



Efectividad agronómica de fuentes de fertilizantes fosfatadas en el cultivo de maíz (*Zea mays*. L)

Agronomic effectiveness of phosphate fertilizer sources in corn (*Zea mays*. L) cultivation

Eficácia agronômica de fontes de fertilizantes fosfatados na cultura do milho (*Zea mays*. L)

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.359>

Derlys Fernando López Ávalos
derlysfernando@hotmail.com

Wilfrido Daniel Lugo Pereira
wdlugo.26@hotmail.com

Osmar Lorenzo Salinas Bonhomme
osmar_b@outlook.es

Eulalio Morel López
lopezeulalio@hotmail.com

Modesto Osmar Da Silva
dasilvaoviedomodesto@gmail.com

Carlos Alberto Mongelos Barrios
carlos526mongelos@hotmail.com

Raúl Sánchez Jara
sanchezraul1984@hotmail.com

Universidad Nacional de Concepción. Concepción, Paraguay

Artículo recibido: 18 de marzo 2024 / Arbitrado: 23 de abril 2025 / Publicado: 1 de mayo 2025

RESUMEN

El estudio evaluó la efectividad agronómica de diferentes fuentes de fertilizantes fosfatados en el cultivo de maíz en Santa Elena, Concepción, Paraguay, entre septiembre y diciembre de 2023. El objetivo fue comparar el impacto del superfosfato triple y TOP PHOS, aplicados en dosis de 0, 45, 90 y 135 kg ha⁻¹ de P₂O₅, sobre el crecimiento y rendimiento del maíz. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con esquema bifactorial y tres repeticiones. Las variables analizadas incluyeron altura de planta, longitud y diámetro de mazorca, y rendimiento. Los resultados mostraron que la fuente de fósforo no influyó significativamente en la altura de planta ni en las dimensiones de la mazorca, pero sí lo hicieron las dosis de P₂O₅. El mayor rendimiento (no se especifica el valor exacto) se obtuvo con 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y superfosfato triple. Se concluye que la dosis de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ favorece la productividad del maíz en estas condiciones.

Palabras clave: Cultivo de maíz; Dosis de fósforo; Fertilizantes fosfatados; Productividad del cultivo; Rendimiento agrícola; Superfosfato triple

ABSTRACT

This study evaluated the agronomic effectiveness of different sources of phosphate fertilizers on corn crops in Santa Elena, Concepción, Paraguay, between September and December 2023. The objective was to compare the impact of triple superphosphate and TOP PHOS, applied at doses of 0, 45, 90, and 135 kg ha⁻¹ of P₂O₅, on corn growth and yield. A randomized complete block design with a two-factor scheme and three replications was used. The variables analyzed included plant height, ear length and diameter, and yield. The results showed that the phosphorus source did not significantly influence plant height or ear dimensions, but P₂O₅ doses did. The highest yield (the exact value is not specified) was obtained with 90 kg ha⁻¹ of P₂O₅ and triple superphosphate. It is concluded that a dose of 90 kg ha⁻¹ of P₂O₅ improves corn productivity under these conditions.

Key words: Corn cultivation; Phosphorus dosage; Phosphate fertilizers; Crop productivity; Agricultural yield; Triple superphosphate

RESUMO

O estudo avaliou a eficácia agronômica de diferentes fontes de fertilizantes fosfatados na cultura do milho em Santa Elena, Concepción, Paraguai, entre setembro e dezembro de 2023. O objetivo foi comparar o impacto do superfosfato triplo e do TOP PHOS, aplicados nas doses de 0, 45, 90 e 135 kg ha⁻¹ de P₂O₅, no crescimento e na produtividade do milho. Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados com um esquema bifatorial e três repetições. As variáveis analisadas incluíram a altura da planta, o comprimento e diâmetro da espiga e o rendimento. Os resultados mostraram que a fonte de fósforo não influenciou significativamente a altura da planta nem as dimensões da espiga, mas as doses de P₂O₅ sim. A maior produtividade (o valor exato não é especificado) foi obtida com 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e superfosfato triplo. Conclui-se que a dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ favorece a produtividade do milho nestas condições.

Palavras-chave: Cultura do milho; Dose de fósforo; Fertilizantes fosfatados; Produtividade das culturas; Desempenho agrícola; Superfosfato triplo

INTRODUCCIÓN

La producción de maíz representa una de las actividades agrícolas más relevantes en Paraguay, tanto por su impacto económico como por su papel fundamental en la seguridad alimentaria del país. En la campaña 2023, las estimaciones oficiales señalaron una producción cercana a los cinco millones de toneladas, con rendimientos promedio de 5,8 toneladas por hectárea. Este cultivo no solo abastece el mercado interno, sino que también constituye un importante rubro de exportación, generando divisas y empleo en las zonas rurales. El maíz, además, es la base de la alimentación animal y un insumo clave en la industria agroalimentaria, lo que subraya su importancia estratégica para el desarrollo nacional (1).

Por lo que, en las últimas décadas, la agricultura paraguaya ha experimentado un proceso de intensificación productiva, caracterizado por la incorporación de nuevas tecnologías y la adopción de sistemas de cultivo más eficientes. Este avance ha permitido la realización de múltiples cosechas anuales y el aumento sostenido de los niveles de productividad. Sin embargo, este progreso también ha traído consigo desafíos significativos en cuanto al manejo sostenible de los recursos naturales, en particular del suelo y los nutrientes esenciales para el crecimiento de los cultivos. Uno de los nutrientes más críticos en la producción de maíz es el fósforo, cuya disponibilidad en el suelo suele ser limitada debido a factores como la fijación química y la baja

movilidad (2). El fósforo es indispensable para el desarrollo radicular, la floración y la formación de granos, por lo que su deficiencia puede traducirse en pérdidas considerables de rendimiento. En este contexto, la fertilización fosfatada se convierte en una práctica esencial para garantizar el éxito de los sistemas agrícolas intensivos y la sostenibilidad de la producción (3).

Por tanto, la elección de la fuente de fósforo, la dosis aplicada y el momento de incorporación al suelo son decisiones agronómicas que inciden directamente en la eficiencia de uso del nutriente y en la rentabilidad del sistema productivo. Diversos estudios han demostrado que la respuesta del maíz a la fertilización fosfatada depende en gran medida de las características químicas del suelo, la solubilidad del fertilizante y la interacción con otros elementos, como el calcio y el azufre (4). Por ello, la recomendación de dosis y fuentes debe basarse en un conocimiento preciso de las condiciones locales y de las necesidades específicas del cultivo (5). En Paraguay, los suelos destinados al cultivo de maíz presentan una amplia variabilidad en cuanto a su textura, pH, contenido de materia orgánica y niveles de fósforo disponible. Investigaciones recientes han señalado que, en suelos de textura franco-arenosa y pH ligeramente ácido, la eficiencia de las fuentes fosfatadas puede variar considerablemente.

Así, la selección adecuada del fertilizante y su manejo son aspectos clave para maximizar

la respuesta del cultivo y minimizar las pérdidas por fijación o lixiviación. A pesar de los avances logrados en la investigación y la extensión agrícola, persisten importantes brechas de conocimiento en torno a la efectividad agronómica de las diferentes fuentes de fertilizantes fosfatados disponibles en el mercado. Mientras que el superfosfato triple ha sido tradicionalmente la fuente más utilizada, en los últimos años han surgido alternativas como el TOP PHOS, que incorpora otros nutrientes como azufre y calcio. Sin embargo, la información sobre el desempeño comparativo de estas fuentes en condiciones locales es aún limitada. Además, la literatura científica internacional ha documentado que la respuesta del maíz a la fertilización fosfatada puede variar no solo en función de la fuente y la dosis, sino también del manejo del suelo y las condiciones climáticas (6).

Mientras que, estudios realizados en Brasil y Argentina han mostrado que la aplicación de dosis óptimas de fósforo puede incrementar significativamente el rendimiento de grano, pero que dosis excesivas pueden resultar en pérdidas económicas y ambientales. En Paraguay, los resultados disponibles son aún incipientes y requieren ser ampliados y contextualizados. Otro aspecto relevante es la interacción entre el fósforo y otros nutrientes presentes en el suelo o aportados por el fertilizante. El azufre y el calcio, por ejemplo, pueden influir en la disponibilidad y absorción del fósforo, así como en el desarrollo

general de la planta. La presencia de estos elementos en fertilizantes compuestos como el TOP PHOS podría modificar la respuesta del cultivo, aunque los mecanismos subyacentes y su impacto en el rendimiento aún no han sido suficientemente estudiados en la región (7).

De ahí que, el manejo eficiente de la fertilización fosfatada no solo tiene implicancias productivas y económicas, sino también ambientales. El uso inadecuado de fertilizantes puede contribuir a la contaminación de cuerpos de agua por escorrentía o lixiviación de nutrientes, así como a la degradación de la estructura y fertilidad del suelo a largo plazo. Por ello, es fundamental avanzar hacia estrategias de manejo que optimicen el uso del fósforo y reduzcan los riesgos asociados a su aplicación. En este contexto, la investigación agronómica desempeña un papel crucial para generar información localmente relevante que oriente las recomendaciones técnicas y las políticas públicas. La evaluación comparativa de diferentes fuentes y dosis de fósforo en condiciones reales de campo permite identificar las opciones más eficientes y sostenibles para los productores, contribuyendo así a la mejora continua de los sistemas agrícolas (6, 8).

Hasta el momento, la mayoría de los estudios realizados en Paraguay se han centrado en la evaluación de dosis de fósforo, pero son escasos los trabajos que comparan de manera sistemática el desempeño de distintas fuentes comerciales

bajo condiciones controladas. Además, existe poca información sobre la interacción de estos fertilizantes con las características específicas del suelo y el clima de las principales regiones productoras del país. Por todo lo anterior, se identifica una clara necesidad de profundizar en el estudio de la efectividad agronómica de las fuentes de fertilizantes fosfatados en el cultivo de maíz, considerando tanto los aspectos productivos como los ambientales y económicos. Este conocimiento es indispensable para orientar a los productores en la toma de decisiones y para promover una agricultura más competitiva y sostenible (9, 10).

El presente trabajo se propone la evaluar el efecto de dos fuentes de fósforo –superfosfato triple y TOP PHOS– aplicadas en diferentes dosis en el cultivo de maíz en la región de Concepción. Los resultados obtenidos permitirán no solo ampliar el conocimiento científico sobre el tema, sino también ofrecer recomendaciones prácticas para mejorar la eficiencia del uso de fertilizantes y la productividad del maíz en Paraguay.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el Distrito de Belén, Departamento de Concepción, Paraguay, circunscrita en las coordenadas a 23°22'18" Sur 57°16'21" Oeste, con una elevación de 200 msnm (8). La precipitación media anual es de 1.400 mm, según datos proveídos por la Dirección de Meteorología e Hidrología de la Dirección Nacional

de Aeronáutica Civil (9). El suelo de la región posee las siguientes características, taxonómicamente pertenece al Orden Alfisol de textura franco arcillosa con panorama en forma de lomada de origen arenisca, con un relieve plano de 0 a 3% de pendiente, con drenaje bueno y de rocosidad nula (10). En el área experimental, antes de la implantación del experimento, fue obtenida una muestra de suelo, la cual fue remitida a un Laboratorio de Suelos, las características químicas y física, en entre los 0 a 20 cm de profundidad señalan: P (Mehlich⁻¹): 10 mg kg⁻¹; M.O.: 1,50 %; pH (H₂O): 6,30; K: 65 mg kg⁻¹; Ca + Mg: 4,5 cmol kg⁻¹, correspondiendo a la clase textural Franco arenoso.

El experimento se diseñó bajo un esquema de bloques completos al azar (DBCA) con disposición factorial 2 x 4, donde el factor A consistió en dos fuentes de fósforo (Superfosfato triple y TOP PHOS) y el factor B en cuatro dosis de P₂O₅ (0, 45, 90 y 135 kg ha⁻¹). Esto dio lugar a un total de 8 tratamientos, cada uno de los cuales fue replicado tres veces, sumando así 24 parcelas experimentales en total. Esta estructura permitió evaluar de manera sistemática la interacción entre las fuentes y las dosis de fósforo en el cultivo de maíz, asegurando la validez estadística de los resultados. La asignación de los tratamientos a las parcelas dentro de cada bloque se realizó de forma aleatoria, asegurando que todos los tratamientos estuvieran representados en cada repetición y

minimizando el sesgo por variabilidad ambiental. Cada unidad experimental tuvo unas dimensiones de 2 x 4,5 metros, totalizando 9 m² por parcela, y se dispusieron de manera que se redujera la influencia de factores externos como la pendiente o la exposición solar. Las fuentes de fósforo empleadas fueron Superfosfato triple (46% de P) y TOP PHOS (18% P₂O₅, 11% S, 18% Ca).

La siembra se efectuó manualmente en septiembre de 2023, con una densidad de cuatro plantas por metro lineal y separaciones de 0,30 m entre plantas y 0,70 m entre hileras y en condiciones de secano. La fertilización fosfatada se aplicó en su totalidad al momento de la siembra, junto con una fertilización básica de nitrógeno y potasio. El manejo agronómico, incluyendo el control de malezas, plagas y enfermedades, fue uniforme en todas las parcelas. La cosecha se realizó a los 120 días después de la emergencia, evaluando variables como altura de planta, longitud y diámetro de mazorca, y rendimiento de grano, para analizar en detalle la respuesta del maíz a los diferentes tratamientos.

La aplicación de las fuentes de fósforo incluidas en el experimento se llevó a cabo en el momento de la siembra, incorporando el 100% de la dosis. Adicionalmente, se realizó una fertilización básica consistente en 70 kg/ha de nitrógeno (N), utilizando urea como fuente, y 60 kg/ha de potasio (K), proveniente de cloruro de potasio. Ambos fertilizantes fueron aplicados a 10 cm de distancia

de las plantas y a una profundidad aproximada de 10 cm, empleando una matraca manual. El monitoreo de malezas, plagas y enfermedades se llevó a cabo diariamente. Para el control de malezas, se aplicó glifosato, un herbicida de acción total. En cuanto al manejo de plagas, se emplearon diferentes productos químicos según la etapa del cultivo: a los 8 días después de la emergencia se aplicó cipermetrina (0.3 L/ha) para el control de insectos masticadores de hojas; a los 45 días después de la emergencia se utilizó una mezcla de acetamiprid (300 g/ha) y clorpirifos (1 L/ha) para combatir insectos chupadores de hojas, seguida de una aplicación de pirimifos (0.5 L/ha) y deltametrina (0.3 L/ha).

La cosecha de las mazorcas se llevó a cabo a los 120 días después de la emergencia. Se utilizó una parcela útil compuesta por dos hileras centrales de 0.70 m de longitud cada una (0.70 × 3) y una separación de 0.70 m entre hileras, lo que resultó en un área total de evaluación de 2.1 m². Tras la recolección, las mazorcas se dejaron secar al sol durante 24 horas antes de proceder con el trillado manual para extraer los granos. Posteriormente, se eliminaron las impurezas y se realizó el pesaje de los granos de cada tratamiento utilizando una balanza de precisión, obteniendo así el rendimiento final del cultivo.

Las determinaciones evaluadas fueron: Altura de la planta: a evaluación se realizó a los 120 días después de la siembra. Para ello, se utilizó una

cinta métrica y se midió la altura de las plantas en centímetros, desde el cuello de la raíz hasta el ápice del tallo. En cada parcela, se seleccionaron al azar cinco plantas para la medición. Altura de inserción de la mazorca: La determinación de esta variable se registró en centímetros utilizando una cinta métrica. Para ello, se seleccionaron al azar cinco plantas por tratamiento y se midió la altura desde el cuello de la planta hasta el punto de inserción de la mazorca. Esta medición se realizó un día antes de la cosecha y se expresó en metros por planta.

Longitud y diámetro de las mazorcas: Se seleccionaron cinco mazorcas al azar en cada unidad experimental. Durante la cosecha, las mazorcas fueron retiradas de las plantas y almacenadas en bolsas para su posterior limpieza y medición. La longitud y el diámetro se determinaron con la ayuda de un calibrador Vernier, expresándose en centímetros. Rendimiento: Luego de la cosecha manual, los granos fueron separados de las mazorcas y pesados con una balanza de precisión. Los datos obtenidos de cada tratamiento y sus respectivas repeticiones fueron registrados en gramos por parcela y, posteriormente, convertidos a kilogramos por hectárea en función del área de la parcela útil.

Para garantizar la aleatoriedad en la selección de plantas y mazorcas durante la evaluación de las variables agronómicas, en cada parcela se seleccionaron cinco plantas al azar. La aleatoriedad se aseguró numerando todas las plantas de la

parcela útil y utilizando un generador de números aleatorios para elegir las plantas a medir. De igual manera, para la evaluación de la longitud y el diámetro de las mazorcas, se seleccionaron cinco mazorcas al azar de las plantas previamente elegidas, evitando sesgos y asegurando la representatividad de la muestra dentro de cada unidad experimental.

La unidad de muestreo para las variables agronómicas correspondió a cinco plantas por parcela, seleccionadas de la parcela útil, que estaba compuesta por las dos hileras centrales de cada unidad experimental (con un área de 2,1 m²). En estas plantas se midieron la altura total y la altura de inserción de la mazorca. Para la evaluación de la longitud y el diámetro de las mazorcas, se tomaron cinco mazorcas al azar de esas mismas plantas. El rendimiento se determinó cosechando y trillando manualmente todas las mazorcas de la parcela útil, pesando los granos y extrapolando los resultados a kilogramos por hectárea, lo que permitió obtener datos precisos y comparables entre tratamientos.

Para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos en el experimento, se utilizó el software estadístico InfoStat versión 2020, ampliamente reconocido en investigaciones agronómicas por su robustez y facilidad de manejo de diseños experimentales multifactoriales. Antes de proceder con el análisis de varianza (ANAVA), se verificaron los supuestos fundamentales de normalidad y homocedasticidad de los residuos.

La normalidad se comprobó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, mientras que la homogeneidad de varianzas se evaluó con el test de Levene. En todos los casos, los datos cumplieron con los supuestos requeridos, lo que permitió la aplicación válida de los procedimientos estadísticos paramétricos. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$), las medias de los tratamientos fueron comparadas mediante el test de Tukey a los niveles de significancia del 1% y 5%, categorizando así los tratamientos y facilitando la interpretación de los resultados.

Adicionalmente, se realizó un análisis de regresión para explorar la relación entre las dosis de fósforo aplicadas y las variables de respuesta, especialmente el rendimiento de grano y la altura de planta. Para ello, se ajustaron modelos polinomiales de segundo grado (regresión cuadrática), considerando la dosis de P_2O_5 como variable independiente y las variables agronómicas como dependientes. Este enfoque permitió identificar la dosis de máxima eficiencia técnica (DMET) para cada variable, proporcionando información relevante para la recomendación agronómica. Los coeficientes de determinación (R^2) y los valores de significancia de los modelos se reportaron para respaldar la validez de los ajustes realizados.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados de la Tabla 1, indican que no hubo diferencias estadísticas significativas en la altura de las plantas de maíz entre las fuentes de fósforo evaluadas, es decir, tanto el Superfosfato triple como el TOP PHOS produjeron alturas similares (1,56 m y 1,54 m, respectivamente), con un valor de P de 0,701, muy superior al nivel de significancia convencional. Esto sugiere que la elección de la fuente de fósforo no influyó de manera relevante en el crecimiento en altura de las plantas bajo las condiciones del experimento. Por el contrario, las dosis de P_2O_5 aplicadas sí afectaron significativamente la altura de las plantas ($P < 0,001$). La mayor altura promedio se obtuvo con 90 kg ha⁻¹ de P_2O_5 (1,62 m), seguida por 135 kg ha⁻¹ (1,58 m), 45 kg ha⁻¹ (1,55 m) y la dosis 0 (1,49 m), mostrando que la fertilización fosfatada incrementó notablemente el crecimiento respecto al testigo. No se detectó una interacción significativa entre fuente y dosis, aunque la tendencia fue cercana al umbral de significancia, y los errores estándar oscilaron entre $\pm 0,025$ y $\pm 0,035$ m, lo que respalda la precisión de las mediciones.

Tabla 1. Efecto de fuentes y dosis de fósforo en la altura de plantas de maíz (*Zea mays* L.). Horqueta, Paraguay. 2024.

Factor	Niveles	Altura, m	Valor P	EE±
A: Fuentes	Superfosfato triple (46% P)	1,56	<0,001	0,025
	TOP PHOS (18% P ₂ O ₅)	1,54		
B: Dosis, kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	0	1,49 ^c		0,035
	45	1,55 ^b		
	90	1,62 ^a		
	135	1,58 ^{ab}		
Interacción (A×B)		-	0,057	0,03

a, b, c Letras no comunes difieren según Test de Tukey.

La Figura 1, muestra la curva de respuesta ajustada para la altura de plantas de maíz en función de las dosis crecientes de fósforo aplicadas en Horqueta, Paraguay, en 2024. Los resultados evidencian un incremento progresivo en la altura de las plantas a medida que se incrementa la dosis de P₂O₅, alcanzando el valor máximo con la aplicación de 90 kg ha⁻¹, donde se registró una altura promedio de 1,62 m por planta. Sin embargo, a partir de esta dosis, el aumento en la altura tiende a estabilizarse, observándose una respuesta decreciente con dosis superiores, lo que es característico de la ley de rendimientos decrecientes en la nutrición vegetal.

El ajuste de la curva permitió determinar la dosis de máxima eficiencia técnica (DMET) para la altura de plantas, que fue de 115 kg ha⁻¹ de P₂O₅, con una altura estimada de 1,61 m por planta. Estos resultados confirman que la fertilización fosfatada tiene un efecto positivo y significativo sobre el crecimiento en altura del maíz, aunque existe un punto óptimo a partir de la cual dosis mayores no generan incrementos sustanciales. Este comportamiento coincide con hallazgos de investigaciones previas, que también reportan una respuesta significativa del maíz a la aplicación de fósforo, especialmente en suelos con baja disponibilidad inicial de este nutriente.

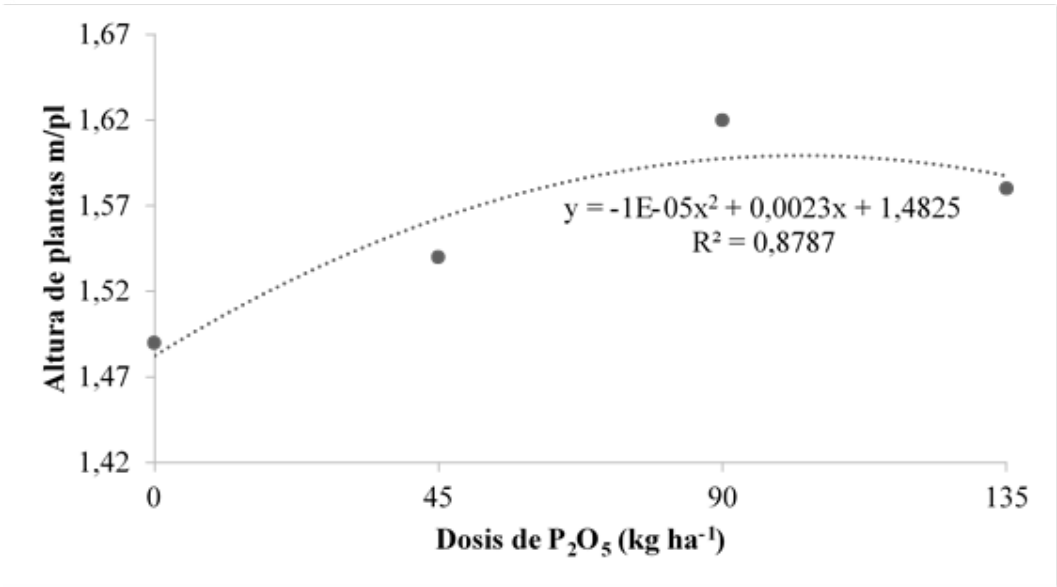


Figura 1. Curva de respuesta ajustada para la altura de plantas del maíz afectado por la aplicación de fósforo, Horqueta, Paraguay. 2024.

Los resultados de la Tabla 2, muestran que no se observaron diferencias estadísticas significativas en la longitud ni en el diámetro de la mazorca de maíz entre las dos fuentes de fósforo evaluadas (Superfosfato triple y TOP PHOS), con valores de P de 0,24 y 0,12 respectivamente. En términos numéricos, el Superfosfato triple alcanzó una longitud promedio de 18,45 cm y un diámetro de 3,93 cm, mientras que TOP PHOS presentó valores muy similares (18,28 cm de longitud y 3,90 cm de diámetro), lo que indica que la fuente de fósforo utilizada no tuvo un impacto relevante en estas características morfológicas de la mazorca.

En contraste, las dosis de P₂O₅ aplicadas (factor B) sí influyeron significativamente tanto en la longitud como en el diámetro de las mazorcas, con valores de P < 0,001 y 0,003, respectivamente. La dosis de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ resultó en los mayores valores para ambas variables (19,70 cm de longitud y 4,02 cm de diámetro), seguida por la dosis de 135 kg ha⁻¹, 45 kg ha⁻¹ y la dosis 0, que presentó los valores más bajos (16,86 cm y 3,80 cm). No se detectó interacción significativa entre fuente y dosis, lo que indica que el efecto positivo del fósforo sobre el desarrollo de la mazorca se debe principalmente a la cantidad aplicada y no al tipo de fertilizante fosfatado utilizado.

Tabla 2. Efecto de fuentes y dosis de fósforo sobre la longitud y el diámetro de la mazorca de maíz. Horqueta, Paraguay, 2024.

Factor	Niveles	Longitud de mazorca, cm	EE±	P	Diámetro de mazorca, cm	EE±	P
A: Fuente de P₂O₅	Superfosfato triple (46% P)	18,45	0,18	0,24	3,93	0,04	0,12
	TOP PHOS (18% P ₂ O ₅)	18,28			3,90		
B: Dosis de kg ha⁻¹ P₂O₅	0	16,86 ^c	0,21	<0,001	3,80 ^c	0,04	0,003
	45	18,12 ^b			3,91 ^b		
	90	19,70 ^a			4,02 ^a		
	135	18,84 ^{ab}			3,95 ^{ab}		
Interacción (A×B)				0,40			0,39

a, b, c Letras no comunes difieren según Test de Tukey.

La Figura 2, ilustra la curva de respuesta ajustada para la longitud y el diámetro de la mazorca de maíz en función de las dosis crecientes de fósforo aplicadas en Horqueta, Paraguay, durante 2024. Los resultados muestran que tanto la longitud como el diámetro de la mazorca aumentaron significativamente con el incremento de la dosis de P₂O₅ hasta alcanzar un máximo en torno a los 90 kg ha⁻¹. Con esta dosis, se obtuvo la mayor longitud promedio de mazorca (19,7 cm) y el mayor diámetro (4,02 cm), evidenciando una respuesta positiva y marcada del cultivo a la fertilización fosfatada.

A partir de la dosis óptima, la curva tiende a estabilizarse, mostrando que dosis superiores no generan incrementos adicionales relevantes en las dimensiones de la mazorca. Este comportamiento se ajusta a la ley de rendimientos decrecientes, donde el efecto del fósforo es más notorio en las primeras aplicaciones y se atenúa a medida que se incrementa la dosis. Estos resultados confirman que la aplicación adecuada de fósforo es fundamental para maximizar el desarrollo de la mazorca en maíz, y permiten identificar el rango de dosis más eficiente para lograr mejores resultados productivos bajo las condiciones locales del estudio.

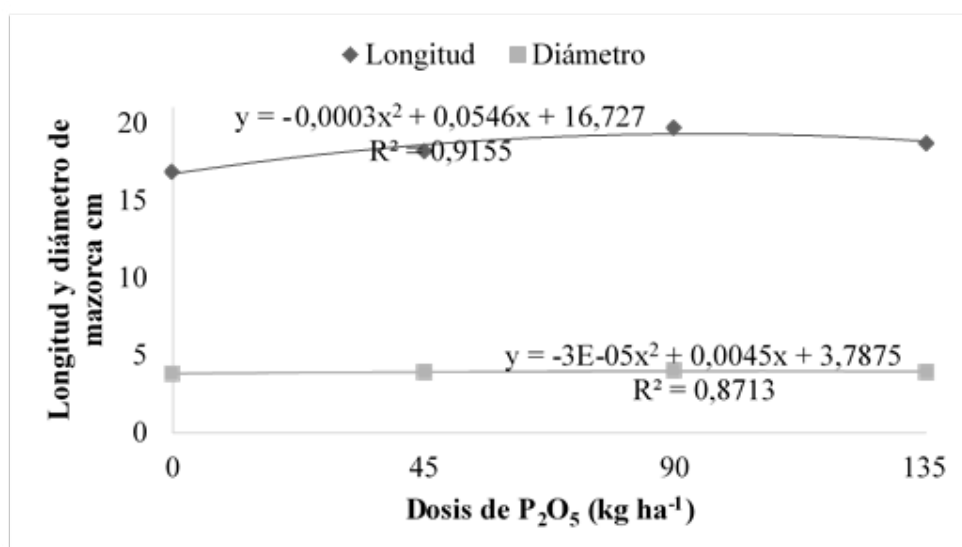


Figura 2. Curva de respuesta ajustada para la longitud y diámetro de mazorca del maíz afectado por la aplicación de fósforo, Horqueta, Paraguay. 2024.

Los resultados de la **Tabla 3** muestran que el rendimiento de maíz fue significativamente influenciado tanto por la fuente como por la dosis de fósforo aplicada. En cuanto al factor A (fuente de P_2O_5), el Superfosfato triple (46% P) generó un rendimiento promedio de 2.509,2 kg ha⁻¹, significativamente superior al obtenido con TOP PHOS (18% P_2O_5), que alcanzó 2.335,1 kg ha⁻¹ ($P = 0,001$). Esto indica que, bajo las condiciones del experimento, el Superfosfato triple fue más eficiente para incrementar la productividad del maíz en comparación con TOP PHOS.

Respecto al factor B (dosis de P_2O_5), se observaron diferencias altamente significativas

($P < 0,001$) entre los tratamientos. La mayor producción se logró con la dosis de 90 kg ha⁻¹ de P_2O_5 (2.670,8 kg ha⁻¹), seguida de 135 kg ha⁻¹ (2.460,9 kg ha⁻¹), 45 kg ha⁻¹ (2.320,5 kg ha⁻¹) y la dosis 0 (2.120,0 kg ha⁻¹). Estos resultados evidencian que la aplicación de fósforo incrementa el rendimiento del maíz, alcanzando el máximo con 90 kg ha⁻¹, y que dosis superiores no necesariamente generan mayores beneficios. No se detectó interacción significativa entre fuente y dosis ($P = 0,087$), lo que sugiere que el efecto de cada factor es independiente.

Tabla 3. Efecto de fuentes y dosis de fósforo sobre el rendimiento de maíz (kg ha⁻¹). Horqueta, Paraguay, 2024.

Factor	Niveles	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	EE±	P
A: Fuente de P ₂ O ₅	Superfosfato triple (46% P)	2.509,2 ^a	6,53	0,001
	TOP PHOS (18% P ₂ O ₅)	2.335,1 ^b		
B: Dosis, kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	0	2.120,0 ^c	6,25	<0,001
	45	2.320,5 ^b		
	90	2.670,8 ^a		
	135	2.460,9 ^{ab}		
Interacción (A×B)				0,087

a, b, c Letras no comunes difieren según Test de Tukey.

La Figura 3, presenta la curva de respuesta ajustada para el rendimiento de maíz en función de las dosis de fósforo aplicadas en Horqueta, Paraguay, durante 2024. Los resultados muestran un incremento significativo del rendimiento a medida que se aumenta la dosis de P₂O₅, alcanzando el valor máximo con la aplicación de 90

kg ha⁻¹, donde se obtuvo un rendimiento promedio de 2.670,8 kg ha⁻¹. A partir de esta dosis óptima, el rendimiento tiende a estabilizarse o incluso a disminuir ligeramente con dosis superiores, como se observa con la aplicación de 135 kg ha⁻¹ (2.460,9 kg ha⁻¹).

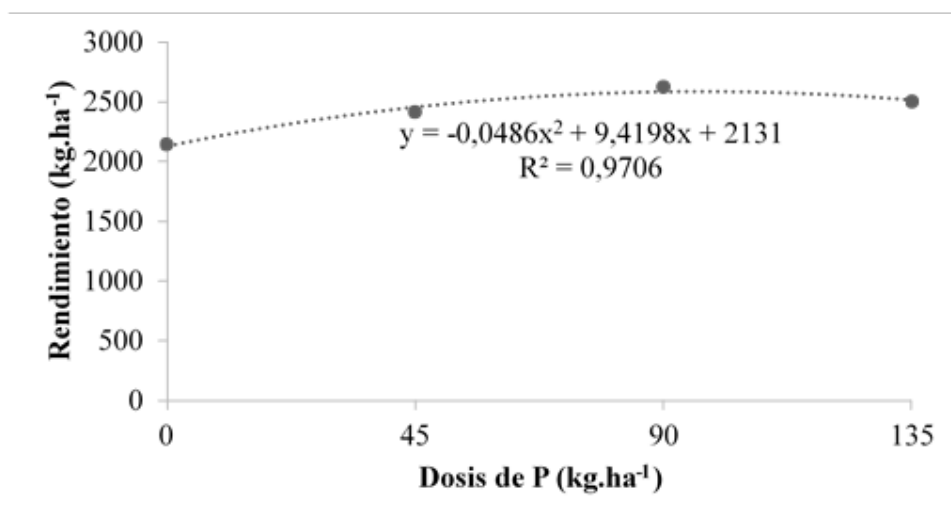


Figura 3. Curva de respuesta ajustada para el rendimiento de maíz afectado por la aplicación de fósforo, Horqueta Paraguay, 2024

La forma de la curva refleja la ley de rendimientos decrecientes, indicando que las primeras aplicaciones de fósforo generan los mayores incrementos en la productividad, mientras que dosis adicionales no resultan en aumentos proporcionales e incluso pueden ser menos eficientes o innecesarias. Estos resultados confirman la importancia de una fertilización fosfatada adecuada, ya que permiten identificar la dosis de máxima eficiencia técnica para el rendimiento de maíz bajo las condiciones locales del experimento, optimizando el uso del insumo y la rentabilidad del cultivo.

Discusión

La evaluación de la efectividad agronómica de distintas fuentes y dosis de fertilizantes fosfatados en el cultivo de maíz permitió identificar patrones claros en la respuesta del cultivo a la fertilización. En primer lugar, los resultados muestran que la altura de las plantas de maíz no presentó diferencias estadísticas significativas entre las fuentes de fósforo utilizadas, es decir, tanto el Superfosfato triple como el TOP PHOS tuvieron un comportamiento similar (Tabla 1). Sin embargo, sí se observaron diferencias notables en función de la dosis de P_2O_5 aplicada, siendo la dosis de 90 kg ha^{-1} la que proporcionó la mayor altura promedio ($1,62 \text{ m}$), como se visualiza en la Figura 1. Este hallazgo coincide con investigaciones previas que destacan la importancia del fósforo en el crecimiento inicial

del maíz y su impacto directo sobre el desarrollo vegetativo (11- 13).

Mientras que, el efecto positivo se tradujo en incrementos en la longitud y diámetro de $2,84 \text{ cm}$ en longitud y $0,22 \text{ cm}$ en diámetro respecto a la dosis 0, evidenciando la importancia de una fertilización fosfatada adecuada para el óptimo desarrollo de los órganos reproductivos del maíz (Tabla 2, Figura 2). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Rodrigues y García (14); Ortiz-Isabel y Ramos (15), quienes destacan que la respuesta del maíz a la fertilización fosfatada depende en gran medida de la disponibilidad inicial de fósforo en el suelo y de la dosis aplicada. Además, aunque el TOP PHOS aporta azufre y calcio, en este estudio no se detectaron beneficios adicionales de estos nutrientes sobre las dimensiones de la mazorca, lo que sugiere que el fósforo fue el principal factor limitante bajo las condiciones experimentales. Así, se reafirma que una correcta estrategia de fertilización fosfatada no solo mejora el crecimiento vegetativo, sino que también impacta directamente en el potencial productivo del cultivo.

La aplicación de 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 generó el mayor rendimiento ($2.670,8 \text{ kg ha}^{-1}$), lo que puede explicarse porque a esa dosis se optimizan los procesos metabólicos y fisiológicos que determinan la formación y llenado de los granos (Tabla 3, Figura 3). El Superfosfato triple mostró mayor eficiencia que TOP PHOS, probablemente debido a su mayor

concentración de fósforo disponible (46% P), lo que facilita una absorción más rápida y eficiente por parte de las raíces en las primeras fases del ciclo del cultivo. Aunque TOP PHOS aporta azufre y calcio, estos nutrientes no fueron limitantes en el suelo experimental, por lo que el fósforo fue el principal factor determinante del rendimiento. Además, el fósforo favorece el desarrollo de raíces profundas y ramificadas, permitiendo a la planta explorar un mayor volumen de suelo y acceder a más agua y nutrientes, lo que es especialmente importante en condiciones de secano como las del presente experimento (16).

Desde el punto de vista fisiológico, una adecuada disponibilidad de fósforo incrementa la tasa de cuajado de granos y el peso final de los mismos, ya que mejora el transporte de fotoasimilados hacia los órganos de reserva. Por otro lado, Brito y Emategui (17) manifiestan que cuando el fósforo es insuficiente, se observa una reducción en el número de granos por mazorca y en el peso de los granos, lo que se traduce en menores rendimientos. La curva de respuesta observada en la Figura 3, donde el rendimiento se incrementa hasta un punto óptimo y luego tiende a estabilizarse o disminuir con dosis mayores, es consistente con la ley de rendimientos decrecientes y refleja que el exceso de fósforo no aporta beneficios adicionales y puede incluso afectar la eficiencia de absorción de otros nutrientes esenciales.

La ausencia de interacción significativa entre fuente y dosis de fósforo en la mayoría de las variables evaluadas indica que el efecto positivo del fósforo sobre el crecimiento y rendimiento del maíz depende principalmente de la cantidad aplicada, más que del tipo de fertilizante utilizado. Esto se explica según Withers et al. (2), por la solubilidad y composición química de las fuentes fosfatadas pueden variar, la planta responde fundamentalmente a la disponibilidad efectiva de fósforo en el suelo, que es la fracción realmente absorbible por las raíces. Estudios isotópicos han demostrado que fuentes con mayor solubilidad, como el superfosfato triple (SFT), facilitan una absorción más rápida y eficiente de fósforo en etapas tempranas del cultivo, lo que favorece el desarrollo radical y la absorción de nutrientes. Sin embargo, cuando la dosis aplicada es adecuada, la diferencia entre fuentes tiende a diluirse, ya que la cantidad total de fósforo disponible para la planta es el factor limitante principal (18).

Además, la respuesta lineal a la dosis de fósforo observada en varios estudios indica que el crecimiento y rendimiento del maíz aumentan con la cantidad aplicada hasta alcanzar un punto óptimo, más allá del cual los incrementos son marginales o nulos. Esto sugiere, de acuerdo con Chien et al. (7), que, para maximizar la eficiencia agronómica y económica, el productor debe priorizar la dosis correcta de fósforo que satisfaga

las demandas del cultivo y las características del suelo, antes que la elección de la fuente, siempre considerando la relación costo-beneficio y la disponibilidad local de los fertilizantes. En suelos con baja disponibilidad de fósforo, la aplicación de dosis óptimas mejora significativamente la biomasa y el rendimiento, independientemente de la fuente utilizada. Por lo tanto, la recomendación práctica es ajustar la dosis de fósforo a las condiciones específicas del lote y utilizar la fuente más accesible y económica sin comprometer la nutrición del cultivo (19).

De ahí que, el análisis de regresión realizado para las variables altura de planta, longitud y diámetro de mazorca, y rendimiento, permitió ajustar curvas de respuesta que reflejan la ley de rendimientos decrecientes Figuras 1, 2 y 3. Es decir, las primeras aplicaciones de fósforo generan incrementos notables en las variables agronómicas, pero a partir de una determinada dosis, los aumentos adicionales son cada vez menores. En este estudio, la dosis de máxima eficiencia técnica (DMET) para la altura de planta se estimó en 115 kg ha^{-1} de P_2O_5 , mientras que, para el rendimiento, el óptimo se alcanzó con 90 kg ha^{-1} (14). Estos resultados son consistentes con lo reportado Nunes et al. (6) en la literatura, donde se señala que la respuesta del maíz a la fertilización fosfatada varía según el tipo de suelo, el contenido inicial de fósforo y la capacidad de fijación del nutriente. En suelos con baja disponibilidad de P,

como el evaluado en este experimento (10 mg kg^{-1} de P Mehlich-1), la respuesta a la fertilización suele ser más marcada, justificando la inversión en este insumo para mejorar la productividad (20).

Es importante destacar que el TOP PHOS, aunque menos eficiente en términos de rendimiento que el Superfosfato triple, aporta además azufre y calcio, nutrientes que pueden ser relevantes en suelos con deficiencias específicas. Sin embargo, en este estudio no se observaron efectos adicionales atribuibles a estos elementos, lo que sugiere que el fósforo fue el factor limitante principal bajo las condiciones experimentales (1). El manejo agronómico uniforme, la correcta aplicación de fertilizantes y el control de factores bióticos y abióticos permitieron minimizar la variabilidad experimental, fortaleciendo la validez de los resultados obtenidos (8). En términos prácticos, los resultados de este estudio ofrecen información valiosa para la toma de decisiones en el manejo de la fertilización fosfatada en maíz.

Recomiendan la aplicación de 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 como dosis óptima para maximizar el rendimiento, preferentemente utilizando Superfosfato triple, aunque la elección de la fuente puede ajustarse según la disponibilidad y el costo en cada situación particular. Además, se destaca la importancia de realizar análisis de suelo previos para ajustar las recomendaciones a las condiciones específicas de cada lote (1,14). Finalmente, este trabajo contribuye a la generación de

conocimiento localmente relevante y puede servir de base para futuras investigaciones orientadas a optimizar el uso de fertilizantes en sistemas agrícolas intensivos. Se recomienda profundizar en el estudio de la interacción del fósforo con otros nutrientes y en la evaluación de su impacto ambiental, a fin de promover una agricultura más sostenible y eficiente en el uso de los recursos (1, 3, 5).

CONCLUSIONES

Los resultados confirman que la dosis de fósforo es un factor determinante para el desarrollo y la productividad del maíz. Si bien tanto el Superfosfato triple como el TOP PHOS mostraron comportamientos similares en la mayoría de las variables evaluadas, fue la cantidad de fósforo aplicada la que marcó diferencias significativas en la altura de planta, la longitud y el diámetro de la mazorca, así como en el rendimiento de grano. Es importante señalar que el Superfosfato triple presentó una ligera superioridad en el rendimiento, aunque esta diferencia no fue tan marcada en las demás variables, lo que sugiere que la fuente puede ser secundaria frente a la dosis adecuada.

Por otro lado, se identificó que la dosis óptima de fósforo para maximizar la productividad del maíz bajo las condiciones del estudio fue de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅. A pesar de que se evaluaron dosis superiores, no se observaron incrementos adicionales significativos en las variables

agronómicas ni en el rendimiento, lo que evidencia la importancia de ajustar la fertilización según las necesidades reales del cultivo y del suelo. Así, la selección de la fuente de fósforo puede basarse en criterios de disponibilidad y costo, siempre que se garantice el aporte adecuado del nutriente, facilitando la toma de decisiones para el productor y optimizando el uso de los recursos.

Finalmente, cabe destacar que el manejo agronómico uniforme y el control de factores externos fueron fundamentales para la validez experimental, permitiendo que las recomendaciones obtenidas sean extrapolables a condiciones similares. En consecuencia, se recomienda aplicar 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ al momento de la siembra, acompañado de un manejo integral de nutrientes y buenas prácticas agrícolas. No obstante, es necesario profundizar en estudios que evalúen la interacción del fósforo con otros nutrientes y su impacto ambiental, de modo a avanzar hacia sistemas de producción de maíz más sostenibles y eficientes.

CONFLICTO DE INTERESES Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses por la publicación de este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pavinato P, Cherubin M, Soltangheisi A, Rocha G, Chadwick D, Jones D. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. *Sci Rep.* 2020;10(1):15615. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72302-1>

2. Withers P, Rodrigues M, Soltangheisi A, De Carvalho T, Guilherme L, Benites D, et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. *Sci Rep.* 2018;8(1):1-13. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.09.0533>
3. Hansel F, Ruiz Diaz D, Amado T, Rosso L. Deep banding increases phosphorus removal by soybean grown under no-tillage production systems. *Agron J.* 2017;109(3):1091-1098. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z>
4. Hopkins B, Hansen N. Phosphorus management in high-yield systems. *J Environ Qual.* 2019;48(5):1265-1280. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.03.0130>
5. de Oliveira J, Inda A, Barrón V, Torrent J, Tiecher T, de Oliveira F. Soil properties governing phosphorus adsorption in soils of Southern Brazil. *Geoderma Reg.* 2020;22: e00318. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00318>
6. Nunes R, Sousa M, Goedert W, Vivaldi L. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. *Rev Bras Cienc Solo.* 2011; 35:877-888. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300022>
7. Chien S, Prochnow L, Tu S, Snyder C. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. *Nutr Cycl Agroecosyst.* 2011;89(2):229-255. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9390-4>
8. Torales M, Martínez B, Román J, Rojas K, de Egea V, Torres J, et al. Actualización de áreas de riesgo y perfil epidemiológico de hantavirus en Paraguay (2013-2020). *Mem Inst Investig Cienc Salud.* 2022;20(3):108-116. <https://doi.org/10.18004/mem.iics/1812-9528/2022.020.03.108>
9. Galeano P, Alvarez W, Fois A, Paredes A, Rojas A, Grabski E. Disponibilidad de cobre en suelos de la Región Oriental del Paraguay. *Rev Cient UCSA.* 2022;9(1):72-80. <https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2022.009.01.072>
10. Díaz M, Fiori C, Ayala L, Yubero F, Martínez López R, López M. Actividad de fosfatasa alcalina y crecimiento del arroz con inoculación biológica y micronutrientes. *Rev Mex Cienc Agric.* 2020;11(3):481-492. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i3.1873>
11. Alves J, Magalhães M, Goulart D, Dantas B, de Gouvêa J, Purcino R, et al. Mecanismos de tolerância da variedade de milho "Saracura". *Rev Bras Milho Sorgo.* 2002;1(01). <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v1n01p%p>
12. Lopes H, Ramos L, Sales L, Smerine G, Junior D, Bega R. Milho safrinha: efeito da adubação fosfatada associado a área de cultivo. *Braz J Anim Environ Res.* 2021;4(2):2196-2209. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n2-051>
13. Herrera R, Vásquez S, Granja F, Molina-Müller M, Capa-Morocho M, Guamán A. Interacción de nitrógeno, fósforo y potasio sobre características del suelo, crecimiento y calidad de brotes y frutos de cacao en la Amazonía Ecuatoriana. *Bioagro.* 2022;34(3):277-288. <https://doi.org/10.51372/bioagro343.7>
14. Rodrigues B, García Y. Eficiencia de uso del nitrógeno en maíz fertilizado de forma orgánica y mineral. *Agron Mesoam.* 2018;29(1):207-219. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.27127>
15. Ortiz-Isabel B, Ramos F. El programa Arco para el control del huanglongbing en Tecoman, Colima, y Axtla, San Luis Potosí, México. *Agro Productividad.* 2019;12(6). <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1379>
16. Guimarães A, Amaral Júnior T, Almeida J, Pena G, Vittorazzi C, Pereira M. Estrutura populacional e impacto da seleção recorrente em milho-pipoca por marcadores SSR-EST. *Acta Sci Agron.* 2018;40: e35218. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.35218>
17. Britos E, Emategui V. Diferentes formulaciones fosfatadas en la fertilización del maíz. In: I Congreso Paraguayo de Ciencia del Suelo; IV Simposio Paraguayo de Manejo y Conservación de Suelos. San Lorenzo, PY, FCA-UNA. 2015;134-137. https://sopacis.org.py/wp-content/uploads/2023/09/CPCS_FINAL_230908_161242.pdf

- 18.** Ramiro R, Jiménez A, Palacios D. Efecto del nitrógeno bien expresado en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en el cantón Catamayo, provincia de Loja. Bosques Latitud Cero. 2025;15(1):92-100. <https://doi.org/10.54753/blc.v15i1.2315>
- 19.** González-Molina L, Virgen-Vargas J, del Carmen Moreno-Pérez E, de Jesús-Prado T. Demanda de N, P y K en líneas de maíz de Valles Altos de México. Rev Mex Cienc Agrícolas. 2024;15(8): e3185-e3185. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i8.3185>
- 20.** Rosa A, Ruiz D, Hansel F. Phosphorus fertilizer optimization is affected by soybean varieties and placement strategy. J Plant Nutr. 2020;43(15):2336-2349. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1771583>