la longitud del tallo, así como el largo y ancho de las hojas, fueron medidos en centímetros (cm). Esta metodología detallada asegura una evaluación exhaustiva y precisa del rendimiento agrícola, proporcionando datos robustos y fiables para el análisis comparativo del cultivo. El peso de los frutos se determinó empleando una balanza analítica de alta precisión. La longitud del tallo se midió mediante la utilización de una regla milimetrada, se registró la distancia desde la yema terminal hasta la base donde comienza la raíz a ras del suelo. Así mismo para la determinación del largo de las hojas, se utilizó una regla milimetrada, se realizó el registro desde el ápice hasta la base de la hoja incluido el peciolo. En cuanto al ancho, se midió la mitad de la longitud previamente obtenida, de forma perpendicular al nervio central conforme a la metodología descrita por Birania et al. (2022).

Fue realizado un test de normalidad de Kolmogórov-Smirnov y de Shapiro-Wilk de manera a orientar si se deben utilizar pruebas paramétricas o no paramétricas con el fin de comprobar si existe una diferencia significativa entre los datos, posteriormente para una distribución normal ($p > 0,05$) se utilizó el análisis de varianza ANOVA, acompañando con test de Tukey, y para una distribución que no era normal ($p \leq 0,05$) se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Para la evaluación de la correlación entre las variables se utilizó el test de Pearson, la variable independiente se consideró a la concentración de silicio en suelo, mientras que, a los parámetros peso de frutos, longitud de tallo, ancho de las hojas y largo de las hojas se lo han considerado como variables

Resultados

El silicio se encontró en concentraciones variables en los suelos analizados como se puede observar en la Tabla 1. Las concentraciones de silicio determinadas en suelos de cultivo de frutilla varían en un rango de 41,2 g/100 g a 52,6 g/100 g. La muestra con la concentración más baja se obtuvo en el punto de muestreo M10, ubicado en Areguá, mientras que la concentración más alta se registró en el punto M8 en J. Augusto Saldívar.

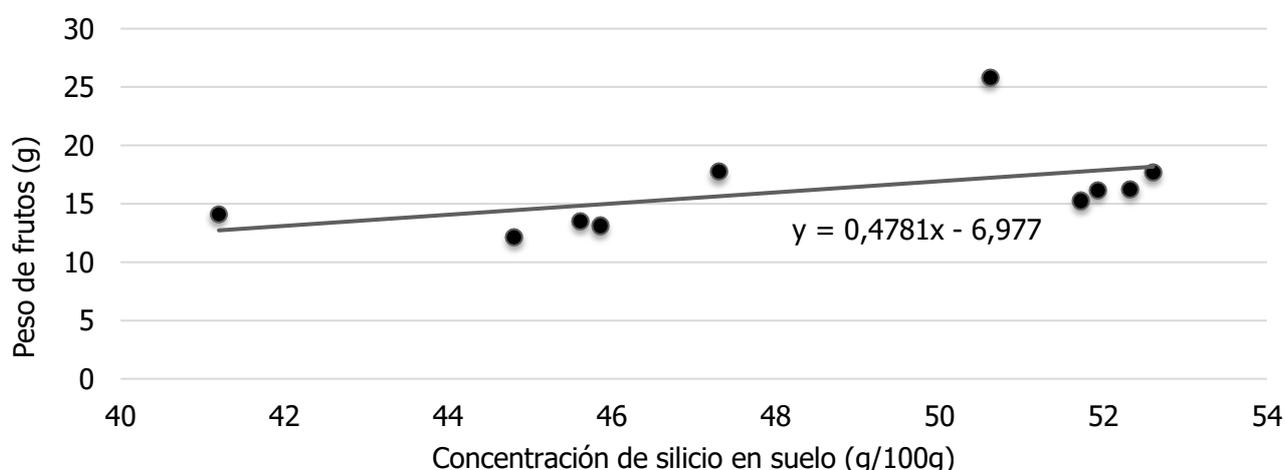
Tabla 1. Concentración de silicio (g/100 g) en muestras de suelos de cultivos de frutillas.

Código de identificación	Ciudad	Coordenadas de geocalización	Promedio ¹ ± Desvío estándar
M1	Areguá	-25.3328676, -57.3571971	52,33±1,10 cd
M2	Areguá	-25.3725856, -57.3046285	51,93±2,59 cd
M3	Capiatá	-25.4129099, -57.4341664	51,73±4,31 cd
M4	Areguá	-25.3362209, -57.3570627	44,81±0,88 ab
M5	Areguá	-25.3380042, -57.3589452	45,86±1,66 ac
M6	J. Augusto Saldívar	-25.4424248, -57.4147650	45,61±1,78 ad
M7	Pirayú	-25.4433016, -57.2803471	50,62±0,43 bcd
M8	J. Augusto Saldívar	-25.4427142, -57.4145236	52,61±2,68 c
M9	J. Augusto Saldívar	-25.4427415, -57.4345802	47,31±1,82 ac
M10	Areguá	-25.3381960, -57.3555734	41,20±3,35 a

¹Promedio de tres repeticiones y cuando seguidas por la misma letra, no difieren estadísticamente para cada parámetro analizado ($p \leq 0,05$ test de Tukey).

Los resultados obtenidos revelaron diferencias estadísticamente significativas entre algunas concentraciones de silicio analizadas en los suelos de cultivo de frutilla (Tabla 1). Fue identificada diferencia significativa en el análisis intergrupar de las concentraciones de silicio, la cual, se debió principalmente a las diferencias existentes entre la mayoría de los puntos de muestreo y el punto M10 en Areguá, seguido del punto M4 en Areguá y, en último lugar, al punto M8 en J. Augusto Saldívar como se observa en la Tabla 1.

Por otro lado, al aplicar el análisis de correlación de Pearson, se evidenció una correlación lineal positiva ($y = 0,4781x - 6,977$), la misma, evidencia una excelente relación del contenido de silicio en los suelos con el incremento del peso de los frutos para cada punto de muestreo (Figura 2), la influencia lineal positiva sugiere una relación proporcional directa. Esto implica que la presencia de un mayor contenido de silicio en el suelo puede influir positivamente en la producción de frutos, promoviendo un mayor crecimiento y desarrollo de los mismos.

**Figura 2.** Correlación de Pearson entre concentración de silicio en suelo y el peso de los frutos.

Al analizar los datos de peso de los frutos (Tabla 2), se encontró que la muestra con el peso más bajo 12,12 g, se obtuvo del punto de muestreo M4, ubicado en Areguá, mientras que el peso más alto

25,81 g se registró en el punto de muestreo M7 de Pirayú. Según el análisis del test de Tukey, se observaron diferencias significativas entre las muestras analizadas, siendo la media del peso de los frutos en el punto de muestreo M7 en Pirayú la que difería estadísticamente de todos los demás puntos de muestreo, presentando una diferencia significativa con todas las demás medias de peso de frutos.

Tabla 2. Peso de frutos (g) por cada punto de muestreo de las diferentes ciudades analizadas.

Código de identificación	Ciudad	Coordenadas de geolocalización	Promedio¹± Desvío estándar
M1	Areguá	-25.3328676, -57.3571971	16,23±3,87 ef
M2	Areguá	-25.3725856, -57.3046285	16,18±4,19 def
M3	Capiatá	-25.4129099, -57.4341664	15,24±2,79 cdef
M4	Areguá	-25.3362209, -57.3570627	12,12±3,76 b
M5	Areguá	-25.3380042, -57.3589452	13,12±3,68 bc
M6	J. Augusto Saldívar	-25.4424248, -57.4147650	13,49±3,30 bd
M7	Pirayú	-25.4433016, -57.2803471	25,81±5,30 a
M8	J. Augusto Saldívar	-25.4427142, -57.4145236	17,64±3,84 f
M9	J. Augusto Saldívar	-25.4427415, -57.4345802	17,74±4,05 f
M10	Areguá	-25.3381960, -57.3555734	14,08±2,68 be

Letras iguales en la misma columna indica que no existen diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$ test de Tukey).

Además, se observaron combinaciones de medias con diferencias significativas, indicadas por letras en minúscula. Las medias que difieren en letras indican diferencias significativas, mientras que aquellas con la misma letra no presentan diferencias significativas (Tabla 2).

Las diferencias observadas son consistentes con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis (5%), que confirma diferencias estadísticamente significativas entre el peso de los frutos de los diferentes puntos de muestreo.

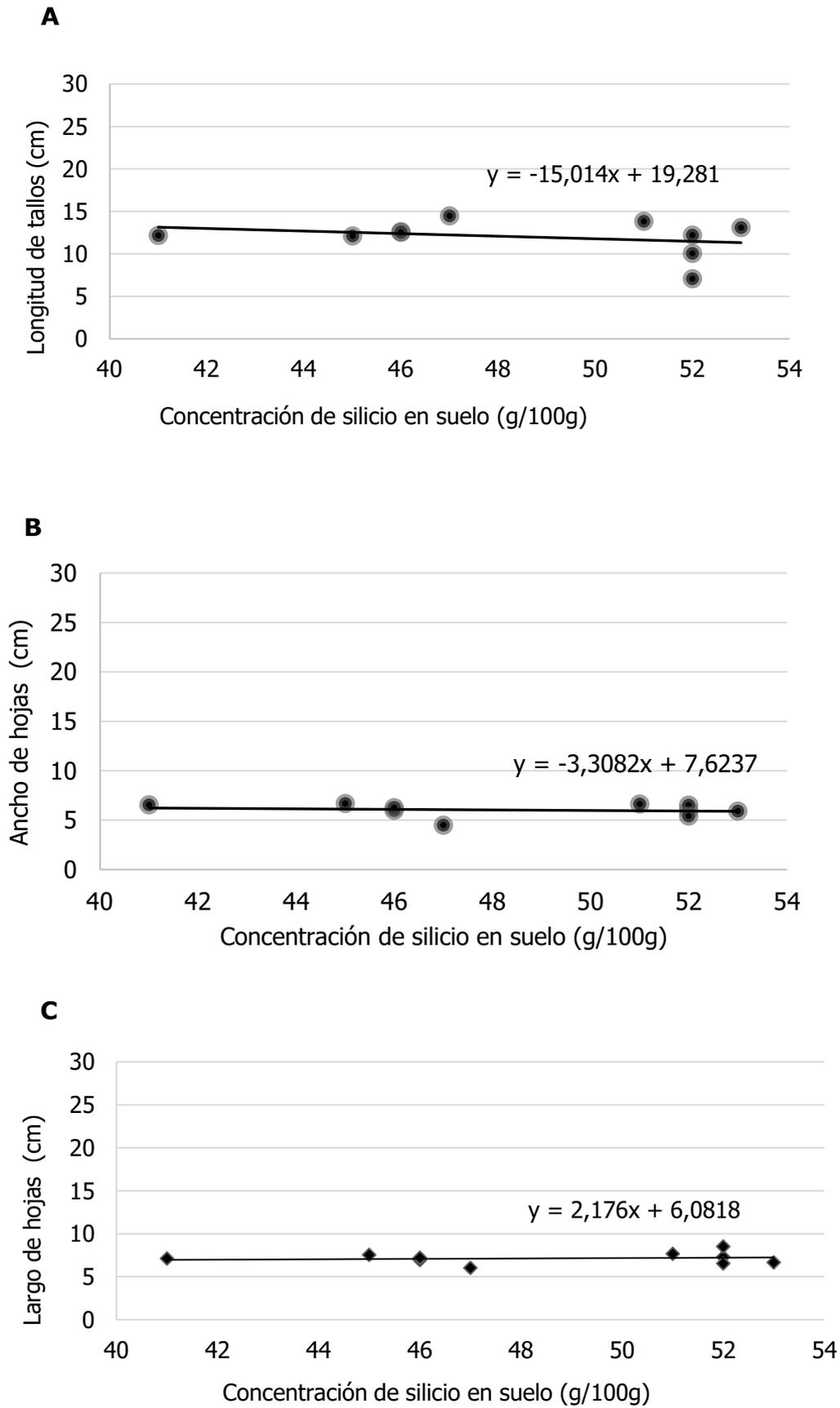


Figura 3. Relación entre la concentración de silicio en suelo y la longitud del tallo (A), ancho de hojas (B) y largo de hojas (C).

Para las variables de longitud de tallo, ancho de hojas y largo de hojas (Figura 2), el análisis estadístico de correlación de Pearson a partir de la función de la regresión para la variable de longitud de tallo (LT cm) ($y = -15,014x + 19,281$), la variable de ancho de hoja (AH cm) ($y = -3,3082x + 7,6237$) y largo de la hoja (LH) ($y = 2,176x + 6,0818$), se evidencia una buena correlación entre la concentración de silicio y las variables analizadas en todos los puntos, las cuales se presentaron con media general muy próximas. Del mismo modo, estas variables no presentaron diferencias estadísticamente significativas al aplicar el test de Tukey al 5% de probabilidad (Figura 3; Tabla 3).

Tabla 3. Longitud del tallo (LT cm), ancho (AH cm) de hojas y largo de hojas (LH cm) en el cultivo de frutilla en los diferentes puntos de muestreo.

Código de identificación	LT (cm)		AH (cm)		LH (cm)	
	Promedio ¹ ± Desvío estándar		Promedio ¹ ± Desvío estándar		Promedio ¹ ± Desvío estándar	
M1	12,20±1,02	a	5,97±0,66	a	7,30±0,69	a
M2	10,05±1,15	a	6,50±0,72	a	4,19±0,63	a
M3	7,06±1,08	a	5,39±0,67	a	6,53±0,56	a
M4	12,11±1,27	a	6,67±0,69	a	7,52±0,77	a
M5	12,60±1,20	a	5,97±0,73	a	6,91±0,59	a
M6	12,53±1,20	a	6,22±0,83	a	7,19±0,83	a
M7	13,84±2,30	a	6,60±0,78	a	7,65±0,75	a
M8	13,09±1,76	a	5,89±0,76	a	6,65±0,62	a
M9	14,49±1,20	a	4,46±0,52	a	6,00±0,66	a
M10	12,18±1,67	a	6,53±0,67	a	7,10±0,64	a

Letras iguales en la misma columna indica que no existen diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$ test de Tukey).

Discusión

Se observó que las concentraciones de silicio en el suelo coinciden con los resultados reportados por Michajluk et al. (2019), quienes realizaron un estudio en suelos de la región oriental del Paraguay donde, encontraron que el contenido de silicio varía entre 17,2 g/100 g y 66,1 g/100 g, rango dentro del cual se encuentran nuestros resultados. Esta concordancia es coherente, dado que los sitios de cultivo de frutilla analizados también pertenecen a la región oriental del país, lo que sugiere similitudes en las características edáficas de la zona. Es ampliamente conocido que los niveles de silicio en el suelo tienen un papel fundamental en la absorción de este elemento por parte de las plantas. Estudios previos, realizados por de Guntzer et al. (2012), han confirmado que estos niveles son susceptibles de ser influenciados por factores específicos del suelo. En consecuencia, es comprensible que el contenido de silicio en el suelo pueda mostrar variaciones significativas en función a la roca madre, pH, conductividad, ubicación geográfica o región a la que pertenezca el suelo, así como debido a las características propias del suelo. En este estudio, se han identificado variaciones estadísticamente significativas entre los distintos puntos de muestreo, corroborando resultados similares obtenidos en investigaciones previas con cultivos de maíz de dos especies diferentes (Combatt et al., 2020) y en

cultivos de maíz y frijoles (Narayanaswamy y Prakash, 2009). Estos hallazgos demuestran claramente el impacto que los niveles de silicio ejercen en las características de las plantas. Es evidente que la presencia o ausencia de silicio en el suelo puede tener un papel determinante en el desarrollo y rendimiento de los cultivos, lo que subraya la importancia de comprender y gestionar adecuadamente los niveles de este elemento en el suelo agrícola para mejorar la productividad y la calidad de los cultivos.

En la presente investigación, se ha obtenido un coeficiente de correlación de 0,489 entre la concentración de silicio en el suelo y el peso de los frutos. Este valor sugiere una relación moderadamente fuerte, tal como lo establecieron Martínez et al. (2010) en su estudio sobre correlaciones en poblaciones de maíz sobre las características morfológicas y la calidad nutricional. Es necesario considerar que el análisis de correlaciones de Pearson solo examina la relación lineal entre las variables y no establece una relación causal. Existen otros factores que pueden influir en la producción de frutos, como la disponibilidad de nutrientes, el manejo del cultivo, las condiciones climáticas, entre otros. Por lo tanto, es necesario realizar investigaciones adicionales para comprender completamente los mecanismos subyacentes de esta relación y su relevancia en el contexto agrícola. Según Ouellette et al. (2017) y Cruz et al. (2018), el uso de fertilizantes a base de silicio produjo un efecto positivo en el peso de los frutos de diferentes variedades de frutilla, con un incremento de 100 g por planta y 2,44 g por fruta, respectivamente. Este efecto benéfico también se observó en el pepino, una planta que acumula silicio (Abd-alkarim et al., 2017). Por lo tanto, se puede concluir que el silicio influye en el tamaño de los frutos tanto en plantas acumuladoras de silicio como en aquellas que no poseen esta característica.

Cuando se realizó un análisis estadístico de correlación de Pearson, se encontró que no había ninguna correlación entre las variables de longitud de tallo, ancho de las hojas y largo de las hojas, con la concentración de silicio en el suelo. Estos resultados coinciden con lo reportado por Chiqui y Lema (2010) en su estudio sobre frutillas y por Jayawardana et al. (2015), quienes señalaron la ausencia de correlación entre estas variables y los niveles de silicio en el suelo. Por consiguiente, resulta crucial realizar estudios de campo y ensayos controlados de manera a seguir investigando para comprender de manera más profunda cómo el silicio interactúa con otros factores agronómicos y ambientales (tipo de labranza, contenido de nutrientes y fertilización, control de plagas, disponibilidad de agua, radiación solar) y así influir en el crecimiento y desarrollo de las plantas en diversos contextos agrícolas.

Conclusión

Los resultados obtenidos sugieren que el silicio desempeña un papel fundamental en el aumento del peso de los frutos durante el ciclo agrícola de la frutilla. No se observó influencia significativa del silicio en otros parámetros agronómicos como la longitud del tallo, el ancho de las hojas y el largo de las hojas.

El empleo de la técnica de activación neutrónica en fuente isotópica de neutrones permitió determinar la presencia y variación en los niveles de concentración de silicio en diferentes muestras de suelo analizadas.

Agradecimientos: A la Ing. Ambiental Elva María Matto de Galeano por la colaboración en las imágenes proporcionadas al trabajo.

Contribución de los autores: Conceptualización: F.A.G.B., L.V.B.C., M.L.M., J.B.M.B. ;**Curación de datos:** F.A.G.B. , L.V.B.C., J.B.M.B.; **Análisis formal:** L.V.B.C., J.B.M.B.; **Adquisición de fondos:** ;**Investigación:** L.V.B.C., M.L.M., J.T.O., A.C.A.R., D.L.R.M., J.B.M.B.; **Metodología:** F.A.G.B. , L.V.B.C., J.T.O., D.L.R.M.; **Administración del proyecto:** F.A.G.B.; **Recursos:** F.A.G.B.; **Software:** M.E.R.P., J.T.O.; **Supervisión:** A.C.A.R., D.L.R.M.; **Validación:** D.L.R.M., J.T.O., J.B.M.B.; **Visualización** L.V.B.C., M.L.M., A.C.A.R., D.L.R.M.; **Redacción – borrador original:** F.A.G.B. , L.V.B.C., J.B.M.B. ; **Redacción – revisión y edición:** F.A.G.B., L.V.B.C., M.L.M., J.B.M.B.

Fuente de Financiamiento: Sin financiamiento externo.

Disponibilidad de datos: Los datos utilizados en esta investigación podrán ser solicitados al autor de correspondencia según pertinencia.

Referencias Bibliográficas

- Abd-Alkarim, E., Bayoumi, Y., Elmahdy, M., y Rakha, M. (2017). Silicon supplements affect yield and quality of cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in net houses. *African Journal of Agricultural Research*, 12 (31), 2518-2523. <https://www.researchgate.net/publication/319158540>
- Anamarija, K. (2013). Effect of nutrient starvation on some aspects of nitrogen metabolism in substrate-grown strawberry plantings cv. Nyoho. *Ratar.povrt*, 50(1), 24-30. DOI: 10.5937/ratpov50-3615. https://www.researchgate.net/publication/256194716_Effect_of_nutrient_starvation_on_some_aspects_of_Nitrogen_metabolism_in_substrate-grown_strawberry_plantings_cv_Nyoho
- Apaza Mamani, E. (2006). Comportamiento agronómico de variedades de frutilla (*Fragaria virginiana*) a diferentes densidades de plantación en la provincia sud Yungas del departamento de La Paz. *Universidad Mayor de San Andrés*. (Tesis de grado, Carrera Ingeniería Agronómica). La Paz, Bolivia. Repositorio Institucional Universidad Mayor San Andrés. Disponible en: <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/12405>
- Araya, M. A., Camacho, M. E., Molina, E., y Cabalceta, G. (2015). Evaluación de fertilizantes líquidos con silicio, calcio o magnesio sobre el crecimiento del sorgo en invernadero. *Agronomía Costarricense*, 39(2), 47-59. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242015000200047
- Bareiro, J. (2019). *Manual de transferencia de resultados de investigación sobre el cultivo de frutilla: producción de mudas de alta calidad*. Proyecto IPTA – CONACYT OTRI 16-101. Oficina de Transferencia de Tecnología y Resultados de la Investigación. Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria. 48
[p.https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/upload_editores/u294/PUBLICACION_MUDA_FRUTILLA_23-07-2019-final.pdf](https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/upload_editores/u294/PUBLICACION_MUDA_FRUTILLA_23-07-2019-final.pdf)

- Birania, S., Attkan, A. K., Kumar, S., Kumar, N., & Singh, V. K. (2022). Mass modeling of strawberry (*Fragaria* × *Ananasa*) based on selected physical attributes. *Journal of Food Process Engineering*, 45(5), e14023. doi:10.1111/jfpe.14023
- Bóveda, L., Cabello, J., Gómez, R., Degen de Arrúa, R., González, Y., & Michajluk, B. (2020). Evaluación de la variación del contenido de silicio en diferentes muestras comerciales de arroz, *Oryza sativa* L., sometidos a distintas condiciones de procesamiento industrial a través de análisis por activación neutrónica. *Revista Rojasiana*, 19(2), 31-39.
- Chiqui, A., & Lema, M. (2010). Evaluación del rendimiento en el cultivo de fresa (*Fragaria* sp.) variedad oso grande, bajo invernadero mediante dos tipos de fertilización (orgánica y química) en la parroquia Octavio Cordero Palacios, Cantón Cuenca (Trabajo de grado). *Universidad Politécnica Salesiana*. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4745>
- Combatt, E., Palacio, D., & Blanco, R. (2020). Silicio disponible en suelos alcalinos por diferentes métodos y el absorbido por cultivos de maíz y frijol a nivel de invernadero. *Suelos Ecuatoriales*, 50(1-2), 13-25.. <https://www.researchgate.net/publication/347597684>
- Cruz, H. (2018). Respuesta agronómica y fisiológica de la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) a la aplicación de silicio. Montecillo, México. *Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas*. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/3058>
- Guntzer, F., Keller, C., & Meunier, J.-D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 201-213. <https://hal.science/hal-00930510/document>
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2021). 2.3.1. Superficie de cultivos temporales (hectáreas), según año. Periodo 2012-2021. En *Compendio Estadístico Ambiental 2021 - Tierra Agroforestal*. <https://datos.gov.py/dataset/compendio-estad%C3%ADstico-ambiental-2021-tierra-agroforestal/resource/bd140a93-6cb4-4bda-a7a5>
- Jayawardana, H. A. R. K., Weerahewa, H. L. D., & Saparamadu, M. D. J. S. (2015). Effect of root or foliar application of soluble silicon on plant growth, fruit quality and anthracnose development of capsicum. *Tropical Agricultural Research*, 26(1), 74-81.. <https://tar.sljol.info/articles/10.4038/tar.v26i1.8073>
- Kostic, L., Nikolic, N., Bosnic, D., Samardzic, J., y Nikolic, M. (2017). Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. *Journal Plant and Soil*, 419(1), 447-55. https://www.researchgate.net/publication/318833291_Silicon_increases_phosphorus_P_uptake_by_wheat_under_low_P_acid_soil_conditions
- López Gorostiaga, O., Gonzalez, E., Llamas G., P. A., Molinas, O., Franco S., E. S., García S., S., Ríos A., E. O. (1995). *Mapa de reconocimiento de suelos de la Región n Oriental*. Asunción: MAG / SSERNMA – BID. 1995, Escala 1/500.000.
- Martínez, M., Ortiz, R., Ríos, H., & Acosta, R. (2010). Análisis de las correlaciones en poblaciones cubanas de maíz. *Cultivos Tropicales*, 31(2), 82-91. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215930012>
- Méndez, Y. R., Chacón, L. M., Corzo, M. H., y Angulo, H.M.R. (2016). La toxicidad por aluminio (Al³⁺) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Revista Palmas*, 37(1), 11-23. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11696>
- Michajluk, J., Gómez, R., Moreno, H., Leguizamón, C., & Cabello, J. (2019). Evaluación del contenido de silicio en suelo a través de técnicas analíticas nucleares. *Revista Científica de la UCSA*, 6, 18-22. <http://scielo.iics.una.py/pdf/ucsa/v6n3/2409-8752-ucsa-6-03-18.pdf>
- Narayanaswamy, C., & Prakash, N. B. (2009). Calibration and categorization of plant available silicon in rice soils of South India. *Journal of Plant Nutrition*, 32(8), 1237-1254. Doi: 10.1080/01904160903005970.
- Navarro, G., & Navarro, S. (2003). *Química agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. 2ª ed. Ediciones Mundi Prensa, pp. 425-427.

- Ouellette, S., Goyette, M.-H., Labbé, C., Laur, J., Gaudreau, L., & Gosselin, A. (2017). Silicon transporters and effects of silicon amendments in strawberry under high tunnel and field conditions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 949. Doi: 10.3389/fpls.2017.00949.
- Patel, R., Patel, K., & Malav, J. (2017). Status of silicon in rice (*Oryza sativa* L.) and its correlation with other nutrients under typical ustochrepts soil. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(12), 2598-2611. <https://www.ijcmas.com/6-12-2017/R.A.%20Patel,%20et%20al.pdf>
- Skrovankova, S., Sumczynski, D., Mlcek, J., Jurikova, T., & Sochor, J. (2015). Bioactive compounds and antioxidant activity in different types of berries. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(10), 24673-246706. DOI: 10.3390/ijms161024673.
- Vargas Ferreira, S., González Ricart, M., Almada, C., & Toledo, I. (2018). Characteristics of the community process of strawberry producing families and the conditions of reproduction of their social habitus in a productive context. *Revista Científica de la UCSA*, 5(1), 5-13. DOI: 10.18004/2409-8752/2018.005(01)005-013.
- Zhang, Y., Seeram, N. P., Lee, R., Feng, L., & Heber, D. (2008). Isolation and identification of strawberry phenolics with antioxidant and human cancer cell antiproliferative properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(3), 670-675. DOI: 10.1021/jf071989c.