

UNIVERSIDAD DE CALDAS

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA AGRONOMICA



**SILICIO EN LA NUTRICION Y PROTECCION DEL CAFÉ: PANORAMA
ACTUAL Y PERSPECTIVAS**

Presentado por:

Juan Esteban Cardona Pineda

Tutora:

Carolina Zamorano Montañez

I.A PhD. Ciencia de las Malezas

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito para obtener el título de Ingeniero Agrónomo

Manizales, Caldas, Colombia

2023

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. CAPÍTULO I	
2.1 GENERALIDADES Y COMPOSICIÓN MINERAL DE LAS PLANTAS.....	6
2.2 VIAS DE ACCESO Y ACUMULACIÓN DENTRO DE LA PLANTA.....	9
3. CAPÍTULO II	
3.1 USO DEL SILICIO EN LA NUTRICIÓN VEGETAL.....	13
3.2 USO DEL SILICIO EN LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES-.....	15
3.2.1 DEFENSAS FÍSICAS INFLUENCIADAS POR EL SILICIO.....	19
3.2.2 DEFENSAS BIOQUÍMICAS INFLUENCIADAS POR EL SILICIO	20
4. CAPÍTULO III	
4.1 PANORAMA ACTUAL Y PERSPECTIVAS.....	22
5. CONCLUSIONES.....	27
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

INDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Tabla 1. Abundancia de silicio y otros elementos en algunos reservorios de la corteza terrestre.

Tabla 2. Productos a base de Silicio aprobados por el ICA comercializados en el departamento de Risaralda por la Cooperativa de Caficultores (COOPCAFER).

Figura 1, 2 y 3. Barrera física formada por la acumulación del silicio en las células epidérmicas de las hojas.

1. INTRODUCCION

Para Mandlik *et al.* (2020) y Tripathi *et al.* (2020), el silicio (Si) es uno de los elementos más abundantes, ocupando el segundo lugar en términos de abundancia en la corteza terrestre (Tabla 1) Es uno de los elementos más predominantes de la tierra y comprende más del 25 % de la corteza terrestre (Sommer *et al.*, 2006). A pesar de su profusión, la mayor parte del Si en los suelos no está disponible para las plantas. En particular, el Si no es un elemento esencial sino beneficioso para muchas plantas terrestres (Frew *et al.*, 2018).

Las mayores fuentes de Si son los silicatos primarios, secundarios y el cuarzo (SiO₂), que es el mineral más común en los suelos y comprende del 90% al 95% de las fracciones de arena y limo. Las arenas poco meteorizadas pueden contener más del 40% de este elemento, mientras que suelos tropicales muy meteorizados contienen solo el 9% (Jiménez, 2015).

Sabemos que este elemento mineral no es considerado “esencial” para la mayoría de las plantas, pero está reportado que tiene algunos efectos benéficos sobre muchos cultivos de importancia agronómica a nivel mundial, ya que se ha reportado que actúa sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas brindando protección contra factores bióticos y abióticos; pero no se lo ha considerado con la importancia de los macro y micronutrientes. Está documentado que la presencia de este elemento favorece el desarrollo de los cultivos a través de la inducción de resistencia y protección a diversos factores ambientales (Datnoff y Rodrigues, 2005). Debido a la creciente preocupación por el medio ambiente y la salud de los consumidores, la búsqueda de café de alta calidad sin residuos de pesticidas ha sido una demanda constante (Datnoff & Rodrigues, 2007). La nutrición mineral es una opción

que se puede utilizar como complemento en el manejo de enfermedades (Marschner, 1995).

Numerosos estudios han demostrado que un suministro exógeno de silicio (Si) pudiera minimizar la incidencia de enfermedades fúngicas y mejorar la resistencia a una amplia gama de hongos patógenos que causan enfermedades foliares y radicales en muchas plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas Rodrigues *et al.*. (2015).

En el caso del café, específicamente para la enfermedad roya del café, causada por el hongo fitopatógeno *Hemileia vastatrix*, es la enfermedad más devastadora del café que puede afectar sus rendimientos entre un 35 – 50%. Existe información limitada disponible en la literatura sobre el silicio y el control de las enfermedades en el café. Sin embargo, estudios como el de Carré-Missio *et al.* (2014), han servido para demostrar que este elemento es promisorio para el control de ciertas enfermedades.

En ese sentido, esta revisión literaria apunta hacia los factores y aspectos relacionados del uso del elemento mineral silicio en la nutrición vegetal y en la prevención de enfermedades, con especial énfasis hacia el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) siempre que fue posible con la literatura publicada. Incluirá desde los aspectos generales para definir su esencialidad, hasta los mecanismos de ingreso a la planta y sus funciones biológicas dentro de las mismas. Se analizará la información desde una perspectiva que permita tener un contexto más claro sobre el panorama actual, sus proyecciones, y determinar su potencial para mejorar los sistemas productivos.

Para lograrlo se han organizado dos capítulos dentro de los cuales se desarrollaron las siguientes temáticas:

- i) Generalidades sobre el silicio, y composición mineral de las plantas
- ii) Vías de acceso del silicio y su acumulación dentro de la planta
- iii) Silicio en la nutrición vegetal
- iv) Silicio en la prevención de enfermedades

Finalmente, se encontrará el panorama actual y las perspectivas futuras, las conclusiones, además de las fuentes de información consultadas basadas en literatura actualizada.

2. CAPITULO I

2.1 GENERALIDADES SOBRE EL SILICIO Y COMPOSICIÓN MINERAL DE LAS PLANTAS

El silicio (Si), después del oxígeno, es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre ya que constituye cerca del 28% de ésta. (Tabla 1). Este elemento se puede encontrar sólo en formas combinadas, es decir, como sílice y minerales silicatados. Además, en el suelo el Si se encuentra como ácido monosilícico ($\text{Si}(\text{OH})_4$) que la mayor parte corresponde a formas no disociadas, forma en la que las plantas pueden asimilarlo.

Tabla 1. Abundancia de silicio y otros elementos en algunos reservorios de la corteza terrestre.

ELEMENTO	LITOSFERA (%)	BIOTA (%)	CULTIVOS (%)
Si	27,7	0,03	0,1 - 10
O	47,4	24,9	45 - 47
H	1,5	49,8	-
C	0,48	24,9	48 - 50
N	0,03	0,27	0,5 - 6
Ca	4,1	0,07	0,1 - 6
K	2,1	0,05	0,8 - 8
Mg	2,3	0,03	0,05 - 1
P	1	0,03	0,15 - 0,5
S	0,26	0,17	0,1 - 1,5
Al	8,2	0,02	0,00001 - 0,05

Tomado de Raya & Aguirre (2012).

El silicio (Si) es un elemento sobre el cual hasta hace relativamente poco se llamó la atención, es importante para aminorar o aliviar la toxicidad de otros elementos presentes en exceso como el aluminio (Al) o el manganeso (Mn) y para algunas plantas como el arroz (*Oryza sativa*) y la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) resulta esencial (Chen & Lewin *et al.*, 1969).

El elemento controla el desarrollo del sistema de la raíz, aumenta resistencia de las plantas a las temperaturas bajas o altas, viento, sal, los metales pesados y el ataque de insectos, hongos y enfermedades (Epstein, 1999). De acuerdo con (Korndörfer y Datnoff, 2004), el silicio es un elemento que estimula el crecimiento de algunas plantas, por lo que es considerado como altamente benéfico, incluso esencial para un grupo de ellas. Por otro

lado Matichenkov (2004) considera que el silicio mejora el desarrollo de raíces de las plantas y puede aumentar su masa radicular entre un 50 y 200%.

Desde el descubrimiento de este elemento se cree que no es importante en el desarrollo de las plantas pero sí que juega un papel importante en la reducción de las enfermedades de las plantas, la investigación ha revelado que modificar las plantas con silicio es una forma simple y sostenible de ayudar a mantener y mejorar la salud de las plantas en la agricultura (Datnoff *et al.* 2007).

Fisiológicamente hablando, autores como Aristizábal (2003), afirma que, cuando la materia seca se quema a altas temperaturas quedan las cenizas que, excepto por algunas pérdidas parciales de nitrógeno, azufre y cloro en formas volátiles, constituyen una buena aproximación de la composición mineral de las plantas. De igual manera el mismo autor menciona que, en las cenizas se encuentran los elementos N, P, K, Mg, S, Mn, Fe, Cu, Cl, B, Mo, y Zn, que son considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. En ciertos casos las cenizas pueden contener F, Cr, I, Co, Na, Se, Si, Ga, La, Ni y Al, que no son elementos esenciales pero que cumplen alguna función particular en ciertas plantas y que por lo mismo se les conoce como elementos funcionales.

Según Smits *et al.* (2009) el aluminio (Al), el cobalto (Co), el sodio (Na), el selenio (Se) y el silicio (Si) se consideran elementos beneficiosos para las plantas: no son necesarios para todas las plantas, pero pueden promover el crecimiento de las plantas y pueden ser esenciales para ciertas plantas. Se ha informado que estos elementos beneficiosos mejoran la resistencia al estrés biótico, como los patógenos, la herbivoría, y al estrés abiótico, como la sequía, la salinidad y la toxicidad o deficiencia de nutrientes. Los autores también mencionan que, una mejor comprensión de los efectos de los elementos beneficiosos es

importante para mejorar la productividad de los cultivos y mejorar el valor nutricional de las plantas para una población mundial en crecimiento.

La concentración de Si en la planta oscila entre el 0,1 y el 15 % del peso seco, según la especie (Hodson *et al.*, 2005). En ese sentido cabe destacar que la presencia del elemento en la planta y sus concentraciones dentro de las plantas varía dependiendo la especie. El mismo autor menciona que, en general, las monocotiledóneas muestran niveles más altos de acumulación de Si (10-15%) en comparación con las dicotiledóneas como el café (0,5% o menos); por lo que el suministro exógeno de este elemento se hace crucial, así como también entender el mecanismo de ingreso y acumulación de este elemento dentro de la planta.

2.2 VIAS DE ACCESO DEL SILICIO Y ACUMULACIÓN DENTRO DE LA PLANTA

Los elementos nutritivos son absorbidos por la planta generalmente desde la solución del suelo y a través de la raíz por procesos y mecanismos que aún no están completamente aclarados, es decir vía edáfica, pero la planta también lo hace vía foliar lo que tiene ciertas ventajas, tanto de tipo económico, para evitar fijaciones en el suelo y por tener una asimilación y una respuesta más rápida en la planta.

Se sabe que las especies de plantas difieren en cuanto a su capacidad para absorber Si del suelo y translocarlo eficientemente al brote (Mitani & Ma, 2005). En el caso específico de

este elemento, es absorbido por las plantas en forma energéticamente pasiva, siendo tomado por las raíces de la solución del suelo como ácido monosilícico para ser acumulado en las células epidermales que las impregna en una fina capa. Los mismos autores afirman que, en especies como el arroz, la caña de azúcar y otras gramíneas, reconocidas como acumuladoras de silicio, presentan hasta un 5% de silicio en la materia seca del vástago. Por el contrario, el café demostró ser una especie ineficiente para absorber el silicio contenido en el suelo.

Las concentraciones de este elemento se encuentran comúnmente entre 0,1 y 0,6 mM a los niveles de pH que se encuentran en la mayoría de los suelos agrícolas (Knight y Kinrade 2001). El transporte pasivo está impulsado por la corriente transpiratoria, mientras que el transporte activo de Si desde las raíces hasta los brotes está mediado por proteínas transportadoras específicas, como el arroz bajo en silicio 1 (Lsi¹), un transportador de entrada de Si y el Lsi², un transportador de salida, que ocurren en muchas especies de monocotiledóneas y algunas dicotiledóneas (Lux *et al.*, 2020; Mostofa *et al.*, 2021).

Los productos que contienen en su formulación el silicio, al ser aplicado al suelo reaccionan con el agua transformándose en ácido monosilícico, siendo esta la forma de silicio como es absorbido por las plantas, moviéndose rápidamente dentro de ella a través del xilema. Cuando la planta transpira pierde el agua absorbida por el silicio en el suelo y se inmoviliza en cristales de silicio, formando una barrera protectora presentando una “resistencia mecánica”. Se ha demostrado que la absorción de Si se satura a una concentración externa de 1.28 mM, indicando que la absorción de este elemento es medida por un tipo de transportadores proteínicos. Recientemente se ha descubierto que al menos dos transportadores se encuentran involucrados en la absorción de Si en las raíces de arroz.

Uno de ellos se encuentra localizado en la membrana plasmática de las células corticales de la raíz (SIT1: Transportador de Si 1), el cual transporta este elemento desde la solución externa hasta las células corticales de la raíz. El otro transportador se encuentra localizado en la membrana plasmática de las células parenquimatosas del xilema (SIT2: Transportador de Si 2), el cual es responsable de liberar el Si dentro del xilema. Estos transportadores pueden tener diferentes afinidades para el ácido silícico (Ma *et al.*, 2004).

Para el caso del arroz, la eficiencia para absorber activamente Si del suelo se debe a la presencia de proteínas de transporte de Si ubicadas en las bandas de Caspary de la exodermis y la endodermis (Ma *et al.*, 2007). Sin embargo, en otras especies de plantas, como café arábico, se desconoce la presencia de genes responsables de la producción de estas proteínas portadoras de Si en el sistema radical.

La transpiración sigue siendo una opción viable como uno de los principales impulsores del transporte y la deposición de silicio en las plantas y, por lo tanto, la duración del crecimiento de las plantas afecta significativamente la concentración de silicio; por ejemplo, las hojas más viejas contienen más silicio que las hojas más jóvenes (Henriet *et al.* 2006). En el caso del cultivo de arroz para absorber activamente Si del suelo se debe a la presencia de proteínas de transporte de Si ubicadas en las bandas de Caspary del exodermo y el endodermo (Ma *et al.*, 2007). Sin embargo, los mismos autores afirman que en otras especies de plantas, como el café se desconoce la presencia de genes responsables de la producción de estas proteínas portadoras de Si en el sistema radicular.

No existen reportes en la literatura sobre la capacidad de las plantas de café para absorber Silicio cuando las fuentes de este elemento se aplican vía foliar y si se absorbe de manera eficiente Pereira & Rodriguez *et al.* (2009). Una vez absorbido, el silicio se deposita como

sílice amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) en toda la planta, principalmente en las paredes celulares, donde interactúa con pectinas y polifenoles y mejora la rigidez y la resistencia de la pared celular (Currie & Perry *et al.*, 2007).

La distribución del silicio dentro de las plantas depende de las especies. En plantas de bajo contenido de Si como tomate, rábano y col china no se distingue una tendencia en la cantidad de silicio en la parte aérea o en la parte subterránea de la planta; en otros casos como el trébol rojo, la raíz acumula niveles más altos de Si con respecto a la parte aérea. Sin embargo, en plantas de alto contenido de Si como el arroz y la avena, el 90% de este elemento se encuentra en la parte aérea (Liang *et al.*, 2005).

Diversos autores como Rodrigues *et al.* (2015), informaron que el silicio no tiene capacidad para trasladarse de hojas más viejas a más nuevas o incluso de un sitio de aplicación a otro. Así, para asegurar la reducción de las intensidades de las enfermedades, posiblemente por su efecto osmótico, se debe aplicar constantemente silicato de potasio a todas las hojas de la planta y esto es muy difícil de lograr en cafés de tres a cuatro años. Esto debido en las plantaciones de café simultáneamente tienen lugar crecimientos vegetativos y reproductivos por lo que presenta muchos nudos, hojas, estructuras de floración y frutos en variado estado de desarrollo que requieren silicio y los demás elementos, y esto conduce a que estas estructuras compitan por los nutrientes entre los diferentes órganos.

3. CAPÍTULO II

3.1 EL SILICIO EN LA NUTRICIÓN VEGETAL

La nutrición mineral es uno de los factores ambientales que el hombre puede manipular fácilmente para controlar enfermedades en las plantas cultivadas. Aunque no se considera esencial para las plantas, pero sí beneficioso, el silicio (Si) ha aumentado la resistencia de varias especies de plantas a plagas, enfermedades, así como a diferentes tipos de estrés abiótico como altas temperaturas, falta de agua en el suelo y toxicidad del hierro. y manganeso a las raíces cuando se acumulan altos niveles de estos elementos en los tejidos de estas especies, en su mayoría monocotiledóneas (Mitani & Ma, 2005)

La fertilización mineral con silicio tiene un doble efecto en el sistema suelo-planta. La nutrición con silicio al cultivo refuerza en la planta su capacidad de almacenamiento y distribución de carbohidratos requeridos para el crecimiento y producción de cosecha, la autoprotección contra enfermedades causadas por hongos y bacterias, el ataque de insectos y ácaros y de las condiciones desfavorables de clima, al estimular el desarrollo y actividad de estructuras poliméricas en la cutícula, los tricomas y fitolitos en la superficie de las hojas (Quero *et al.*, 2008). El mismo autor menciona que, la fertilización con minerales ricos en silicio aumenta la disponibilidad del fósforo en un 40 a 60% y promueve la transformación del fósforo no disponible para la planta en formas asimilables y previene la transformación de fertilizantes ricos en fósforo en compuestos inmóviles. Por lo que en este sentido una aplicación de fertilizantes a base de silicio es casi que obligatoria para una agricultura altamente eficiente en términos de aprovechamiento de recursos.

Dado el incremento exponencial de la población mundial está ahora confrontado por una mayor escasez de productos de las plantas, y hay una mayor necesidad de producir cultivos

de más altas rendimiento y calidad. Un aspecto importante de la producción vegetal es que la alta productividad puede solamente lograrse en plantas que estén nutricionalmente balanceadas. Caicedo & Chavarriaga (2008) demostraron que el silicio aumenta la disponibilidad del fósforo, y estimula el crecimiento de la raíz, fenómeno también inherente a la función fosfórica. En concordancia con lo anterior, Etesami & Jeong *et al.* (2018) mencionan que, como premisa general, la nutrición mineral equilibrada en las plantas incluyendo el silicio, mejora el vigor de las plantas y aumenta la resistencia a las enfermedades.

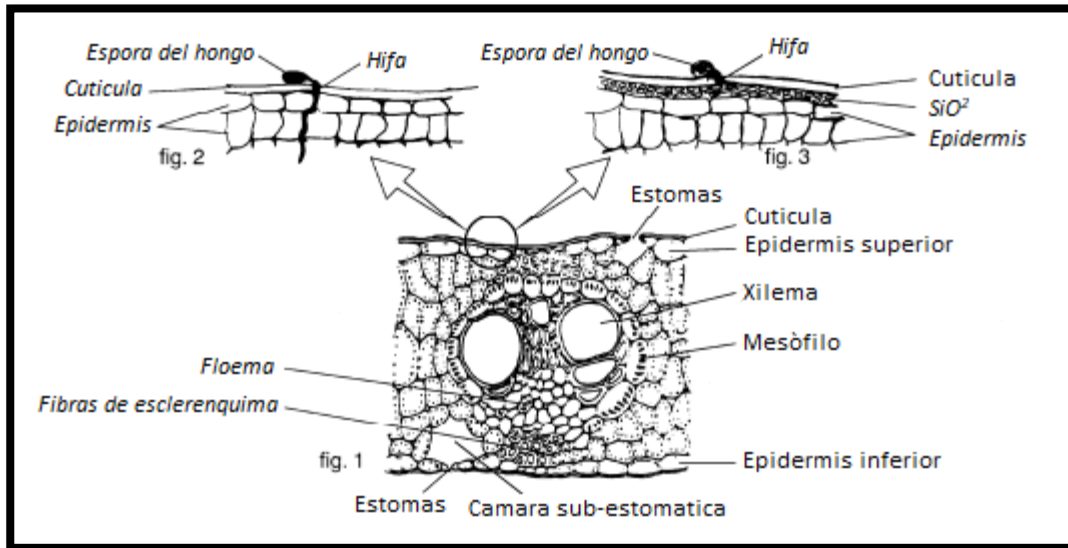
También autores como Aguirre (2005), mencionan otros factores que se interrelacionan con la nutrición como los agentes abióticos que son temperatura, agua, o CO₂ disuelto en el agua como ácido carbónico, actúan sobre los materiales arcillosos del suelo liberando ácido silícico al mismo tiempo que son liberados minerales arcillosos que se asocian al silicio y forman silicatos de calcio, magnesio, potasio, zinc, hierro, aumentando en gran medida la capacidad de intercambio catiónico del suelo, contribuyendo esto a que el pH se torne básico 7.5 a 8.5, dando las condiciones para que el suelo sea altamente productivo. También afirma que el silicio hace que de los tallos baje oxígeno a la raíz llegando al parénquima oxidando de esta manera la rizosfera logrando que el Fe y Mn reducido (forma en que lo toma la planta) se oxidara, siendo esta forma poca absorbida por las plantas, lo que evita una excesiva toma de estos elementos que, aunque son necesarios para la planta, su abundancia puede volverlos tóxicos. Además, el silicio refuerza en la planta su capacidad de distribución de carbohidratos requeridos por el crecimiento. El silicio tiene acción sinérgica con el calcio y magnesio mejorando la vida media de las cosechas percederas, incrementando la eficiencia de las prácticas de postcosecha.

3.2 EL SILICIO EN LA PREVENCIÓN ENFERMEDADES

Cuando el Silicio se acumula en las paredes de las células epidérmicas, parece que hace disminuir la transpiración, así como las infecciones causadas por hongos. En las hojas de las plantas el silicio se deposita debajo de la cutícula y sobre las células epidérmicas, esta capa limita la pérdida de agua por las hojas y dificulta la penetración y desarrollo de hifas de hongos (ver figura 1, 2 y 3).

Como se puede observar en las figuras 1,2 y 3, el silicio se acumula en la epidermis y se asocia con la pectina e iones de calcio, endureciendo el tejido y protegiendo así el ingreso de patógenos a la planta. Otra parte del tejido epidérmico son las estomas los cuales están formados por células llamada célula guarda u oclusivas. Las estomas son los encargados del intercambio de gases del interior de la planta y el exterior, regulando la respiración y la fotosíntesis, y sirven también para eliminar el exceso de agua y minerales (Aguirre & Raya *et al.*, 2012).

Figura 1, 2 y 3. Barrera física formada por la acumulación de Silicio en las células epidérmicas de las hojas.



Fuente (SEPHU 2009).

Traducido del portugués al español por Google Translate®.

El Si se acumula en la epidermis y se asocia con la pectina e iones de Ca, endureciendo el tejido y protegiendo así el ingreso de patógenos a la planta. La forma en que el silicio permanece dentro de las plantas es el de gel sílica (silicio amorfo e hidratado o ácido silícico polimerizado). Otras formas del silicio incluyen al ácido silícico y el ácido silícico coloidal (Datnoff & Rodrigues *et al.*, 2005).

El manejo de enfermedades específicamente la roya en café involucra principalmente el uso de fungicidas protectantes a base de cobre, sistémicos del grupo de los triazoles, solos o en mezcla con estrobirulinas, y el uso de cultivares resistentes (Zambolim *et al.*, 2002). Los mismos autores afirman que, debido al uso continuado de fungicidas condujo a la aparición

de poblaciones resistentes. Sin embargo, la nutrición mineral es uno de los factores ambientales que el hombre puede manipular fácilmente para controlar enfermedades en las plantas cultivadas. Aunque no se considera esencial para las plantas, pero sí beneficioso, el silicio ha aumentado la resistencia de varias especies de plantas a enfermedades.

En café, se sabe que las plantas que crecían en suelo que contenía Si eran más resistentes a la mancha marrón, resistencia atribuida a la deposición de Si en la superficie de la hoja y una capa de cera y cutícula más gruesas (Pozza *et al.*, 2004). El mismo autor informa que plántulas de la variedad Catuaí cultivadas en Brasil sobre sustrato que contenía silicato de calcio presentaron una reducción del 63,2% en el porcentaje de hojas lesionadas y del 43% en el número total de lesiones por planta, en relación con las plantas que no fueron abastecidas con este elemento.

Por otro lado, Caicedo y Chavarriaga (2008) en Colombia, evaluaron el efecto de la aplicación de dosis de silicio sobre el desarrollo en almácigo de plántulas de café. Estos afirman que los resultados obtenidos permitieron ratificar la influencia del silicio en complemento con abonos orgánicos, en el mayor desarrollo y crecimiento de brotes, al igual que el mayor número de hojas, lo que influencia necesariamente en el peso seco total. En almácigos de café de las variedades Catuai y Mondo Novo, sembrados en una mezcla de estiércol bovino y material de subsuelo en relación 4:1, que la aplicación de 1 g de CaSiO_3 por kilogramo de sustrato, redujo el número de hojas infectadas y de lesiones causadas por mancha de hierro (*Cercospora coffeicola* L.). Estos afirman que los resultados obtenidos permitieron ratificar la influencia del silicio en complemento con abonos orgánicos, en el mayor desarrollo y crecimiento de brotes, al igual que el mayor número de hojas, lo que

influencia necesariamente en el peso seco total. Igualmente afirman que, al aumentar la concentración de silicato de K en plantas de café disminuyó linealmente hasta en un 66% el número de lesiones causadas por roya (*Hemileia vastratix*), indicando que éstas son razones suficientes para sugerir el uso del silicio como una alternativa ecológica para el manejo de enfermedades en café.

El ensayo fue diseñado para investigar la aplicación foliar de silicato de potasio, una fuente de silicio soluble, en el proceso de infección de la roya del café en el nivel microscópico. La concentración foliar de Si para plantas asperjadas con agua y Silicato de potasio no tiene diferencia significativa (0.24 y 0.30 dag kg⁻¹, respectivamente). Mientras que, el microanálisis de rayos X indicó que la deposición de silicio en las hojas de las plantas que fueron rociadas con silicato de potasio fue mayor en comparación con las muestras de hojas de las plantas rociadas con agua. Los resultados demostraron que, la severidad de la roya en hojas de plantas rociadas con agua o rociadas con silicato de potasio alcanzó 44% y 32%, respectivamente, a los 36 días después de la inoculación (ddi). El silicato de potasio ha mostrado resultados prometedores para el control de la roya del café de manera preventiva cuando la germinación de la roya es baja (35%) (Carré-Missio *et al.*, 2012). Afirman que, la protección local obtenida por la aspersion de silicato de potasio para reducir la roya del café se prolongó hasta 25 días. Por otro lado, autores como (Pozza *et al.* 2004) también mencionan que la aplicación de silicato de calcio en plantas de almácigo redujo la incidencia de mancha de hierro y se confirmó la presencia del silicio en el tejido foliar mediante las técnicas de microscopía de barrido electrónico y microanálisis de rayos X.

3.2.1 DEFENSAS FÍSICAS INFLUENCIADAS POR EL SILICIO

Entre las diversas amenazas bióticas a la producción de cultivos, las enfermedades de las plantas causadas por patógenos fúngicos son una de las principales limitaciones que causan pérdidas de rendimiento tanto cualitativas como cuantitativas en todo el mundo (Etesami y Jeong, 2018). Numerosos estudios han demostrado que un suministro exógeno de Si podría minimizar la incidencia de enfermedades fúngicas y mejorar la resistencia a una amplia gama de hongos patógenos que causan enfermedades foliares y radicales en muchas plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas (Rodrigues *et al.*, 2015). Por otro lado, Yang & Ahammed *et al.* (2021), mencionan que, en términos de cantidad y calidad de la información el efecto más profundamente estudiado del Silicio y su papel en las plantas es su rol en la reducción de la susceptibilidad sobre las enfermedades de origen fúngico.

Los efectos benéficos del silicio han sido demostrados en varias especies de plantas y, en el caso de problemas fitosanitarios, es capaz de aumentar la resistencia de las plantas al ataque de insectos y patógenos. El silicio puede conferir resistencia a las plantas por su depósito, formando una barrera mecánica, y por su acción como inductor del proceso de resistencia (Castellanos *et al.*, 2015). Por lo tanto, según lo observado en las figuras 1, 2 y 3, la distribución del silicio en las células epidérmicas de las hojas no suele ser uniforme por lo que puede no prevenir totalmente la penetración de las estructuras reproductivas de los hongos, pero si puede retrasar el periodo de incubación o la colonización hasta cierto punto.

La hipótesis de la formación de una barrera física debajo de la cutícula después de la polimerización del ácido monosilícico explica, en parte, el aumento de la resistencia al añublo del arroz (Datnoff *et al.*, 2007). Tentativamente, esta hipótesis ha sido utilizada por varios investigadores como uno de los argumentos para explicar la resistencia de algunas especies de plantas a ciertos patógenos cuando se les suministra silicio vía foliar o edáfica. En concordancia con lo anterior, Pereira & Rodriguez *et al.* (2009) afirman que, bajo la observación del microscopio electrónico de barrido observaron que la cutícula era más gruesa y la capa epicuticular de cera estaba más desarrollada en la superficie abaxial de las hojas de las plantas alimentadas con Si, lo que hacía que la superficie fuera más hidrofóbica, impidiendo, en cierto modo, la formación de una película de agua importante para la germinación de conidios de *Cercospora coffeicola*.

3.2.2 DEFENSAS BIOQUÍMICAS INFLUENCIADAS POR EL SILICIO

Las plantas responden ante el ataque de patógenos a través de mecanismos físicos y bioquímicos evitando la colonización de estos. Las plantas presentan dos tipos de mecanismos de defensa: constitutivas o preformadas e inducibles (Durrant & Dong, 2004). La defensa inducida en plantas puede ser activada por medio del uso de inductores como el ácido salicílico, fosfito de potasio, Acibenzolar-S-metil, Propiconazol, silicio, entre otros. Los efectos de este último se han demostrado en diferentes especies de plantas

actuando como un inductor de resistencia a través de su deposición generando una barrera mecánica e incrementando la producción de enzimas de defensa (Mogollón & Castaño *et al.*, 2012).

Más allá de las barreras físicas o mecánicas, los mecanismos de defensa vegetal inducidos por el silicio implican la producción de compuestos como metabolitos secundarios o enzimas. Diversos autores afirman que, la abundante acumulación de compuestos fenólicos asociados con las estructuras de algunos patógenos en los sitios de infección y el aumento en la producción de algunas clases de fitoalexinas en arroz (Datnoff *et al.*, 2007), y el aumento de la actividad de las enzimas líticas a la pared celular fúngica o asociadas al metabolismo secundario de la planta (Liang *et al.*, 2005) refuerzan la hipótesis de que el silicio potencia los mecanismos de defensa en las plantas y no actúa solo pasivamente en la resistencia.

En concordancia con lo anterior, autores como Ma & Yamaji (2008), afirman que el silicio refuerza las barreras bioquímicas y estructurales que limitan el ingreso y colonización del patógeno y protege la planta ante estrés biótico o abiótico e induce la producción de fitoalexinas y compuestos fenólicos en respuesta a la infección del patógeno. Por otro lado, Pereira & Rodríguez *et al.* (2009) evaluaron el efecto del silicio aplicado vía foliar en la reducción de la severidad de la roya en café, además de la posible potenciación de la actividad de las enzimas quitinasa, β -1,3- glucanasas, peroxidasas, polifenoloxidasas, lipoxigenasas y fenilalanina amoniaco-liasas, implicadas en las respuestas de defensa de las plantas frente a patógenos. Obteniendo como resultado que la aplicación foliar de soluciones de KSi con pH 10.5 y 5.5 fueron eficientes en la reducción de la severidad,

especialmente en el pH más bajo. Botelho *et al.* (2005) también informó el control de la mancha del ojo de gallo (*Mycena tricolor*) en plántulas de café del cultivar Catuaí IAC99 cultivadas en sustrato que contenía dosis crecientes de silicato de calcio y silicato de sodio.

El silicio como inductor de resistencia va muy de la mano con el concepto de la nutrición, con los cuales se puede incrementar la resistencia a través de la fortificación de estructuras anatómicas como cutículas más gruesas, células epidérmicas más rígidas, lignificación de tejidos, entre otros. Además, según Marschner *et al.* (1995), la nutrición puede inducir defensa sistémica a través de la producción de compuestos fenólicos que ayudan a combatir a patógenos y plagas. El silicio, es un elemento que favorece la resistencia de las plantas a plagas y enfermedades a través de los mecanismos mencionados.

4. CAPÍTULO III

4.1 PANORAMA ACTUAL Y PERSPECTIVAS

Si bien varios autores mencionan la “no esencialidad” de este mineral, sabemos por otros reportes la importancia que tiene este elemento en la nutrición, protección vegetal y todas las demás reacciones que inducen una resistencia ante factores bióticos y abióticos a las plantas. Sin embargo, partiendo de la base de la definición de esencialidad propuesta por Epstein & Bloom, se puede considerar “cuasi esencial” ya que su ausencia o baja

concentración en la planta puede causar un crecimiento anormal en el desarrollo y reproducción de las plantas.

A pesar de los numerosos estudios sobre el papel de este elemento y su influencia en la resistencia que brinda a las plantas contra enfermedades de origen fúngico, los mecanismos y el cómo se logra siguen sin estar claros, por lo que se hace imperiosa la necesidad de plantear un panorama donde se ilustre la situación actual y hacia dónde va encaminada esta temática y su perspectiva futura sabiendo que el Silicio tiene efectos positivos documentados sobre el crecimiento de las plantas y la resistencia al estrés, y en algunos casos se conocen los mecanismos subyacentes.

Por lo anterior se puede afirmar:

- Que se ha demostrado que el silicio posee actividad antifúngica, la resistencia mejorada a enfermedades inducida por este elemento se manifiesta en parte por la barrera mecánica debajo de la cutícula y en las paredes celulares, lo que evita el ingreso de las estructuras fúngicas. Mas allá de esta barrera física, se cree que la producción de compuestos fenólicos y metabolitos que favorecen la defensa química contra estos factores. Además, también una nutrición mineral balanceada asegura el estado saludable de los cultivos, lo cual se refleja con una planta sana que exhibe un mejor potencial productivo y por ende resistencia a enfermedades.
- Hay evidencia que la productividad de los cultivos de importancia agronómica, económicamente hablando dependen de un balanceado plan de fertilización, y que, la

interacción de cada uno de los elementos que se han demostrado ser esenciales y no esenciales para las plantas juegan un papel determinante a la hora de la nutrición y la protección vegetal ante factores bióticos y abióticos.

- Resulta necesario ampliar significativamente el conocimiento sobre esta temática en nuestro medio educativo y productivo, de la importancia de este elemento y como es su relación con los distintos factores con que allí interactúan.
- Se puede afirmar que los mecanismos detrás de los efectos beneficiosos del silicio para la planta están relativamente poco investigados, en comparación con los efectos tóxicos que tiene en particular este elemento en niveles altos.
- Ciertos taxones de plantas como las de la familia Equisetaceae toma preferentemente silicio se puede afirmar que, si se confirma que este elemento en particular es beneficioso para las plantas, la base celular de los efectos positivos de este elemento será un área interesante de estudio futuro para el desarrollo agrícola enfocado al sector cafetero.

Al realizar un análisis de rentabilidad teniendo en cuenta los precios actuales a base de silicio que se encuentran en el mercado se puede afirmar que, una fertilización a base de silicio puede aportar significativamente a la nutrición equilibrada de los cultivos y en caso específico del fosforo puede ser una alternativa muy eficiente para que este

elemento que se tiene que aplicar en tan grandes cantidades tenga una mejor disponibilidad y no se pierda tanto por diversos factores. Logrando así reducir significativamente no solo las cantidades de fertilizante aplicado sino también reduciendo costos de producción al tener una mejor asimilación de nutrientes y unos cultivos sanitariamente más resistentes al ataque de plagas y enfermedades, todo encaminado hacia la reducción de costos totales, resultando en un sistema productivo más rentable.

Como premisa final se puede decir que, la pérdida de rendimiento debido a enfermedades de origen fúngico son un problema de importancia económica a nivel mundial, ya que disminuyen la productividad de los sistemas productivos y aumenta los costos de producción. Y a manera de perspectiva futura basados en la evidencia de los beneficios de este elemento reduciendo la intensidad de las enfermedades, la demanda de fertilizantes y enmiendas que aporten silicio tendrán una mayor dinámica en el mercado global por lo que el costo de esta materia prima aumentará en un futuro.

Tabla 2. Productos a base de Silicio con registro ICA comercializados en el departamento de Risaralda.

Productos a base de Silicio aprobados por el ICA comercializados en el departamento de Risaralda por la Cooperativa de Caficultores (COOPCAFER)						
Producto	Casa comercial	Formulación	Presentación	Grado de Silicio	Precios Coopcafer	No. Registro ICA
Terrasil Silicio	Coraggio	Granulos Dispersables (WG)	20 Kg	Dióxido de silicio (SiO ₂) 67 %	\$ 61.700	9983
Fertisilicio	Fertzulo	Concentrado Soluble (SL)	1 L	250 g/L	\$ 43.200	10349
Tricho-sil	Agroser	Concentrado Soluble (SL)	1 L	136 g/L	\$ 82.950	9787
Refuerzo Silicio	Agrocol	Concentrado Soluble (SL)	1 L	107.00 g/L	\$ 29.550	11063
Macsil	Colinagro	Granulos Dispersables (WG)	20 Kg	23,50%	\$ 70.250	5273
Silival Ca	Ferval	Polvo Seco (SP)	50 Kg	26%	\$ 92.600	3037
Algesil	Altinco	Concentrado Soluble (SL)	1 L	250 g/L	\$ 88.650	7655
Agrimins Tottal Inicio	Colinagro	Granulos Dispersables (WG)	50 Kg	13%	\$ 215.800	9612
Agrimins Tottal Cafetero	Colinagro	Granulos Dispersables (WG)	50 Kg	4,52%	\$ 223.600	8014
Agrimins Tottal Llenado	Colinagro	Granulos Dispersables (WG)	50 Kg	12%	\$ 223.700	7952
Nutriesenciales	Colinagro	Granulos Dispersables (WG)	50 Kg	26%	\$ 92.700	10794
Sili-Cal-Mag	Rio Claro	Polvo Seco (SP)	50 Kg	20%	\$ 24.100	7438
Silival 2	Ferval	Polvo Seco (SP)	50 Kg	37%	\$ 97.500	10371
Sol Potasio	Feragrocol	Granulos Dispersables (WG)	50Kg	90%	\$ 164.500	4925
Silix Foz	Feragrocol	Granulos Dispersables (WG)	50Kg	24%	\$ 183.550	11113
Tierra de Diatomeas	Agropuli	Polvo Mojable (WP)	25Kg	55,55%	\$ 59.800	9865

Elaboración propia en base al listado de productos con registro ICA y precios actuales de Coopcafer Risaralda.

5. CONCLUSIONES

- Basados en la literatura se concluye que desde hace más de 40 años se están informando resultados de investigación sobre los efectos benéficos del uso del silicio en la resistencia de los cultivos a enfermedades de origen fúngico; sin embargo, la información es aún pobre en muchos cultivos y grupos de hongos fitopatógenos.
- Los resultados más alentadores se concentraron en un inicio en el arroz, la caña de azúcar, el maíz y otras gramíneas, se informan también en solanáceas, cucurbitáceas, crucíferas, los forestales y el café.
- El silicio refuerza las barreras bioquímicas y estructurales que limitan el ingreso y colonización de patógenos y protege la planta ante estrés biótico o abiótico e induce la producción de fitoalexinas y compuestos fenólicos en respuesta a la infección del patógeno.
- Entre las fuentes de silicio más empleadas para el manejo de enfermedades se encuentran la escoria de silicato de calcio y el silicato de potasio.
- El método convencional para el control de la roya del café consiste en la aplicación de diversos productos de síntesis química como fungicidas protectantes a base de cobre, sistémicos del grupo de los triazoles y también el uso de variedades con determinado nivel de resistencia genética.

- El suministro de silicio exógeno al cultivo de café es una estrategia de control promisoría ya que este elemento puede aumentar la resistencia a este patógeno contribuyendo a la acción fungistática mediante otro mecanismo de acción.
- Se hace imperiosa la necesidad del uso de los diferentes tipos de fertilizantes a base de silicio que provienen tanto de fuentes orgánicas como de fuentes inorgánicas para el control de enfermedades de origen fúngico, con el fin de reducir el impacto ambiental que se obtiene con el uso de todos los productos de protección vegetal que se aplican convencionalmente en los sistemas productivos.
- El silicio aumenta la disponibilidad del fósforo entre un 40 a 60% y promueve la transformación del fósforo no disponible para la planta en formas asimilables y previene la transformación de fertilizantes ricos en fósforo en compuestos inmóviles. En este orden de ideas, este elemento es una alternativa sustentable en la producción agrícola mundial.
- Aunque los productos de protección vegetal como los fungicidas pueden controlar efectivamente las enfermedades de origen fúngico, se tiene que pensar en una alternativa que no conlleve a la generación de resistencia a estos productos, además de los efectos perjudiciales de estos ingredientes activos en la biota del medio ambiente, por lo que el uso del silicio se puede tomar como una buena estrategia de manejo de enfermedades

más amigable con el medio ambiente y que a la vez pueda controlar eficazmente estos problemas fitosanitarios.

- La presencia de este elemento mejora en gran medida la sanidad fitosanitaria, ya que este elemento se convierte en una barrera física-mecánica a la esporulación del hongo causante de la roya del café, pero como la planta de café al no ser acumuladora de silicio se le debe mantener el suplemento constante de este elemento sea vía foliar o edáfica para lograr dicho efecto mencionado.
- En términos generales, en todos los sistemas productivos agrícolas, el silicio promisoriamente puede contribuir a la seguridad alimentaria mundial al ayudar en el desarrollo de cultivos mejor balanceados nutricionalmente y con una producción optima, asimismo como mitigar las enfermedades de origen fúngico.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ahammed, GJ y Yang, Y. (2021). Mecanismos de resistencia a enfermedades fúngicas inducidas por silicio en plantas. *Fisiología y bioquímica vegetal*, 165, 200-206.
2. Adam Frew, Leslie A Weston, Olivia L Reynolds, Geoff M Gurr, The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach, *Annals of Botany*, Volume 121, Issue 7, 8 June 2018, Pages 1265–1273, <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>
3. Aristizábal Loaiza, M. (2003). *Introducción a la fisiología vegetal*. Manizales, Colombia: Editorial Universidad de Caldas. 307 p.
4. Barrera, J. F., Avelino, J., Huerta, G., Herrera, J., & Gómez, J. (2013). La roya del café, crónica de una devastación anunciada. *Ecofronteras*, 22-25.
5. Botelho DMS, Pozza EA, Pozza AAA, Carvalho JG, Botelho CE, Souza PE (2005) Intensidad de la mancha del ojo marrón en plántulas de café en función de fuentes y dosis de silicio. *Patología Vegetal Brasileña* 30:582-588
6. Caicedo, L., & Chavarriaga, W. (2008). Efecto de la aplicación de dosis de silicio sobre el desarrollo en almácigo de plántulas de café variedad Colombia. *Agronomía Colombiana*, 15(1), 3-4.
7. Castellanos González, Leónides, de Mello Prado, Renato, & Silva Campos, Cid Naudi. (2015). El Silicio en la resistencia de los cultivos. *Cultivos Tropicales*, 36 (1): 16-24. Recuperado en 11 de agosto de 2023, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362015000500002&lng=es&tlng=es.

8. Carré-Missio, V., Rodrigues, F. Á., Schurt, D. A., Rezende, D. C., Moreira, W. R., Korndörfer, G. H., & Zambolim, L. (2012). Componentes epidemiológicos da ferrugem do cafeeiro afetados pela aplicação foliar de silicato de potássio. *Tropical Plant Pathology*, 37, 50-56.
9. Carré-Missio, V., Rodrigues, F. A., Schurt, D. A., Resende, R. S., Souza, N. F. A., Rezende, D. C., ... & Zambolim, L. (2014). Effect of foliar-applied potassium silicate on coffee leaf infection by *Hemileia vastatrix*. *Annals of applied biology*, 164(3): 396-403. Consultado en <https://doi.org/10.1590/S1982-56762013000600012>
10. Aguirre, C. (2005). El silicio en los organismos vivos. Asociación Interciencia. Caracas, Venezuela. Pp. 504 – 509. Extraído de http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/1644/TS_JDHE_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
11. Chen CH, Lewin J. (1969). Silicio como elemento nutritivo para *Equisetum arvense*. *Canadian Journal of Botany* 47:125-131.
12. Currie, H. A., & Perry, C. C. (2007). Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. *Annals of botany*, 100(7): 1383–1389. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm247>
13. Datnoff LE, Rodrigues FA, Seebold KW (2007) Silicio y nutrición vegetal. En: Datnoff LE, Elmer WH, Huber DM (Eds.) Nutrición mineral y enfermedades de las plantas. San Pablo MN. Prensa APS, págs. 233-246.
14. Durrant, W. E. & Dong, X. (2004). Systemic acquired resistance. *Annual Review Phytopathology*, 42: 185-209.

15. Epstein, E. (1999). "Silicon". *Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 50: 641-64.
16. Epstein E, Bloom AJ. (2005). *Nutrición mineral de las plantas: principios y perspectivas* Sunderland, MA: Sinauer Associates. 380 p.
17. Etesami, H., Jeong, B.R., 2018. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 147: 881–896. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>.
18. Henriët, C., Draye, X., Oppitz, I., Swennen, R. y Delvaux, B. (2006). Efectos, distribución y absorción de silicio en banano (*Musa spp.*) en condiciones controladas. *Planta y suelo* , 287: 359-374.
19. Hodson MJ, White PJ, Mead A, Broadley MR: Filogenética variación en la composición de silicio de las plantas. *Ann Bot* 2005, 96:1027-1046.
20. Islam, W.; Tayyab, M.; Jalil, F.; Hua, Z.; Huang, Z.; Chen, HY. (2020) Defensa vegetal mediada por silicio contra patógenos e insectos plagas pesticida. *Bioquímica y Fisiología*, 168: 104641.
21. Jiménez, A. S., & Khalajabadi, S. S. (2015). Respuesta del café a la aplicación de silicio y lombrinaza durante la etapa de almácigo. *Ministro de Hacienda y Crédito Público*, 66(2), 88-109. Consultado en <https://www.cenicafe.org/es/publications/Revista66-22.pdf#page=88>
22. Knight, CT y Kinrade, SD (2001). Una introducción a la química acuosa del silicio. En *Estudios sobre ciencias vegetales* 8:57-84.

23. Korndörfer, G. H. & Datnoff, L. E. (2004). “Efeito do Silicio no Crescimento e Produtividade das Culturas”. [En línea] Silício na Agricultura. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia. Disponible en: <http://sifertilizer.com>
24. Liang YC, Sun WC, Si J, Römheld V (2005) Efectos del silicio aplicado foliar y radicularmente en la mejora de la resistencia inducida al mildiu polvoroso en *Cucumis sativus*. *Patología de Plantas* ,54:678-685.
25. Lux, A., Lukačová, Z., Vaculík, M., Švubová, R., Kohanová, J., Soukup, M., Martinka, M., & Bokor, B. (2020). Silicification of Root Tissues. *Plants*, 9(1): 111. <https://doi.org/10.3390/plants9010111>
26. Ma, JF y Yamaji, N. (2008). Funciones y transporte del silicio en las plantas. *Ciencias de la vida celulares y moleculares* , 65: 3049-3057.
27. Ma. J.F., N. Mitani, S. Nagao, S. Konichi, K. Tamai, T. Iwashita, and M. Yano. 2004. Characterization of the Silicon Uptake System and Molecular Mapping of the Silicon Transporter Gene in Rice. *Plant Physiology*. 136: 1-6.
28. Ma JF, Yamaji N, Mitani N, Tamai K, Konishi S, Fujiwara T, Katsuhara M, Yano M (2007) Un transportador de eflujo de silicio en el arroz. *Naturaleza* 448:209-213.
29. Marschner, H. & Rimmington, G. (1995). “Mineral nutrition of higher plants”. *Plant, Cell & Environment*, 11(2): 147-148. doi 10.1111/j.1365-3040.1988.tb01130.x.
30. Matichenkov, Vladimir. (2004). “Silicon in Food”. [On line]. Agriculture and Environment. International Conference and Exhibition. (2-5 August 2004). Pushchino, Russia. Available from <Http://www.sifertilizer.com>
31. Mitani N, Ma JF (2005) Sistema de absorción de silicio en diferentes especies de plantas. *Revista de Botánica Experimental* ,56:1255-1261.

32. Mogollón, A. M. & Castaño, J. (2012). Evaluación in vitro de inductores de resistencia sobre *Mycosphaerella fijiensis* Morelet. *Revista facultad nacional de agronomía*, 65 (1): 6327-6336.
33. Mostofa, M.G., Rahman, M.M., Ansary, M.M.U., Keya, S.S., Abdelrahman, M., Miah, M. G., Phan Tran, L.S., 2021. Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. *Critical Review in Biotechnology*: 1–17.
34. Pereira, S. Rodrigues, A. Carré-Missio, V. Goreti, M. & Zambolim (2009). *Patología de plantas tropicales*, 34(4): 223-230.
35. Pilon-Smits, EA, Quinn, CF, Tapken, W., Malagoli, M. y Schiavon, M. (2009). Funciones fisiológicas de los elementos beneficiosos. *Opinión actual en biología vegetal* , 12 (3): 267-274.
36. Pozza AAA, Alves E, Pozza EA, Carvalho JG, Montanari M, Guimarães PTG, Santos DM (2004) Efecto del silicio en el control de la mancha del ojo marrón en tres variedades de café. *Fitopatología Brasileña* 29:185-188.
37. Quero, E. (2008). La Biosilicificación proceso biológico fundamental en la productividad vegetal. *Revista de Riego: Protección y Nutrición de Hortalizas y Frutas*, 6(39): 72-76.
38. Raya, J. C. & Aguirre, C. L. (2012). El papel del silicio en los organismos y ecosistemas. *Conciencia tecnológica*, 43: 42-46
39. Lawrence, D. Rodrigues, F. (2015). The Role of Silicon Suppressing Rice Diseases. The American Phytopathological Society. p. 1-5.

40. Rodrigues, F., WM, Datnoff, LE, Jones, JB y Rollins, JA (2005). Silicon influences cytological and molecular events in compatible and incompatible rice (*Magnaporthe grisea*) interactions. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 66: 144-159.
41. Mandlik,R.,Thakral,V., Raturi,G., Shinde,S., Nikolić,M., Tripathi,D.K., Sonah,H. Deshmukh,R. (2020) Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants, *Journal of Experimental Botany*, 71 (21): 6703–6718, <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>
42. Sociedad española de productos húmicos. S.A. (2009). El silicio (Si) como elemento fertilizante y protector de enfermedades y plagas. Boletín informativo del Departamento técnico N°028. Zaragoza, España.
43. Sommer, M., Kaczorek, D., Kuzyakov, Y., & Breuer, J. (2006). Silicon pools and fluxes in soils and landscapes—a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169(3): 310-329.
44. Zambolim L, Vale FXR, Costa H, Pereira AA, Chaves GM (2002) Epidemiología y control integrado de la roya del café. En: Zambolim L (Ed.) El estado del arte de las tecnologías de producción de café. Visosa MG. Universidad Federal de Visosa. Pp. 369-450.