

EFFECTO NUTRICIONAL FOLIAR DE SILICIO PARA EL CULTIVO DE BANANO (*Musa spp.*) EN ECUADOR

Jean Sanmartín-Galván^{1/*}, Andrea Cuenca-Moreno², Ángel Luna-Romero³,
Edison Jaramillo-Aguilar⁴, Diego Villaseñor-Ortiz⁵

Palabras clave: ácido monosilícico; cavendish; *Musa spp*; nutrición.

Keywords: monosilicic acid; cavendish; *Musa spp*; nutrition.

Recibido: 06/03/23

Aceptado: 19/05/23

RESUMEN

Introducción. El silicio en banano (*Musa spp.*) y su nivel crítico al ser aplicado de forma foliar es poco conocido. Por ello, en la presente investigación se propuso como hipótesis que la aplicación foliar de dosis frecuente de ácido monosilícico (SiOH_4) 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 efecto nutricional 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 dosis crecientes de Si (0; 250; 500 y 750 cm^3 . 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 obtuvo que un modelo de regresión lineal (R^2 : 0,43) que podría ayudar a predecir el nivel crítico de Si foliar en banano. **Conclusiones.** Se encontró mediante la aplicación de una ecuación lineal que entre mayor sea la dosis de Si aplicada (750 cm^3) se lograra un mayor nivel de Si foliar (0,41%) en plantas de banano.

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

1 Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA), Semillero Estudiantil de Investigación en Fitotecnia (SINFIT) - Campus Santa Inés, Machala, Ecuador.  0000-0002-1237-9527.

2 Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA), Semillero Estudiantil de Investigación en Fitotecnia (SINFIT) - Campus Santa Inés, Machala, Ecuador.  0000-0002-5271-692X.

3 Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA), Semillero Estudiantil de Investigación en Fitotecnia (SINFIT) - Campus Santa Inés, Machala, Ecuador.  0000-0002-4311-9445.

4 Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA), Semillero Estudiantil de Investigación en Fitotecnia (SINFIT) - Campus Santa Inés, Machala, Ecuador.  0000-0002-8241-9598.

5 Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA), Semillero Estudiantil de Investigación en Fitotecnia (SINFIT) - Campus Santa Inés, Machala, Ecuador.  0000-0001-5646-4451.

ABSTRACT

Foliar nutritional effect of silicon for banana (*Musa* spp.) Crop in Ecuador.

Introduction. Silicon in banana (*Musa* spp.) and its critical level when applied by foliar application is little known. For this reason, in the present investigation we proposed as a hypothesis that the foliar application of frequent doses of monosilicic acid (SiOH_4) increases the nutritional content of silicon in the crop. **Objective.** Evaluate the response of the banana crop to increasing doses of Si, to determine the foliar nutritional effect in the specific conditions of the province of El Oro. **Materials and methods.** The trials

were implemented in the field in a completely randomized experimental design in blocks, where increasing doses of Si were applied (0; 250; 500 and 750 $\text{cm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), to evaluate its effect on the level of foliar Si, chlorophyll and roots, from leaf and root analyses. Regression analyzes were carried out and the respective relationship models between the doses of Si applied with the level of foliar Si in banana and chlorophyll were obtained. **Results.** A linear regression (R^2 : 0.43) model was obtained that could help predict the critical level of foliar Si in banana. **Conclusions.** It was found through the application of a linear equation that the higher the dose of Si applied (750 cm^3) the higher the level of Si foliar (0.41%) in banana plants was achieved.

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) (Vásquez 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, aunque no es esencial para las plantas, la mayoría de los cultivos acumulan una cantidad significativa (Tubaña y Heckman 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 (Amin *et al.* 2018, Tubaña *et al.* 2016). 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 (Liu *et al.* 2020). Resaltar 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), Fósforo (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 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 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 $\text{Si}(\text{OH})_4$, 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

umenta 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).

La presencia de Si 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 (Lopes da Silva *et al.* 2021). 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 (Bhat *et al.* 2019, dos Santos *et al.* 2021). Estos efectos beneficiosos se deben a la presencia de fitolitos en los cultivos expuestos a varios tipos de estrés ambiental (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 el mundo sobre el cultivo de banano mediante diferentes dosis de nutrientes han evaluado sus efectos en la producción, rendimiento y fitosanidad de la planta. Sin embargo, la información al respecto de Si es realmente muy escasa, lo que hace imposible conocer los niveles críticos o adecuados de este nutriente para banano.

Estudios realizados por Castellanos González *et al.* (2015) en gramíneas, determinaron que el Si actúa de manera indirecta sobre la resistencia a plagas, mitiga la susceptibilidad de la planta y genera 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.), encontraron que existe relación directa sobre el Si y su incidencia en el incremento de N y K; con 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.

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. El objetivo de este experimento es evaluar la respuesta del cultivo de banano a dosis crecientes de Si, para determinar el efecto nutricional 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 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), con una estación seca de mayo a diciembre y una estación lluviosa de enero a abril (Morán-Tejeda *et al.* 2016). 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 4 tratamientos y 4 repeticiones. Las dosis evaluadas fueron: 0; 250; 500 y 750 $\text{cm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en referencia a las dosis aplicadas dentro del mercado. Se aplicaron las dosis con una frecuencia mensual. Se seleccionaron de 3 a 5 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 Ballesteros 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 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 en forma de superfosfato triple (46% de P_2O_5); 64 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de CaO (23% CaO) y 60 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de SO_4 en forma de sulfato cálcico (18% SO_4) (Villaseñor-Ortiz *et al.* 2022). Durante el ensayo se aplicaron todas las prácticas agronómicas que requiere el cultivo como el deshierbe, control de malezas, apuntalamiento, enfunde, deshoje fitosanitario, riegos y limpieza de canales de drenaje; según las recomendaciones de Galán Saúco *et al.* (2010).

Muestreo foliar y de raíces. Se recolectaron muestras foliares de 3 a 5 plantas centrales en cada UE. La recolección de las hojas se realizó al momento de la emergencia de la inflorescencia con el procedimiento propuesto por Martin-Prevel (1987) mediante el método MEIR se colectó 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 2 porciones se evaluó el nivel de clorofila con el dispositivo de medición portátil Minolta SPAD-502 Plus, con el cual se realizaron 3 tomas en ambos lados de hoja de la nervadura central, y se registró el dato promedio calculado por el mismo equipo en unidades de $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$.

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. 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 3 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 13 500 cm^3 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 Vargas (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 manejo el programa SPSS Statistic 26 desarrollado por IBM (1968) para el análisis de datos.

Para medir la relación entre los 4 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 a partir de la asignación de 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 varianza de la aplicación de los tratamientos de Si foliar sobre 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 $\text{cm}^3.\text{ha}^{-1}$ respectivamente (Tabla 1). La dosis de Si de 500 $\text{cm}^3.\text{ha}^{-1}$ generó la media más alta de Si foliar, que presenta diferencias estadísticas significativas (p valor = 0,007) al compararla con las demás dosis.

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 ($\text{cm}^3.\text{ha}^{-1}$) | SPAD ($\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$) | 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 diferencias significativas por medio de las pruebas post-hoc de Duncan al 5% de probabilidad. SPAD = Nivel de clorofila ($\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$). Si-f = Silicio foliar (%).

Los resultados que se obtuvieron de clorofila (Tabla 1) determinaron que la aplicación de una dosis de Si de 500 $\text{cm}^3.\text{ha}^{-1}$ generó la media más alta de clorofila (56,16 $\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$) diferenciándose significativamente del resto de dosis que registraron valores inferiores a la media general (53,33 $\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$). 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.

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 ($\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$) | Ecuación | R ² | y max ^{NC} (SPAD en $\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$) | x max (Dosis de Si en $\text{cm}^3.\text{ha}^{-1}$) |
|---------------------------------------|---|--------------------|--|---|
| Lineal ¹ | SPAD = 52,19125 + 0,0027Si | 0,04 ^{ns} | 54,22 | 750 |
| Cuadrática ² | SPAD = 51,035 + 0,017x - 0,000019Si ² | 0,11 ^{ns} | 54,84 | 447,37 |
| Cubica ³ | 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 ($\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$).

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 Del Pozo (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.

En la Tabla 3, se muestran los análisis de varianza 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, en promedio, el porcentaje de raíces vivas (77,20%) en la aplicación de la dosis de 500 cm³.ha⁻¹ se encontraron en un rango normal (70-85%) según parámetros preestablecidos por laboratorio (Tabla 3).

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.

Estos resultados difieren con obtenidos por Lopes da Silva *et al.* (2021) en el cultivo de col, donde 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%, lo cual difiere 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.

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 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 nivel 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).

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 maxNC (Si-f en %) | x max (Dosis de Si en cm ³ . ha ⁻¹) |
|-------------------------|--|--------------------|------------------------|---|
| Lineal ¹ | Si-f = 0,22 + 0,00025Si | 0,43** | 0,41 | Si = 750 |
| Cuadrática ² | Si-f = 0,20 + 0,00049Si - 0,00000032Si ² | 0,46 ^{ns} | 0,39 | Si = 768,65 |
| Cubica ³ | Si-f = 0,22 - 0,00042Si + 0,0000032Si 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 (%).

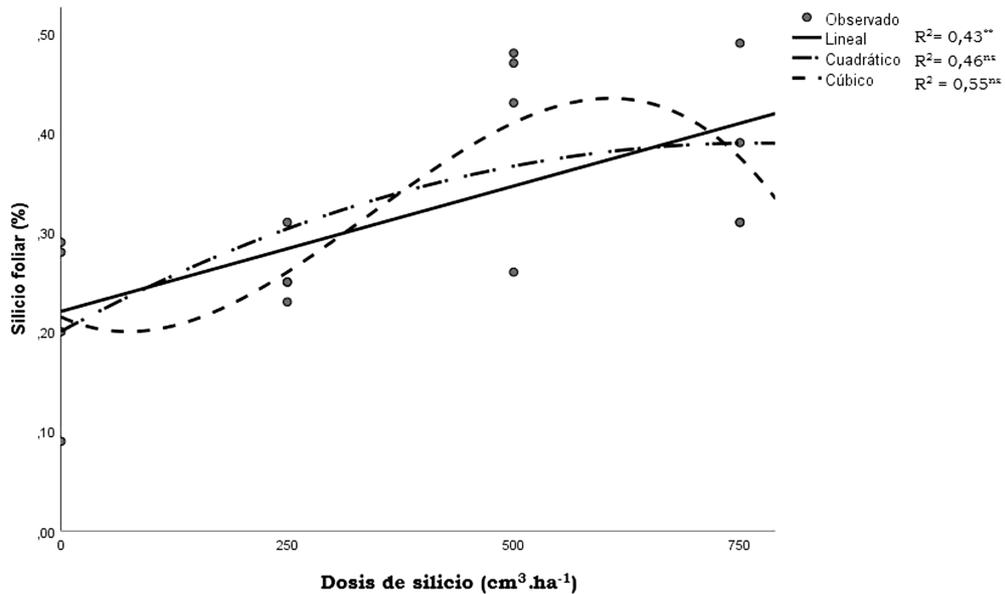


Figura 1. Correlación polinómica entre la variable independiente (dosis de silicio) y la variable dependiente (niveles de silicio foliar) en plantas de banano 'Williams Cavendish'. Machala, provincia del El Oro, Ecuador, 2023.

Pocos estudios han determinado un nivel crítico 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 nivel crítico foliar y poco precisa al momento de emplear alguna fuente de Si como nutrición complementaria del cultivo; lo que justifica la relevancia de estos resultados para futuras investigaciones.

CONCLUSIONES

Se concluye que la aplicación foliar con Si (dosis al $500 \text{ cm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) mejoró el nivel de

clorofila y el estado nutricional del cultivar de banano 'Williams Cavendish' cultivado en Ecuador. Mediante una ecuación lineal propuesta, se encontró que entre mayor sea la dosis de Si aplicada (750 cm^3) se lograra un mayor nivel de Si foliar (0,41%). 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 el establecimiento de un contenido adecuado de Si foliar a nivel nutricional.

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, KA; Mazrou, YS; Hafez, YM. 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, DJ. 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, HF; Bibi, N; Zia, Z; Abbas, S; Hammad, HM; Fahad, S; Ashraf, MR; Shah, GM; Rabbani, F; Saeed, S. 2018. Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. *Crop Protection* 104:21-34.
- Bhat, JA; Shivraj, SM; Singh, P; Navadagi, DB; Tripathi, DK; Dash, PK; Solanke, AU; Sonah, H; Deshmukh, R. 2019. Role of Silicon in Mitigation of Heavy Metal Stresses in Crop Plants. *Plants* 8(3):71.
- Bryson, GM; Mills, HA; Sasseville, DN; Jones, JB; Barker, AV. 2014. *Plant analysis handbook III: A guide to sampling, preparation, analysis, interpretation and use of results of agronomic and horticultural crop plant tissue*. Athens, GA., Micro-Macro Publishing, Incorporated. Inc. 571 p.
- 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, OA; Subirachs, JMC; Dittel, SS; Pérez, RH. 2013. Aumento del potencial productivo en caña de azúcar por aplicación de armurox® como fuente de silicio biodisponible. México. Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA):43-54.
- Castellanos González, L; de Mello Prado, R; Silva Campos, CN. 2015. El Silicio en la resistencia de los cultivos. *Cultivos Tropicales* 36:16-24.
- Chamba, LMA; Montoya, ANC; Granda, ADCV; Quezada, TXS. 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.
- de Souza Ferraz, RL; de Macêdo Beltrão, NE; de Melo, AS; Magalhães, ID; Fernandes, PD; do Socorro Rocha, M. 2014. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silicio foliar. *Semina: Ciências Agrárias* 35(2):735-748.
- dos Santos Sarah, MM; de Mello Prado, R; de Souza Júnior, JP; Teixeira, GCM; dos Santos Duarte, JC; de Medeiros, RLS. 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, JC; Tomer, E; Daniells, JW. 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(1):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, JD. 2012. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 32(1):201-213.
- 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*. (programa informático). New York, United States of America.
- Lopes da Silva, DL; de Mello Prado, R; Tenesaca, LFL; da Silva, JLF; Mattiuz, BH. 2021. Silicon attenuates calcium deficiency by increasing ascorbic acid content, growth and quality of cabbage leaves. *Scientific reports* 11(1):1770.
- 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.
- 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, VV; Calvert, DV. 2002. Silicon as a beneficial element for sugarcane. *Journal American Society of Sugarcane Technologists* 22(2):21-30.
- Melo, GW; Rozane, DE; 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. Acta Horticulturae* 1217(55):423-430.
- Morán-Tejeda, E; Bazo, J; López-Moreno, JI; Aguilar, E; Azorín-Molina, C; Sanchez-Lorenzo, A; Martínez, R; Nieto, JJ; Mejía, R; Martín Hernández, N; Vicente-Serrano, SM. 2016. Climate trends and variability in Ecuador (1966–2011). *International Journal of Climatology* 36(11):3839-3855.
- Moyano Del Pozo, BE. 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. 136 p.
- Petsakos, A; Prager, SD; Gonzalez, CE; Gama, AC; Sulser, TB; Gbegbelegbe, S; Kikulwe, EM; 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; Gómez, G; Bermeo, A; Segovia, A. 1995. Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos. In Pourrut, P (ed.). *El Agua en el Ecuador*. Quito, Ecuador, Corporación Editora Nacional. p. 7-12.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 14th ed. Washington, U.S.A., USDA-NRCS.
- Soto Ballesteros, M. 2014. *Bananos I: conceptos básicos* (N°. F01/7273). Cartago, Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 338 p.
- Taylor, AL; Loegering, WQ. 1953. Nematodes associated with root lesions in abacá. *Turrialba* 3(1/2):8-13.
- Tubaña, BS; Babu, T; Datnoff, LE. 2016. A Review of Silicon in Soils and Plants and Its Role in US Agriculture. *Soil Science* 181(9/10):393-411.
- Tubaña, BS; Heckman, JR. 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.
- Vásquez Orozco, R. 2017. El impacto del comercio del Banano en el desarrollo del Ecuador. *Revista Afese* 53:167-182.
- Villaseñor-Ortiz, D; De Mello Prado, R; Luna-Romero, E; Jaramillo-Aguilar, E; Agurto-Rodriguez, L. 2022. Critical nitrogen and potassium levels and sufficiency ranges for banana cultivation in Ecuador. *Fruits* 77(1):1-8.