



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE AGRONOMÍA

Nivel crítico nutricional foliar de silicio para el cultivo de banano (*Musa spp.*) en Ecuador

**CUENCA MORENO ANDREA NATHALY
INGENIERA AGRONOMA**

**SANMARTÍN GALVÁN JEAN PIERRE
INGENIERO AGRONOMO**

**MACHALA
2022**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE AGRONOMÍA

**Nivel crítico nutricional foliar de silicio para el cultivo de banano
(Mussa spp.) en Ecuador**

**CUENCA MORENO ANDREA NATHALY
INGENIERA AGRONOMA**

**SANMARTÍN GALVÁN JEAN PIERRE
INGENIERO AGRONOMO**

**MACHALA
2022**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE AGRONOMÍA

ENSAYOS O ARTÍCULOS ACADÉMICOS

**Nivel crítico nutricional foliar de silicio para el cultivo de banano
(Mussa spp.) en Ecuador**

**CUENCA MORENO ANDREA NATHALY
INGENIERA AGRONOMA**

**SANMARTÍN GALVÁN JEAN PIERRE
INGENIERO AGRONOMO**

VILLASEÑOR ORTIZ DIEGO RICARDO

**MACHALA
2022**



REVISTA AGRONOMÍA COSTARRICENSE

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA-COLEGIO DE INGENIEROS AGRÓNOMOS-MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA

Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca-Correo electrónico: rac.cia@ucr.ac.cr
Tel. 2511-2080 ISSN 2215-2202

04 de mayo del 2023
RAC-026-23

Señor
Jean Sanmartín Galván
Universidad Técnica de Machala

Estimado autor:

En relación con el manuscrito “**Nivel crítico nutricional foliar de silicio para el cultivo de banano (*Musa spp.*) en Ecuador**”, le comunico que se le solicitan las siguientes modificaciones que deben ser integradas en un nuevo documento.

Resumen

1. No es correcto en **Resultados** indicar que fue significativo el nivel de clorofila pues se indica lo contrario en los resultados cuando expone que “Se evidenció que la aplicación de Si foliar a una dosis de 500 cm³ ha⁻¹ generó un mayor efecto significativo sobre los niveles de clorofila y silicio foliar”. Dicho contenido debe ser revisado.

Introducción

2. Requiere mejorar la revisión de antecedentes o investigaciones respecto a aplicaciones de dosis de Si.
3. En el segundo párrafo se indica que: “Investigaciones indican que el uso del Si en la agricultura puede mejorar la productividad de los cultivos, la asimilación de nutrientes esenciales, y aumentar la tolerancia a diversos tipos de estrés causados por factores abióticos y bióticos”, para lo cual es necesario citar referencias, para apoyar con otras fuentes lo investigado.

Resultados y discusión

4. Aún necesita incluir y discutir más a fondo, este contenido en comparación o contraste con otras publicaciones referentes al tema en banano.

Aspectos generales

5. Revisar y verificar el término *Musa*, ya que no lleva sin doble s.
6. Debe incluir el título en inglés en el componente Abstract.

Se señalan otras observaciones que deben ser consideradas. Las mismas aparecen en los documentos que se adjuntan.

Mucho le agradeceré el envío del trabajo corregido a más tardar el **11 de mayo del 2023** para considerar su posible publicación. Por último, no omito señalar que el documento modificado será sometido a una nueva revisión, por lo que podría solicitársele de nuevo aclaraciones o correcciones.

Sin otro en particular se despide cordialmente,

Silvia Elena Arce Quesada
Editora
Revista Agronomía Costarricense

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, CUENCA MORENO ANDREA NATHALY y SANMARTIN GALVAN JEAN PIERRE, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado Nivel crítico nutricional foliar de silicio para el cultivo de banano (*Mussa spp.*) en Ecuador, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



CUENCA MORENO ANDREA NATHALY

0705209534



SANMARTIN GALVAN JEAN PIERRE

0705451656

UNIVERSITAS
MAGISTRO-
RUM
ET SCHOLAR-
IUM

NIVEL CRÍTICO NUTRICIONAL FOLIAR DE SILICIO PARA EL CULTIVO DE BANANO (*Mussa spp.*) EN ECUADOR

Jean Sanmartín-Galván^{1,2*}, Andrea Cuenca-Moreno^{1,3}, Ángel Luna-Romero^{1,4}, Edison Jaramillo-Aguilar^{1,5}, Diego Villaseñor-Ortiz¹

*Autor para correspondencia. Correo electrónico: jsanmarti4@utmachala.edu.ec

¹Universidad Técnica de Machala (UTMACH) - Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA) - Semillero Estudiantil de Investigación en Fitotecnia (SINFIT) - Campus Santa Inés, km 1/2 vía Machala-Pasaje, Machala. (CC 170517) - Ecuador.

² 0000-0002-1237-9527, ³ 0000-0002-5271-692X, ⁴ 0000-0002-4311-9445, ⁵ 0000-0002-8241-9598, ⁶ 0000-0001-5646-4451

RESUMEN

Introducción. Los efectos beneficiosos del silicio (Si) suelen ser pequeños en condiciones óptimas y más pronunciados en condiciones de estrés de las plantas de banano, y las pruebas más impresionantes se encuentran en experimentos de campo. Sin embargo, se sabe poco sobre el silicio en banano (*Musa spp.*) y su nivel crítico al ser aplicado de forma foliar. Por ello, en la presente investigación propusimos como hipótesis que la aplicación foliar de dosis frecuente de ácido monosilícico (SiOH₄) incrementa el contenido nutricional del silicio en el cultivo. **Objetivo.** Evaluar la respuesta del cultivo de banano a dosis crecientes de Si, para determinar el nivel crítico foliar en las condiciones específicas de la provincia de El Oro. **Materiales y métodos.** Los ensayos fueron implementados en campo en un diseño experimental en bloques completamente aleatorio, donde se aplicaron distintas y crecientes dosis de Si (0; 250; 500 y 750 cm³ ha⁻¹), para evaluar su efecto en el nivel de Si foliar, clorofila y raíces, a partir de análisis foliares y de raíces. Se realizaron análisis de regresión y se obtuvieron los respectivos modelos de relación entre las dosis de Si aplicadas con el nivel de Si foliar en banano y clorofila. **Resultados.** Se evidenció que la aplicación de Si foliar a una dosis de 500 cm³ ha⁻¹ generó un mayor efecto significativo sobre los niveles de clorofila y silicio foliar. Se obtuvo que un modelo de regresión lineal que predice el nivel crítico de Si foliar en banano. **Conclusiones.** Encontramos mediante la aplicación de una ecuación lineal que un nivel crítico de Si foliar (0,41 %) se logra con una dosis de Si de 750 cm³ ha⁻¹. Esta investigación en Si en el cultivo de banano propone el establecimiento de un contenido adecuado de Si foliar a nivel nutricional.

Palabras claves: ácido monosilícico, cavendish, dosis, mussa spp, nutrición

ABSTRACT

Introduction. The beneficial effects of silicon (Si) are usually small under optimal conditions and more pronounced under stress conditions of banana plants, and the most impressive evidence is found in field experiments. However, little is known about silicon

in banana (*Musa spp.*) and its critical level when foliar applied. Therefore, in the present research we proposed as a hypothesis that foliar application of frequent doses of monosilicic acid (SiOH_4) increases the nutritional content of silicon in the crop. **Objective.** To evaluate the response of the banana crop to increasing doses of Si, in order to determine the critical foliar level in the specific conditions of the province of El Oro. **Materials and methods.** The field trials were implemented in a completely randomized block experimental design, where different and increasing doses of Si (0; 250; 500 and $750 \text{ cm}^3 \text{ ha}^{-1}$) were applied to evaluate its effect on the level of foliar Si, chlorophyll and roots, based on foliar and root analysis. Regression analyses were carried out and the respective models of the relationship between the doses of Si applied and the level of foliar Si in banana and chlorophyll were obtained. **Results.** It was found that the application of foliar Si at a dose of $500 \text{ cm}^3 \text{ ha}^{-1}$ generated a greater significant effect on the levels of chlorophyll and foliar silicon. A linear regression model predicting the critical level of foliar Si in banana was obtained. **Conclusions.** We found by applying a linear equation that a critical level of foliar Si (0.41 %) is achieved with a Si dose of $750 \text{ cm}^3 \text{ ha}^{-1}$. This research on Si in banana crop proposes the establishment of an adequate foliar Si content at a nutritional level.

Keywords: cavendish, dose, monosilicic acid, musa spp, nutrition

INTRODUCCIÓN

El banano (*Musa spp.*) es un cultivo de gran valor económico y social en muchas partes del mundo, ya que no solo es una importante fuente de nutrientes y energía, sino que también contribuye a la sostenibilidad económica y social de algunas comunidades del mundo (Petsakos et al. 2019). El comercio del banano es una fuente significativa de ingresos para la economía ecuatoriana y es una importante fuente de empleo en el país. El sector bananero emplea a unas 200.000 personas de manera directa y a más de un millón de personas de manera indirecta, según datos de la Asociación de Exportadores de Banano de Ecuador (AEBE) (Orozco 2017). Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en el 2020 Ecuador exportó 6,1 millones de toneladas de banano, lo que representa aproximadamente el 32 % de la producción mundial (Chamba et al. 2021).

El silicio (Si) es un elemento común en rocas y suelos, que, aunque no es esencial para las plantas, la mayoría de los cultivos acumulan una cantidad significativa de este elemento (Tubaña 2015). Investigaciones indican que el uso del Si en la agricultura puede mejorar la productividad de los cultivos, la asimilación de nutrientes esenciales, y aumentar la tolerancia a diversos tipos de estrés causados por factores abióticos y bióticos. Además, el uso de Si en la agricultura puede aumentar el rendimiento, reducir el estrés abiótico por salinidad, aumentar la resistencia a la sequía y reducir los efectos tóxicos de los metales pesados (Amin et al. 2018, Tubaña et al. 2016, Liu et al. 2020). El uso de silicatos naturales como fertilizantes aumentan el potencial de mitigar el agotamiento de los nutrientes del suelo y, como consecuencia, es una alternativa al uso extensivo de fertilizantes fitosanitarios y fertilizantes ricos en Nitrógeno (N), Fosforo (P)

y Potasio (K); de esta forma se lograría mantener una agricultura sostenible (Guntzer et al. 2012).

La absorción de Si por parte de las plantas se produce principalmente en forma de ácido silícico (H_4SiO_4) o ácido monosilícico $Si(OH)_4$ soluble en agua, que sigue pasivamente el flujo de agua desde la superficie de la raíz (Henriet et al. 2006). El Si en el suelo se encuentra en una forma inerte y se absorbe en forma soluble como $Si(OH)_4$, lo que depende tanto de las raíces como de la composición química del suelo (Bakhat et al. 2018). Adicionalmente, la presencia de más Si en las raíces, brotes y hojas de las plantas las hace más resistentes a los ataques de plagas y aumenta la tolerancia a la sequía, puesto que forma una gruesa capa bajo la epidermis, esta capa de Si reduce la capacidad de las hojas para asimilar las plagas y la pérdida de agua durante la transpiración de la planta (Greger et al. 2018).

El Si no es esencial para el crecimiento de las plantas, pero su presencia puede tener varias funciones beneficiosas, tales como la reducción de la toxicidad de los minerales, la mejora de las propiedades mecánicas de los tejidos vegetales y el aumento de la resistencia a diversos estreses abióticos y bióticos. Además, la aplicación de Si puede atenuar la deficiencia de Calcio (Ca) en el cultivo de col (*Brassica oleracea* L.) y la deficiencia de K en plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cuando se aplica vía foliar. Estos efectos beneficiosos se deben a la presencia de fitolitos en los cultivos expuestos a varios tipos de estrés ambiental (Bhat et al. 2019, Lopes da Silva et al. 2021, dos Santos et al. 2021, Guntzer et al. 2012).

Para llevar a cabo un diagnóstico foliar, es necesario conocer los niveles de nutrientes estándar requeridos por el cultivo, los cuales se encuentran en el rango crítico (SR), que puede estar asociado con el 90 al 100 % de la producción máxima (Ulrich 1952). La mayoría de los estudios realizados en todo el mundo sobre el cultivo de banano utilizando diferentes dosis de nutrientes, han evaluado sus efectos en la producción, rendimiento y fitosanidad de la planta, sin embargo, la información al respecto del elemento Si, es realmente muy escasa, lo que hace imposible conocer los niveles críticos o adecuados de este nutriente para el cultivo mencionado.

En vista de los antecedentes mencionados, se ha formulado la hipótesis de que la aplicación frecuente de dosis de Si foliar aumentará el contenido nutricional de Si en los cultivos. Por lo tanto, el objetivo de este experimento es evaluar la respuesta del cultivo de banano a dosis crecientes de Si, para determinar el nivel crítico foliar en las condiciones específicas de la provincia de El Oro.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y características del área experimental. El experimento se realizó entre los meses de junio de 2022 a enero de 2023 en la granja experimental del campus Santa Inés de la Universidad Técnica de Machala, provincia de El Oro, Ecuador (3° 17' 22" S, 79° 54' 43" W). El clima de la región corresponde al de sabana tropical (AW) según la clasificación climática de Köppen-Geiger, con una estación seca de mayo a diciembre y

una estación lluviosa de enero a abril (Morán-Tejeda et al. 2016). Así mismo, respecto a la temperatura media anual de la zona oscila entre 25 y 30 °C (Pourrut et al. 1995). Las características del suelo de la zona pertenecen al subgrupo de Aquic Dystrudepts (Soil Survey Staff 2014). El cultivar del sitio utilizado fue el triploide Musa AAA, cv. "Williams", del subgrupo Cavendish ("Williams Cavendish").

Diseño experimental. El experimento correspondió a un diseño de bloques completos al azar (DBCA). Para el establecimiento del diseño: se ubicaron los bloques de manera perpendicular al gradiente de variabilidad de la zona (fertilidad del suelo); se dividió los bloques en función del número de tratamientos y se los asignó de forma completamente al azar en las unidades experimentales (UE), de forma independiente. Se consideró una franja alrededor del entorno experimental para contrarrestar el efecto de los bordes.

El factor de estudio fue las dosis creciente y distinta de ácido monosilícico Si(OH)_4 . Se establecieron cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Las dosis evaluadas fueron: 0; 250; 500 y 750 $\text{cm}^3 \text{ha}^{-1}$ en referencia a las dosis aplicadas dentro del mercado. Se aplicaron las dosis con una frecuencia mensual. Se seleccionaron de tres a cinco unidades muestrales (UM), que consistieron en plantas (hijas) de un metro de altura y con una de sus hojas funcionales en estado de F10 (primera hoja funcional de 10 cm de ancho), por cada tratamiento (Soto 2014).

Manejo del ensayo. Las dosis de Si se aplicaron mediante un vehículo aéreo no tripulado (VANT-Dron) de fumigación agrícola. Se continuo con la planificación nutricional anual del entorno experimental, que consistió en una fertilización edáfica y foliar en toda la zona experimental de manera homogénea en todos los tratamientos. Las plantas recibieron dosis estándar de: 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 en forma de superfosfato triple (46 % de P_2O_5); 64 kg ha^{-1} de CaO (23 % CaO) y 60 kg ha^{-1} de SO_4 en forma de sulfato cálcico (18 % SO_4) (Villaseñor et al. 2022). Durante el ensayo se aplicaron todas las prácticas agronómicas que requiere el cultivo como: deshierbe, control de malezas, apuntalamiento, enfunde, deshoje fitosanitario, riegos y limpieza de canales de drenaje; siguiendo recomendaciones de Galán Saúco et al. (2012).

Muestreo foliar y de raíces. Se recolectaron muestras foliares de tres a cinco plantas centrales en cada UE. La recolección de las hojas se realizó al momento de la emergencia de la inflorescencia siguiendo el procedimiento propuesto por Martin-Prevel (1987) mediante el método MEIR; tomando de la tercera hoja (desde el ápice) de una planta adulta que, en el punto de emisión de inflorescencia, una porción central de 10 cm x 10 cm en cada lado de la vena central. En las dos porciones se evaluó el nivel de clorofila con el dispositivo de medición portátil Minolta SPAD-502 Plus, con el cual se realizaron tres tomas en ambos lados de hoja de la nervadura central, registrando el dato promedio (calculado por el mismo equipo) en unidades de $\mu\text{g cm}^{-2}$.

El tejido foliar muestreado en las parcelas experimentales se descontaminó con agua desionizada, luego con una solución detergente (0,1%), después con una solución de ácido clorhídrico (0,3%) y de nuevo con agua desionizada. Posteriormente, el tejido se secó en una estufa de circulación forzada a temperaturas entre 60 y 70 °C hasta peso

constante y finalmente se molió. En laboratorio, se utilizó el método propuesto por Bryson et al. (2014) para la preparación de la muestra, que consistió en la incineración seca de la muestra y posterior dilución en agua. Luego se realizaron los análisis químicos correspondientes para determinar el nivel de Si según el método EPA 7010 que utiliza la técnica de espectrofotometría de absorción atómica en horno de grafito.

El muestreo de raíces consistió en la recolección de muestras de tres plantas de cada UE, las muestras fueron tomadas, mediante el criterio de selección de plantas en reciente emergencia de inflorescencia, que poseyeran una planta hija de sucesión de al menos 1 m de altura. Posteriormente, frente a la planta hija seleccionada, se excavó en el suelo un hoyo de 30 cm de longitud por 15 cm de ancho y 30 cm de profundidad (volumen 13500 cm³ de suelo), se recolectaron todas las raíces extraídas en esa porción de suelo, luego se colocaron las raíces en bolsas plásticas, debidamente identificadas y se enviaron al laboratorio, el cual empleo el método establecido por Taylor y Loegering (1953), modificado por Araya (2002) para el análisis de raíces.

Procedimiento estadístico. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) factorial intergrupos. Para la verificación de supuestos de distribución normal y de homogeneidad de varianzas, se empleó las pruebas de Shapiro-Wilk y de Levene, respectivamente. Como método de separación de medias para las comparaciones múltiples entre los grupos, se aplicaron pruebas de rangos múltiples post hoc de Duncan. Se generaron modelos de regresión polinomial. El nivel de significancia ($p < 0,05$) fue implementado para todas las pruebas y regresiones estadísticas. Se maneja el software SPSS Statistic 26 desarrollado por IBM (1968) para el análisis de datos.

Para la medir la relación entre los cuatro tratamientos de Si aplicados de forma foliar, con los niveles de Si obtenidos después de la evaluación en laboratorio y los niveles de clorofila, medidos con el instrumento SPAD, se realizaron mediante análisis de regresión y se obtuvieron los respectivos modelos de relación entre las dosis de Si aplicadas con el nivel de Si foliar en banano y clorofila. El valor del nivel crítico (NC) o contenido adecuado de Si foliar, se evaluó asignando valor nulo al nivel de Si foliar para la ecuación producto de la regresión entre Si foliar y tratamientos. (Melo et al. 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1, se muestran los análisis de varianzas de la aplicación de los tratamientos de Si foliar en los niveles de clorofila y silicio foliar. Los niveles de Si foliar más altos (0,41 y 0,38 %) se presentaron en las aplicaciones de dosis de 500 y 750 cm³ ha⁻¹ respectivamente (Tabla 1). Sin embargo, la dosis de 500 cm³ ha⁻¹ de Si, generó la media más alta de Si foliar, existiendo diferencias estadísticas significativas al compararse con las demás dosis.

Estudios realizados por Castellanos et al. (2015) en gramíneas, determinaron que el Si actúa de manera indirecta sobre la resistencia a plagas, mitigando la susceptibilidad de la planta y generando así la mejor asimilación de nutrientes. Según investigaciones de Camacho et al. (2013) sobre el efecto del Si aplicado de forma foliar en el cultivo de

azúcar (*Saccharum officinarum* L.) , indica la relación directa que existe sobre el Si y su incidencia en el incremento de N y K; mostrando una tendencia de disminución del sodio (Na). Investigaciones realizadas por de Souza Ferraz et al. (2014) en el cultivo de algodón, establecen que la aplicación de Si aumentó la tasa de asimilación de CO₂ y la eficiencia cuántica del fotosistema II.

Los resultados que se obtuvieron de clorofila (Tabla 1) determinaron que la aplicación de una dosis de 500 cm³ ha⁻¹ de Si, generó la media más alta de clorofila (56,16 µg cm⁻²) diferenciándose significativamente del resto de dosis que registraron valores inferiores a la media general (53,33 µg cm⁻²). En la Tabla 2, se muestran los modelos de regresión polinomial entre los tratamientos de Si foliar y los niveles de clorofila. Estos modelos no fueron significativos.

Resultados obtenidos por Abdelaal et al. (2020) en el cultivo de pimiento dulce, demostraron que mediante la aplicación foliar de Si se produce mejoras en la concentración de clorofila y nutrientes minerales, el estado hídrico y el rendimiento de frutos de las plantas de pimiento dulce. También estudios realizados en maíz por Liu et al. (2020) comprobaron que la aplicación de Si mitiga la disminución del contenido de clorofila causada por microelementos tóxicos. En banano, resultados de Moyano (2016) demuestran un efecto positivo en cuanto a la aplicación de Si, ya que incrementa el contenido de clorofila, incidiendo de manera positiva sobre el desarrollo fisiológico, mejor asimilación de nutrientes presentes en la planta y el control de plagas y enfermedades.

Tabla 1: Niveles de clorofila y silicio foliar en función de la aplicación de distintas dosis de silicio en plantas de banano 'Williams Cavendish' (Machala, provincia del El Oro, Ecuador, 2023).

Dosis de silicio (cm ³ ha ⁻¹)	SPAD (µg cm ⁻²)	Si-f (%)
0	51,52 ^b ± 5.35	0,22 ^c ± 0,09
250	52,45 ^b ± 5.02	0,26 ^{bc} ± 0,04
500	56,16 ^a ± 3.40	0,41 ^a ± 0,10
750	53,04 ^b ± 5.39	0,38 ^{ab} ± 0,09
p valor	0,007	0,016

^a: denota las diferencias significativas por medio de las pruebas post-hoc de Duncan al 5% de probabilidad. SPAD: Nivel de clorofila (µg cm⁻²). Si-f: silicio foliar (%).

Tabla 2: Relación entre la variable independiente (dosis de silicio), la variable dependiente (nivel de clorofila) y el respectivo nivel crítico de la tercera hoja de las plantas de banano 'Williams Cavendish' (Machala, provincia de El Oro, Ecuador, 2023).

SPAD ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	Ecuación	R ²	y max ^{NC} (SPAD en $\mu\text{g cm}^{-2}$)	x max (Dosis de Si en $\text{cm}^3 \text{ha}^{-1}$)
Lineal¹	SPAD = 52,19125 + 0,0027Si	0,04 ^{ns}	54,22	750
Cuadrática²	SPAD = 51,035 + 0,017x - 0,000019Si ²	0,11 ^{ns}	54,84	447,37
Cubica³	SPAD = 51,515 - 0,014Si + 0,000097Si ² - 0,00000010Si ³	0,18 ^{ns}	56,54	563,91

^{ns}: No existe significancia estadística, ¹: Modelo de regresión lineal, ²: Modelo de regresión cuadrática, ³: Modelo de regresión cubica. ^{NC}: Valores del nivel crítico o contenido adecuado, extraídos asignando valor nulo a los niveles de clorofila. SPAD: nivel de clorofila ($\mu\text{g cm}^{-2}$).

En la Tabla 3, se muestran los análisis de varianzas de la aplicación de los tratamientos de Si foliar en el porcentaje de raíces vivas y la masa total de raíces promedio. La aplicación de las diferentes dosis de Si no demostraron un efecto sobre el porcentaje de raíces vivas y la masa total de raíces promedio. Sin embargo, pese a que la aplicación de Si no demuestra un efecto sobre estas variables, es válido señalar que, en promedio, el porcentaje de raíces vivas (77,20 %) en la aplicación de la dosis de 500 $\text{cm}^3 \text{ha}^{-1}$ se encontraron en un rango normal (70 – 85 %) según parámetros preestablecidos por laboratorio (Tabla 3).

Estos resultados difieren con los resultados obtenidos por Lopes da Silva et al. (2021) en el cultivo de col, ya que comprobaron que, al añadir Si en solución nutritiva bajo invernadero, se incrementa el contenido de materia seca de las raíces. Matichenkov y Calvert (2002) en el cultivo de caña de azúcar, explican que la presencia del Si aplicado de forma edáfica en campo o invernadero mejora el desarrollo y aumenta la masa radicular en un 50 y 200 %, difiriendo con los resultados obtenidos en la presente investigación principalmente por la forma de aplicación, ya que la capacidad de traslocación de los nutrientes a la raíz mediante una dosificación foliar es menor en comparación con una aplicación edáfica directa de Si.

Tabla 3: Porcentaje de raíces vivas y masa total de raíces promedio en función de la aplicación de distintas dosis de silicio en plantas de banano 'Williams Cavendish' (Machala, provincia del El Oro, Ecuador, 2023)

Dosis de silicio (cm ³ ha ⁻¹)	Bloq.	Pt.	RV (%)	Interpretación de rangos de RV (%)	MTRP (g)
0	1	1	74,03	70 – 85 (Normal)	77,00
	2	2	65,75	< 70 (Deficiente)	36,50
	3	3	29,85	< 70 (Deficiente)	22,33
	4	1	58,82	< 70 (Deficiente)	51,00
$\bar{x} \pm \sigma$			57,11 ^{ns} ± 19,21	< 70 (Deficiente)	46,71 ^{ns} ± 23,34
250	1	2	69,70	< 70 (Deficiente)	49,50
	2	3	60,26	< 70 (Deficiente)	26,00
	3	2	77,50	70 – 85 (Normal)	40,00
	4	2	26,32	< 70 (Deficiente)	9,50
$\bar{x} \pm \sigma$			58,45 ^{ns} ± 22,55	< 70 (Deficiente)	31,25 ^{ns} ± 17,42
500	1	1	90,00	> 85 (Bueno)	10,00
	2	3	68,75	< 70 (Deficiente)	42,67
	3	4	58,74	< 70 (Deficiente)	67,25
	4	1	91,30	> 85 (Bueno)	23,00
$\bar{x} \pm \sigma$			77,20 ^{ns} ± 16,07	70 – 85 (Normal)	35,73 ^{ns} ± 24,94
750	1	1	43,33	< 70 (Deficiente)	30,00
	2	3	70,80	70 – 85 (Normal)	37,67
	3	3	58,59	< 70 (Deficiente)	42,67
	4	1	76,74	70 – 85 (Normal)	43,00
$\bar{x} \pm \sigma$			62,37 ^{ns} ± 14,77	< 70 (Deficiente)	38,33 ^{ns} ± 6,07
p valor			0,510 ^{ns}		0,781 ^{ns}

^{ns}: determina que no existe diferencias significativas entre los grupos. MTRP: masa total de raíces promedio. RV: raíces vivas. Bloq.: número de bloques. Pt: número de plantas muestreadas.

En la Tabla 4, se muestran los modelos de regresión polinomial entre los tratamientos de Si foliar y los niveles de Si identificados en laboratorio. La ecuación lineal estableció un nivel crítico (NC) de Si foliar (0,41 %) a una dosis máxima de Si (750 cm³ ha⁻¹) con un coeficiente de determinación R² (0,43) altamente significativo, que indica una correlación moderada entre las variables (Tabla 4). Al ser una ecuación lineal positiva, su tendencia explica que a la aplicación de una mayor dosis de Si, se obtendrán un mayor % de Si foliar (Figura 1). Posiblemente por la falta de aplicación de una dosis adicional Si en el ensayo, el resto de los modelos de regresión no resultaron significativos. Sin embargo, se puede observar que, a diferencia de la ecuación lineal, esta ecuación cubica predice: un mayor NC de Si foliar (0,45 %) a una menor aplicación de dosis de Si (614,70 cm³ ha⁻¹) y un mayor coeficiente de determinación R² (0,55) que indica una correlación fuerte entre las variables (Tabla 4).

Pocos estudios han determinado un NC de Si foliar en distintos cultivos. En plántulas de café en almácigo, Caicedo y Chavarriaga (2008) determinaron una gran concentración de Si foliar (0,52 %) que se provoca al aplicar 6 g de silicio. Pese a esto, no se determina específicamente aquel contenido adecuado que se genera a partir de una dosificación de este nutriente. En banano, la información es escasa de NC foliar y poco precisa al momento de emplear alguna fuente de Si como nutrición complementase del cultivo; lo que justifica la relevancia de estos resultados para futuras investigaciones.

Tabla 4: Relación entre la variable independiente (dosis de silicio), la variable dependiente (niveles de silicio foliar) y el respectivo nivel crítico de la tercera hoja de las plantas de banano ‘Williams Cavendish’ (Machala, provincia de El Oro, Ecuador, 2023).

Si-f (%)	Ecuación	R ²	y max ^{NC} (Si-f en %)	x max (Dosis de Si en cm ³ ha ⁻¹)
Lineal¹	Si-f = 0,22 + 0,00025Si	0,43**	0,41	Si = 750
Cuadrática²	Si-f = 0,20 + 0,00049Si – 0,00000032Si ²	0,46 ^{ns}	0,39	Si = 768,65
Cúbica³	Si-f = 0,22 – 0,00042Si + 0,00000032Si ² – 0,0000000031Si ³	0,55 ^{ns}	0,45	Si = 614,70

^{ns}: No existe significancia estadística, **: Altamente significativo al 1 % de probabilidad. ¹: Modelo de regresión lineal, ²: Modelo de regresión cuadrática, ³: Modelo de regresión cubica. ^{NC}: Valores del nivel crítico o contenido adecuado, extraídos asignando valor nulo a los niveles de silicio foliar. Si-f: porcentaje de silicio foliar (%).

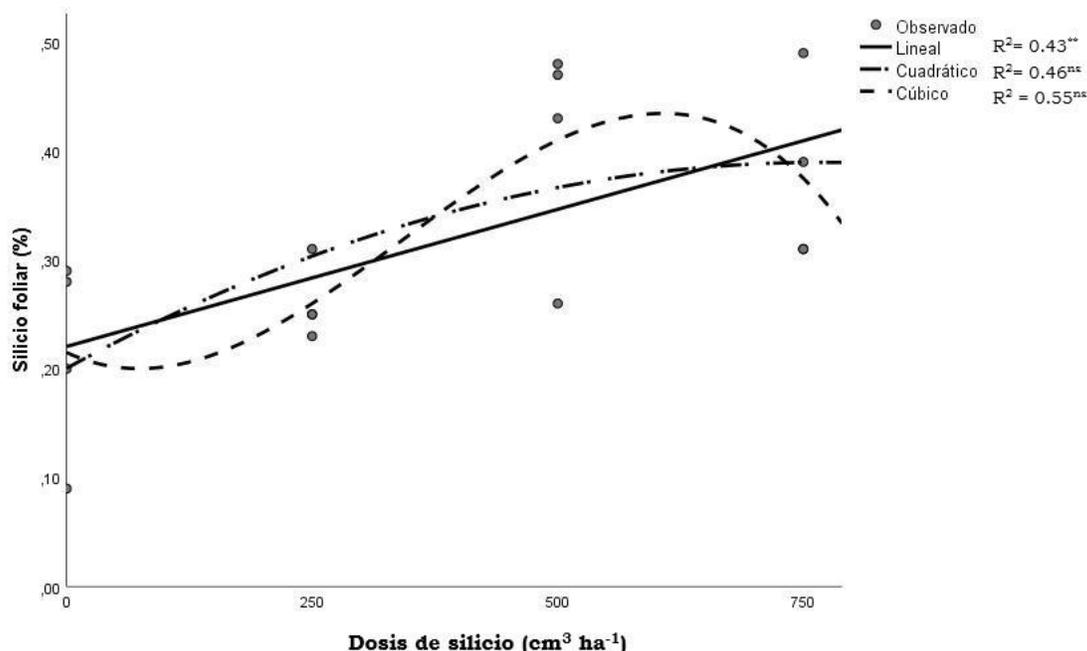


Figura. 1: Correlación polinómica entre la variable independiente (dosis de silicio) y la variable dependiente (niveles de silicio foliar) en plantas de banano 'Williams Cavendish' (Machala, provincia del El Oro, Ecuador, 2023).

CONCLUSIONES

Concluimos que la aplicación foliar con Si (dosis al 500 cm³ ha⁻¹) mejoró el nivel de clorofila y el estado nutricional del cultivar de banano 'Williams Cavendish' cultivado en Ecuador. Mediante una ecuación lineal propuesta, encontramos que el NC (0,41 %) de Si foliar, se logra con una dosis de 750 cm³ ha⁻¹. Esta investigación en Si en el cultivo de banano propone el establecimiento de un contenido adecuado de Si foliar a nivel nutricional. En futuras investigaciones es importante demostrar la incidencia del Si en el incremento de otros elementos importantes que interfieren en la nutrición foliar del banano; para esto, es de relevancia que se evalúen distintas y crecientes dosis del elemento, puestas a prueba en más de un ciclo vegetativo para obtener nuevos resultados.

AGRADECIMIENTOS

A Yara ecuador Cia. Ltda. como principal financista del presente proyecto de investigación en colaboración con la Universidad Técnica de Machala (UTMACH).

LITERATURA CITADA

- Abdelaal, K. A; Mazrou, Y. S; Hafez, Y. M. 2020. Silicon foliar application mitigates salt stress in sweet pepper plants by enhancing water status, photosynthesis, antioxidant enzyme activity and fruit yield. *Plants*, 9(6), 733.
- Amin, M; Ahmad, R; Ali, A; Hussain, I; Mahmood, R; Aslam, M; Lee, D. J. 2018. Influence of Silicon Fertilization on Maize Performance Under Limited Water Supply. *Silicon*, 10(2), 177–183.
- Araya-Vargas, M. 2002. Metodología utilizada en el laboratorio de nematología de CORBANA SA para la extracción de nematodos de las raíces de banano (*Musa AAA*) y plátano (*Musa AAB*). *CORBANA (Costa Rica)*, 28, 97-109.
- 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.
- Bhat, J. A; Shivaraj, S. M; Singh, P; Navadagi, D. B; Tripathi, D. K; Dash, P. K; Solanke, A. U; Sonah, H; Deshmukh, R. 2019. Role of Silicon in Mitigation of Heavy Metal Stresses in Crop Plants. *Plants*, 8(3), 71.
- Bryson, G. M; Mills, H. A; Sasseville, D. N; Jones, J. B; Barker, A. V. 2014. Plant analysis handbook III: A guide to sampling, preparation, analysis, interpretation and use of results of agronomic and horticultural crop plant tissue. Micro-Macro Publishing, Incorporated.
- 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.
- Camacho, O. A; Subirachs, J. M. C; Dittel, S. S; Pérez, R. H. 2013. Aumento del potencial productivo en caña de azúcar por aplicación de armurox® como fuente de silicio biodisponible.
- Castellanos González, L; de Mello Prado, R; Silva Campos, C. N. 2015. El Silicio en la resistencia de los cultivos. *Cultivos Tropicales*, 36, 16-24.
- Chamba, L. M. A; Montoya, A. N. C; Granda, A. D. C. V; Quezada, T. X. S. 2021. Evolución en las exportaciones de banano e impacto del desarrollo económico, provincia de El Oro 2011-2020, pre-pandemia, pandemia; aplicando series de tiempo. *Polo del conocimiento*, 6(8), 257-277.
- da Silva, D. L; de Mello Prado, R; Tenesaca, L. F. L; da Silva, J. L. F; Mattiuz, B. H. 2021. Silicon attenuates calcium deficiency by increasing ascorbic acid content, growth and quality of cabbage leaves. *Scientific reports*, 11(1), 1770.

- de Souza Ferraz, R. L; de Macêdo Beltrão, N. E; de Melo, A. S; Magalhães, I. D., Fernandes, P. D; do Socorro Rocha, M. 2014. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silício foliar. *Semina: Ciências Agrárias*, 35(2), 735-748.
- dos Santos Sarah, M. M; de Mello Prado, R; de Souza Júnior, J. P; Teixeira, G. C. M; dos Santos Duarte, J. C; de Medeiros, R. L. S. 2021. Silicon supplied via foliar application and root to attenuate potassium deficiency in common bean plants. *Scientific Reports*, 11(1), 1-13.
- Galán Saúco, V; Robinson, J. C; Tomer, E; Daniells, J. W. 2010. Current situation and challenges of cultivating banana and other tropical fruits in the subtropics. In VI International Symposium on Banana: XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People 928 (pp. 19-30).
- Greger, M; Landberg, T; Vaculík, M. 2018. Silicon Influences Soil Availability and Accumulation of Mineral Nutrients in Various Plant Species. *Plants*, 7(2), 41.
- Guntzer, F; Keller, C; Meunier, J. D. 2012. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 201-213.
- Hebsur, N. S. 2019. Effect of silicon fertilization on growth and yield of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] in a vertisol. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(6), 1572–1575.
- Henriet, C; Draye, X; Oppitz, I; Swennen, R; Delvaux, B. 2006. Effects, distribution and uptake of silicon in banana (*Musa* spp.) under controlled conditions. *Plant and Soil*, 287(1–2), 359–374.
- IBM. 1968. IBM SPSS Statistics. United States of America.
- Kablan, L; Lagauche, A; Delvaux, B; Legrève, A. 2012. Silicon Reduces Black Sigatoka Development in Banana. *Plant Disease*, 96(2), 273–278.
- Kimunye, J; Jomanga, K; Tazuba, A. F; Were, E; Viljoen, A; Swennen, R; Mahuku, G. 2021. Genotype X Environment Response of ‘Matooke’ Hybrids (Naritas) to *Pseudocercospora fijiensis*, the Cause of Black Sigatoka in Banana. *Agronomy*, 11(6), 1145.
- Liu, X; Yin, L; Deng, X; Gong, D; Du, S; Wang, S; Zhang, Z. 2020. Combined application of silicon and nitric oxide jointly alleviated cadmium accumulation and toxicity in maize. *Journal of Hazardous Materials*, 395, 122679.
- Mahmoud, L. M; Dutt, M; Shalan, A. M; El-Kady, M. E; El-Boray, M. S; Shabana, Y. M; Grosser, J. W. 2020. Silicon nanoparticles mitigate oxidative stress of in vitro-derived banana (*Musa acuminata* ‘Grand Nain’) under simulated water deficit or salinity

- stress. *South African Journal of Botany*, 132, 155–163.
- Martin-Prével P. 1987. Banana. In.: Martin-Prevel P; Gagnard J; Gautier P (Eds). Plant analysis as a guide to the requirements of temperate and tropical crops. USA: Lavoisier Publishers Inc. p. 637–670
- Matichenkov, V. V; Calvert, D. V. 2002. Silicon as a beneficial element for sugarcane. *Journal American Society of Sugarcane Technologists*, 22(2), 21-30.
- Melo, G. W; Rozane, D. E.; Brunetto, G. 2017. Identification of the critical levels, sufficiency ranges and potential response to nutrient fertilization in vineyards by the DRIS method. In VIII International Symposium on Mineral Nutrition of Fruit Crops 1217 (pp. 423-430).
- Morán-Tejeda, E; Bazo, J; López-Moreno, J. I; Aguilar, E; Azorín-Molina, C; Sanchez-Lorenzo, A; ...; Vicente-Serrano, S. M. 2016. Climate trends and variability in Ecuador (1966–2011). *International Journal of Climatology*, 36(11), 3839-3855.
- Moyano Del Pezo, B. E. 2016. Establecimiento de la línea base de productos formulados con silicio y estudio de los efectos sobre parámetros de desarrollo y sanitarios de plantas de banano cavendish (aaa), variedad Williams (Tesis Lic. Guayaquil, Ecuador, Escuela Superior Politécnica del Litoral).
- Orozco, R. V. 2017. El impacto del comercio del Banano en el desarrollo del Ecuador. *Revista afese*, 53, 53.
- Petsakos, A; Prager, S. D; Gonzalez, C. E; Gama, A. C; Sulser, T. B; Gbegbelegbe, S; Kikulwe, E. M; Hareau, G. 2019. Understanding the consequences of changes in the production frontiers for roots, tubers and bananas. *Global Food Security*, 20, 180–188.
- Pourrut, P; Gdmez, G; Bermeo, A; Segovia, A. 1995. Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos. *El Agua en el Ecuador*, II, 9.
- Rajput, V. D; Minkina, T; Feizi, M; Kumari, A; Khan, M; Mandzhieva, S; Sushkova, S; El-Ramady, H; Verma, K. K; Singh, A; Hullebusch, E. D. van; Singh, R. K; Jatav, H. S; Choudhary, R. (2021). Effects of Silicon and Silicon-Based Nanoparticles on Rhizosphere Microbiome, Plant Stress and Growth. *Biology*, 10(8), 791.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy, 14th ed. (Washington, U.S.A.: USDA-NRCS).
- Soto Ballesteros, M. 2014. Bananos conceptos básicos 1 (No. F01/7273). Editorial Tecnológica.
- Taylor, A. L; Loegering, W. Q. 1953. Nematodes associated with root lesions in abacá.

Turrialba, 3(1/2), 8-13.

Tubaña, B. S.; Babu, T; Datnoff, L. E. 2016. A Review of Silicon in Soils and Plants and Its Role in US Agriculture. *Soil Science*, 181(9/10), 393–411.

Tubaña, B. S; Heckman, J. R. 2015. Silicon in soils and plants. *Silicon and plant diseases*, 7-51.

Ulrich, A. 1952. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 3(1), 207–228.

Villaseñor-Ortiz, D.; De Mello Prado, R.; Luna-Romero, E.; Jaramillo-Aguilar, E.; and Agurto-Rodriguez, L. 2022. Critical nitrogen and potassium levels and sufficiency ranges for banana cultivation in Ecuador. *Fruits* 77(1), 1-8.