

# Productos de Silicio: Ayudan a las plantas a superar estrés biótico y abiótico



***El silicio (Si), el segundo elemento más abundante sobre la corteza de la tierra luego del oxígeno, es considerado un elemento benéfico para el desarrollo y crecimiento de las plantas. El silicio permite que las plantas logren sobreponerse a los efectos del estrés biótico y abiótico. Lamentablemente, los beneficios del Si nunca fueron tomados muy en cuenta hasta los inicios del siglo XX, en gran medida por la falta de síntomas visibles tanto de la deficiencia como de la toxicidad de Si en las plantas. Por esta razón por muchos años los investigadores no realizaron ensayos ni estudios con este elemento. Sin embargo, en muchas condiciones agronómicas las plantas están enfrentadas a severas condiciones de estrés, especialmente en suelos con disponibilidad bajas o limitantes de Si. De esta forma en la comunidad científica primero y luego entre agricultores se comenzó a entender la importancia del silicio en el desarrollo de las plantas. Ya se han realizado 5 congresos mundiales sobre Silicio ( Estados Unidos 1999, Japón 2002, Brasil 2005, Sudáfrica 2008 y China 2011). Y de esta forma el uso de diversas formulaciones con silicio comenzó a popularizarse entre los agricultores. El Profesor Lawrence E. Datnoff, del Departamento de Patología y Fisiología Vegetal de Luisiana State University Agricultural Center en Estados Unidos, ofrece en esta edición de New Ag International su visión sobre la incorporación de este elemento en los planes de manejo y su rol para potenciar a las plantas frente a situaciones de estrés biótico y abiótico.***



Silicio se refiere al elemento químico Si y se encuentra en la tabla periódica de los elementos en la columna IV-A, directamente bajo el carbono<sup>Ⓞ</sup>. Tiene un número atómico 14 y es un metaloide tetravalente. La silica (SiO<sub>2</sub>) se refiere al dióxido de silicio, y es el mayor constituyente de la arena. Los silicatos (SiO<sub>3</sub><sup>-2</sup>) se encuentran en asociación con los siguientes cationes: Ca<sup>+2</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> y forman los siguientes compuestos cristalinos- CaSiO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, MgSiO<sub>3</sub> y K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. El ácido silícico, Si (OH)<sub>4</sub> (también conocido como ácido mono-silícico o ácido orto-silícico) se refiere a la forma soluble de Si que está disponible para ser absorbida por las raíces de las plantas. La silicona, R<sub>2</sub>SiO – donde la R es un grupo orgánico- se utiliza en la fabricación de productos plásticos y gomas.

## **MUCHOS SUELOS DEL MUNDO SON DEFICIENTES EN SILICIO SOLUBLE**

La mayoría de los suelos contienen grandes cantidades de Si soluble con concentraciones en el rango de 3.5 a 40 mg de Si L<sup>-1</sup>. Las concentraciones de esta magnitud son comunes en varios nutrientes inorgánicos como SO<sub>4</sub>, K, Ca y se encuentran en exceso en las concentraciones de fósforo en la solución del suelo. Sin embargo, la disolución del Si desde los minerales del suelo es lenta y su adsorción por el suelo y las prácticas agrícolas intensivas hacen que los niveles de Si disponible se reduzcan considerablemente hasta el punto de que es necesario suplementar con productos a base de Si para obtener las producciones agrícolas deseadas. Algunos suelos tienen bajos niveles de Si disponible. Este tipo de suelos son comúnmente suelos muy lavados, lixiviados, ácidos, con una baja base de saturación y que contienen grandes cantidades de sesquióxidos (ejemplo, óxido de aluminio, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Por esta razón, suelos altamente lavados como Oxisols y Ultisols pueden tener niveles bajos de Si disponible para las plantas. Y suelos altamente orgánicos como los Histosols, bajos en minerales también pueden tener bajos niveles de Si. Más aún, algunos suelos principalmente compuestos de arena cuarzo, silica (ejemplo, los entisols arenosos) pueden tener altos niveles de Si insoluble pero bajos niveles de Si disponible para las plantas. Muchas mezclas de suelos caen en esta categoría también. Estas condiciones de suelos con baja disponibilidad de Si disponible se encuentran en grandes zonas agrícolas de África, Asia, las Américas e incluso en Europa.

## **UN CONSTITUYENTE CLAVE DE LAS PLANTAS**

Todas las plantas cultivadas sobre suelo van a contener Si en sus tejidos, y se ha demostrado que 44 clados de angiospermas (que representan más de 100 órdenes o familias) también contienen silicio en sus tejidos. Para determinar si las plantas acumulaban Si los estudios anteriores se enfocaban en medir Si en el follaje y no en otros órganos de las plantas. Recientemente se ha demostrado que algunas especies vegetales – ej. Tomate y pimiento- acumulan más Si en sus raíces que en sus brotes. La extracción de silicio hacia los brotes varía según la especie y el nivel de madurez de la planta, con un rango de concentración que va desde 0.1% a 10%, en base a materia seca. Las plantas monocotiledóneas tenderán a acumular más Si en sus tejidos que las plantas dicotiledóneas. En general los pastos de humedades tendrán entre 4.6 y 6.9%, mientras que los pastos en praderas secas varía entre 0.5 y 1.4%. Las plantas dicotiledóneas tienen en general menos de 0.23%. En la parte baja de este rango, 0.1%, esto es similar a los porcentajes de macronutrientes como Ca, Mg, P y S. Y en la parte alta, 10%, la concentración en los tejidos supera la de nutrientes



Prof Lawrence E. Datnoff

minerales como N o K. Por todo esto, se establece que el Silicio es claramente un constituyente mayor de las plantas. La diferencia en la capacidad de acumulación de Si entre diferentes plantas se atribuye principalmente a las diferentes habilidades de las raíces para absorber Si. Como mencionamos anteriormente, las raíces extraen ácido salicílico y se han identificado y caracterizado transportadores en las raíces que juega un rol muy activo en la acumulación de Si. Este trabajo se ha realizado en trigo, soja, arroz, maíz, zapallo y cebada. Una vez que pasa la barrera de la raíz, el Si se mueve por el xilema a través de transportadores y/o por transpiración hacia la endodermis de la raíz, membranas celulares del vascular bundle y las células de la hoja en la epidermis justo debajo de la cutícula. Una vez dentro de una célula, ocurre un proceso natural de polimerización que convierte el ácido silícico en sílica insoluble ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ; también conocido como gel de sílica o fitolítidos).

## VARIAS FUENTES DE SILICIO EN EL MERCADO



Hay una serie de fuentes sólidas y líquidas de Si en el mercado, que han sido utilizados como enmiendas de suelo o fertilizantes: Diatomita, silicato de calcio, metasilicato de sodio, silicato de potasio, silicato de magnesio, ácido ortosilícico, dióxido de silicio hidratado, metasilicato de calcio. Para que estos materiales sean útiles, deben cumplir con una serie de criterios, que incluyen un contenido relativamente alto de Si soluble, una condición material que facilite su almacenaje y aplicación y que no contengan sustancias que contaminen el suelo como los metales pesados. Las fuentes sólidas que han sido utilizadas con éxito en incorporaciones al suelo incluyen la wallastonita – un silicato de calcio  $\text{CaSiO}_3$  natural- un subproducto de las industrias del fosfato y el acero, termofosfato y cemento. Los residuos de cultivo ( ejemplo, cáscara de arroz) también son una fuente potencial, pero debido a su lenta solubilidad en el suelo, no les permite suplementar las necesidades inmediatas de los cultivos. Varios

de estos materiales se aplican en pre-plantación en tasas que van desde 300 a 800 kg de silicio elemental por hectárea. Las fuentes líquidas incluyen silicatos de potasio o sodio y se utilizan principalmente en producciones hidropónicas a tasas de ~2mM Si. También se utilizan silicatos líquidos en aplicaciones foliares, principalmente para controlar enfermedades. Sin embargo, para diferentes combinaciones hospedero:enfermedad (trigo/pepino: oídio; soja/roya; arroz/mancha marrón) las plantas respondieron mejor con las aplicaciones de Si a las raíces que en forma foliar. En el 2007, un silicato de potasio (Sil-MATRIX<sup>®</sup>, PQ Corporation) fue registrado por la Environmental Protection Agency (EPA) en Estados Unidos y certificado por Organic Materials Review Institute (OMRI) como un pesticida orgánico para el control preventivo de oídio y el control de ácaros y áfidos en cultivos de alto valor como uva vinífera, fresas, arándanos, entre otros.

## ¿UN ELEMENTO ESENCIAL?

En los años 50s Japón y Corea del Sur fueron los primeros países en reconocer la importancia del Si en la producción agrícola, especialmente en arroz. Ellos clasificaron este elemento como esencial. En el 2004, Brasil fue el tercer país en reconocer formalmente el silicio. El Ministerio de Agricultura de Brasil, que regula la producción comercial de fertilizantes estableció que el Si es un micronutriente benéfico. En la actualidad, el Si todavía no es reconocido como un elemento esencial y en muchos países se vende solo como una enmienda o acondicionador de suelos en vez de como un fertilizante. Y esto se debe en gran parte a la forma cómo se definen los nutrientes de las plantas, la que se base en tres criterios desarrollados por Arnon y Stout (Epstein y Bloom 2005<sub>1</sub>): **1)** una deficiencia del elemento impide que la planta complete su ciclo; **2)** la deficiencia es específica para el elemento en cuestión y **3)** la deficiencia impacta directamente en la nutrición de la planta, como por ejemplo como constituyente de un metabolito esencial para la acción de un sistema enzimático. Epstein y Bloom 2005<sub>1</sub> han argumentado que hay dificultades con esta definición. Porque para el primer criterio, una planta puede tener una deficiencia bastante severa de un nutriente esencial y pese a ello puede completar su ciclo. El segundo criterio lo consideran reiterativo y finalmente, para el tercer criterio, que el elemento participe directamente en la nutrición de la planta, no incorpora la capacidad de corregir situaciones ambientalmente desfavorables.

De hecho en muchos casos de descubrimiento de elementos esenciales no se han cumplido con estos criterios. Cuando se descubrió que el boro era esencial, nadie tenía la evidencia que el “elemento participaba directamente en la nutrición de la planta”. Por eso, Epstein y Bloom han propuesto lo siguiente: Un elemento es esencial si cumple con uno o dos de los siguientes criterios: **(1)** el elemento es parte de una moléculas que es un componente intrínseco de la estructura o metabolismo de una planta; **(2)** la planta puede ser tan severamente privada del elemento que exhibe anomalías en su crecimiento, desarrollo o reproducción, en comparación con las plantas no deficitarias. Debido a que la “esencialidad” del Si para diatomáceas, Equisetum arvense ha sido bien establecida, pero no ha podido ser demostrada categóricamente para otras especies, Epstein y Bloom han propuesto que el Si es un un elemento “cuasi-esencial”.

**Tabla 1:** Tipos de estrés abiótico que mejoran con aplicaciones de silicio

<p><b>Químico</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda a superar toxicidad por metales (Al, Cd, As, Mn, Fe)</li> <li>• Ayuda a superar estrés por sales</li> <li>• Ayuda a superar desajustes nutricionales (exceso de N, deficiencia de P)</li> </ul>
<p><b>Físico</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Previene la compactación</li> <li>• Aumenta la resistencia a altas y bajas temperaturas</li> <li>• Mejora la resistencia a estrés hídrico</li> <li>• Mejora la resistencia a estrés por calor</li> </ul>

**UN ROL DOCUMENTADO EN LA REDUCCIÓN DE ESTRÉS ABIÓTICO**

**Tabla 2.** Patógenos que causan royas, oídio, manchas foliares, agallas, marchitez y pudriciones radiculares que se han reportado que se suprimen con silicio.

<p><b>Hongos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bipolaris</li> <li>• Blumeria</li> <li>• Collectotrichum</li> <li>• Corynespora</li> <li>• Diplocarpon</li> <li>• Erysiphe</li> <li>• Fusarium</li> <li>• Leptosphaeria</li> <li>• Magnaporthe</li> <li>• Phaeosphaeria</li> <li>• Phakospora</li> <li>• Rhizoctonia</li> <li>• Septoria</li> <li>• Sphaerotheca</li> <li>• Sclerotinia</li> <li>• Uncinula</li> </ul>	<p><b>Oomycetes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Phytophthora</li> <li>• Pythium</li> </ul> <p><b>Bacterias</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ralstonia</li> <li>• Xanthomonas</li> </ul> <p><b>Virus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tobacco Ring Spot</li> <li>• Tobacco Mosaic</li> <li>• Belladonna Mottle</li> </ul> <p><b>Nematodos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meloidogyne</li> </ul>
--	---

Se ha comprobado los efectos benéficos del Si, directo o indirecto, sobre las plantas bajo estrés abiótico (Tabla 1) en una variedad de cultivos, especialmente en arroz. Las hojas, tallos y panoja de las plantas de arroz que crecen en presencia de Si muestran un crecimiento erecto, sugiriendo que se mejora la distribución de la luz dentro de la canopia. El silicio puede afectar positivamente el efecto de la actividad de algunas enzimas que participan en la fotosíntesis en arroz y a su vez reducir la senescencia de la hoja del arroz. Un uso alto de N puede afectar la erectud de la hoja y por lo tanto disminuir la capacidad máxima de intercepción de luz, sobretodo en altas densidades de siembra. Sin embargo, el Si impactará positivamente en la erectud de la planta, mejorando la capacidad fotosintética. El silicio también puede ayudar a aliviar el estrés hídrico al disminuir la pérdida de agua en las hojas y disminuir la transpiración. La transpiración ocurre principalmente a través de los estomas y parcialmente a través de la cutícula. Y debido a que el Si es depositado bajo la cutícula, se puede disminuir la transpiración de esta parte de la planta. En adición, las plantas suplementadas con Si pueden mantener una mayor conductancia estomática, mayor contenido de agua y de potencial hídrico. Estas mismas razones deberían explicar el impacto positivo de este elemento frente al estrés por calor. Bajo situaciones de estrés por deficiencia de P, el Si potencia la disponibilidad de P interno al reducir la extracción en exceso de Mn y Fe. Y ante altas concentraciones de P, el silicio puede reducir el daño al reducir la extracción de P o al reducir la transpiración. También se ha reportado que el silicio protege a la planta de la toxicidad por metales, como Al, Cd, Fe, Mn y Zn. Para los metales Al, Cd, Fe y Zn, se atribuyen los

efectos del Si a la interacción entre este elemento y estos metales en el simplasto o apoplasto. Más aún, la reducción de la toxicidad de estos metales se cree que ocurre por complejación y/o por compartimentación con Si en el citoplasma y la secuestación en las vacuolas o paredes celulares. Se han establecido hipótesis que señalan tres mecanismos para disminuir la toxicidad por Mn: **(1)** el silicio reduce la extracción de Mn al potenciar el potencial oxidativo de Mn por parte de la rizósfera a través de mecanismos químicos o microbianos, **(2)** incrementa la capacidad acopladora de la pared celular lo que genera una reducción del Mn en el apoplasto y/o **(3)** estimulando el sistema de defensa antioxidativo contra el daño oxidativo de las células causado por la toxicidad de Mn. La reducción del estrés por sales generado por el silicio se ejecutaría a través de dos mecanismos: **(1)** El silicio podría generar un bloqueo parcial del flujo bypass de transpiración, reduciendo el paso de Na y **(2)** la deposición de Si en las raíces impediría que el Na se transporte al xilema. De hecho la concentración de Na en la sabia del floema se redujo de 6.2 a 2.8 mN en ensayos con Si.

**LEGISLACIÓN: UN STATUS ESPECIAL PARA FERTILIZANTES DE SILICIO**

Norteamérica ofrece un buen ejemplo del estatus especial de los fertilizantes de silicio en la legislación. En el 2004, se realizaron esfuerzos para educar la Association of American Plant Food Control Officials (AAPFCO), el organismo que regula los registros de fertilizantes en Estados Unidos. Puerto Rico y Canadá utilizan las recomendaciones de AAPFCO para sus propias regulaciones de fertilizantes. Este organismo busca generar uniformidad por consenso, considerando las necesidades de los consumidores, la protección del medioambiente y manteniendo una competencia justa entre los actores de la industria. AAPFCO tiene una definición de nutrientes de las plantas diferente a la entregada por Aron y Stout y también a la de Epstein y Bloom. Ellos ponen a los nutrientes en dos categorías **(1)** primarios y **(2)** secundarios y micronutrientes, esto basado en las cantidades de nutrientes requeridos. Los nutrientes primarios incluyen el nitrógeno (N), el fosfato disponible (P2O5) y el potasio soluble (K2O) y son absorbidos en grandes cantidades. Los secundarios y micronutrientes se necesitan en cantidades traza y son esenciales para el desarrollo normal de las plantas y en muchos casos es necesarios adicionarlos al medio de cultivo. Los nutrientes secundarios incluyen el calcio, magnesio y azufre,

mientras que los micronutrientes incluyen el boro, cloro, cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, sodio y zinc. Por lo tanto, esta clasificación tampoco definió un lugar para el Si, debido a que este elemento no cabía en la clasificación de nutriente primario, secundario o micronutriente. En consecuencia, el comité de registro de AAPFCO propuso una nueva categoría llamada "Sustancias o Compuestos Benéficos". Esta nueva categoría fue definida como "cualquier sustancia o compuesto otro que los nutrientes primarios, secundarios o micronutrientes al que se pueda demostrar por investigación científica que puede ser benéfico para una o más especies de plantas, cuando se aplica de forma exógena". Pese a ello, el Si recibió solo una aprobación tentativa por la AAPFCO porque no había un método para diferenciar el contenido total de silicio del silicio soluble. Había que determinar y validar un método para determinar el Si disponible para las plantas en las fuentes fertilizantes. Basado en investigaciones anteriores, se pudo determinar un método de 5 días para determinar las concentraciones de silicio soluble en los productos fertilizantes sólidos y fue aprobado por AAPFCO (Sebastain et al., 2013<sub>2</sub>). Se ha demostrado que este método tiene una buena correlación con la extracción de Si por las plantas y se puede usar ahora para control de calidad, para registrar de forma adecuada nuevos productos y para elegir el mejor productor de silicio para un cultivo. En la actualidad los fertilizantes llevan en la etiqueta que contienen sustancias benéficas como el Si y pueden ser vendidos en Estados Unidos. Como ejemplo, CrossOver™ (CaMgSiO<sub>3</sub>, HARSCO) se está registrando actualmente y se señala que contiene la sustancia benéfica Si y ya se vende en 33 estados de EE.UU. para uso en los mercados hortofrutícolas y agrícolas. En Europa, no se ha desarrollado ningún trabajo a nivel de Unión Europea y el silicio no está incluido en la legislación de fertilizantes. Sin embargo, aparece registrado en algunas legislaciones nacionales (ejemplo, en varios países de Europa del Este). En Australia y Sudáfrica, el silicio forma parte de la legislación sobre fertilizantes.

## **EL ROL DEL SILICIO FRENTE AL ESTRÉS BIÓTICO: MUCHO MÁS QUE ACCIÓN FUNGICIDA**

**Tabla 4.** Reportes de herbívoros y otras plagas que son suprimidos por silicio.

<b>Insectos masticadores</b>
• Cienpiés y barrenadores
• Saltamontes
• Gusanos
• Escarabajos
• Langostas
<b>Insectos chupadores</b>
• Cicadélidos
• Áfidos
• Mosca blanca
• Escama
<b>Otras plagas</b>
• Arañas de las hojas
• Ácaros

Muchos cultivos suplementados con Si ganan en resistencia contra enfermedades foliares y del suelo, provocadas por hongos, bacterias, nematodos y virus (Tabla 2). El silicio afecta una serie de componentes de la resistencia de la planta que permiten retardar la incubación, reducir la expansión de las lesiones, reducir el tamaño y número de lesiones y la producción de conidias. Por esta razón, con las aplicaciones de Si se reduce la severidad y el progreso de las enfermedades. Y se puede lograr que las especies susceptibles ganen resistencia, equiparando a las especies parcial o completamente resistentes. El silicio puede suprimir enfermedades en forma tan efectiva como un fungicida. Como la concentración de Si (soluble e insoluble) aumenta en los tejidos de la planta, la supresión de enfermedades aumenta. Sin embargo, es importante destacar que el aporte de Si debe ser continuo porque, de lo contrario, el efecto protector disminuye o desaparece. La resistencia a enfermedades es mayor cuando el Si se aplica al suelo y es absorbido por las raíces, en oposición a la eficacia de las aplicaciones foliares. Las aplicaciones foliares de Si no van a funcionar tan bien como las

aplicaciones de Si a las raíces porque los transportadores de Si no se expresan en las hojas. Consecuentemente, los efectos supresores de enfermedades en los casos de las aplicaciones foliares se deben probablemente a que el Si que es depositado en la superficie de la hoja tenga un efecto osmótico o de pH. El mecanismo subyacente que gobierna la protección del Si a enfermedades no está del todo comprendido. Sin embargo, el efecto del Si en la resistencia de las plantas a enfermedades se considera que se debe a la acumulación de Si en el tejido de la epidermis o a la expresión respuestas de defensa metabólicas o patogénicas. El ácido monosilícico acumulado se polimeriza en ácido polisilícico y luego se transforma en sílica amorfa, la que forma una membrana gruesa de si-celulosa. De esta forma una doble capa cuticular protege y fortifica mecánicamente las plantas. El Silicio también podría formar complejos con compuestos orgánicos en las paredes de las células de la epidermis, aumentando la resistencia a la degradación por las enzimas liberadas por los hongos y bacterias fitopatógenas. Hay otras investigaciones que apuntan a un rol más activo del Si en las plantas, sugiriendo que el silicio podría ser una señal que medie entre las enfermedades y la respuesta defensiva de las plantas. Se ha demostrado que el Silicio después de una infección por hongos estimula la actividad de la quitinasa y activa rápidamente las peroxidases y polifenoxidasas. Se ha demostrado que fenoles glicosilados extractados de plantas a las

**Tabla 3:** Algunos genes de defensa y estrés mediados por el silicio en diferentes sistemas hospedero-patógeno.

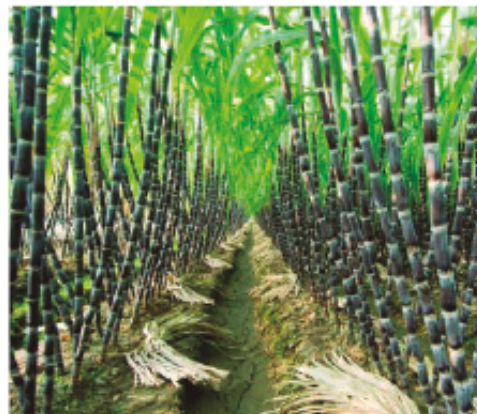
<b>Tomate <i>Ralstonia solanacearum</i></b>
• Factor de transcripción WRKY1
• Proteína de respuesta a la resistencia a enfermedades
• Relacionado a Ferritina
• Proteína abundante en embiogénesis tardía
• Trehalosa fosfatasa
• Acetoacetil- CoA tiolasa
<b>Trigo <i>Blumeria graminis</i></b>
• β-1,3 endoglucanasa
• Proteínas relacionadas con patogénesis
• Proteínas tipo Germina
• Superóxido dismutasa
• Peroxidasa
<b>Arabidopsis <i>Erysiphe cichoracearum</i></b>
• WRKY
• Proteínas relacionadas con patogénesis
• Quitinasa
• Defensina
• Proteínas tipo Germina
• Peroxidasa
<b>Arroz <i>Magnaporthe oryzae</i></b>
• Proteína tipo tolerancia a salinidad
• Oxidasa multicobre tipo 1
• Ferritina 1, precursor de cloroplastos
• Terpeno sintetasa, de unión a metal
• Fenilalanina amonio liasa
• Peroxidasa
• Proteína antihongos
• Precursor peroxidasa 52

que se les aplicó Si tienen una potente actividad fungistática. También se ha demostrado que en plantas atacadas por patógenos a las que se les adicionó Si se generaron flavonoides y fitoalexinas momilactonas, compuestos de bajo peso molecular que tienen propiedades antifúngicas. Estos compuestos antifúngicos aparentemente juegan un rol muy activo en la supresión de las enfermedades. Más aún, se observó en hojas de arroz tratadas con Si un incremento en la generación de superóxido ( $O_2^-$ ), 15 minutos después de ser inoculadas con *Magnaporthe oryzae*, el agente causal del añublo del arroz. Estos estudios sugieren que hay mecanismos adicionales que pueden estar involucrados en la resistencia inducida por el Si a enfermedades. Mucha evidencia sugiere que el Si influye en los balances hormonales endógenos de resistencia de las plantas. A través de microarrays se ha podido confirmar que los suplementos de Si inducen altos niveles de ácido

salicílico, ácido jasmónico y etileno. Recientemente estudios a nivel genómico en tomate, arroz y trigo cultivados en suelos suplementados con Si y comparados con plantas control (sin enmiendas de Si en el suelo) han demostrado expresiones únicas de una serie de genes involucrados en los mecanismos y metabolismo de defensa de las plantas (Tabla 3). También se ha demostrado que el Si otorga resistencia a las plantas contra ataques de insectos barrenadores y chupadores (Tabla 4). Estos efectos pueden ser directos o indirectos. Los efectos directos pueden incluir una reducción en el crecimiento y la reproducción del insecto plaga. Y los efectos indirectos pueden incluir efectos en la tasa de mortalidad de la plaga que resultará en una menor penetración en la planta y también el silicio puede tener un rol en la generación de volátiles de la planta que pueden atraer enemigos de la plaga que ataca a la planta. Un claro mecanismo de acción del Si contra los ataques de plaga es el aumento en la dureza de los tejidos vegetales. Las plantas atacadas por insectos aumentan su liberación de enzimas de la defensa como peroxidasa, polifenoloxidasas y fenilalanina amonioliasa cuando reciben suplementos de silicio. La peroxidasa participa en la lignificación y en la síntesis de suberina que incrementa la dureza de los tejidos de la planta y al mismo tiempo genera quinones que poseen propiedades antibióticas. La actividad de la enzima PAL aumenta la producción de compuestos fenólicos. Claramente, muchos de los compuestos de defensa producidos por las plantas suplementadas con Si cuando son atacadas por insectos funcionan de forma similar a aquellos generados cuando la planta es atacada por enfermedades.

## **UN GRAN MERCADO POTENCIAL PARA PRODUCTOS DE SILICIO**

El silicio es un componente vital del sistema suelo-planta. Y juega un rol muy importante defendiendo y potenciando a la planta frente a situaciones de estrés biótico y abiótico. Sin embargo, la potencialidad comercial del Silicio recién ha comenzado a ser comprendida por la industria, tanto para ser usado como fertilizante o como un fitosanitario. Debido a que muchos suelos tienen bajos niveles de Si disponible para las plantas y basados también en que muchas especies de plantas contienen algo de Si en sus tejidos parece prudente considerar la suplementación con silicio como un método simple y económico para ayudar a mantener y potenciar la salud de las plantas.



**(Cita 1)** Epstein, E. and Bloom, A. J. 2005. *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives, 2nd Edition*, Sinauer Associates, Inc., Sutherland, MA, 400 pgs

**(Cita 2)** Sebastian, D., Rodrigues, H., Kinsey, C., Korndorfer, G., Pereira, H., Buck, G., Datnoff, L., Miranda, S., and Provance-Bowley, M. 2013. A 5-day method for determination of soluble silicon concentrations in nonliquid fertilizer materials using a sodium carbonate-ammonium nitrate extractant followed by visible spectroscopy with heteropoly blue analysis: single-laboratory validation. *J. AOAC*