

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Ingeniería Agronómica



Proyecto Especial de Graduación
Efecto de cinco niveles de fertilización con silicio
en la absorción de fósforo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea*
***mays* L.)**

Estudiantes

Carlos Anibal del Cid Santos

Oscar Daniel León González

Asesores

Ricardo Alexander Peña Venegas, Ph.D.

Renan Pineda Mejía, Ph.D.

Honduras, agosto 2023

Autoridades

SERGIO ÁNDRES RODRIGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

CELIA O. TREJO RAMOS

Directora Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros	5
Índice de Figuras	6
Índice de Anexos	8
Resumen	9
Introducción	11
Materiales y Métodos	14
Localización del Experimento	14
Diseño y Establecimiento del Experimento	15
Fraccionamiento de las Dosis de Silicio	17
Fertilización	18
Control de Malezas	18
Control de Plagas y Enfermedades	19
Riego	19
Variables Medidas.....	19
Materia Seca, Fósforo y Silicio Absorbido.....	19
Productividad	20
Número de Granos por Mazorca	21
Peso del Raquis	21
Volumen de Raíz	21
Variables de Crecimiento Durante el Ciclo de Cultivo	21
Altura de Planta	21
Diámetro de Tallo	21
Tasa de Crecimiento.....	21
Análisis Estadístico	21
Modelo Estadístico.....	22

Resultados y Discusión.....	23
Contenido de Materia Seca a los 70 Días Después de la Siembra	23
Absorción de Silicio y Fósforo a los 70 días Después de la Siembra	24
Crecimiento del Cultivo.....	25
Volumen Radicular y Materia Seca a la Cosecha	27
Absorción de Silicio y Fósforo a los 120 Días Después de la Siembra.....	28
Absorción de Fósforo y Materia Seca en Mazorca a los 120 Días Después de Siembra.....	29
Productividad	30
Correlación Entre Contenido de Si, P y el Diámetro del Tallo a los 70 DDS.....	32
Correlación Entre Contenido de Si, P, Granos por Mazorca y Materia Seca a los 70 DDS	34
Correlación Entre Rendimiento y Altura de la Planta, Si, P, Granos por Mazorca (n°) en Plantas de Maíz a los 120 DDS.....	36
Conclusiones	39
Recomendaciones	40
Referencias.....	41
Anexos.....	48

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Descripción del testigo y los cuatro tratamientos con SiO ₂ utilizados para la evaluación en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.	18
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Índice de Figuras

Figura 1 Ubicación del experimento con distintas dosis de fertilización de SiO ₂ , dónde se realizó la siembra del cultivo de maíz Tuxpeño, área delimitada en rojo, del lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.	14
Figura 2 Croquis del establecimiento del experimento con distintas dosis de fertilización con SiO ₂ en bloques completos al azar y la distribución de los 4 tratamientos, el testigo y las 3 repeticiones en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.....	16
Figura 3 Efecto de las dosis de fertilización con SiO ₂ en la producción de materia seca (g. planta ⁻¹) en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 70 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.	23
Figura 4 Efecto de las dosis de fertilización con SiO ₂ en la absorción de silicio (a) y fósforo (b) expresada en mg. planta ⁻¹ en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 70 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.....	25
Figura 5 Efecto de las dosis de fertilización con SiO ₂ en las variables de crecimiento, altura de la planta cm(a), diámetro mm. planta ⁻¹ (b), tasa de crecimiento cm. día ⁻¹ (c) en el cultivo de maíz tuxpeño a los 100 después de siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.	26
Figura 6 Efecto de las dosis de fertilización con SiO ₂ en el volumen radicular expresado en cm ³ (a) y en la producción de materia seca (g. planta ⁻¹) (b) en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 120 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.....	28
Figura 7 Efecto de las distintas dosis de fertilización con SiO ₂ en absorción de silicio (a) y fósforo (b) expresado en mg. planta ⁻¹ en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 120 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.....	29
Figura 8 Efecto de las distintas dosis de fertilización con SiO ₂ en la absorción de fósforo(a) y la producción de materia seca expresada en g. planta ⁻¹ (b) en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 120 días	

después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.....	30
Figura 9 Efecto de las distintas dosis de fertilización con SiO_2 en el rendimiento (kg. ha^{-1}) (a), en el número de granos por mazorca (b) y en el peso de raquis por mazorca en plantas de maíz Tuxpeño a los 120 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.	32
Figura 10 Correlación entre la absorción de silicio y fósforo (mg. planta^{-1}) (a); relación del diámetro del tallo (mm. planta^{-1}) con el silicio (mg. planta^{-1}) (b) y fósforo absorbido (c), en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 70 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.	34
Figura 11 Correlación del contenido de materia seca (g. planta^{-1}) en función de las de las variables de fósforo absorbido (mg. planta^{-1}) (a), silicio absorbido (mg. planta^{-1}) (b) y el número de granos por mazorca (d) en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 120 después de siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.	36
Figura 12 Correlación del rendimiento (kg. ha^{-1}) con las variables de altura de la planta (cm), silicio absorbido (mg. planta^{-1}) y el número de granos por mazorca (n°) en plantas de maíz tuxpeño a los 120 después de siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.....	38

Índice de Anexos

Anexo A Nutrientos extraídos por tonelada de maíz (<i>Zea mays</i> L.) producido por Bertsch (2009). .48	48
Anexo B Análisis de suelo del Lote 7, Zona 2, realizado en el laboratorio de Suelos, EAP Zamorano, Honduras.....	49
Anexo C Gráfica de curva de absorción de fósforo total, raíz, follaje y mazorca en maíz (<i>Zea mays</i> L.).	50
Anexo D Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en la materia seca de las plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) a los 70 días después de siembra.	51
Anexo E Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en el contenido de Si y P absorbido por las plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) a los 70 días después de siembra.	52
Anexo F Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en la altura, diámetro y tasa de crecimiento de las plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) a los 100 días después de siembra.....	53
Anexo G Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en volumen radicular y materia seca en las plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) a los 120 días después de siembra.	54
Anexo H Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en el contenido de Si y P absorbido en las plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) a los 120 días después de siembra.	55
Anexo I Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en el contenido de P absorbido y materia seca las plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) a los 120 días después de siembra.....	56
Anexo J Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en el rendimiento, granos por mazorca y peso del raquis en las plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) a los 120 días después de siembra.	57

Resumen

El maíz es el tercer cultivo con mayor área sembrada, posee un alto impacto agropecuario, industrial y nutricional a nivel mundial. El fósforo(P) es un nutriente clave en el maíz, que requiere en altas cantidades disponible en la solución del suelo. La eficiencia del P en cereales es baja, por lo tanto, es indispensable el uso de alternativas como la aplicación de silicio (Si), lo cual ha demostrado que aumenta los niveles de fósforo disponible en la solución del suelo contribuyendo en la productividad. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto en la absorción de P y rendimiento en maíz. Se estableció un experimento con cinco tratamientos, cuatro niveles de fertilización con Si y un testigo sin fertilización (0 L. ha⁻¹, 0.75 L. ha⁻¹, 1.5 L. ha⁻¹, 2.25 L. ha⁻¹, 3 L. ha⁻¹). Los tratamientos se dispusieron en un diseño de bloques completos al azar (BCA), con tres repeticiones, para un total de quince unidades experimentales (UE) en un área de 453.6 m². Se observó que la fertilización con silicio no incrementó la absorción de P y Si en maíz, además de no mostrar un efecto significativo en parámetros de rendimiento y crecimiento. Sin embargo, se evidenciaron diferencias significativas en el parámetro productivo del peso del raquis a dosis de 0.75 L. ha⁻¹, 1.5 L. ha⁻¹, 2.25 L. ha⁻¹ de Si. Se presentaron relaciones fuertemente positivas en las variables de crecimiento y rendimiento, evidenciando que a una mayor absorción de Si en el tejido, existió una mayor absorción de P.

Palabras clave: absorción, disponibilidad, fósforo, productividad, rendimiento, silicio.

Abstract

Corn is the third crop with the third largest planted area and has a high agricultural, industrial, and nutritional impact worldwide. Phosphorus (P) is a key nutrient in corn, which requires high amounts available in the soil solution. Phosphorous efficiency in cereals is low, therefore, it is essential to use alternatives such as silicon (Si) application, which has been shown to increase the levels of available phosphorus in the soil solution, contributing to productivity. The objective of this study was to determine the effect on P uptake and yield in corn. An experiment was established with five treatments, four levels of Si fertilization and a control without fertilization (0 L. ha⁻¹, 0.75 L. ha⁻¹, 1.5 L. ha⁻¹, 2.25 L. ha⁻¹, 3 L. ha⁻¹). The treatments were arranged in a randomized complete block design (BCA), with three replications, for a total of fifteen experimental units (EU) in an area of 453.6 m². It was observed that silicon fertilization did not increase P and Si uptake in corn and did not show a significant effect on yield and growth parameters. However, there were significant differences in the productive parameter of rachis weight at doses of 0.75 L. ha⁻¹, 1.5 L. ha⁻¹, 2.25 L. ha⁻¹ of Si. There were strongly positive relationships in the growth and yield variables, showing that the higher the Si absorption in the tissue, the higher the P absorption.

Key words: absorption, availability, phosphorus, productivity, silicon, yield.

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos con mayor área sembrada, ocupando el tercer lugar a nivel global (Schafer 2022). Este cultivo de origen mesoamericano ha tenido un alto impacto en los sectores agropecuario e industrial por su amplia demanda, tanto para nutrición humana como animal, siendo una de las principales fuentes de carbohidratos (Guamán Guamán et al. 2020). Alrededor del mundo, más de 170 regiones cultivan esta planta, destacándose Estados Unidos, China, Brasil, Ucrania, Argentina, México Indonesia e India, como los mayores productores (Wang y Hu 2021). Por la alta demanda global y las mejoras en los sistemas de producción, el maíz en grano seco ha alcanzado los 1.137 millones de toneladas (Mt) a nivel mundial (Erenstein et al. 2022). Esta alta demanda señala la necesidad de mejorar los planes de fertilización y aumentar la eficiencia en la absorción de nutrientes para el desarrollo de la planta.

El maíz requiere de macronutrientes y micronutrientes esenciales para su desarrollo fisiológico; ciclos metabólicos, productivos y reproductivos (Naeem et al. 2020). El balance en la disponibilidad de nutrientes en el suelo y la planta es indispensable para obtener altos rendimientos. El crecimiento y desarrollo de los cultivos están determinados en gran medida por la disponibilidad y sinergia de nutrientes. Por lo tanto, para garantizar una mejor productividad, desarrollo vegetal y altos rendimientos se necesita conocer la dinámica de nutrientes en la relación suelo-planta, transporte, formas de absorción y asimilación de estos (Wawrzyńska y Sirko 2014).

Uno de los macronutrientes más importantes es el fósforo (P). Es esencial en el tejido vegetal debido a que participa en diferentes rutas metabólicas, siendo componente esencial de las células, ácidos nucleicos y moléculas de potencial energético, como el ADN, ARN y ATP (Tapia Torres y García Oliva 2013). Además, es un nutriente necesario para diversos procesos celulares como la fotosíntesis y el metabolismo de los carbohidratos (Kumar S et al. 2021). Al ser el P un elemento relevante para la nutrición vegetal, una de las problemáticas que se presentan en las producciones agrícolas es la baja disponibilidad y movilidad de este. La inmovilización del P se puede dar por la adsorción de los iones de P por hidróxidos de aluminio (Al) y hierro (Fe), lo cual limita la productividad de los cultivos en

suelos tropicales (Nowaki RH. D. et al. 2017); al igual que suelos derivados de ceniza volcánica que se caracterizan pH ácidos y ricos en minerales amorfos como las alófanas (Bravo et al. 2013).

La disponibilidad de P en el suelo es un parámetro clave en los sistemas de producción de cultivos, debido que, plantas con un rápido desarrollo y ciclo corto como el maíz (*Zea mays* L.) necesitan de mayores cantidades P en solución y una reposición más rápida del fósforo absorbido por la planta, en comparación con los cultivos perennes (Lino et al. 2018). Sin embargo, la mayor proporción de P utilizado para la producción de cultivos cereales se pierde por la baja eficiencia en su uso, siendo la aplicación de fertilizantes uno de los costos de producción más altos (Pereira et al. 2020). Por ende, se deben buscar alternativas que permitan mejorar la eficiencia en el uso de P.

La nutrición vegetal y el adecuado manejo de los fertilizantes ha sido uno de los aspectos más estudiados en el camino de aumentar la productividad en los sistemas productivos. La manufactura de nuevos fertilizantes e integración de ingredientes activos y elementos químicos que ayuden a la mejora en la disponibilidad de nutrientes ha impulsado un aumento en la productividad de los cultivos. En el caso del P utilizado por los cereales a nivel mundial, la eficiencia es muy baja, oscilando entre el 15 y 30% (Dhillon et al. 2017); quiere decir que cada 100 kg de P aplicado, la planta únicamente aprovecha 15 – 30 kg. Debido a esto, la optimización de fertilizantes y la comprensión de la interacción de los elementos es indispensable para el desarrollo y planificación de los cultivos, especialmente maíz.

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y ocupa más del 30% de los minerales del suelo; mientras que su concentración en la solución del suelo en forma de ácido monosilícico (H_4SiO_4) oscila entre 0.1 y 0.6 mM (Yan et al. 2018). La fertilización con Si es una de las alternativas más recientes para mejorar la productividad agrícola. Esto se debe a que mejora la tolerancia al estrés biótico y abiótico, incluido el estrés generado por la baja disponibilidad de nutrientes (Amin et al. 2018).

La aplicación de Si sugiere un aumento en la disponibilidad de nutrientes en la rizosfera y en la absorción por parte de las raíces a través de mecanismos fisiológicos (Pavlovic et al. 2021). Es

conocido que el uso del Si y adopción de este elemento en planes de fertilización es prometedor para producciones sostenibles; además del control de patógenos ha demostrado mejorar el desarrollo y los rendimientos de cultivos extensivos (Etesami y Jeong 2019).

Según Schaller et al. (2022), la adición de Si ha ayudado significativamente en el aumento de P disponible para la planta en suelos con altas concentraciones del elemento, pero el efecto puede variar dependiendo del horizonte. De igual manera, la adsorción del P a minerales del suelo es baja al estar asociada a silicatos. La presencia y asociación de P al Si, disminuye la cantidad de hidróxidos de Fe y Al en el suelo, lo que da paso a mayor P disponible para la planta (Schaller et al. 2022). Según Neu et al. (2017), la aplicación de Si en concentraciones moderadas pueden aumentar efectivamente los rendimientos de granos y aumentar la eficiencia en el uso de fertilizantes.

El uso de Si puede ser una alternativa para aumentar la solubilización del fósforo en el suelo, y por ende su disponibilidad para la planta, aumentando así la eficiencia en el uso de fertilizantes, particularmente en cultivos de ciclo corto como el maíz, que tienen una alta demanda de nutrientes. Por esta razón, el objetivo de este estudio fue evaluar la aplicación de cuatro niveles de fertilización con silicio y su efecto en la absorción de fósforo y rendimiento del cultivo de maíz Tuxpeño.

Materiales y Métodos

Localización del Experimento

El estudio se desarrolló entre noviembre del 2022 y marzo del 2023, en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano ($14^{\circ}00'28''$ latitud norte y $86^{\circ}59'5''$ longitud oeste), ubicada en el Km 30 Carretera de Tegucigalpa a Danlí, Valle de Yeguaré, San Antonio de Oriente, Francisco Morazán, Honduras (Figura 1). Las condiciones presentes en la zona son: altitud de 800 msnm, precipitación de $1,100 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ y una temperatura promedio de 26°C .

Figura 1

Ubicación del experimento con distintas dosis de fertilización de SiO_2 , dónde se realizó la siembra del cultivo de maíz Tuxpeño, área delimitada en rojo, del lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.



El suelo del lote del experimento presentó textura Franco arenosa (FA) de 0-43 cm, estructura en bloques subangulares, tamaño medio y grado moderado; consistencia en húmedo friable, resistencia a la penetración de $0.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ a los 0-23 cm y $2 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ a los 23-43 cm de profundidad

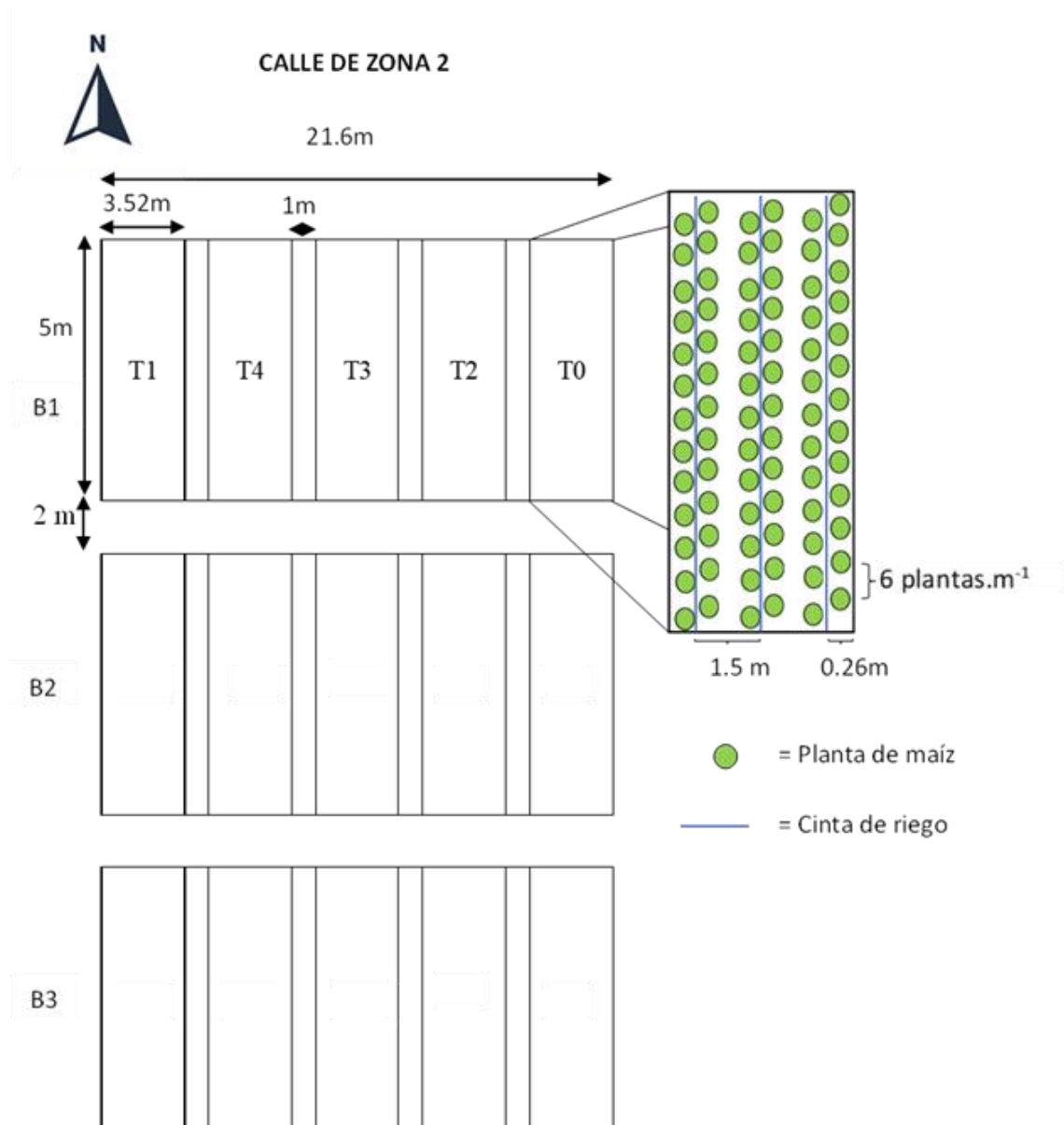
(Elvir Coello 2016). El suelo presentó a su vez, un pH de 6.05 y un porcentaje de materia orgánica del 1.02 (Anexo B).

Diseño y Establecimiento del Experimento

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar (BCA) (Figura 2), esto debido a la heterogeneidad intrínseca de los suelos que representó una fuente de variación para la evaluación, por tanto, al utilizar este diseño se disminuye el error experimental y se aumenta la precisión. El experimento estuvo compuesto de 3 bloques, los cuales, representaban a su vez, las repeticiones. El área experimental fue de 453.6 m². Las unidades experimentales (UE) contaron con dimensiones de 3.52 m × 5 m, para un área total de 17.6 m² por cada una. Esto se tradujo a 180 plantas. UE⁻¹ (Figura 2), se contó con un total de 15 unidades experimentales.

Figura 2

Croquis del establecimiento del experimento con distintas dosis de fertilización con SiO_2 en bloques completos al azar y la distribución de los 4 tratamientos, el testigo y las 3 repeticiones en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.



La siembra se efectuó el 18 de noviembre del año 2022, bajo un sistema de siembra convencional utilizando como semilla la variedad sintética de maíz Tuxpeño. El distanciamiento de siembra se realizó a doble hilera con un distanciamiento de 1.5 m entre líneas de riego por goteo y 0.1667 m entre plantas, con una densidad 80,000 plantas. ha⁻¹.

Fraccionamiento de las Dosis de Silicio

Se evaluaron cuatro niveles de fertilización con dióxido de silicio (SiO₂) (0.75 L. ha⁻¹, 1.5 L. ha⁻¹, 2.25 L. ha⁻¹, 3 L. ha⁻¹), siendo la dosificación de 1.5 L. ha⁻¹ la recomendada por el fabricante (cuadro 2). Las aplicaciones se efectuaron por medio de aplicaciones al *drench*, en la base de la planta cubriendo el sistema radicular. El número de aplicaciones y el momento se seleccionaron en base a la curva de absorción de P en maíz realizada por Fallas et al. (2011)(Anexo C), en la cual se determinaron los momentos críticos de absorción para este elemento. La primera aplicación se realizó a los 0 días después de siembra (DDS), ya que en sus primeras etapas, el maíz debe tener P disponible para el inicio de la absorción por parte su sistema radicular e inicios de su desarrollo foliar (Fallas et al. 2011); la segunda aplicación a los 20 DDS, se sustenta en el incremento significativo en la absorción de P por parte del follaje y el pico de absorción alcanzado por la raíz en los días posteriores(36-45 DDS), por lo que la planta debe poseer la capacidad de suplir estos requerimientos en el momento correcto; la tercera a los 35 DDS, se justifica en apoyar el pico de absorción de P por parte del follaje que se presenta desde los 45 hasta los 60 DDS alcanzando su máximo de absorción a los 59 DDS; por ende, la planta debe poseer P en solución suficiente para satisfacer esta demanda; la cuarta aplicación a los 50 DDS, suple la demanda de P soluble dada por las exigencias nutricionales de la mazorca en desarrollo a los 70 DDS, así como, un sistema radicular que inicia una segunda etapa de crecimiento, y por tanto, también el requerimiento del elemento, el cual la planta no es capaz de satisfacer únicamente con la movilización de P dentro de sus tejidos.

Cuadro 1

Descripción del testigo y los cuatro tratamientos con SiO₂ utilizados para la evaluación en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.

No. de tratamiento	Dosis L. ha ⁻¹
T0	0
T1	0.75
T2	1.50
T3	2.25
T4	3.00

Preparación del Terreno

Se realizó una mecanización previa a la siembra del lote, esto para eliminar la compactación presente e incrementar el espacio poroso del suelo y permitir así un adecuado desarrollo radicular de las plantas.

Fertilización

La fertilización base de las unidades experimentales (UE) se desarrolló de forma tradicional, con aplicaciones de fertilizante granulado en banda. El cálculo de fertilización se realizó en base a la extracción de nutrientes por tonelada de maíz producido, estimado para un promedio esperado de 11 ton. ha⁻¹, dado el potencial de rendimiento de la variedad sintética y el balance de nutrientes aportados por el suelo (Anexo A y B). La primera aplicación se realizó al momento de la siembra, con aplicaciones de 55 kg ha⁻¹ N, 55 ha⁻¹ P y 41.8 kg. ha⁻¹ K; la segunda a aplicación se efectuó a los 24 DDS con 110 kg. ha⁻¹ N, 83.6 kg. ha⁻¹ K, 20.7 kg. ha⁻¹ Ca y 32.1 kg. ha⁻¹ Mg; la tercera aplicación se realizó a los 40 DDS con de 110 kg. ha⁻¹ N, 83.6 kg. ha⁻¹ K, 20.6 kg. ha⁻¹ Ca y 32.1 kg. ha⁻¹ Mg, de igual forma para todos los tratamientos, únicamente variando los distintos niveles de Si utilizados.

Control de Malezas

El control de malezas se realizó de forma mecánica, cada 20 días entre desmalezado hasta los 80 DDS.

Control de Plagas y Enfermedades

Se realizaron dos aplicaciones para control de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) con el insecticida EXALT® (spinetoram). En la etapa VT se realizaron tres aplicaciones preventivas con un intervalo de siete días entre cada una, con el fungicida PRONTO®50 WP (benomil) para el control de mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*, *Monographella maydis* y *Coniothyrium phyllachorae*), tizón foliar (*Helminthosporium turcicum*) y roya (*Puccinia sorghi*) junto al insecticida KARATE®(lambdacialotrina) para prevención de barrenador del tallo (*Diatraeae sp.*). Posterior a esto, se realizó una aplicación de ENGENO® (thiametoxam, lambda cyalotrina) para el control del gusano elotero (*Helicoverpa zea*).

Riego

Se utilizó un sistema de riego por goteo en el cultivo, el cual consistió en la instalación de una cinta de riego de la marca Azud Sprint® por surco, con un caudal de 1.22 L/hora. Se realizaron riegos tres días por semana, con un tiempo aproximado de 3 horas por día.

Variables Medidas

Materia Seca, Fósforo y Silicio Absorbido

Se evaluó mediante la determinación del peso materia seca (MS) del tejido vegetativo por planta y por unidad experimental (UE), posteriormente se seleccionó una muestra compuesta y se determinó la concentración de P en el laboratorio de suelos de Zamorano. La absorción de P y Si por planta se cuantificó en base al peso de la MS en relación con la concentración de P presente, utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Absorción de P (mg. planta}^{-1}\text{)} = (\text{PMS} \times \%P) / 100 \quad [1]$$

El muestreo para determinar la MS por planta se realizó de la siguiente manera: se tomaron cinco plantas por unidad experimental. Las muestras se recolectaron mediante una selección sistemática en zig-zag en las dos hileras centrales de la unidad experimental, estas consideradas como la unidad observacional. Posteriormente se trasladaron las muestras de tejido/planta al laboratorio para medir: peso fresco por planta y MS. planta⁻¹. El contenido de P y Si (mg. planta⁻¹) por UE, se calculó

utilizando la MS. planta⁻¹ y la concentración (%) de P y Si en el tejido, obteniendo como resultado la absorción de cada elemento promedio por planta en la UE.

La evaluación se efectuó a los 70 DDS, debido que, en esta etapa la planta alcanza la máxima acumulación de P en sus tejidos vegetativos (Fallas et al. 2011) . Un segundo muestreo se realizó a los 120 DDS, esta vez diferenciando tejido y mazorca, con el fin de determinar el contenido de P y Si mg. planta⁻¹ en el tejido en etapa de cosecha, así como el P mg. planta⁻¹ movilizadado al grano.

Productividad

Se evaluó el rendimiento en kg. ha⁻¹. Se calculó en base del peso de la semilla de cinco mazorcas por cada unidad experimental con una humedad del grano del 12%; se extrapoló el rendimiento de la unidad experimental a una hectárea utilizando la densidad de siembra de 80,000 plantas. ha⁻¹, siendo esta igual para todas las UE.

Proceso para Llevar el Rendimiento a la Humedad Óptima.

Se determinaron los datos productivos en madurez fisiológica del cultivo, cómo lo es el peso de la mazorca, el cual se determinó al utilizar cinco mazorcas por UE, según los establecido por Hernández Galván (2019), al igual que el peso de la semilla, determinados por el desgrane de cinco mazorcas, tomando el peso de las semillas; se midió la humedad inicial de las muestras obtenidas, utilizando un medidor de humedad digital y posteriormente se efectuó el ajuste de humedad al 12% ,mediante la siguiente ecuación (Remache et al. 2017):

$$Pf = \frac{Pi(100-Hi)}{(100-Hf)} \quad [2]$$

En donde:

Pf: peso final con la humedad a la que se debe llevar(g)

Pi: peso inicial de la semilla del muestreo(g)

Hi: humedad inicial de la semilla (%)

Hf: Humedad a la se debe de ajustar el peso (%)

Número de Granos por Mazorca

Se seleccionaron cinco mazorcas por unidad experimental, de estas se determinó el número hileras y se contó el número de granos de una hilera representativa de la mazorca. Para determinar el número total de granos por mazorcas, se multiplicó el número de hileras por el número de granos por hilera.

Peso del Raquis

Se pesaron los raquis de 5 mazorcas desgranadas por unidad experimental.

Volumen de Raíz

Se tomó una raíz por unidad experimental y se procedió a escanear las raíces, para posteriormente ingresarlos en el software WinRhizo®, para procesar las muestras y obtener los resultados del volumen de las raíces.

Variables de Crecimiento Durante el Ciclo de Cultivo***Altura de Planta***

Para medir la altura de planta se seleccionaron seis plantas al azar de cada unidad experimental, se tomó la distancia (cm) desde la base del suelo hasta la inserción de la espiga a los 100 DDS.

Diámetro de Tallo

Se midió en diámetro(mm) mediante el uso de un pie de rey, medido a la altura de la terminación del primer anillo de raíces a los 100 DDS.

Tasa de Crecimiento

Se estimó la tasa de crecimiento de las plantas de maíz mediante la división de la altura dividido 100. La tasa de crecimiento del cultivo se basa en medir la ganancia de altura de un cultivo por unidad de área de suelo y en una unidad de tiempo (Aguilar Carpio et al. 2015).

Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó por medio de software estadístico InfoStat versión 2020. La evaluación de las premisas del modelo se efectuó con los siguientes análisis: se determinó la

normalidad de los datos mediante la prueba de normalidad por Shapiro-Wilks, la homocedasticidad se comprobó mediante la prueba de Bartlett y Levene, bajo los supuestos el muestreo ideal, los términos del error se suponen independientes y normalmente distribuidos, las desviaciones de la media cero. Una vez cumplidas todas las premisas, se procedió a realizar un ANDEVA de las variables medidas; posteriormente se realizó una separación de medias de Duncan. Además, se efectuó un análisis de correlación de Pearson para las variables.

Modelo Estadístico

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad [3]$$

Donde:

Y_{ij} : Variable de respuesta

μ : Corresponde a la media poblacional del estudio.

T_i : Efecto del i-ésimo tratamiento.

β_j : Efecto del j-ésimo bloque

ε_{ij} : Error experimental en la unidad j del tratamiento.

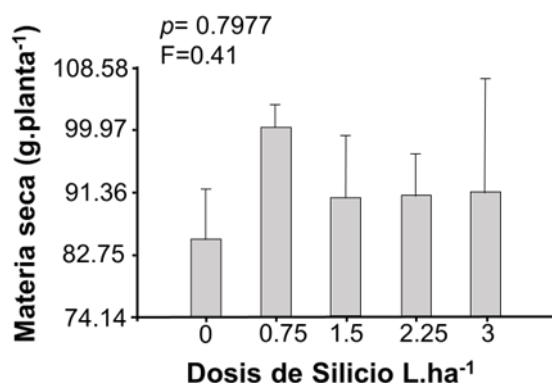
Resultados y Discusión

Contenido de Materia Seca a los 70 Días Después de la Siembra

A los 70 días después de la siembra (DDS) la materia seca de las plantas de maíz no mostró ninguna variación en respuesta a las distintas dosis de fertilización con silicio aplicadas (Figura 3 y Anexo D). Este resultado es consistente con los hallazgos de Janislampi (2012), quien en su estudio evaluó la fertilización de Si en maíz hidropónico a diferentes concentraciones, demostrando que no existía un efecto estadísticamente significativo en el aumento de materia seca en etapas tempranas del cultivo. Sin embargo, otras investigaciones han demostrado que el incremento de aplicaciones de SiO_2 granulado, se reflejan en un incremento de materia seca en las plantas de maíz híbrido a los 60 días después de siembra, resaltando que por lo general a mayores concentraciones de Si aplicados, mayor es la acumulación de materia seca en la planta (Jawahar et al. 2020). La diferencia en los resultados puede explicarse por el efecto ambiental, los factores bióticos y abióticos que pueden determinar el rendimiento en materia seca del maíz en las etapas del cultivo, como los son la humedad, temperatura y luz solar; además de su capacidad de absorción de Si y otros nutrientes del suelo (Bolaños Aguilar y Emile 2011).

Figura 3

Efecto de las dosis de fertilización con SiO_2 en la producción de materia seca (g. planta^{-1}) en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 70 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.

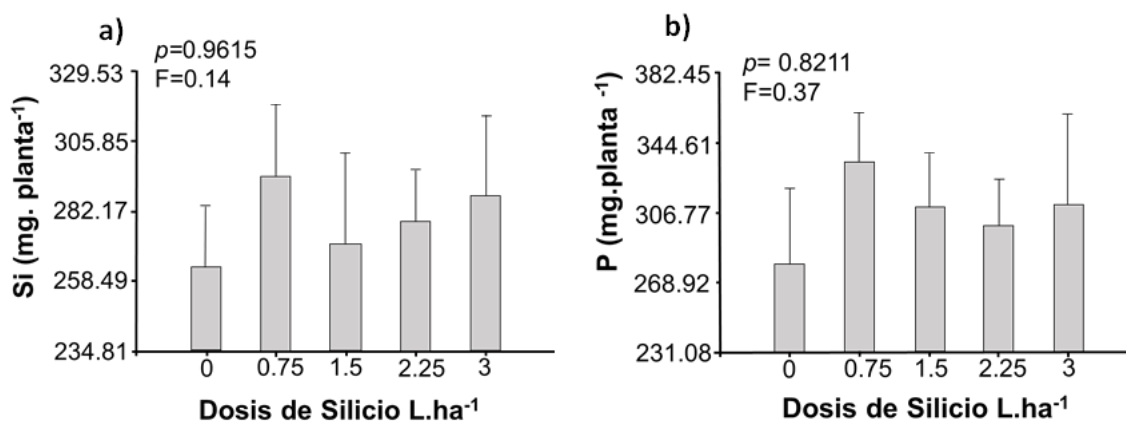


Absorción de Silicio y Fósforo a los 70 días Después de la Siembra

A los 70 DDS no se observó un efecto significativo en la absorción de Si y P como respuesta a las dosis de fertilización con silicio (Figura 4, y anexo E). Este resultado en absorción de Si puede ser explicado, dado que, existe variabilidad en los contenidos de Si dependiendo de la especie de planta evaluada, siendo las plantas con mayor capacidad de absorción las gramíneas donde se incluyen; el trigo (*Triticum spp.*), arroz (*Oryza sativa*), cebada (*Hordeum vulgare L.*) y maíz (*Zea mays*) (Sahebi et al. 2015). Según Mitani et al. (2008), la capacidad de acumulación de Si del maíz se debe a la presencia de los genes *ZmLsi1* y *ZmLsi6* que regulan la absorción y transporte en la planta. Sin embargo, la absorción de Si por medio de estos transportadores es un proceso dependiente de energía, por lo tanto, la exposición de la planta a repesores metabólicos (2,4-dinitrofenol y cianuro de potasio) y las bajas temperaturas pueden inhibir el transporte y acumulación de Si (Mitani 2005). En cuanto a la absorción de P, Lee y Kim (2007), investigaron la eficiencia de un silicato en la reducción en la adsorción P, donde demostró que la aplicación de Si puede disminuir la adsorción de P y mejorar su disponibilidad en el suelo, sin embargo, se deprimió fuertemente la adsorción de P cuando se añadió Si antes que P en comparación a ser aplicados simultáneamente. Este resultado coincide con Owino-Gerroh y Gascho (2004), quienes evidenciaron que el uso de silicato mejoró la disponibilidad de P en el suelo, por tanto, se incrementó el contenido de P y Si en el brote y la raíz en plantas de maíz, no obstante, la aplicación de únicamente P no presentó incremento en el contenido de estos elementos en los tejidos. Como se puede observar, son muchos los factores que pueden afectar la absorción de Si y P en la planta, por lo cual, es necesario realizar más investigación para entender mejor las causas de la ausencia de efectos encontrado.

Figura 4

Efecto de las dosis de fertilización con SiO_2 en la absorción de silicio (a) y fósforo (b) expresada en mg. planta^{-1} en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 70 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.



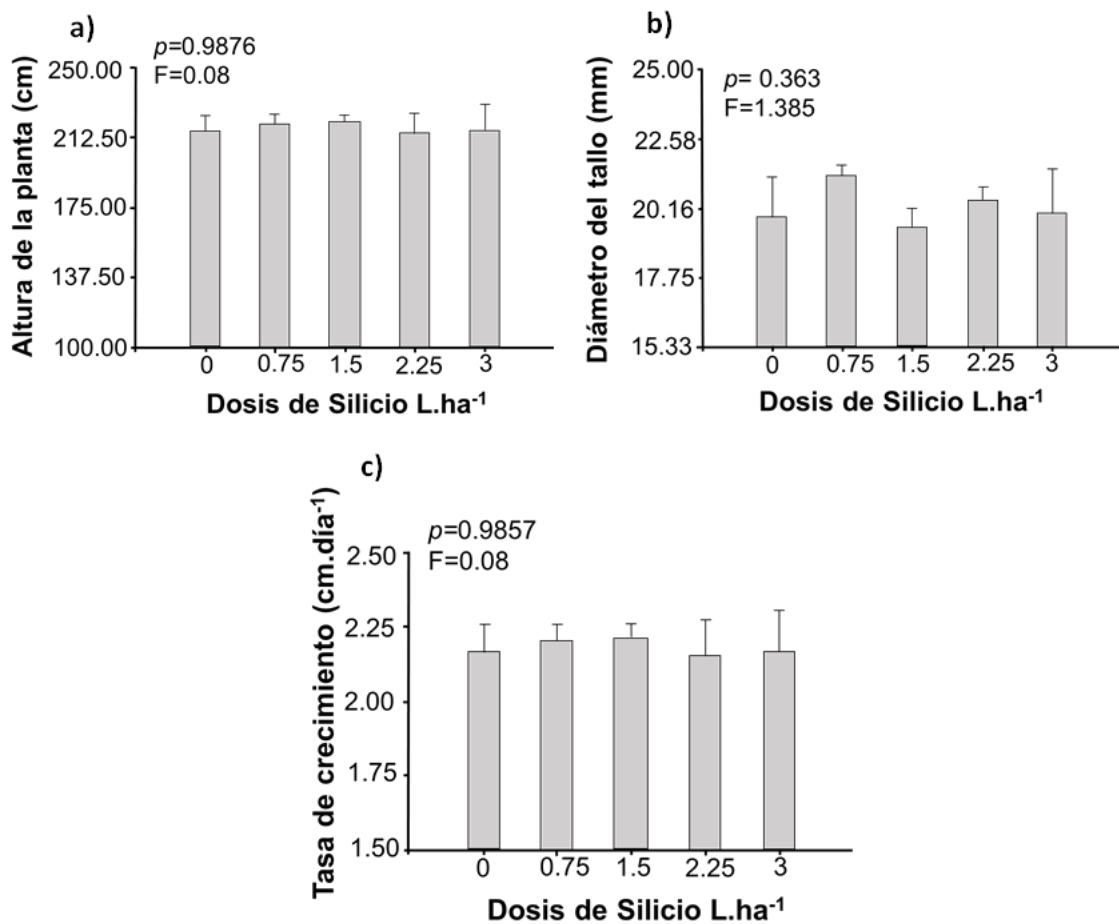
Crecimiento del Cultivo

A los 100 DDS la altura de la planta, diámetro y tasa de crecimiento del cultivo de maíz no presentaron variación en respuesta a las dosis de fertilización con silicio aplicada (Figura 5 y anexo F). La altura de planta y grosor del tallo son parámetros importantes, debido a su importancia en otros componentes del crecimiento de la planta en el tiempo o rendimiento, como lo es la tasa de crecimiento, ya que, reflejan una respuesta de la planta con respecto a la acumulación de los nutrientes que se producen durante los procesos fotosintéticos y producción de los nutrientes que son trasladados a la mazorca para realizar el llenado de semillas (Hernández Galván 2019). La investigación realizada por Naranjo Carmona y Solórzano Cuesta (2018), demostró que a mayores dosis en la aplicación de SiO_2 , se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en el aumento de la altura de la planta en el cultivo de arroz. Esto se puede deber a que la aplicación de este elemento mejora el movimiento de carbohidratos, proteínas y metabolitos secundarios en los tejidos promoviendo los procesos metabólicos en el desarrollo de estructuras como el tallo (Quero 2009). De igual manera, los resultados obtenidos en el experimento difieren también a los obtenidos por Borda et al. (2007), quien sustenta que la dosificación de 100 y 50 mg. Kg^{-1} de ácido monosilícico aumentan

la altura y grosor de los tallos en el cultivo de avena forrajera (*Avena sativa*). Sin embargo, se destaca que estos datos pueden ser influenciados en gran medida por la nutrición suministrada al cultivo en la fase vegetativa y el Si aplicado pudo tener un efecto en el balance de los nutrientes suministrados o presentes en el suelo (Pavlovic et al. 2021).

Figura 5

Efecto de las dosis de fertilización con SiO_2 en las variables de crecimiento, altura de la planta cm(a), diámetro mm. planta⁻¹ (b), tasa de crecimiento cm. día⁻¹ (c) en el cultivo de maíz tuxpeño a los 100 después de siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.

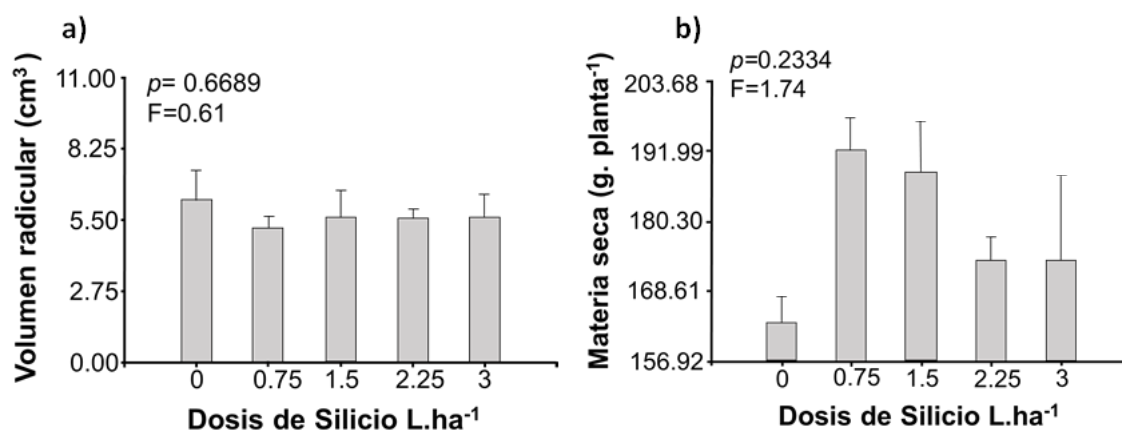


Volumen Radicular y Materia Seca a la Cosecha

A los 120 DDS no se presentó efecto de las dosis de fertilización con silicio en el volumen radicular y materia seca en las plantas de maíz (Figura 6 y anexo G). En el estudio realizado por Greger et al. (2018) , se exploraron dosificaciones de silicato de potasio (K_2SiO_3) en trigo, dónde no se evidenció un aumento en la biomasa radicular. La evaluación de ambos parámetros está ligados a la distribución de materia seca en la planta y su rol en la producción del cultivo, debido a que en la etapa R6, los rendimientos son determinados por los nutrientes absorbidos por la raíz y acumulados en los órganos de la planta que se destinan a la producción de mazorca (Amin et al. 2014). Sin embargo, estudios han demostrado que otras fuentes de Si, pueden tener efecto en los rasgos morfológicos de la raíz como lo es el aumento en la longitud, expansión de área superficial, aumento del volumen y ramificación de raíces en maíz, sorgo, arroz, trigo y cebada (Hattori et al. 2003; Vaculík et al. 2012; Ali et al. 2013; Kim YHa et al. 2014; Bijanzadeh y Egan 2018). El volumen radicular es un parámetro de importancia para el desarrollo de las plantas, esto debido a capacidad de exploración y ramificación de la raíz para una mayor asimilación de nutrientes presentes en la solución del suelo (Benavides 2011). El contenido de materia seca contenido en las plantas evaluadas, divergen al experimento realizado por Amin et al. (2014), en cuyo experimento se realizó aplicaciones con silicato de calcio a una concentración de 100 mg/kg, produciendo 21.68% más materia seca en comparación con las plantas a las que no se le realizó una aplicación de Si. Asimismo, la aplicación de Si a 150 mg/kg resultó en un aumento máximo del 26.03%. Una razón por la cual los resultados difieren a los resultados obtenidos en esta investigación puede ser atribuido a las condiciones controladas y los niveles de humedad suministrados entre experimentos. En este caso, condiciones ambientales presentes durante el establecimiento del experimento, como lo fueron a las lluvias durante los primeros meses de desarrollo pudieron influir en la absorción de los elementos; además de la capacidad intrínseca de infiltración del suelo pudieron ser un ser un factor incidente en los datos obtenidos.

Figura 6

Efecto de las dosis de fertilización con SiO_2 en el volumen radicular expresado en cm^3 (a) y en la producción de materia seca (g. planta^{-1}) (b) en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 120 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.

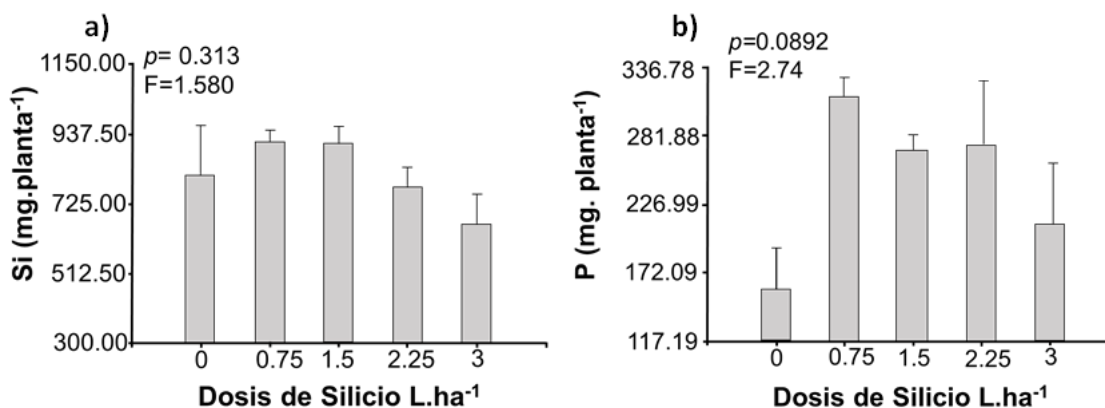


Absorción de Silicio y Fósforo a los 120 Días Después de la Siembra

A los 120 DDS la absorción de Si y P no presentaron respuesta a las dosis de fertilización con silicio (Figura 7 y anexo H). Ninguna de la dosis aplicada mostró afectar significativamente la absorción de Si y P al final del experimento. Este efecto puede asociarse a la edad del maíz, dado que, el crecimiento es un factor determinante en la absorción del Si y se ha comprobado que la mayor acumulación de Si en los tejidos ocurre en las etapas del maíz VT y R2 (Mabagala F et al. 2021). Según Lee YBok et al. (2004) en su estudio menciona que, el pH puede afectar la eficiencia del Si, obteniéndose la mayor desorción del fosfato en un rango de pH de 7 a 9 y a temperaturas de 20°C. En contraste a estos resultados Kostic L et al. (2017) quien evaluó el uso de Si en suelos ácidos en contraste con encalado y aplicación de P, indicando que el uso de silicato de sodio (Na_2SiO_3) aumentó la concentración de P en los brotes de trigo (*Triticum aestivum* L.) en el rango de las plantas fertilizadas con P, además de estimular la tasa de exudación de malato y citrato por las raíces.

Figura 7

Efecto de las distintas dosis de fertilización con SiO_2 en absorción de silicio (a) y fósforo (b) expresado en mg. planta^{-1} en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 120 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.

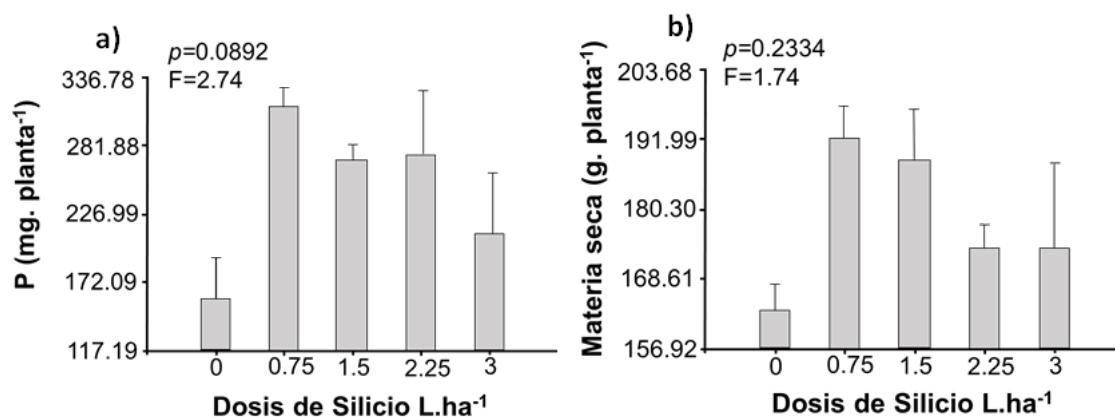


Absorción de Fósforo y Materia Seca en Mazorca a los 120 Días Después de Siembra

A los 120 DDS el P y materia seca, no presentaron respuesta a las dosis de fertilización con silicio aplicadas (Figura 8 y anexo I). Este resultado difiere con respecto al estudio realizado en arroz por Jinger et al. (2022), en el cual se evaluaron cuatro niveles de fertilización con Si (0,40,80 120 kg.ha^{-1}), los resultados demostraron un efecto significativo en el incremento de la acumulación de materia seca, incremento en el rendimiento de grano y una mejora significativa en la concentración de P y Si en el grano de arroz en un 25-47% por encima del control. Este efecto es respaldado por Jia-Li et al. (2017), quien evaluó el efecto de tres niveles de fertilización con P y Si, donde sus resultados demostraron que la deficiencia de P en plántulas de maíz disminuye la acumulación de materia seca y reduce la concentración de P en los tejidos, concluyendo que P y Si poseen efectos sinérgicos significativos sobre las características del maíz. Estos hallazgos también fueron corroborados por Singh Kk et al. (2006), quien demostró en su estudio que la aplicación de Si en dosis de 50 kg.ha^{-1} incrementó significativamente el rendimiento de grano de arroz, producción de materia seca, así como la absorción de Si por el grano, esto siendo atribuido a efectos sinérgicos del Si con otros nutrientes y una estimulación de mayor actividad fotosintética en la planta.

Figura 8

Efecto de las distintas dosis de fertilización con SiO_2 en la absorción de fósforo(a) y la producción de materia seca expresada en g. planta^{-1} (b) en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 120 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.



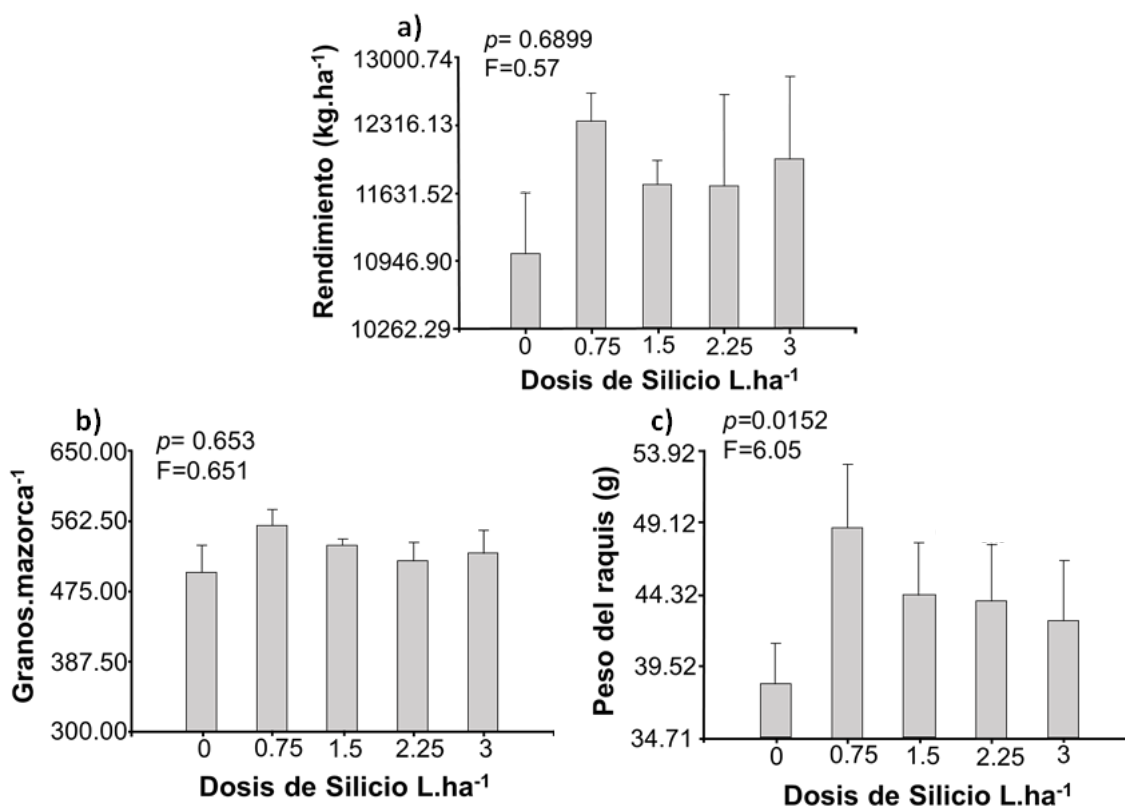
Productividad

A los 120 DDS, la dosis de silicio aplicada no mostro afectar significativamente el rendimiento ni el número de granos por mazorca (Figura 9 y anexo J). Sin embargo, el peso de raquis varió significativamente en función de la dosis de silicio aplicada ($p \leq 0.01$) (Figura 9 y anexo J). Las plantas que recibieron dosis de 0.75 L. ha⁻¹, 1.5 L. ha⁻¹ y 2.25 L. ha⁻¹ de Si, mostraron un mayor peso de raquis en comparación a aquellas plantas que no recibieron Si. A su vez, el peso de raquis de las plantas a las cuales se les aplicó una dosis de Si del 3 L. ha⁻¹ fue significativamente menor en comparación a aquellas plantas que recibieron una dosis del 0.75 L. ha⁻¹ de Si (Figura 9 y anexo J). Los resultados coinciden a los obtenidos por Hurtado (2014), quién no evidenció un mayor rendimiento a cosecha en maíz al realizar aplicaciones de silicato de magnesio a comparación de los demás tratamientos. Sin embargo, el experimento realizado por Liang et al. (2015), demostró que los ensayos realizados con aplicaciones de escoria de silicato determinaron un aumento en el incremento del rendimiento entre un 8.5 y 10.2% en ensayos de campo en el cultivo de maíz, esto debido a un incremento en el número de mazorcas y peso de los granos. Además, los resultados presentados en el número de granos por mazorca son equivalentes a los resultados obtenidos por Lucero Rafael (2022), quién no obtuvo

diferencias significativas en el número de granos por hilera al realizar aplicaciones de silicato de magnesio en maíz. Las diferencias presentadas entre los experimentos pueden deberse, como se mencionó con anterioridad a factores abióticos, como lo es el clima, ya que investigaciones en la aplicación de Si en condiciones de estrés por sequía obtuvieron un aumento en el rendimiento en temporada de sequía durante la etapa de crecimiento del maíz; mientras que los rendimientos son bajos en plantaciones en las cuales no presentaron estrés por sequía (Li et al. 1999); lo cual puede indicar que los efectos benéficos del Si sobre el desarrollo vegetativo, llenado de granos y peso de mazorca pueden influenciar su respuesta en distintas condiciones de estrés. Con respecto a los datos obtenidos en el peso del raquis, los resultados difieren a los presentados por Sancho Mora (2016), quién no obtuvo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos a diferentes concentraciones de Si. El aumento en el peso del raquis puede evidenciar una mayor absorción de nutrientes por la planta y está ligado a condiciones ambientales y nutricionales que pueden afectar el desarrollo del cultivo y por ende, mejorar la respuesta a la absorción de Si y otros nutrientes (Ulloa Sanchez y Zapata Fava 2011).

Figura 9

Efecto de las distintas dosis de fertilización con SiO_2 en el rendimiento (kg. ha^{-1}) (a), en el número de granos por mazorca (b) y en el peso de raquis por mazorca en plantas de maíz Tuxpeño a los 120 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.



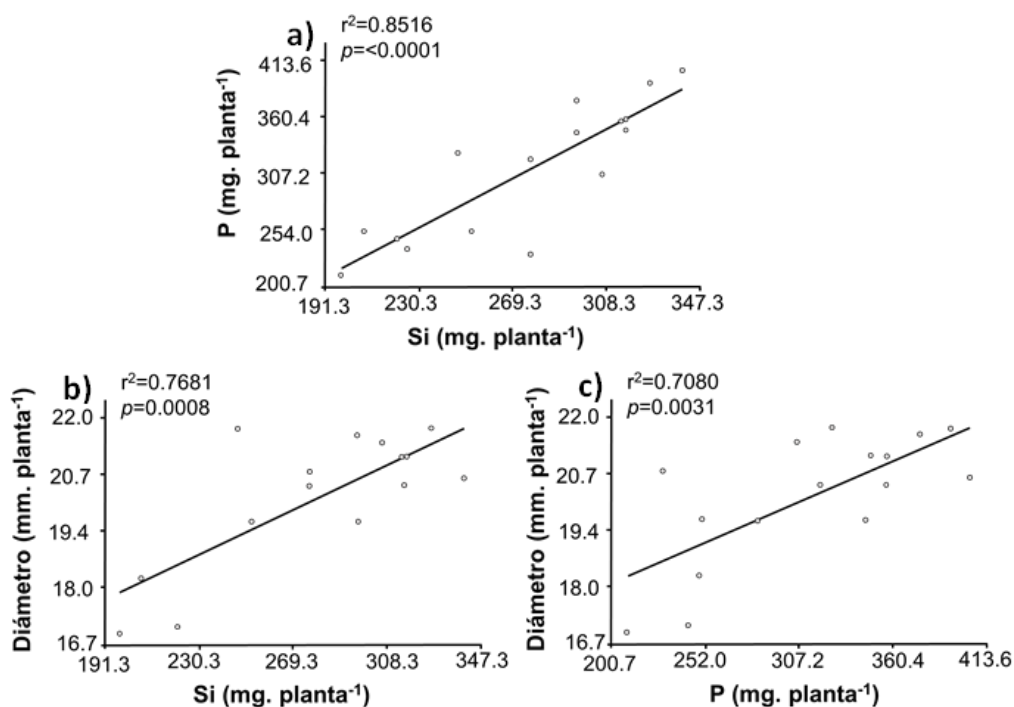
Correlación Entre Contenido de Si, P y el Diámetro del Tallo a los 70 DDS

A los 70 DDS el contenido de P en función al Si presentó una correlación fuerte positiva ($r^2=0.8516$) y altamente significativa ($P\leq 0.001$), es decir, a mayor contenido de Si, se presentó mayor contenido de P en el tejido (Figura 10). De igual manera, el diámetro del tallo (mm) en función al contenido de Si y P presentó correlaciones fuertemente positivas ($r^2=0.7681$ y 0.7080) y altamente significativas ($P\leq 0.001$), de tal forma que, existió un efecto lineal del diámetro del tallo en función del contenido de Si y P, es decir, a mayor concentración de Si y P se presentó un incremento en el diámetro del tallo (Figura 10). Esto puede estar ligado a la relación que tienen las gramíneas con el Si presente y absorbido por la planta, el cual promueve la expresión génica en la absorción de P, en donde hay

una alteración genética de los transportadores de P, lo que estimula una absorción de P en la raíz y promoviendo exudados que ayudan a su movilización y traslocación a los tejidos de la planta (Wang Y et al. 2016). En base a los resultados, se puede determinar que la absorción de P y la tendencia que presenta a un aumento del diámetro del tallo se debe a la importancia del elemento en el desarrollo y crecimiento de las plantas (Raghothama 2005); lo cual concuerda con lo descrito por Naomi et al. (2021), quién sugiere que el contenido de P denota un aumento en el diámetro del tallo, lo cual se evidenció en su estudio, donde plantas de maíz con menores concentraciones de P mostraron tendencia a desarrollar un menor diámetro de tallo en comparación a mayores niveles P suministrados y absorbidos. El grosor del tallo y su tendencia al crecimiento de este se puede deber a la capacidad de Si de acumularse y fortalecer el tejido, lo cual, se demostró por Liang SJ. et al. (2013), quien evidenció que la dosificación y la acumulación de Si mejoró la resistencia a acame y engrosamiento del tallo de gramíneas, como arroz.

Figura 10

Correlación entre la absorción de silicio y fósforo (mg. planta^{-1}) (a); relación del diámetro del tallo (mm. planta^{-1}) con el silicio (mg. planta^{-1}) (b) y fósforo absorbido (c), en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 70 días después de la siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.



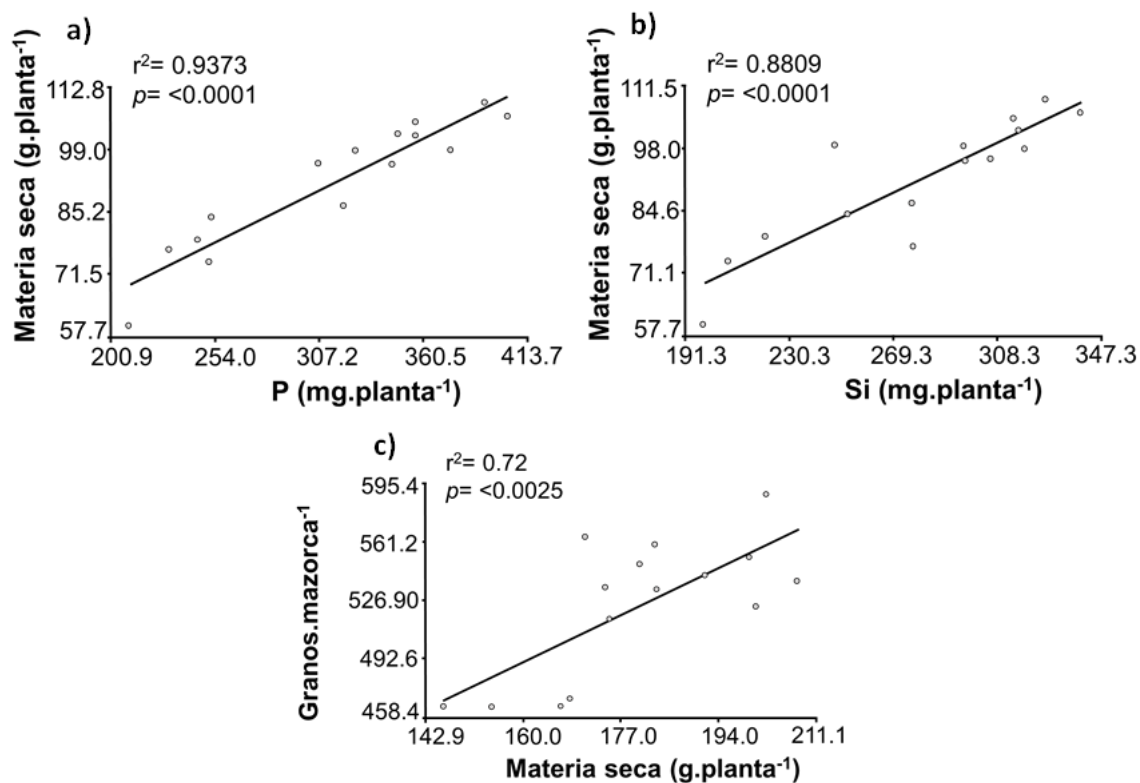
Correlación Entre Contenido de Si, P, Granos por Mazorca y Materia Seca a los 70 DDS

A los 70 DDS la materia seca en función al contenido de P y Si presentó correlaciones fuertemente positivas ($r^2=0.9373$ y 0.8809) y altamente significativas ($P\leq 0.001$), es decir, existe un efecto lineal en el cual a mayor contenido de P y Si, se obtuvo mayor peso de materia seca (Figura 11). Granos por mazorca (n°) en función al peso de materia seca presentó correlación fuertemente positiva ($r^2=0.72$ y altamente significativas ($P\leq 0.001$), por tanto, se observa un efecto lineal en el cual, a mayor peso de materia seca, mayor número de granos por mazorca (Figura 11). Los resultados son similares a los obtenidos por Kakiuchi y Kamiji (2015), quién en su investigación observó que había una correlación directa entre el aumento de materia seca de la biomasa aérea y diferentes

concentraciones de P acumulado en el cultivo de soya. Además, en gramíneas como lo es el arroz se ha demostrado una tendencia a la acumulación de Si, lo cual ha incrementado la materia seca (Xu et al. 2022); debido a la acumulación de este elemento en el tejido de las hojas, permitiendo un mayor crecimiento de las plantas, exposición de las plantas a la luz promoviendo el metabolismo fotosintético (Sahebi et al. 2015). Los resultados obtenidos en la correlación entre materia seca y la producción de granos por mazorca, son datos que concuerdan con los obtenidos por López-Castañeda (2011), quién observó una relación en el rendimiento de granos y biomasa aérea; dónde el rendimiento se puede determinar por el número de granos cosechados por mazorca o superficie cultivada en gramíneas. Por otra parte, en arroz se ha demostrado que los rendimientos de semilla se correlacionan positivamente con el contenido de materia seca, lo cual determina un mayor llenado de granos debido la traslocación de nutrientes a los sumideros de la planta (Koutroubas et al. 1998).

Figura 11

Correlación del contenido de materia seca ($g. planta^{-1}$) en función de las de las variables de fósforo absorbido ($mg. planta^{-1}$) (a), silicio absorbido ($mg. planta^{-1}$) (b) y el número de granos por mazorca (d) en el cultivo de maíz Tuxpeño a los 120 después de siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.



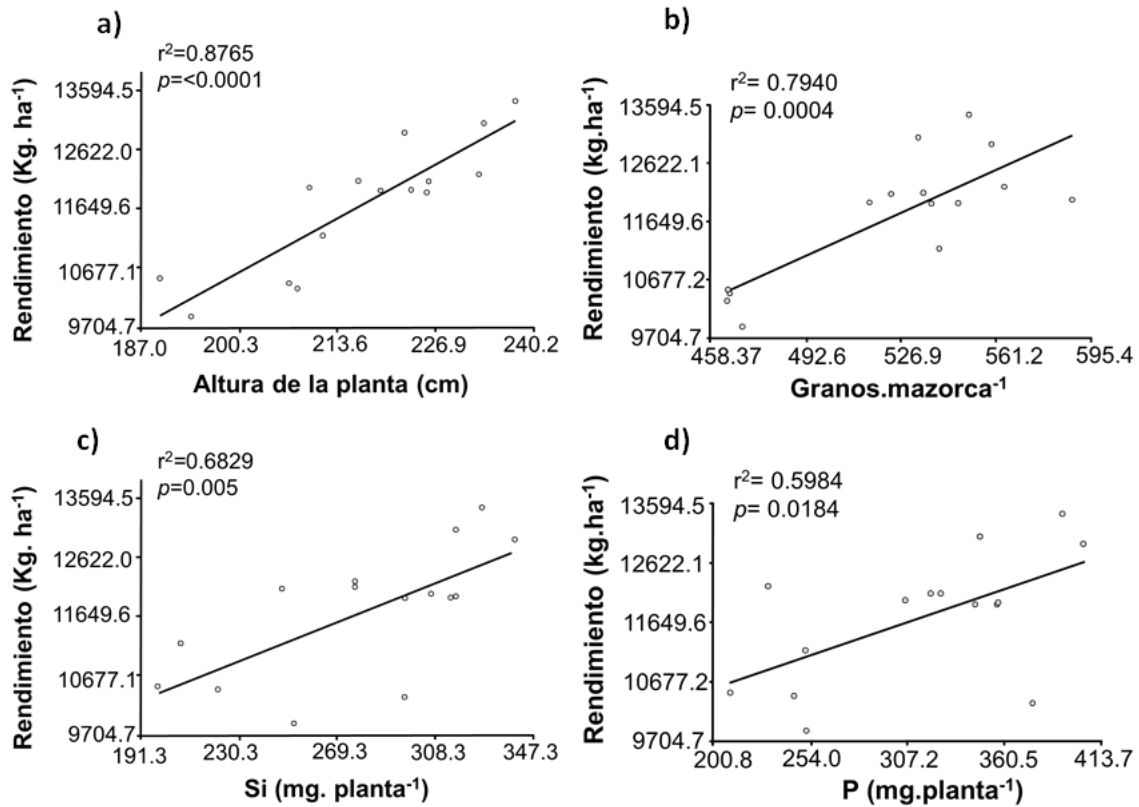
Correlación Entre Rendimiento y Altura de la Planta, Si, P, Granos por Mazorca (n°) en Plantas de Maíz a los 120 DDS.

A los 120 DDS el rendimiento en función a la altura de la planta, presentó correlación fuertemente positiva ($r^2=0.87$) y altamente significativa ($P \leq 0.001$), es decir, existe un efecto lineal en donde se observó que, a mayor altura de la planta, se obtuvo mayor rendimiento (Figura 12). Rendimiento en función de granos por mazorca, presentó correlación fuertemente positiva ($r^2=0.7940$) y altamente significativa ($P \leq 0.001$), por ende, existe un efecto lineal, donde, a mayor número de granos por mazorca, se presentó un mayor rendimiento (Figura 12). Rendimiento en función de contenido de Si y P, presentó correlaciones fuertemente positivas ($r^2=0.6829$ y 0.5984) y

significativas ($P=0.005$ y 0.0184), por tanto, se observó un efecto lineal en el que, a mayor contenido en el tejido de Si y P, se obtuvo mayor rendimiento. (Figura 12). Esta relación fuertemente positiva entre altura de la planta y rendimiento es sostenida por Yin et al. (2011), quienes en su estudio evaluaron distintos modelos matemáticos en tres etapas diferentes y durante tres años para determinar la relación entre estas variables; donde obtuvo como resultado que el rendimiento estuvo fuertemente relacionado ($r^2>0.50$), con altura de la planta medida en etapa V10 y V12. Así mismo, Katsvairo et al. (2003), confirman estos resultados, reportando que altura de la planta se correlacionó con rendimiento (0.50-0.60) en todos los sitios evaluados. La relación fuerte positiva entre el número de granos por mazorca y en el rendimiento, puede ser explicada, dado que, tanto el número de granos por mazorca y el peso de 100 granos presentan efectos directos altos sobre el peso total del grano y son clasificadas como las principales variables que poseen efecto sobre el rendimiento, mientras que, el número de granos por filas y número de filas se encuentran en segundo nivel de importancia (Mohammadi et al. 2003). Por otra parte Immanuel S y Nagarajan (2011), determinaron que la longitud de la mazorca y el número de granos por hila registraron las mayores correlaciones con respecto al rendimiento de grano ($r=0.871$ y 0.868). La relación fuertemente positiva entre rendimiento del grano y el Si aplicado, es respaldado por Pati et al. (2016), quienes reportaron que la aplicación de Si en $600 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ aumentó significativamente el rendimiento en grano y paja en el cultivo de arroz; asimismo, incrementó la absorción de los nutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio y la concentración de Si en los tejidos. La relación fuertemente positiva entre el rendimiento y la absorción de P puede ser explicado por un aumento en la absorción de P por parte de la planta dado por las aplicaciones de Si, esto es sustentado por un estudio efectuado en arroz por Meena et al. (2018), quienes en su estudio demuestran que el P disponible era significativamente influenciado por los diferentes niveles de Si aplicado. Por lo tanto, se puede inferir que un aumento en el P disponible incrementa el rendimiento, dado que, Rashid y Iqbal (2012) en su estudio evaluaron el rendimiento y la calidad del maíz frente a distintas dosis de fertilización con P, concluyendo que el rendimiento y la calidad del maíz mejoraron significativamente, tanto la concentración en el tejido como la materia seca producida.

Figura 12

Correlación del rendimiento (kg. ha^{-1}) con las variables de altura de la planta (cm), silicio absorbido (mg. planta^{-1}) y el número de granos por mazorca (n°) en plantas de maíz tuxpeño a los 120 después de siembra en el lote 7 de Zona II de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.



Conclusiones

La fertilización con silicio (SiO_2) en drench no presentó un efecto sobre el incremento en la absorción de fósforo y silicio, ni en los parámetros de crecimiento de las plantas de maíz Tuxpeño.

Los factores de rendimiento no presentaron diferencias significativas frente a la aplicación de los distintos niveles de silicio. No obstante, las diferencias significativas encontradas en el peso de raquis al aplicar silicio demuestran que existió una mayor tendencia a la traslocación de nutrientes hacia la mazorca, a pesar de no presentarse diferencias significativas en el rendimiento.

Recomendaciones

En próximas evaluaciones con óxido de silicio en maíz se debe incrementar el número de repeticiones, ello con la finalidad de obtener mayor precisión en el ANDEVA, dado que, las medias entre tratamientos en evaluaciones con silicio tienden a tener diferencias pequeñas entre magnitudes y un coeficiente de variación bajo facilita el reconocimiento de diferencias estadísticas entre tratamientos.

Evaluar otras fuentes de silicio como silicato de potasio, silicato de magnesio y silicato de sodio con la finalidad comprobar la eficiencia de distintas presentaciones de silicio y determinar si existe un efecto en el tipo de fuente utilizada y su efecto en la absorción de P y Si.

Referencias

- Aguilar Carpio C, Escalante Estrada, José Alberto Salvador, Aguilar Mariscal I. 2015. Análisis De Crecimiento Y Rendimiento De Maíz En Clima Cálido En Función Del Genotipo, Biofertilizante Y Nitrógeno. *Terra Latinoamericana*; [consultado el 24 de nov. de 2022]. 33(1):51–62. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v33n1/2395-8030-tl-33-01-00051.pdf>.
- Ali S, Farooq MA, Yasmeen T, Hussain S, Arif MS, Abbas F, Bharwana SA, Zhang G. 2013. The influence of silicon on barley growth, photosynthesis and ultra-structure under chromium stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*; [consultado el 3 de jul. de 2023]. 89:66–72. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651312004356>. doi:10.1016/j.ecoenv.2012.11.015.
- Amin M, Ahmad R, Ali A, Hussain I, Mahmood R, Aslam M, Lee DJ. 2018. Influence of silicon fertilization on Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. *Silicon*. 10(2):177–183. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n3/v14n3a17.pdf>. doi:10.1007/s12633-015-9372-x.
- Amin M, Murtaza G, Ahmad R, Basra SMA. 2014. Silicon induced improvement in morpho-physiological traits of maize (*Zea Mays* L.) under water deficit. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*; [consultado el 2 de jul. de 2023]. 51(1):187–196. https://www.researchgate.net/profile/Dr-Ghulam-Murtaza/publication/295559649_Silicon_induced_improvement_in_morpho-physiological_traits_of_maize_Zea_Mays_L_under_water_deficit/links/56dff6a508ae9b93f79bc1ea/Silicon-induced-improvement-in-morpho-physiological-traits-of-maize-Zea-Mays-L-under-water-deficit.pdf.
- Benavides AM. 2011. Absorción de iones en la raíz. México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/absorcion_de_iones_en_la_raiz.pdf.
- Bertsch F. 2009. Absorción de nutrientes por los cultivos. 1ª ed. San José, Costa Rica: [sin editorial]. ISBN: 978-9968-9422-3-2; [consultado el 29 de jul. de 2023]. <https://isbn.cloud/9789968942232/absorcion-de-nutrientes-por-los-cultivos/>.
- Bijanazadeh E, Egan TP. 2018. Silicon priming benefits germination, ion balance, and root structure in salt-stressed durum wheat (*Triticum durum* desf.). *Journal of Plant Nutrition*; [consultado el 3 de jul. de 2023]. 41(20):2560–2571. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01904167.2018.1485936>. doi:10.1080/01904167.2018.1485936.
- Bolaños Aguilar ED, Emile J-C. 2011. Distancia entre surcos en el rendimiento y calidad de la materia seca de maíz y de sorgo. *Revista Mexicana de ciencias pecuarias*; [consultado el 2 de jul. de 2023]. 2:299–312. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242011000300005.
- Borda OA, Barón FH, Gómez MI. 2007. El silicio como elemento benéfico en avena forrajera (*Avena sativa* L.): respuestas fisiológicas de crecimiento y manejo. *Agronomía Colombiana*; [consultado el 2 de jul. de 2023]. 25(2):273–279.
- Bravo I, Montoya JC, Menjivar JC. 2013. Retención y disponibilidad de fósforo asociado a la materia orgánica en un Typic Melanudands del departamento del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*. 62(3):261–267. <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v62n3/v62n3a09.pdf>.
- Dhillon J, Torres G, Driver E, Figueiredo B, Raun WR. 2017. World Phosphorus Use Efficiency in Cereal Crops. *Agronomy Journal*. 109(4):1670–1677. doi:10.2134/agronj2016.08.0483.

- Elvir Coello JA. 2016. Diagnóstico de la compactación de los suelos para determinar subsoleo y registro de su adecuación en lotes agropecuarios, Zamorano, Honduras [Proyecto Especial de Graduación]. Honduras: Escuela Agrícola Panamerica, Zamorano; [consultado el 29 de jul. de 2023]. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/5913>.
- Erenstein O, Jaleta M, Sonder K, Mottaleb K, Prasanna BM. 2022. Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Security*; [consultado el 18 de jun. de 2023]. 14(5):1295–1319. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12571-022-01288-7>. doi:10.1007/s12571-022-01288-7.
- Etesami H, Jeong BR. 2019. Importance of silicon in fruit nutrition: Agronomic and physiological implications. En: Srivastava AK, Hu C, editores. *Fruit crops: Diagnosis and management of nutrient constraints*. Waltham: Elsevier. p. 255–277.
- Fallas R, Bertsch F, Echandi C, Henríquez C. 2011. Caracterización del desarrollo y absorción de nutrimentos del híbrido de maíz HC-57. *Agronomía Costarricense*. 35(2):33–47. doi:10.15517/rac.v35i2.6677.
- Greger M, Landberg T, Vaculík M. 2018. Silicon Influences Soil Availability and Accumulation of Mineral Nutrients in Various Plant Species. *Plants*; [consultado el 2 de jul. de 2023]. 41(7):2–16. en. <https://www.mdpi.com/2223-7747/7/2/41>. doi:10.3390/plants7020041.
- Guamán Guamán RN, Desiderio Vera TX, Villavicencio Abril ÁF, Ulloa Cortázar SM, Romero Salguero EJ. 2020. Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos. *Siembra*. 7(2):47–56. doi:10.29166/siembra.v7i2.2196.
- Hattori T, Inanaga S, Tanimoto E, Lux A, Luxová M, Sugimoto Y. 2003. Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. *Plant Cell Physiol*; [consultado el 3 de jul. de 2023]. 44(7):743–749. eng. <https://academic.oup.com/pcp/article/44/7/743/1855693>. doi:10.1093/pcp/pcg090.
- Hernández Galván DG. 2019. Evaluación del crecimiento, desarrollo y rendimiento de tres variedades de maíz en asocio con frijol y soya, bajo dos arreglos de siembra [Proyecto Especial de Graduación]. Honduras: Escuela Agrícola Panamerica, Zamorano. 28 p; [consultado el 24 de nov. de 2022]. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6689>.
- Hurtado CM. 2014. Estudio de alternativas de fertilización edáfica y foliar, en un híbrido comercial de maíz (*zea mayz* l), en la zona de balzar, provincia del guayas. Ecuador: ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL; [consultado el 4 de jul. de 2023]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/30648/D-79891.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.
- Immanuel S C, Nagarajan P. 2011. Interrelationship and path-coefficient studies for qualitative traits, grain yield and other yield attributes among maize (*Zea mays* L.). *International J. of Plant Breeding and Genetics*; [consultado el 4 de jul. de 2023]. 5(3):209–223. <https://scialert.net/fulltext/?doi=ijpbg.2011.209.223>. doi:10.3923/ijpbg.2011.209.223.
- Janislampi KW. 2012. Effect of silicon on plant growth and drought stress tolerance. [sin lugar]: Utah State University; [consultado el 2 de jul. de 2023]. https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1002&context=cpl_pubs.
- Jawahar S, Suseendran K, Kalaiyarasa C, Ramesh S, Vinodkumar SR, Arivukkarasu K. 2020. Effect of silicon on dry matter yield and nutrient uptake of hybrid maize. *Plant Archives*; [consultado el 2 de jul. de 2023]. 20(1):3211–3215. [http://plantarchives.org/20-1/3211-3215%20\(5771\).pdf](http://plantarchives.org/20-1/3211-3215%20(5771).pdf).

- Jia-Li Z, Zhu CongHua, Dou Pan, Ma XiaoJun, Wang XingLong, Kong FanLei, Yuan JiChao. 2017. Effect of phosphorus and silicon application on the uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium by maize seedlings. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*; [consultado el 4 de jul. de 2023]. 25(5):677–688. Chinese. <http://www.ecoagri.ac.cn/en/article/doi/10.13930/j.cnki.cjea.170222?viewType=HTML>.
- Jinger D, Dhar S, Dass A, Sharma VK, Paramesh V, Parihar M, Joshi E, Singhal V, Gupta G, Prasad D, et al. 2022. Co-fertilization of silicon and phosphorus influences the dry matter accumulation, grain yield, nutrient uptake, and nutrient-use efficiencies of aerobic rice. *Silicon*; [consultado el 4 de jul. de 2023]. 14(9):4683–4697. <http://arrworyza.com/AdminPanel/download/Response%20of%20nitrogen%20and%20silicon%20levels%20on%20growth,%20yield%20and%20nutrient.pdf>. doi:10.1007/s12633-021-01239-5.
- Kakiuchi J, Kamiji Y. 2015. Relationship between Phosphorus Accumulation and Dry Matter Production in Soybeans. *Plant Production Science*; [consultado el 4 de jul. de 2023]. 18(3):344–355. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1626/pps.18.344>. doi:10.1626/pps.18.344.
- Katsvairo TW, Cox WJ, van Es HM. 2003. Spatial growth and nitrogen uptake variability of corn at two nitrogen levels. *Agronomy Journal*; [consultado el 4 de jul. de 2011]. 95(4):1000–1011. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj2003.1000>. doi:10.2134/agronj2003.1000.
- Kim YH, Khan AL, Waqas M, Shim JK, Kim DH, Lee KY, Lee IJ. 2014. Silicon Application to Rice Root Zone Influenced the Phytohormonal and Antioxidant Responses Under Salinity Stress. *Journal of Plant Growth Regulation*; [consultado el 3 de jul. de 2023]. 33(2):137–149. En;en. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00344-013-9356-2>. doi:10.1007/s00344-013-9356-2.
- Kostic L, Nikolic N, Bosnic D, Samardzic J, Nikolic M. 2017. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. *Plant and Soil*; [consultado el 3 de jul. de 2023]. 419(1):447–455. En;en. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-017-3364-0>. doi:10.1007/s11104-017-3364-0.
- Koutroubas SD, Papakosta DK, Gagianas AA. 1998. The importance of early dry matter and nitrogen accumulation in soybean yield. *European Journal of Agronomy*; [consultado el 4 de jul. de 2023]. 9(1):1–10. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n3/v14n3a17.pdf>. doi:10.1016/S1161-0301(97)00067-1.
- Kumar S, Kumar S, Mohapatra T. 2021. Interaction Between Macro- and Micro-Nutrients in Plants. *Frontiers in Plant Science*. 12. eng. doi:10.3389/fpls.2021.665583.
- Lee YB, Hoon C, Hwang JY, Lee IB, Kim PJ. 2004. Enhancement of phosphate desorption by silicate in soils with salt accumulation. *Soil Science and Plant Nutrition*; [consultado el 3 de jul. de 2023]. 50(4):493–499. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00380768.2004.10408505>. doi:10.1080/00380768.2004.10408505.
- Lee Y-B, Kim P-J. 2007. Reduction of phosphate adsorption by ion competition with silicate in soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture*; [consultado el 3 de jul. de 2023]. 26(4):286–296. https://www.researchgate.net/publication/263646992_Reduction_of_Phosphate_Adsorption_by_Ion_Competition_with_Silicate_in_Soil. doi:10.5338/KJEA.2007.26.4.286.
- Li CH, Chu TD, Liu XB, Yang Q. 1999. Silicon nutrition effects and its study and application development in China. China: Proceedings of Symposium of Plant Nutrition, Shaanxi Science and Technology.
- Liang SJ, Li ZQ, Li XJ, Xie HG, Zhu RS, Lin JX, Xie HA, Wu H. 2013. Effects of stem structural characters and silicon content on lodging resistance in rice (*Oryza sativa L.*). *Research on Crops*; [consultado

- el 4 de jul. de 2023]. 14(3):621–636. English. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20133370205>.
- Liang Y, Nikolic M, Bélanger R, Gong H, Song A. 2015. Effect of silicon on crop growth, yield and quality. En: Liang Y, Nikolic M, Bélanger R, Gong H, Song A, editores. *Silicon in Agriculture*. [sin lugar]: Springer, Dordrecht. p. 209–223. en. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-9978-2_11.
- Lino ACM, Buzetti S, Teixeira Filho MCM, Galindo FS, Maestrello PR, Rodrigues MADC. 2018. Effect of phosphorus applied as monoammonium phosphate-coated polymers in corn culture under no-tillage system. *Semina: Ciências Agrárias*. 39(1):99–112. doi:10.5433/1679-0359.2018v39n1p99.
- López-Castañeda C. 2011. Variación en rendimiento de grano, biomasa y número de granos en cebada bajo tres condiciones de humedad del suelo. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*; [consultado el 4 de jul. de 2023]. 14:907–918. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n3/v14n3a17.pdf>.
- Lucero Rafael VA. 2022. Fuentes de magnesio y silicio en el rendimiento de maíz amarillo duro (*Zea mays L.*), bajo condiciones de La Molina. Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. 79 p; [consultado el 4 de jul. de 2023]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/5575/lucero-rafael-victor-antonio-de-jesus.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Mabagala F, Geng Y, Cao G, Wang L, Wang M, Zhang M. 2021. Silicon accumulation, partitioning and remobilization in spring maize (*Zea mays L.*) under silicon supply with straw return in Northeast China. *Journal of Plant Nutrition*; [consultado el 3 de jul. de 2023]. 44(10):1498–1514. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01904167.2020.1867576>. doi:10.1080/01904167.2020.1867576.
- Meena OP, Patel KC, Malav JK. 2018. Effect of silicon and phosphorus on available Si, P, Fe and Mn content and nutrient ratio of P-stressed maize (*Zea Mays L.*). *Research Journal of Chemistry and Environment*; [consultado el 4 de jul. de 2023]. 22(2):18–21. https://www.researchgate.net/publication/323079409_Effect_of_silicon_and_phosphorus_on_available_Si_P_Fe_and_Mn_content_and_nutrient_ratio_of_P-stressed_maize_Zea_Mays_L.
- Mitani N. 2005. Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of Experimental Botany*; [consultado el 3 de jul. de 2023]. 56(414):1255–1261. <https://academic.oup.com/jxb/article/56/414/1255/551547>. doi:10.1093/jxb/eri121.
- Mitani N, Yamaji N, Ma JF. 2008. Identification of maize silicon influx transporters. *Plant Cell Physiol*; [consultado el 3 de jul. de 2023]. 50(1):5–12. eng. <https://academic.oup.com/pcp/article/50/1/5/1849528>. doi:10.1093/pcp/pcn110.
- Mohammadi SA, Prasanna BM, Singh NN. 2003. Sequential path model for determining interrelationships among grain yield and related characters in maize. *Crop Sci*; [consultado el 4 de jul. de 2023]. 43(5):1690–1697. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2135/cropsci2003.1690>. doi:10.2135/cropsci2003.1690.
- Naeem M, Ansari A, Gill S, editores. 2020. *Contaminants in Agriculture*. [sin lugar]: Springer, Cham ; [consultado el 23 de nov. de 2022]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-41552-5_2.
- Naomi MR, Supriyono, Nurmalasari IA, Pardono. 2021. Role of phosphate fertilizer on growth and yield of hybrid maize (*Zea mays L.*). *Earth and Environmental Science*; [consultado el 4 de jul. de 2023].

- 637(1). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/637/1/012070>. doi:10.1088/1755-1315/637/1/012070.
- Naranjo Carmona JF, Solórzano Cuesta SA. 2018. Evaluación de diferentes dosis y épocas de aplicación de silicio en el desarrollo y producción de arroz variedad DICTA Playitas. Honduras: Escuela Agrícola Panamerica, Zamorano. 25 p; [consultado el 2 de jul. de 2023]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/55057e96-2435-464e-af76-c1e9b4e04295/content>.
- Neu S, Schaller J, Dudel EG. 2017. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*. 7. eng. doi:10.1038/srep40829.
- Nowaki RHD, Parent S-É, Cecílio Filho AB, Rozane DE, Meneses NB, da Silva JADS, Natale W, Parent LE. 2017. Phosphorus Over-Fertilization and Nutrient Misbalance of Irrigated Tomato Crops in Brazil. *Frontiers in Plant Science*. 8. eng. doi:10.3389/fpls.2017.00825.
- Owino-Gerroh C, Gascho GJ. 2004. Effect of Silicon on Low pH Soil Phosphorus Sorption and on Uptake and Growth of Maize | Request PDF. [sin lugar]: *Communications in soil science and plant analysis*; [actualizado el 5 de jul. de 2022.000Z; consultado el 4 de jul. de 2023.916Z]. https://www.researchgate.net/publication/233311786_Effect_of_Silicon_on_Low_pH_Soil_Phosphorus_Sorption_and_on_Uptake_and_Growth_of_Maize.
- Pati S, Pal B, Badole S, Hazra GC, Mandal B. 2016. Effect of silicon fertilization on growth, yield, and nutrient uptake of rice. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*; [consultado el 4 de jul. de 2023]. 47(3):284–290. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103624.2015.1122797>. doi:10.1080/00103624.2015.1122797.
- Pavlovic J, Kostic L, Bosnic P, Kirkby EA, Nikolic M. 2021. Interactions of Silicon With Essential and Beneficial Elements in Plants. *Frontiers in Plant Science*. 12:1–19. eng. doi:10.3389/fpls.2021.697592.
- Pereira NCM, Galindo FS, Gazola RPD, Dupas E, Rosa PAL, Mortinho ES, Filho MCMT. 2020. Corn Yield and Phosphorus Use Efficiency Response to Phosphorus Rates Associated With Plant Growth Promoting Bacteria. *Frontiers in Environmental Science*. 8. <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v25n2/v25n2a09.pdf>. doi:10.3389/fenvs.2020.00040.
- Quero E. 2009. Nutrición con Silicio y sus Aplicaciones a Cultivos a Cielo Abierto y en Agricultura. *Research Gate*; [consultado el 2 de jul. de 2023]. es. https://www.researchgate.net/publication/266375207_NUTRICION_CON_SILICIO_Y_SUS_APLICACIONES_A_CULTIVOS_A_CIELO_ABIERTO_Y_EN_AGRICULTURA_PROTEGIDA_Un_pequeno_recorrido_por_la_naturaleza. doi:10.13140/2.1.2643.8400.
- Raghothama KG. 2005. Phosphorus and plant nutrition: An overview. [sin lugar]: [sin editorial] ; [consultado el 4 de jul. de 2023]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/637/1/012070/pdf>.
- Rashid M, Iqbal M. 2012. Effect of phosphorus fertilizer on the yield and quality of maize (*Zea mays* L.) fodder on clay loam soil. *The Journal of Animal & Plant Sciences*; [consultado el 4 de jul. de 2023]. 22(1):199–203. <https://www.thejaps.org.pk/docs/v-22-1/8.pdf>.
- Remache M, Carrillo M, Mora R, Durango W, Morales F. 2017. Absorción De Macronutrientes Y Eficiencia Del N, En Híbrido Promisorio De Maíz. Patricia Pilar, Ecuador. *Agronomía Costarricense*;

- [consultado el 24 de nov. de 2022]. 41(2):103–115. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v33n1/2395-8030-tl-33-01-00051.pdf>.
- Sahebi M, Hanafi MM, Siti Nor Akmar A, Rafii MY, Azizi P, Tengoua FF, Nurul Mayzaitul Azwa J, Shabanimofrad M. 2015. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed Research International*; [consultado el 3 de jul. de 2023]. 15. en. <https://www.hindawi.com/journals/bmri/2015/396010/>. doi:10.1155/2015/396010.
- Sancho Mora A. 2016. Efecto de incorporación silicato de magnesio en fertilización mineral del cultivo maíz (*Zea mays L.*) en Finca la Vega San Carlos. Costa Rica: Instituto tecnológico de Costa Rica. 74 p; [consultado el 4 de jul. de 2023]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9845/efecto_de_incorporaci%C3%B3n_silicato_de_magnesio_en_fertilizaci%C3%B3n_mineral_del_cultivo_maiz_%28zea%20mays%20l.%29_en_finca_la_vega_san_carlos.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Schafer S. 2022. Who Produces What? Key Agriculture Stats from Around the Globe. [sin lugar]: AgWeb; [consultado el 24 de nov. de 2022]. <https://www.agweb.com/markets/world-markets/who-produces-what-key-agriculture-stats-around-globe>.
- Schaller J, Wu B, Amelung W, Hu Z, Stein M, Lehndorff E, Obst M. 2022. Silicon as a potential limiting factor for phosphorus availability in paddy soils. *Scientific Reports*. 12(1):1–8. En;en. <https://www.nature.com/articles/s41598-022-20805-4>. doi:10.1038/s41598-022-20805-4.
- Singh Kk, Singh K, Singh R, Singh Y, Singh CS. 2006. Response of nitrogen and silicon levels on growth, yield and nutrient. India: Institute of Agricultural Sciences, Banaras Hindu University. 4 p. Informe no. 3; [consultado el 4 de jul. de 2023]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/30648/D-79891.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.
- Tapia Torres Y, García Oliva F. 2013. La disponibilidad del fósforo es producto de la actividad bacteriana en el suelo en ecosistemas oligotróficos: Una revisión crítica. *Terra Latinoamericana*; [consultado el 24 de nov. de 2022]. 31(3):231–242. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v31n3/2395-8030-tl-31-03-00231.pdf>.
- Ulloa Sanchez RA, Zapata Fava GJ. 2011. Efecto de la fertilización orgánica y sintética sobre el crecimiento y rendimiento de grano de tres variedades de maíz (*Zea mays L.*), El Rincon, Dario-Matagalpa, postrera, 2009. Nicaragua: Universidad Nacional Agraria. es; [consultado el 4 de jul. de 2023]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9845/efecto_de_incorporaci%C3%B3n_silicato_de_magnesio_en_fertilizaci%C3%B3n_mineral_del_cultivo_maiz_%28zea%20mays%20l.%29_en_finca_la_vega_san_carlos.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Vaculík M, Landberg T, Greger M, Luxová M, Stoláriková M, Lux A. 2012. Silicon modifies root anatomy, and uptake and subcellular distribution of cadmium in young maize plants. *Ann Bot*; [consultado el 3 de jul. de 2023]. 110(2):433–443. eng. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/5575/lucero-rafael-victor-antonio-de-jesus.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. doi:10.1093/aob/mcs039.
- Wang J, Hu X. 2021. Research on corn production efficiency and influencing factors of typical farms: Based on data from 12 corn-producing countries from 2012 to 2019. *PLoS One*. 16(7):e0254423. eng. https://www.researchgate.net/profile/Dr-Ghulam-Murtaza/publication/295559649_Silicon_induced_improvement_in_morpho-physiological_traits_of_maize_Zea_Mays_L_under_water_deficit/links/56dff6a508ae9b93f79bc1ea/Silicon-induced-improvement-in-morpho-physiological-traits-of-maize-Zea-Mays-L-under-water-deficit.pdf. doi:10.1371/journal.pone.0254423.

- Wang Y, Krogstad T, Clarke JL, Hallama M, Øgaard AF, Eich-Greatorex S, Kandeler E, Clarke N. 2016. Rhizosphere Organic Anions Play a Minor Role in Improving Crop Species' Ability to Take Up Residual Phosphorus (P) in Agricultural Soils Low in P Availability. *Frontiers in Plant Science*. 7:1–14. eng. doi:10.3389/fpls.2016.01664.
- Wawrzyńska A, Sirko A. 2014. To control and to be controlled: understanding the Arabidopsis SLIM1 function in sulfur deficiency through comprehensive investigation of the EIL protein family. *Frontiers in Plant Science*. 5:1–7. English. doi:10.3389/fpls.2014.00575.
- Xu J, Guo L, Liu L. 2022. Exogenous silicon alleviates drought stress in maize by improving growth, photosynthetic and antioxidant metabolism. *Environmental and Experimental Botany*; [consultado el 4 de jun. de 2023]. 201. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1626/pps.18.344>. doi:10.1016/j.envexpbot.2022.104974.
- Yan G-c, Nikolic M, Ye M-j, Xiao Z-x, Liang Y-c. 2018. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*. 17(10):2138–2150. doi:10.1016/S2095-3119(18)62037-4.
- Yin X, Jaja N, McClure MA, M. Hayes R. 2011. Comparison of models in assessing relationship of corn yield with plant height measured during early- to mid-season. *Journal of Agricultural Science*; [consultado el 4 de jul. de 2023]. 3(3). <https://ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/view/9504>. doi:10.5539/jas.v3n3p14.

Anexos**Anexo A**

Nutrientes extraídos por tonelada de maíz (Zea mays L.) producido por Bertsch (2009).

Elemento	N	P	k	Ca	Mg
kg. ha ⁻¹ por t de producción	25	5	19	3.76	5.84

Nota: N=nitrógeno, P= fósforo, k = potasio, Ca= calcio, Mg= Magnesio.

Anexo B

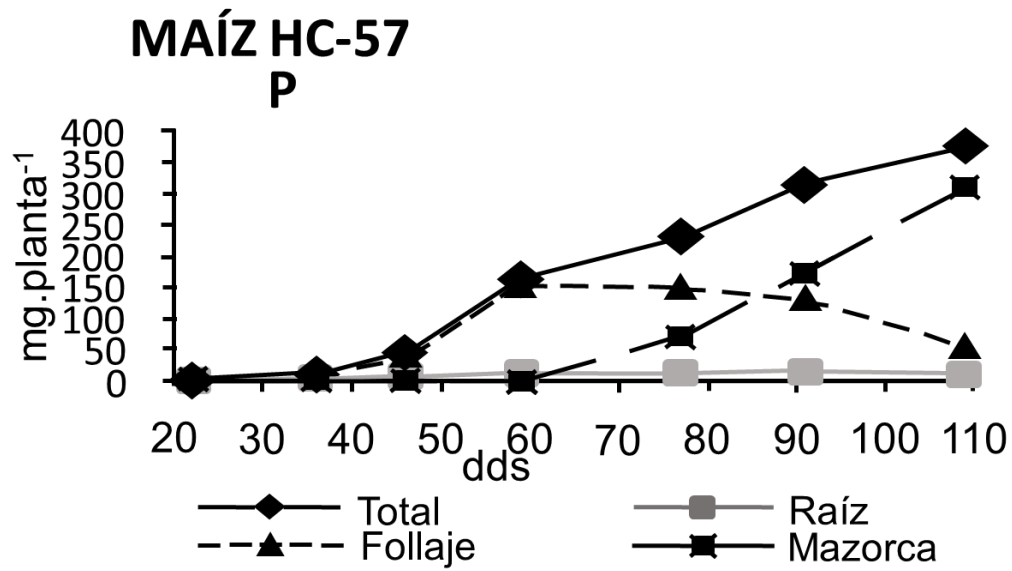
Análisis de suelo del Lote 7, Zona 2, realizado en el laboratorio de Suelos, EAP Zamorano, Honduras.

Textura	g/100g				mg/Kg (extractable)									
	M.O.	N _{total}	P	K	Ca	Mg	Na	S	Cu	Fe	Mn	Zn	B	
FA*	1.76B	0.09B	234A	325A	1642A	132A	9M	2B	3.6A	309A	146A	5.3A	0.2B	

*FA=Franco arenoso; A= Alto; M=Media; B=Bajo.

Anexo C

Gráfica de curva de absorción de fósforo total, raíz, follaje y mazorca en maíz (*Zea mays L.*).



Nota: (Fallas et al. 2011).

Anexo D

Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en la materia seca de las plantas de maíz (Zea mays L.) a los 70 días después de siembra.

ANDEVA			Análisis post-hoc Duncan	
Gl	F ratio	Valor - p	Dosis de SiO ₂ (L. ha ⁻¹)	Mean (\pm standard error)
Materia seca (g. planta⁻¹)				
4	0.41	0.7977	0	84.97 \pm 6.94 a
			0.75	100.33 \pm 3.11 a
			1.50	90.61 \pm 8.51 a
			2.25	90.95 \pm 5.67 a
			3.00	91.35 \pm 15.65 a

Nota: Medias con diferentes letras son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Duncan ($p <$

0.05). * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$

Anexo E

Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en el contenido de Si y P absorbido por las plantas de maíz (Zea mays L.) a los 70 días después de siembra.

GI	ANDEVA		Análisis post-hoc Duncan	
	F ratio	Valor - p	Dosis de SiO ₂ (L.ha ⁻¹)	Mean (\pm standard error)
Si (mg. planta⁻¹)				
4	0.1400	0.9615	0	265.04 \pm 22.36 a
			0.75	298.01 \pm 27.22 a
			1.50	273.49 \pm 33.65 a
			2.25	282.02 \pm 18.78 a
			3.00	280.09 \pm 40.98 a
P (mg. planta⁻¹)				
4	0.3700	0.8211	0	283.93 \pm 45.97 a
			0.75	345.63 \pm 29.73 a
			1.50	317.86 \pm 33.35 a
			2.25	306.66 \pm 28.22 a
			3.00	319.89 \pm 55.68 a

Nota: Medias con diferentes letras son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Duncan ($p <$

0.05). * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$

Anexo F

Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en la altura, diámetro y tasa de crecimiento de las plantas de maíz (*Zea mays* L.) a los 100 días después de siembra.

ANDEVA			Análisis post-hoc Duncan	
Gl	F ratio	Valor - p	Dosis de SiO ₂ (L.ha ⁻¹)	Mean (\pm standard error)
Altura de la planta (cm)				
4	0.08	0.9876	0	215.94 \pm 8.36 a
			0.75	219.50 \pm 4.93 a
			1.50	220.28 \pm 4.42 a
			2.25	214.55 \pm 11.48 a
			3.00	215.55 \pm 14.07 a
Diámetro del tallo (mm)				
4	0.43	0.7848	0	19.89 \pm 1.38 a
			0.75	21.33 \pm 0.34 a
			1.50	19.5 \pm 0.63 a
			2.25	20.44 \pm 0.43 a
			3.00	20.00 \pm 1.51 a
Tasa de crecimiento (cm. día⁻¹)				
4	0.08	0.9857	0	2.16 \pm 0.08 a
			0.75	2.19 \pm 0.04 a
			1.50	2.20 \pm 0.04 a
			2.25	2.14 \pm 0.11 a
			3.00	2.15 \pm 0.14 a

Nota: Medias con diferentes letras son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Duncan ($p <$

0.05). * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$

Anexo G

Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en volumen radicular y materia seca en las plantas de maíz (Zea mays L.) a los 120 días después de siembra.

Gl	ANDEVA		Análisis post-hoc Duncan	
	F ratio	Valor - p	Dosis de SiO ₂ (L.ha ⁻¹)	Mean (\pm standard error)
Volumen radicular (cm³)				
4	0.6100	0.6691	0	6.22 \pm 1.15 a
			0.75	5.13 \pm 0.47 a
			1.50	5.54 \pm 1.06 a
			2.25	5.50 \pm 0.36 a
			3.00	5.56 \pm 0.87 a
Materia seca (g.planta⁻¹)				
4	1.74	0.2334	0	158.37 \pm 11.43 a
			0.75	180.45 \pm 5.71 a
			1.50	159.30 \pm 6.63 a
			2.25	139.84 \pm 5.93 a
			3.00	165.48 \pm 12.06 a

Nota: Medias con diferentes letras son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Duncan ($p < 0.05$). * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$

Anexo H

Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en el contenido de Si y P absorbido en las plantas de maíz (Zea mays L.) a los 120 días después de siembra.

ANDEVA			Análisis post-hoc Duncan	
Gl	F ratio	Valor - p	Dosis de SiO ₂ (L. ha ⁻¹)	Mean (\pm standard error)
P (mg. planta⁻¹)				
4	2.74	0.0892	0	159.24 \pm 32.07 a
			0.75	311.45 \pm 15.34 a
			1.50	268.17 \pm 13.28 a
			2.25	272.82 \pm 52.11 a
			3.00	209.63 \pm 48.74 a
Si (mg. planta⁻¹)				
4	1.580	0.313	0	810.89 \pm 151.22 a
			0.75	906.08 \pm 42.10 a
			1.50	906.68 \pm 50.66 a
			2.25	775.64 \pm 58.52 a
			3.00	661.96 \pm 91.21 a

Nota: Medias con diferentes letras son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Duncan ($p <$

0.05). * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$

Anexo I

Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en el contenido de P absorbido y materia seca las plantas de maíz (Zea mays L.) a los 120 días después de siembra.

Gl	ANDEVA		Análisis post-hoc Duncan	
	F ratio	Valor - p	Dosis de SiO ₂ (L.ha ⁻¹)	Mean (\pm standard error)
P (mg. mazorca⁻¹)				
4	0.70	0.6145	0	2831.67 \pm 258.55 a
			0.75	2608.27 \pm 148.23 a
			1.50	2452.86 \pm 156.84 a
			2.25	2778.37 \pm 87.85 a
			3.00	2904.82 \pm 283.45 a
Materia seca (g. mazorca⁻¹)				
4	2.35	0.1414	0	158.37 \pm 11.43 a
			0.75	180.45 \pm 5.71 a
			1.50	159.30 \pm 6.63 a
			2.25	139.84 \pm 5.93 a
			3.00	165.48 \pm 12.06 a

Nota: Medias con diferentes letras son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Duncan ($p < 0.05$). * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$

Anexo J

Resultados del análisis de varianza de cinco diferentes dosis de silicio en el rendimiento, granos por mazorca y peso del raquis en las plantas de maíz (*Zea mays* L.) a los 120 días después de siembra.

Gl	ANDEVA		Análisis post-hoc Duncan	
	F ratio	Valor - p	Dosis de SiO ₂ (L.ha ⁻¹)	Mean (± standard error)
Rendimiento (kg. ha⁻¹)				
4	0.57	0.6899	0	10996.53 ± 613.49 a
			0.75	12338.70 ± 291.24 a
			1.50	11700.77 ± 251.81 a
			2.25	11678.58 ± 936.91 a
			3.00	11957.30 ± 840.68 a
			Granos. mazorca⁻¹ (n°)	
4	0.65	0.6530	0	498.06 ± 33.16 a
			0.75	557.400 ± 19.02 a
			1.50	531.86 ± 7.88 a
			2.25	512.86 ± 21.44 a
			3.00	521.66 ± 28.25 a
			Peso del raquis. mazorca⁻¹ (g)	
4	6.05	0.0152	0	38.30 ± 2.72 a
			0.75	48.61 ± 4.43 a
			1.50	44.11 ± 3.56 a
			2.25	43.76 ± 3.87 a
			3.00	42.46 ± 4.04 a

Nota: Medias con diferentes letras son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Duncan ($p <$

0.05). * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$