

Silicio como Bioestimulante en el Cultivo de Cacao (*Theobroma cacao* L.) y Agente de Control Biológico de *Moniliophthora roreri* Silicon as a Biostimulant in Cocoa (*Theobroma cacao* L.) Cultivation and Biological Control Agent for *Moniliophthora roreri*

Juan Antonio Torres-Rodríguez¹ , Rommel Arturo Ramos-Remache¹ ,
Juan José Reyes-Pérez¹ , Eduardo Fabian Quinatoa-Lozada² y Tomás Rivas-García^{3†}

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Av. Quito, km 1.5 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (J.A.T.R.), (R.A.R.R.), (J.J.R.P.).

² Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, Av. Los Almendros y Pujilí, Sector la Virgen. 050250 La Maná, Cotopaxi, Ecuador; (E.F.Q.L.).

³ Universidad Autónoma Chapingo-CONHACYT. Carretera Federal México-Texcoco km 38.5, Chapingo 56230 Texcoco, Estado de México, México; (T.R.G.).

† Autor para correspondencia: tomas.rivas@conahcyt.mx

RESUMEN

El cultivo del cacao es muy susceptible a deficiencias nutrimentales y a la moniliasis ocasionada por el fitopatógeno *Moniliophthora roreri*. Una de las alternativas a los productos químicos sintéticos son los compuestos a base de silicio (Si). En la presente investigación se evaluó el efecto del silicio como bioestimulante en el cultivo de cacao y agente de control biológico de *M. roreri*. En el experimento se utilizaron cinco tratamientos de Si: T1 (4.00 kg ha⁻¹), T2 (3.00 kg ha⁻¹), T3 (2.00 kg ha⁻¹) y T4 (1.5 kg ha⁻¹) y un tratamiento control (sin aplicación). Se determinaron los indicadores de producción, número de mazorca, peso fresco y seco de almendras, peso seco de 100 almendras y el rendimiento del cultivo. Además, de la incidencia y severidad de la enfermedad a los 60, 120 y 180 días después de la aplicación del Si y la eficiencia de los tratamientos. Los resultados significativamente superiores para las variables: Producción, número mazorca, peso fresco y seco de almendra y peso seco de 100 almendra, se obtuvieron mediante la aplicación de 4 kg ha⁻¹ de Si, todas las dosis de Si superaron al control ($P \leq 0.05$) en las variables relacionadas a la producción. En el control del fitopatógeno (*M. roreri*), la dosis de 4 kg ha⁻¹ Si disminuyó la incidencia y la severidad de la enfermedad en más del 50%. La aplicación de Si puede ser una opción en el cultivo de cacao como bioestimulante y agente de control biológico de *M. roreri*.

Palabras clave: eficiencia tratamiento, incidencia enfermedad, rendimiento, severidad enfermedad.

SUMMARY

The cocoa crop is very susceptible to nutritional deficiencies and moniliasis caused by the phytopathogen *Moniliophthora roreri*. One of the alternatives to synthetic chemicals are compounds based on silicon (Si). In the present investigation, the effect of silicon as a biostimulant in cocoa cultivation and as a biological control agent for *M. roreri* was evaluated. In the experiment, five Si treatments were used: T1 (4.00 kg ha⁻¹), T2 (3.00 kg ha⁻¹), T3 (2.00 kg ha⁻¹) and T4 (1.5 kg ha⁻¹) and a control treatment (without application). Production indicators, ear number, fresh and dry weight of almonds, dry weight of 100 almonds and crop yield were determined. In addition, the incidence and severity of the disease at 60, 120 and 180 days after the application of Si and the efficiency of the treatments. The significantly higher results for the variables: Production, ear number, fresh and dry weight of almond and dry weight of 100 almonds, were obtained by applying 4 kg ha⁻¹ of Si, all doses of Si exceeded the control ($P \leq 0.05$) in the variables related to production. In the control



Cita recomendada:

Torres-Rodríguez, J. A., Ramos-Remache, R. A., Reyes-Pérez, J. J., Quinatoa-Lozada, E. F., & Rivas-García, T. (2024). Silicio como Bioestimulante en el Cultivo de Cacao (*Theobroma cacao* L.) y Agente de Control Biológico de *Moniliophthora roreri*. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-11. e1817. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1817>

Recibido: 8 de septiembre de 2023.

Aceptado: 19 de enero de 2024.

Artículo. Volumen 42.

Abril de 2024.

Editor de Sección:

Dra. Rita Schwentesius Rindermann



Copyright: © 2024 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

of the phytopathogen (*M. roreri*), the dose of 4 kg ha⁻¹ Si decreased the incidence and severity of the disease by more than 50%. The application of Si can be an option in cocoa cultivation as a biostimulant and biological control agent for *M. roreri*.

Index words: treatment efficiency, disease incidence, performance, disease severity.

INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un importante cultivo para la industria alimenticia y farmacéutica debido a sus propiedades organolépticas y nutracéuticas (Castillejos-Mijangos, Acosta, Gallardo, Osorio, Jiménez, 2022). En Ecuador el cacao es uno de los principales cultivos de importancia económica, su superficie agrícola en 2019, abarcó 601 954 ha, representando el 4% del uso total de la tierra, lo que convierte al cacao en la mayor área dedicada a un cultivo permanente (Avadí, 2023).

Entre las principales enfermedades que afectan al cultivo cacao se encuentra la moniliasis ocasionada por el fitopatógeno *Moniliophthora roreri* (Espinoza-Lozano *et al.*, 2022; Gómez-de la Cruz *et al.*, 2023). Se ha reportado que *M. roreri* ocasiona daños de hasta 80% en la producción (Sánchez-Mora y Garcés-Fiallos, 2012).

M. roreri ocasiona deformaciones, necrosis y descomposición de los frutos (Pérez-Vicente, 2018). Además, los frutos infectados presentan pigmentación irregular y manchas oscuras (Gómez-de la Cruz *et al.*, 2023). El inóculo de *M. roreri* puede sobrevivir más de siete meses en frutos momificados, los cuales aportan niveles elevados de esporas durante todo el periodo de fructificación (Phillips-Mora, Castillo, Krauss, Rodríguez y Wilkinson, 2005).

El principal método de control de *M. roreri* es mediante productos químicos sintéticos (Gómez-de la Cruz *et al.*, 2023). Sin embargo, estos productos se acumulan en el suelo y modifican su pH, dañan el medio ambiente y ocasionan resistencia en los fitopatógenos (Torres-Rodríguez, Reyes, Quiñones y Hernandez, 2022).

Una alternativa a la aplicación de productos químicos sintéticos son los compuestos a base de silicio (Si), (Verma *et al.*, 2021). El Si es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre (Bist *et al.*, 2020). Aunque no es un elemento esencial para las plantas, presenta efectos favorables en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de diferentes cultivos en condiciones de estrés (Reyes-Pérez, Tipán, Llerena, Hernandez y Rivas, 2023), por lo tanto, se considera como un elemento benéfico (Zhang *et al.*, 2019).

La aplicación de Si mejora las características fisicoquímicas del suelo y la fertilidad al transformar los nutrientes en formas disponibles para las plantas (Greger, Landberg y Vaculík, 2018; Rajput *et al.*, 2021). Además, mediante sus iones aleja a los elementos que generan toxicidad en las plantas y favorece la producción de fitoalexinas (Cázar-Flores *et al.*, 2022). La aplicación de Si refuerza la pared celular de las plantas, actuando como una barrera física que dificulta la penetración e infección de los fitopatógenos (Kang, Dutta y Lee, 2023).

También, se ha demostrado que la aplicación del Si induce respuestas de defensa en las plantas como la producción de enzimas antimicrobianas (polifenol oxidasa, glucanasa, peroxidasa, fenilalanina amonio-liasa), fitoalexinas y proteínas relacionadas con la patogenicidad, regulando positivamente varias vías de señalización de defensa como ácido salicílico (SA), ácido jasmónico (JA) y etileno (ET) (Gulzar, Ali, Shah y Kamili, 2021; Verma *et al.*, 2021).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es determinar el efecto del silicio como bioestimulante en el cultivo de cacao y agente de control biológico de *M. roreri*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del Área Experimental

La investigación se realizó en la Hacienda La Margot, perteneciente al señor German Villena Solano, ubicada en el recinto Matilde Esther, localizada en las coordenadas 2° 6' 31.81" S y 79° 15' 8.04" O, a 14 m de altitud, con topografía irregular, tipo de suelo Franco arcilloso. La zona presenta un clima tropical húmedo con una temperatura media anual de 24.60 °C, y precipitación media anual de 1650.30 mm, humedad relativa de 85.02 por ciento.

Material Genético

El material genético utilizado fue el clon CNN-51 de alta productividad. La CCN-51 tiene excelente índice de mazorcas por kilogramos de cacao seco. Es una planta de crecimiento erecto, pero de baja altura lo que facilita las labores agronómicas tales como poda y cosecha, entre otras (Crespo y Crespo, 1997; Fuentes y Castelblanco, 2011).

Tratamientos y Diseño Experimental

En la investigación se evaluaron los efectos de cuatro dosis de Si utilizando cinco tratamientos. Se aplicó un Diseño de Bloques Completos al Azar con cinco tratamientos y cinco repeticiones. El tratamiento T1: (4.00 kg ha⁻¹), T2: (3.00 kg ha⁻¹), T3 (2.00 kg ha⁻¹), T4 (1.5 kg ha⁻¹) y T5 (tratamiento control-sin aplicación).

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Donde: y_{ij} = son las variables productivas sometidas al i -ésimo tratamiento en el j -ésimo bloque; μ = Valor de la media general; τ_i = el efecto del i -ésimo tratamiento; β_j = es el efecto del j -ésimo bloque; ε_{ij} = es el error experimental.

Método de Aplicación

La aplicación de Si se realizó en el inicio de la floración con más 50% de plantas de cacao con flores. A partir de este momento se aplicó cada 30 días con un total de 6 aplicaciones del producto hasta los 180 días. El método de aplicación fue a través del empleo de una mochila marca CP3 con capacidad de 20 L con movimientos verticales de la varilla y bordeando en círculo la copa de las plantas para garantizar una distribución uniforme en el área foliar. La distancia desde la varilla de la mochila y la copa de las plantas fue de aproximadamente de un metro.

Variables Evaluadas

Indicadores de producción y rendimiento. El número de mazorca (NM) se determinó en 25 plantas por conteo durante el período de evaluación, donde cada planta se consideró como una unidad experimental. Para la determinación del peso fresco de almendras (PFA) (gr), de las mazorcas cosechadas (25 plantas) en cada unidad experimental, se seleccionaron de forma aleatoria 25 mazorcas y se extrajeron todas las almendras para posteriormente pesarse en una balanza digital (Santorius de 2 kg \pm 1 g). Para el peso seco de las almendras, éstas se secaron en una estufa (memmert, 60 °C, 72 h), posteriormente se pesaron hasta alcanzar un peso constante, indicativo de la completa eliminación de la humedad presente en las muestras. El rendimiento se estimó en toneladas de cacao en grano seco, se calculó como el 40% del peso fresco del cacao, multiplicando el peso fresco del cacao por planta por 0.40 (factor de conversión para obtener el peso seco).

Incidencia de la enfermedad (IE) por *M. royeri* en el cultivo de cacao. Para determinar la incidencia de la enfermedad se contabilizó el número de mazorcas enfermas y el número de mazorcas sanas, con los datos obtenidos se procedió a calcular el porcentaje de incidencia de *M. royeri*. La evaluación de incidencia de la enfermedad se realizó a los 60, 120 y 180 días (Sánchez-Mora y Garcés-Fiallos, 2012).

$$IE = \frac{Me}{(Me + Ms)} \times 100 \quad (2)$$

En el que IE = Incidencia de la enfermedad (%); Me = Mazorcas enfermas y Ms = Mazorcas sanas.

Severidad externa (SE) de *M. royeri* en mazorcas de cacao. Para la evaluación de severidad externa de la enfermedad en las mazorcas en cada árbol, se tuvo en cuenta el grado de infección de la mazorca y se utilizó la escala arbitraria de 1 a 5 (Villamil-Carvajal, Viteri y Villegas, 2015). La evaluación de la severidad de la enfermedad se realizó a los 60, 120 y 180 días (Cuadro 1).

Para la obtención de los datos la severidad externa de la infección se utilizó la siguiente fórmula:

$$SE = (n1 \cdot E1) + (n2 \cdot E2) + (n3 \cdot E3) + (nX \cdot Ex) / N \quad (3)$$

En el que n = número de mazorcas, E = valor de la escala SE (0-5), y N = número total de mazorcas evaluadas.

Eficiencia del tratamiento. Se determinó la eficiencia de la aplicación de Si hacia *M. royeri* en el cultivo de cacao mediante la siguiente fórmula propuesta por Abbott (1925).

$$E = ((FIWoS - FIWS) / FIWoS) \times 100 \quad (4)$$

Donde: E = Eficiencia (%); FIWoS = Porcentaje de incidencia final sin aplicación de Si; FIWS = Porcentaje de incidencia final con aplicación de Si.

Cuadro 1. Escala de evaluación de severidad de la infección de *M. royeri*.
Table 1. Scale for evaluating the severity of *M. royeri* infection.

Grado	Descripción
0	Ningún síntoma aparente
1	Pequeños y pocos puntos aceitosos
2	Puntos aceitosos bien definidos y abundantes, más deformación o madurez irregular
3	Necrosis sin esporulación
4	Necrosis más esporulación en un área menor de la cuarta parte de la superficie necrótica
5	Necrosis más esporulación en un área mayor de la cuarta parte de la superficie necrótica, esto en relación con el porcentaje de tejido de la mazorca afectado externamente

Análisis Estadístico

Se determinó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de las varianzas mediante la prueba de Bartlett. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza unidireccional (ANOVA) utilizando el software STATISTICA 10.0 (StatSoft, 2011) y se utilizó la prueba de comparación múltiple de media de Fisher ($P < 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto Bioestimulante del Si en el Cacao

Los máximos resultados en los indicadores número de mazorca (NM) (24.17), peso fresco de almendra (PFA) (1846.17 g), peso seco de almendra (PSA) (846.17 g) y el peso de 100 almendra (PS 100) se obtuvieron mediante la aplicación de 4.00 kg ha⁻¹ de Si diferenciándose significativamente ($P \leq 0.05$) con el resto de los tratamientos. Los menores resultados en las variables evaluadas se obtuvieron con la menor dosis de Si (1.50 kg ha⁻¹). Los tres tratamientos restantes (3, 2 y 1.50 kg ha⁻¹ Si) fueron superiores al tratamiento control en las variables NM, PFA, PSA y PS 100. Los resultados obtenidos demuestran una correlación positiva entre la aplicación de Si y el incremento de las variables evaluadas (Cuadro 2).

Los efectos beneficiosos del Si están relacionados con efectos indirectos. El Si mejora los componentes de producción de los cultivos al aumentar la actividad fotosintética y activar los mecanismos naturales de defensa de las plantas contra la infección de fitopatógenos (Muneer, Park, Kim y Jeong, 2017).

Cuadro 2. Efecto del Si en indicadores de producción del cultivo del cacao.
Table 2. Effect of Si on production indicators of cocoa cultivation.

Tratamientos	NM	PFA	PSA	PS 100
kg ha ⁻¹	----- g -----			
T1 (4.00)	24.17±2.48 a	1846.17±1.19 a	846.17±1.19 a	192.17±1.72 a
T2 (3.00)	18.83±2.32 b	1795.83±2.08 b	795.83±1.08 b	180.83±1.47 b
T3 (2.00)	18.17±0.75 bc	1767.67±1.98 b	767.67±1.98 c	179.67±1.03 b
T4 (1.50)	16.33±1.63 c	1726.33±1.88 d	726.33±1.88 d	172.17±1.17 c
T5 (Control)	13.33±1.97 d	1634.17±2.43 e	610.83±1.77 e	163.33±1.21 d

NH = número mazorca; PFA = peso fresco de almendra; PSA = peso seco de almendra; PS 100 = peso seco de 100 almendra. Medias con letras iguales en las columnas no difieren significativamente según Fisher ($P \leq 0.05$), ± Desviación estándar.

NH = healthy ear number; PFA = almond fresh weight; PSA = almond dry weight; PS 100 = dry weight of 100 almonds. Means with the same letters in the columns do not differ significantly according to Fisher ($P \leq 0.05$). ± Standard deviation.

El Si puede afectar positivamente la translocación de nutrientes en las plantas activando las H⁺-ATPasas en la membrana, ayuda en la división celular, una mayor absorción de nutrientes y agua, incrementando los indicadores de producción (Buchelt *et al.*, 2020). También, se ha demostrado que incrementa la estructura del cloroplasto y el contenido de clorofila y, por tanto, mejora la actividad fotosintética de las plantas (Pavlovic, Kostic, Bosnic, Kirkby y Nikolic, 2021).

El Si puede mejorar la división celular, absorción de nutrientes y la eficiencia en el uso del agua (Zhu y Gong, 2014). También, mejora del estado hídrico de la planta, debido a la formación de una doble capa de cutícula de sílice bajo la epidermis de la hoja, lo que reduce las pérdidas de agua a través de la transpiración cuticular (Gong, Chen, Chen, Wang y Zhang, 2003). Un estado hídrico mejorado asegura un suministro constante de agua durante etapas cruciales del desarrollo, como la floración y el cuajado de frutas, favoreciendo la formación de un mayor número de mazorcas. Además, su influencia positiva en la actividad fotosintética y la translocación de metabolitos puede tener efectos directos en el aumento de las variables de producción, como el número y tamaño de los frutos (Lalithya, Bhagya y Choudhary, 2014).

El aumento en el número y peso de los frutos podría atribuirse al efecto beneficioso del Si en la planta, como la mejora de la arquitectura al mostrar hojas más erectas, que interceptan mayor luminosidad solar aumentando la eficiencia de la fotosíntesis y mayor contenido de clorofila (Vijayan, Sriramachandrasekharan, Manivannan y Shakila, 2021).

Actualmente, hay información limitada sobre la aplicación de Si como bioestimulante en los cultivos de árboles frutales. En el cultivo de zapote (*Manilkara zapota* L.), se observó que la aplicación de Si ayudó a mejorar las características de los frutos como el peso del fruto (Lalithya *et al.*, 2014), resultados similares a los reportados en este trabajo, pero con el peso de las almendras. La aplicación de Si en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) aumentó el número y porcentaje de frutos maduros (Parecido, Soratto, Perdoná y Gitari, 2022). También, en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) el Si aumentó los componentes de producción como el número de frutos, longitud del fruto y rendimiento en comparación con el tratamiento control, resultados en correspondencia a los reportados en este trabajo (Reyes-Pérez *et al.*, 2023).

Efecto del Si en el Rendimiento del Cultivo del Cacao

El rendimiento del cultivo de cacao se vio directamente afectado por la aplicación de diferentes dosis de silicio (Si). Los tratamientos experimentales exhibieron rendimientos que oscilaron entre 1 y 2.23 Mg ha⁻¹. Se destacó un rendimiento máximo ($P \leq 0.05$) en los frutos de cacao cuando se aplicaron 4.00 kg ha⁻¹ de Si, alcanzando un valor de 2.23 Mg ha⁻¹, evidenciando diferencias significativas ($P \leq 0.05$) con respecto a los demás tratamientos. Aunque los tratamientos 3.00 y 2.00 kg ha⁻¹ no presentaron diferencias significativas entre sí ($P \geq 0.05$), sí exhibieron diferencias respecto al tratamiento control. Estos resultados refuerzan la influencia positiva de la aplicación de silicio en el aumento de los rendimientos de frutos, con implicaciones importantes para la optimización de la producción de cacao (Figura 1).

El incremento de los rendimientos agrícolas alcanzados en esta investigación mediante la aplicación de dosis crecientes de Si puede estar relacionado a su relación con la regulación del metabolismo, actividad fisiológica, bioquímica y antioxidante en las plantas (Liang *et al.*, 2015). El mayor rendimiento de frutos también podría deberse a una mejor disponibilidad de nutrientes en el suelo para una mayor absorción, al aumento de la capacidad fotosintética y la disminución de la tasa de transpiración (Greger *et al.*, 2018; Cázarez-Flores *et al.*, 2022). La aplicación de Si es beneficiosa para el rendimiento y la calidad de la fruta, porque previene el estrés oxidativo y el pardeamiento fenólico de la fruta (Yamaji, Chiba, Mitani y Feng, 2012). Además, el Si aumenta la disponibilidad de Ca y Mg intercambiables y P, nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas (Korndörfer, Pereira y Camargo, 2002). Fiori (2006¹) informó que el aumento en el rendimiento de frutos se debe al aumento en el número y tamaño de los frutos, lo que se atribuye al aumento en la disponibilidad de Si en el suelo.

Se ha demostrado que el Si aumenta el rendimiento del banano, mediante un análisis de regresión se demostró que el incremento del rendimiento se debió al silicio disponible, al contenido de silicio y a la absorción (Vijayan *et al.*, 2021). También, Lalithya *et al.* (2014) reportaron el mayor rendimiento de frutos de zapote con aspersión foliar de Si respecto al tratamiento control. La aplicación de ácido silícico incremento el rendimiento en el cultivo de mango (*Mangifera indica* L.) (More, Gokhale, Shinde y Korake, 2015), estos resultados son similares a los obtenidos en este trabajo, donde la aplicación de Si logró incrementar el rendimiento en el cultivo de cacao.

¹ Fiori, M. P. (2006). *Comportamento de cultivares de tomateiro quanto à utilização de escórias siderúrgicas em ambiente protegido*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Agronomía. Universidad de Marília. Disponible en: <https://portal.unimar.br/site/public/pdf/dissertacoes/b1a76c85ab7ca9eb1d30fe7c16b20702.pdf>

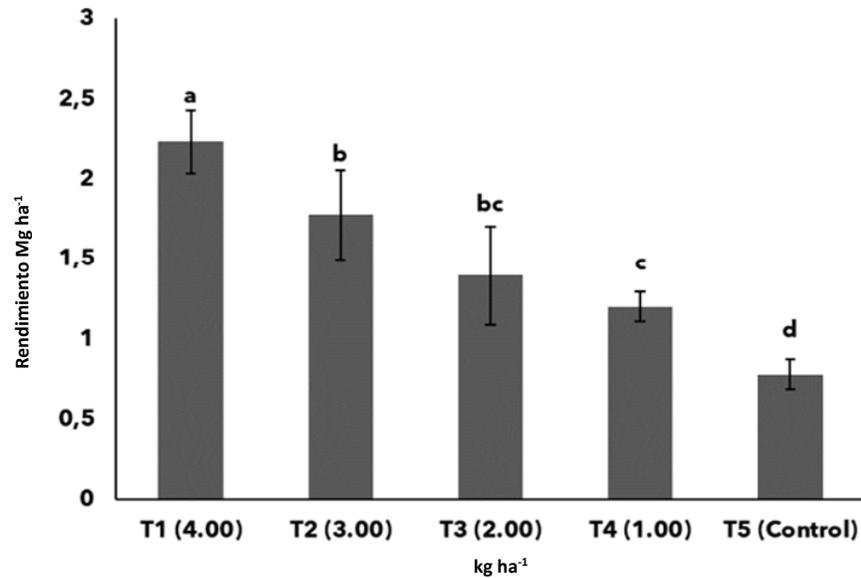


Figura 1. Dosis crecientes de Si en el rendimiento de cacao. Medias con letras iguales en las columnas no difieren significativamente según Fisher ($P \leq 0.05$). \pm Desviación estándar. T1 = 4.00 kg ha⁻¹; T2 = 3.00 kg ha⁻¹; T3 = 2.00 kg ha⁻¹; T4 = 1.50 kg ha⁻¹; T5 = control (sin aplicación).

Figure 1. Increasing doses of Si on cocoa yield. Means with the same letters in the columns do not differ significantly according to Fisher ($P \leq 0.05$). \pm Standard deviation. T1 = 4.00 kg ha⁻¹; T2 = 3.00 kg ha⁻¹; T3 = 2.00 kg ha⁻¹; T4 = 1.50 kg ha⁻¹; T5 = control (without application).

En maíz (*Zea mays* L.) se incrementó el rendimiento del cultivo con la aplicación de Si, resultados en correspondencia con los obtenidos en este trabajo, donde la aplicación de Si incrementó el rendimiento respecto al tratamiento control (Antúnez-Ocampo, Sabino, Hernández y Espinosa, 2023). Jarosz (2014) obtuvo un aumento significativo en el rendimiento del cultivo de tomate fertilizado con una solución nutritiva enriquecida con Si respecto al tratamiento control, resultados en correspondencia a los obtenidos en este experimento donde la aplicación de Si incrementó los rendimientos respecto al tratamiento sin aplicación (control).

Incidencia de *M. royeri* en el Cultivo de Cacao con Aplicación de Si

El tratamiento control (sin aplicación de Si) presentó el mayor porcentaje de incidencia de la enfermedad (IE) a los 60, 120 y 180 días. Los menores resultados de la IE se obtuvieron con el tratamiento 4.00 kg ha⁻¹, obteniéndose a los 60, 120 y 180 días valores de 34.51, 24.22 y 12.13% respectivamente, mostrando diferencias significativas ($P \leq 0.05$) con el resto de los tratamientos de Si. El tratamiento 1.50 kg ha⁻¹ de Si presentó la mayor IE a los 60, 120 y 180 días, sin embargo, mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$) con el tratamiento control (Figura 2).

En la actualidad se han realizado estudios del empleo del Si en la agricultura, debido a los beneficios que ha mostrado en la inducción de respuesta de defensa de las plantas como la producción de enzimas antimicrobianas y proteínas relacionadas con la patogenicidad, haciendo más resistente a las plantas al ataque de los fitopatógenos y reduciendo la incidencia de las enfermedades (Kang *et al.*, 2023; Riseh, Vatankhah, Hassanisaadi y Kennedy, 2023). La acumulación de Si en la pared celular de la planta huésped forma una doble capa de sílice que dificulta la penetración de fitopatógenos, reduciendo así la incidencia de enfermedades (Rajput *et al.*, 2021). Se ha señalado que el Si incrementa el crecimiento, desarrollo y respuesta positiva de las plantas a diferentes tipos de estrés (Zhang *et al.*, 2019).

También, el Si mejora la rigidez de las paredes celulares, aumenta la capa de corteza, impidiendo la propagación de estructuras fitopatógenas, mejorando así la capacidad de defensa contra insectos, hongos, podredumbres y enfermedades bacterianas (Bakhat *et al.*, 2018; Albalawi *et al.*, 2022).

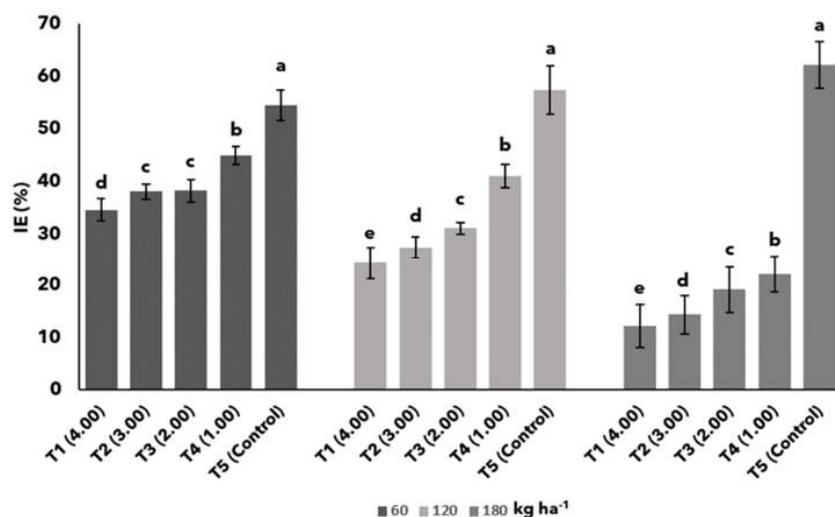


Figura 2. Incidencia de la enfermedad a los 60, 120 y 180 días con aplicación de Si. Medias con letras iguales en las columnas no difieren significativamente según Fisher ($P \leq 0.05$). \pm Desviación estándar. T1 = 4.00 kg ha⁻¹; T2 = 3.00 kg ha⁻¹; T3 = 2.00 kg ha⁻¹; T4 = 1.50 kg ha⁻¹; T5 = Control (sin aplicación).

Figure 2. Incidence of the disease at 60, 120 and 180 days with Si application. Means with the same letters in the columns do not differ significantly according to Fisher ($P \leq 0.05$). \pm Standard deviation. T1 = 4.00 kg ha⁻¹; T2 = 3.00 kg ha⁻¹; T3 = 2.00 kg ha⁻¹; T4 = 1.50 kg ha⁻¹; T5 = control (without application).

Estudios realizados han confirmado el potencial de la aplicación de Si para aumentar la resistencia a los fitopatógenos. Según Bekker, Labuschagne, Aveling y Kaiser (2007) la aplicación de Si soluble (silicato de potasio) aplicado al suelo, inhibió el 100% del crecimiento del fitopatógeno *Phytophthora cinnamomi* en aguacate (*Persea americana* M.), además, las plantas tratadas con Si tuvieron raíces y copas más vigorosas. Los resultados de estudios previos, como los realizados en plántulas de cacao inoculadas con *Monilophthora pernicioso*, respaldan la eficacia de la aplicación de Si al aumentar las actividades de enzimas de defensas (peroxidasa, quitinasa y polifenoloxidasas) en las plantas, contribuyendo a la reducción de la enfermedad ocasionada por *M. pernicioso* (Fantinato et al., 2018), resultados en correspondencia a los obtenidos en este trabajo, donde la aplicación de Si redujo la incidencia de la enfermedad.

La aplicación de Si presentó efecto de biocontrol hacia *Burkholderia glumae*, reduciendo la incidencia de la enfermedad y promoviendo el crecimiento de las plantas (Kang et al., 2023). También se observó que la aplicación de Si redujo la infección de *Magnaporthe oryzae* en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.) (Brunings et al., 2009). En el cultivo de café la aplicación de Si disminuyó el número de lesiones ocasionada por la roya en un 66% con la dosis más alta de silicio en comparación con el número de lesiones en las plantas de control (Martinati, Harakava, Guzzo y Tsai, 2008).

Además, se ha reportado que la utilización de compuestos de origen mineral y orgánico en el control de fitopatógenos tiene varios beneficios, como: baja toxicidad, bajo costo y no contaminan el medio ambiente (Ochoa-Fonseca, Ramírez, López, Moreno y Espinosa, 2015).

Severidad de Moniliasis en las Mazorcas de Cacao con Aplicación de Si

Los menores resultados en la severidad de moniliasis (SE) se obtuvieron con el tratamiento T1 (4.00 kg ha⁻¹). A los 60 días el tratamiento 4.00 kg ha⁻¹ no mostró diferencias significativas ($P \geq 0.05$) con el tratamiento T2 (3.00 kg ha⁻¹) y si con el resto de los tratamientos ($P \leq 0.05$). A los 120 días el tratamiento 4.00 kg ha⁻¹ presentó una SE de 1.75 presentando el menor daño ocasionado por *M. roreri*, mostrando diferencias significativas ($P \leq 0.05$) con el resto de los tratamientos. A los 180 días el tratamiento 4.00 kg ha⁻¹ no presentó diferencias significativas ($P \geq 0.05$) con el tratamiento 3.00 kg ha⁻¹ y si con el resto de los tratamientos. Los valores de SE más alto a los 60, 120 y 180 días con la aplicación de Si se obtuvieron con el tratamiento 1.50 kg ha⁻¹ (Cuadro 3).

Cuadro 3. Severidad de *M. royeri* en las mazorcas de cacao 60, 120 y 180 días (DD) con la aplicación de Si.
Table 3. *M. royeri* severity in cocoa pods at 60, 120 and 180 days (DD) with the application of Si.

Tratamientos	Severidad externa		
	60 DD	120 DD	180 DD
kg ha ⁻¹			
T1 (4.00)	1.50±1.08 c	1.75±0.35 c	2.00±0.59 d
T2 (3.00)	1.75±1.23 c	2.50±1.17 b	2.50±0.11 cd
T3 (2.00)	2.50±0.18 b	2.75±0.82 b	3.00±1.23 bc
T4 (1.50)	2.75±1.46 b	3.00b ±1.18 b	3.50±0.37 b
T5 (Control)	3.55±0.12 a	3.75±1.30 a	4.50±1.15 a

Medias con letras iguales en las columnas no difieren significativamente según Fisher ($P \leq 0.05$). ± Desviación estándar.
Means with the same letters in the columns do not differ significantly according to Fisher ($P \leq 0.05$). ± Standard deviation.

La mayor parte de los suelos contiene menos de la mitad del Si requerido (Tubaña y Heckman, 2015). Las plantas que crecen con carencia de Si son más susceptibles a plagas, estrés, toxicidad por metales pesados y tienen un desarrollo débil (Raya-Pérez y Aguirre, 2012). El Si participa en el sistema de interacción entre plantas y fitopatógenos, al activar respuestas de defensa del huésped, como la producción de enzimas antimicrobianas, fenólicos, flavonoides, fitoalexinas y proteínas relacionadas con la patogenicidad (Gulzar *et al.*, 2021; Rajput *et al.*, 2021).

El Si refuerza la pared celular de las plantas reduciendo la penetración e infección de los fitopatógenos (Pozza, Pozza y Botelho, 2015). La aplicación foliar de Si aumentó la prevención del mildiú polvoroso (*Podosphaera fuliginea*) en *Vitis vinifera*, *Cucumis sativus* y *Cucumis melo* (Gatarayih, Laing y Miller, 2010; Sakr, 2016). La aplicación de Si en *A. thaliana* aumentó la síntesis de callosa, mejorando la resistencia a los fitopatógenos (Brugiére y Exley, 2017). La aplicación de Si en el cultivo de arroz, redujo la severidad de la mancha marrón, causada por *Bipolaris oryzae* y la decoloración del grano (Prabhu *et al.*, 2012), resultados en correspondencia a los reportados en este trabajo.

También, autores como Resende, Rodrigues, Gomes y Nascimento (2013) demostraron que la aplicación de Si en sorgo redujo la severidad de antracnosis (*Colletotrichum sublineolum*) alrededor del 20%, resultados en correspondencia a los obtenidos en este trabajo.

Respecto a la eficiencia de diferentes tratamientos de Si para el control de *M. royeri*, los resultados obtenidos revelaron diferencias en la efectividad de cada tratamiento. Se observó que el tratamiento T1, con una concentración de 4.00 kg ha⁻¹ de Si, alcanzó una eficiencia significativamente superior de 80.47% en comparación con los demás tratamientos. Le siguió la dosis de 3.00 kg ha⁻¹ con 76.97%, 2 kg ha⁻¹ con 69.26% y 1 kg ha⁻¹ presentó la eficiencia más baja con 64.48%. Estas cifras ofrecen una clara indicación de que la dosis de 4.00 kg ha⁻¹ exhibió la mayor eficacia en el control de *M. royeri*, subrayando la importancia de la concentración de Si como un factor determinante en la gestión de esta enfermedad en los cultivos (Figura 3).

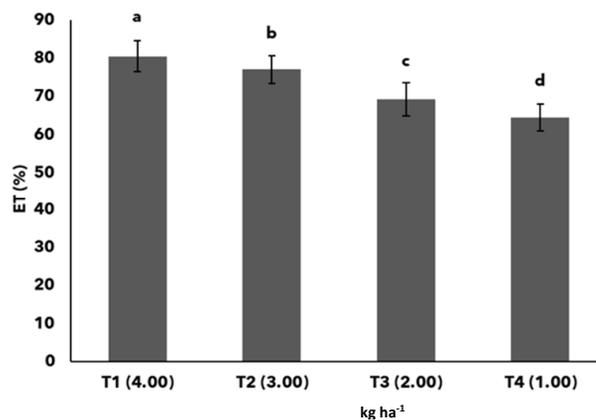


Figura 3. Eficiencia de los tratamientos de Si como agente de control biológico de *M. royeri*. Medias con letras iguales en las columnas no difieren significativamente según Fisher ($P \leq 0.05$). ± Desviación estándar. T1 = 4.00 kg ha⁻¹; T2 = 3.00 kg ha⁻¹; T3 = 2.00 kg ha⁻¹; T4 = 1.50 kg ha⁻¹.

Figure 3. Efficiency of Si treatments as a biological control agent for *M. royeri*. Means with the same letters in the columns do not differ significantly according to Fisher ($P \leq 0.05$). ± Standard deviation. T1 = 4.00 kg ha⁻¹; T2 = 3.00 kg ha⁻¹; T3 = 2.00 kg ha⁻¹; T4 = 1.50 kg ha⁻¹.

Aunque varias plantas no requieren Si, el Si se absorbe como ácido monosilícico soluble, lo que da como resultado el fortalecimiento de la pared celular, aumentando la resistencia a estreses abióticos y bióticos en muchos cultivos (Bist *et al.*, 2020; Vishwakarma *et al.*, 2020; Raturi *et al.*, 2021).

El Si presente en los tejidos de la planta atrae a los depredadores y parasitoides naturales durante la infestación de plagas para impulsar el biocontrol (Verma *et al.*, 2021). El Si puede ayudar a las plantas a resistir la invasión de fitopatógenos a través de defensas estructurales (Rodrigues y Datnoff, 2015). Además, induce respuestas de defensa en las plantas, como la producción de compuestos antimicrobianos (Chen *et al.*, 2015; Vivancos, Labbé, Menzies y Bélanger, 2015; Gulzar *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

En este estudio sobre el cultivo de cacao, se evaluó el impacto de la aplicación de silicio (Si) en diversos indicadores de producción y en la incidencia y la severidad de la moniliasis ocasionada por el fitopatógeno *M. royeri*. Los resultados indican que la aplicación de Si, especialmente a una dosis de 4.00 kg ha⁻¹, mejoró significativamente el número de mazorca, los rendimientos de frutos y la eficiencia en el control biológico de la moniliasis causada por *M. royeri*. Además, todos los tratamientos de Si fueron superiores al tratamiento control (sin aplicación de Si), respecto al incremento del rendimiento y en la reducción de la incidencia y la severidad de *M. royeri*. La investigación respalda la conexión positiva entre el Si y la productividad del cacao, subrayando su papel en fortalecer las defensas de las plantas. La aplicación de Si en el cultivo de cacao puede ser una opción como bioestimulante y agente de control biológico de *Moniliophthora royeri*.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Investigación, conceptualización, validación, administración del proyecto, adquisición de fondo: J.J.R.P. Escritura: revisión y edición: J.A.T.R. y T.R.G. Investigación, metodología: J.J.R.P. y R.A.R.R. Escritura: preparación del borrador original, escritura: revisión y edición: J.A.T.R. y T.R.G. Curación de datos, análisis de datos: J.J.R.P. y E.F.Q.L. Escritura, revisión, análisis formal: J.J.R.P., R.A.R.R. y E.F.Q.L.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, por el apoyo otorgado a través del Fondo Competitivo de Investigación Científica y Tecnológica (FOCICYT) 7ma Convocatoria, a través del proyecto PFOC7-15-2020 "Metodología para la propagación de esquejes de cacao mediante el uso de bioestimulantes de amplio espectro de acción".

LITERATURA CITADA

- Abbott, W. S. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18(2), 265-267.
- Albalawi, M. A., Abdelaziz, A. M., Attia, M. S., Saied, E., Elganzory, H. H., & Hashem, A. H. (2022). Mycosynthesis of silica nanoparticles using *Aspergillus niger*: Control of *Alternaria solani* causing early blight disease, induction of innate immunity and reducing of oxidative stress in eggplant. *Antioxidants*, 11(12), 2323. <https://doi.org/10.3390/antiox11122323>
- Antúnez-Ocampo, O. M., Sabino-López, J. E., Hernández-Galeno, C. A., & Espinosa-Rodríguez, M. (2023). Rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) en respuesta a la fertilización con nitrógeno, fósforo y silicio al suelo. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1682>
- Avadi, A. (2023). Environmental assessment of the Ecuadorian cocoa value chain with statistics-based LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(11), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02142-4>
- Bakhat, H. F., Bibi, N., Zia, Z., Abbas, S., Hammad, H. M., Fahad, S., ... & Saeed, S. (2018). Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. *Crop Protection*, 104, 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.008>
- Bekker, T. F., Labuschagne, N., Aveling, T., & Kaiser, C. (2007). Efficacy of water soluble potassium silicate against *Phytophthora* root rot of avocado under field conditions. *South African Avocado Growers' Association*, 30, 39-48.
- Bist, V., Niranjana, A., Ranjan, M., Lehri, A., Seem, K., & Srivastava, S. (2020). Silicon-solubilizing media and its implication for characterization of bacteria to mitigate biotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1-19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00028>
- Brugière, T., & Exley, C. (2017). Callose-associated silica deposition in *Arabidopsis*. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 39, 86-90. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.08.005>
- Brunings, A. M., Datnoff, L. E., Ma, J. F., Mitani, N., Nagamura, Y., Rathinasabapathi, B., & Kirst, M. (2009). Differential gene expression of rice in response to silicon and rice blast fungus *Magnaporthe oryzae*. *Annals of Applied Biology*, 155(2), 161-170. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00347.x>
- Buchelt, A. C., Teixeira, G. C. M., Oliveira, K. S., Rocha, A. M. S., de Mello Prado, R., & Caione, G. (2020). Silicon contribution via nutrient solution in forage plants to mitigate nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and sulfur deficiency. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1532-1548. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00245-7>
- Castillejos-Mijangos, L. A., Acosta-Caudillo, A., Gallardo-Velázquez, T., Osorio-Revilla, G., & Jiménez-Martínez, C. (2022). Uses of ft-mir spectroscopy and multivariate analysis in quality control of coffee, cocoa, and commercially important spices. *Foods*, 11(4), 579. <https://doi.org/10.3390/foods11040579>
- Cázarez-Flores, L. L., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T. D. J., Ayala-Tafuya, F., Díaz-Valdés, T., Yáñez-Juárez, M. G., & López-Orona, C. A. (2022). Silicio y cloro en el crecimiento, rendimiento y calidad postcosecha de pepino y tomate. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.994>
- Chen, Y., Liu, M., Wang, L., Lin, W., Fan, X., & Cai, K. (2015). Proteomic characterization of silicon-mediated resistance against *Ralstonia solanacearum* in tomato. *Plant and Soil*, 387, 425-440. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2293-4>
- Crespo-Del Campo, E., & Crespo-Andia, F. (1997). Cultivo y beneficio del cacao CCN51. Guayaquil, Paraguay: Editorial El Conejo. ISBN: 9978871756
- Espinoza-Lozano, F., Amaya-Márquez, D., Pinto, C. M., Villavicencio-Vásquez, M., Sosa del Castillo, D., & Pérez-Martínez, S. (2022). Multiple introductions of *Moniliophthora roreri* from the Amazon to the pacific region in Ecuador and shared high azoxystrobin sensitivity. *Agronomy*, 12(5), 1119. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051119>
- Fantinato, D. E., Zanetti, L. V., Aguilar, M. A. G., Souza, C. A. S., Cuzzuol, G. R. F., Gama, V. N., & Milanez, C. R. (2018). Effects of silicon on biochemical and physiological aspects in *Theobroma cacao* under inoculation with *Moniliophthora perniciosa*. *Revista de Ciências Agrárias*, 41(3), 841-848. <https://doi.org/10.19084/RCA18064>
- Fuentes, L. F. Q., & Castelblanco, S. G. (2011). Perfil del sabor del clon CCN51 del cacao (*Theobroma cacao* L.) producido en tres fincas del municipio de San Vicente de Chucurí. *Publicaciones e Investigación*, 5, 45-58. <https://doi.org/10.22490/25394088.594>
- Gatarayih, M. C., Laing, M. D., & Miller, R. M. (2010). Combining applications of potassium silicate and *Beauveria bassiana* to four crops to control two spotted spider mite, *Tetranychus urticae* Koch. *International Journal of Pest Management*, 56(4), 291-297. <https://doi.org/10.1080/09670874.2010.495794>
- Gómez-de la Cruz, I., Chávez-Ramírez, B., Avendaño-Arrazate, C. H., Morales-García, Y. E., Muñoz-Rojas, J., & Estrada-de los Santos, P. (2023). Optimization of *Paenibacillus* sp. NMA1017 Application as a biocontrol agent for *Phytophthora tropicalis* and *Moniliophthora roreri* in cacao-growing fields in Chiapas, Mexico. *Plants*, 12(12), 2336. <https://doi.org/10.3390/plants12122336>
- Gong, H. J., Chen, K. M., Chen, G. C., Wang, S. M., & Zhang, C. L. (2003). Effects of silicon on growth of wheat under drought. *Journal of Plant Nutrition*, 26(5), 1055-1063. <https://doi.org/10.1081/PLN-120020075>
- Greger, M., Landberg, T., & Vaculík, M. (2018). Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. *Plants*, 7(2), 41. <https://doi.org/10.3390/plants7020041>
- Gulzar, N., Ali, S., Shah, M. A., & Kamili, A. N. (2021). Silicon supplementation improves early blight resistance in *Lycopersicon esculentum* Mill. by modulating the expression of defense-related genes and antioxidant enzymes. *3 Biotech*, 11, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02789-6>
- Jarosz, Z. (2014). The effect of silicon application and type of medium on yielding and chemical composition of tomato. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 13(4), 171-183.
- Kang, J. A., Dutta, S., & Lee, Y. H. (2023). Biocontrol of bacterial seedling rot of rice plants using combination of *Cytobacillus firmus* JBR519 and silicon. *PLoS One*, 18(8), e0290049. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290049>
- Korndörfer, G. H., Pereira, H. S., & Camargo, M. S. (2002). *Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura*. Uberlândia, Minas Gerais: Brasil: GPSi-ICIAG-UFU.
- Lalithya, K. A., Bhagya, H. P., & Choudhary, R. (2014). Response of silicon and micro nutrients on fruit character and nutrient content in leaf of sapota. *Biolife*, 2(2), 593-598.
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., Song, A., Liang, Y., ... & Song, A. (2015). Effect of silicon on crop growth, yield and quality. In Y. Liang, M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong, & A. Song (Eds). *Silicon in Agriculture: From Theory to Practice* (pp. 209-223). Dordrecht, The Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2_11

- Martinati, J. C., Harakava, R., Guzzo, S. D., & Tsai, S. M. (2008). The potential use of a silicon source as a component of an ecological management of coffee plants. *Journal of Phytopathology*, 156(7-8), 458-463. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2007.01392.x>
- More, S. S., Gokhale, N. B., Shinde, S. E., & Korake, G. N. (2015). Effect of different sources of silica on nutrient content of leaves and fruit at different stages of Alphonso mango (*Mangifera indica* L.) in lateritic soil. *Journal of Progressive Agriculture*, 6(2), 84-88.
- Muneer, S., Park, Y. G., Kim, S., & Jeong, B. R. (2017). Foliar or subirrigation silicon supply mitigates high temperature stress in strawberry by maintaining photosynthetic and stress-responsive proteins. *Journal of Plant Growth Regulation*, 36, 836-845. <https://doi.org/10.1007/s00344-017-9687-5>
- Ochoa-Fonseca, L. E., Ramírez-González, S. I., López-Báez, O., Moreno-Martínez, J. L., & Espinosa-Zaragoza, S. (2015). Efecto de preparados minerales sobre el crecimiento y desarrollo in vitro de *Moniliophthora roreri* (Cif. & Par.) Evans. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 1065-1075.
- Parecido, R. J., Soratto, R. P., Perdoná, M. J., & Gitari, H. I. (2022). Foliar-applied silicon may enhance fruit ripening and increase yield and nitrogen use efficiency of Arabica coffee. *European Journal of Agronomy*, 140, 126602. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126602>
- Pavlovic, J., Kostic, L., Bosnic, P., Kirkby, E. A., & Nikolic, M. (2021). Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 697592. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>
- Pérez-Vicente, L. (2018). *Moniliophthora roreri* HC Evans et al. y *Moniliophthora perniciosa* (Stahel) Aime: impacto, síntomas, diagnóstico, epidemiología y manejo. *Revista de Protección Vegetal*, 33(1), 00-00.
- Phillips-Mora, W., Castillo, J., Krauss, U., Rodríguez, E., & Wilkinson, M. J. (2005). Evaluation of cacao (*Theobroma cacao*) clones against seven Colombian isolates of *Moniliophthora roreri* from four pathogen genetic groups. *Plant Pathology*, 54(4), 483-490. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01210>
- Pozza, E. A., Pozza, A. A. A., & Botelho, D. M. D. S. (2015). Silicon in plant disease control. *Revista Ceres*, 62, 323-331. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562030013>
- Prabhu, A. S., Barbosa-Filho, M. P., Datnoff, L. E., Snyder, G. H., Berni, R. F., Rodrigues, F. A., & Dallagnol, L. J. (2012). Silicon reduces brown spot severity and grain discoloration on several rice genotypes. *Tropical Plant Pathology*, 37, 409-414. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762012000600005>
- Rajput, V. D., Minkina, T., Feizi, M., Kumari, A., Khan, M., Mandzhieva, S., ... & Choudhary, R. (2021). Effects of silicon and silicon-based nanoparticles on rhizosphere microbiome, plant stress and growth. *Biology*, 10(8), 791. <https://doi.org/10.3390/biology10080791>
- Raturi, G., Sharma, Y., Rana, V., Thakral, V., Myaka, B., Salvi, P., ... & Deshmukh, R. (2021). Exploration of silicate solubilizing bacteria for sustainable agriculture and silicon biogeochemical cycle. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 827-838. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.039>
- Raya-Pérez, J. C., & Aguirre Mancilla, C. L. (2012). El papel del silicio en los organismos y ecosistemas. *Conciencia Tecnológica*, 43, 42-46.
- Resende, R. S., Rodrigues, F. A., Gomes, R. J., & Nascimento, K. J. T. (2013). Microscopic and biochemical aspects of sorghum resistance to anthracnose mediated by silicon. *Annals of Applied Biology*, 163(1), 114-123.
- Reyes-Pérez, J. J., Tipán-Torres, H. C., Llerena-Ramos, L. T., Hernandez-Montiel, L. G., & Rivas-García, T. (2023). Silicon increased the growth, productivity, and nutraceutical quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 51(2), 13155-13155. <https://doi.org/10.15835/nbha51213155>
- Riseh, R. S., Vatankhah, M., Hassanisaadi, M., & Kennedy, J. F. (2023). Chitosan/silica: A hybrid formulation to mitigate phytopathogens. *International Journal of Biological Macromolecules*, 239, 124192. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124192>
- Rodrigues, F. A., & Datnoff, L. E. (2015). *Silicon and plant diseases* (No. 11751). Cham, Switzerland: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0>
- Sakr, N. (2016). The role of silicon (Si) in increasing plant resistance against fungal diseases. *Hellenic Plant Protection Journal*, 9(1), 1-15. <https://doi.org/10.1515/hppj-2016-0001>
- Sánchez-Mora, F. D., & Garcés-Fiallos, F. R. (2012). *Moniliophthora roreri* (Cif y Par) Evans et al. en el cultivo de cacao. *Scientia Agropecuaria*, 3(3), 249-258.
- Statsoft (2011). *STATISTICA User's Guide. Version 10*. Possumoorweg, Hamburg, Germany: StatSoft Europe.
- Torres-Rodríguez, J. A., Reyes-Pérez, J. J., Quiñones-Aguilar, E. E., & Hernandez-Montiel, L. G. (2022). Actinomycete potential as biocontrol agent of phytopathogenic fungi: Mechanisms, source, and applications. *Plants*, 11(23), 3201. <https://doi.org/10.3390/plants11233201>
- Tubaña, B. S., & Heckman, J. R. (2015). Silicon in soils and plants. In F. A. Rodrigues., & L. E. Datnoff (Eds.). *Silicon and plant diseases* (p.p 7-51). Cham, Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0_2
- Verma, K. K., Song, X. P., Tian, D. D., Guo, D. J., Chen, Z. L., Zhong, C. S., ... & Li, Y. R. (2021). Influence of silicon on biocontrol strategies to manage biotic stress for crop protection, performance, and improvement. *Plants*, 10(10), 2163. <https://doi.org/10.3390/plants10102163>
- Vijayan, A., Sriramachandrasekharan, M. V., Manivannan, R., & Shakila, A. (2021). Effect of silicon through potassium silicate on yield, nutrient uptake and quality of grand naine banana. *Asian Journal of Agriculture Food Science*, 9(3), 91-98.
- Villamil-Carvajal, J. E., Viteri-Rosero, S. E., & Villegas-Orozco, W. L. (2015). Aplicación de antagonistas microbianos para el control biológico de *Moniliophthora roreri* Cif & Par en *Theobroma cacao* L. bajo condiciones de campo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(1), 7441-7450. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47830>
- Vishwakarma, K., Singh, V. P., Prasad, S. M., Chauhan, D. K., Tripathi, D. K., & Sharma, S. (2020). Silicon and plant growth promoting rhizobacteria differentially regulate AgNP-induced toxicity in Brassica juncea: Implication of nitric oxide. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 121806. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121806>
- Vivancos, J., Labbé, C., Menzies, J. G., & Bélanger, R. R. (2015). Silicon-mediated resistance of *A. rabidopsis* against powdery mildew involves mechanisms other than the salicylic acid (SA)-dependent defence pathway. *Molecular Plant Pathology*, 16(6), 572-582. <https://doi.org/10.1111/mpp.12213>
- Yamaji, N., Chiba, Y., Mitani-Ueno, N., & Feng-Ma, J. (2012). Functional characterization of a silicon transporter gene implicated in silicon distribution in barley. *Plant Physiology*, 160(3), 1491-1497. <https://doi.org/10.1104/pp.112.204578>
- Zhang, Y., Liang, Y., Zhao, X., Jin, X., Hou, L., Shi, Y., & Ahammed, G. J. (2019). Silicon compensates phosphorus deficit-induced growth inhibition by improving photosynthetic capacity, antioxidant potential, and nutrient homeostasis in tomato. *Agronomy*, 9(11), 733. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110733>
- Zhu, Y., & Gong, H. (2014). Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 455-472. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1>