Estudiante: Catalina Riascos Rubiano

Asesora: PhD. Elizabeth Gilchrist Ramelli

Efectos del déficit de fósforo en plantas de maíz

Trabajo de grado para obtener el título de bióloga

Universidad EAFIT

Medellín, 8 de noviembre de 2023

Efectos del déficit de fósforo en plantas de maíz

Resumen

La creciente población mundial alcanzará probablemente los 9.000 millones de habitantes en 2050, lo que requerirá más del 70% de la producción de alimentos para satisfacer esa demanda de crecimiento demográfico. Con respecto a esto, una preocupación común para la productividad agrícola es la baja disponibilidad de fósforo (P) en los suelos, lo que dificulta el crecimiento de las plantas en muchas regiones alrededor del mundo. Una de las plantas que puede presentar más afectación en su crecimiento es el maíz, esto se puede evidenciar principalmente mediante el seguimiento de la acumulación de materia seca durante el ciclo del cultivo. El maíz (*Zea mays L.*), es el tercer cereal, después del trigo y el arroz, de mayor cultivo y consumo en forma de alimento para humanos, animales y para varios procesos industriales. El análisis de crecimiento usa medidas directas como el peso de la materia seca, que depende del tamaño, actividad y duración del área foliar. En este trabajo se evaluó, el efecto de la falta de fósforo en plantas de maíz, por medio de tres tratamientos: Completo que contiene todos los macronutrientes, P50 que tiene la mitad de la dosis de fósforo y –P que no contiene fósforo. Finalmente, se podrá comprobar la importancia de proporcionar la cantidad adecuada de P al cultivar plantas de maíz.

Palabras clave: productividad agrícola, cultivo, tratamientos.

Introducción

Es posible que, la creciente población mundial alcance los 9.000 millones de habitantes en 2050, lo que requerirá más del 70% de la producción de alimentos para satisfacer esa demanda de crecimiento demográfico. Por tanto, la gestión eficiente de los recursos para mejorar la producción agrícola es vital (Bechtaoui, et al., 2021). La baja disponibilidad de P dificulta el crecimiento de las plantas en muchos suelos en todo el mundo y es una limitación común para la productividad agrícola, particularmente en los países en desarrollo donde el acceso a los fertilizantes fosforados está restringido por la economía de los mismos (Richardson et al., 2011). La teoría rizoeconómica predice que las plantas deficientes en fósforo serían menos deficientes si tuvieran más carbono disponible para invertir en estrategias de adquisición de nutrientes (Postma y Lynch, 2011). A nivel celular vegetal, el P es un elemento crucial para diversas funciones fisiológicas y bioquímicas. Este hace parte de una amplia gama de procesos metabólicos, en concreto, en la síntesis de ácidos nucleicos y en la generación de energía de las plantas, lo que dificulta su crecimiento en condiciones de inanición de este elemento. Además, el P interviene en última instancia, en el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, en muchos contextos agrícolas, muchos suelos son deficientes en P y esta deficiencia limita gravemente su rendimiento y constituye una amenaza para la seguridad alimentaria mundial (Bechtaoui, et al., 2021).

Los fertilizantes desempeñan un papel fundamental en la producción de cultivos y también mejoran su calidad. Los fertilizantes equilibrados son muy importantes porque mejoran y potencian el desarrollo de las plantas y también aumentan el rendimiento. Entre los nutrientes esenciales, el fósforo (P) es el segundo, después del nitrógeno, por lo que es un nutriente indispensable en la agricultura. Interviene en el desarrollo de las plantas y en su metabolismo. El fósforo forma parte de los ácidos nucleicos, de las proteínas estructurales y de las enzimas.

La mayoría de los cultivos de cereales y hortalizas requieren fósforo en gran cantidad (Ali, et al., 2022).

Una de las plantas en las que se puede evidenciar más afectación por falta de P es el maíz. El crecimiento y desarrollo de las raíces son críticos para la absorción temprana de fósforo por parte de las plantas, ya que este es relativamente poco disponible e inmóvil en muchos suelos. Por el contrario, el crecimiento de las raíces depende de la cantidad de P en la planta (Mollier y Pellerin, 1999).

El maíz (*Zea mays L.*), es el tercer cereal más importante, después del trigo y el arroz, que se cultiva y consume en forma de alimento para humanos, para animales y en varios procesos industriales. El maíz, es una de las plantas domesticadas más antiguas que data de hace 7,000 años en el centro de México por los nativos mesoamericanos (Chaudhary, Kaila y Rather, 2013). En Colombia es el principal cultivo de ciclo corto genera el 4% de los empleos agrícolas y aporta un 3% al PIB agropecuario del país (Hoyos-Gómez y Ocampo, 2018). El maíz tiene una importante dimensión social en la dieta de millones de colombianos, aportando el 9% del aporte energético diario de su alimentación a través del consumo de alimentos como arepas y mazamorra, entre otros. En promedio, un colombiano consume 30 kg de maíz al año (Figueroa, 2019).

Cuando se pretende estudiar el impacto de uno de los elementos esenciales, requiere que las plantas se cultiven en condiciones experimentales en las que solo esté ausente el elemento investigado. Estas condiciones son extremadamente difíciles de conseguir con plantas cultivadas en un medio complejo como el suelo, ya que no se puede controlar el aporte de cada mineral. En cambio, existen formulaciones de soluciones nutritivas como la solución Hoagland, que contiene todos los macronutrientes conocidos necesarios para el rápido crecimiento de las plantas. Las concentraciones de estos elementos se fijan en los niveles más altos posibles sin que produzcan síntomas de toxicidad, que pueden ser varios órdenes de magnitud superiores a los que se encuentran en el suelo alrededor de las raíces de las plantas (Taiz y Zeiger, 2006).

El crecimiento del cultivo está influenciado principalmente por el clima y los nutrimentos. Es por esto que, el análisis de crecimiento ha sido usado para el estudio de los factores que influyen en el desarrollo y rendimiento de las plantas, mediante el seguimiento de la acumulación de materia seca durante el ciclo del cultivo. El análisis de crecimiento usa medidas directas como el peso de la materia seca, que depende del tamaño, actividad y duración del área foliar. Con esto se pueden calcular variables, como: la tasa de asimilación neta (TAN), que indica la eficiencia fotosintética promedio, al medir la ganancia neta de asimilados por unidad de área foliar y tiempo. En cuanto al tiempo que el follaje persiste, se tiene la duración de área foliar (DAF) como índice que representa la producción de hojas en el periodo de crecimiento del cultivo (Aguilar Carpio, Escalante Estrada y Aguilar Mariscal 2015).

Así que, en este trabajo se evaluó, por medio de algunas de las variables mencionadas y de tres tratamientos con diferentes niveles de nutrición aplicados a todas las plantas según correspondía: la completa que contiene todos los macronutrientes, la P50 que tiene la mitad de fósforo y la –P que no contiene fósforo, además de que se agregó una solución con micronutrientes a todas las plantas, también el efecto de la falta de fósforo en plantas de maíz y se hablará sobre cómo esto puede influir en la producción agrícola de esta planta.

Materiales y métodos

El diseño experimental para el análisis de la carencia de fósforo se llevó a cabo en un esquema de Diseño Completamente al Azar (DCA) con tres niveles del nutriente y 10 replicaciones, dando como resultado 30 plantas en total. Estos niveles corresponden a: contenido completo de fósforo (C), contenido medio con respecto al total recomendado para que la planta se desarrolle con normalidad (nombrado -P50) y, por último, carencia total de fósforo (denominado -P). A todas las plantas se les aplicó una solución de micronutrientes de forma homogénea. Los experimentos se realizaron en un cobertizo administrado por Área de Sistemas Naturales y Sostenibilidad de la Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería de la Universidad EAFIT, sede Medellín. Se realizaron experimentos, una a partir del trabajo de grado de la Ingeniera Física Manuela Ramos, entre julio y agosto de 2022. Los otros dos realizados en 2023, entre los meses de junio y octubre.

Figura 1. Primeros 7 DDS.

Figura 2. Distribución de las unidades experimentales con los tratamientos dispuestos al azar

Figura 3. Primer muestreo a los 21 días después de la siembra.

Figura 4. Almacenamiento en botellas de vidrio de las soluciones usadas para los tratamientos -P y -P50 (el tratamiento C no se retrata en este caso), así como recipiente medidor individual.

Para el desarrollo del experimento se utilizaron los siguientes materiales:

- 30 materas tipo P-17 (17 cm de diámetro)
- Cuarzo de tamaño de partícula fino y grueso como sustrato
- Tela de pañal
- Semillas de maíz “Lerl”

En las siguientes tablas se describen los tratamientos de macronutrientes (tabla 1) y el tratamiento de micronutrientes (tabla 2).

Tabla 1. Cantidades de macronutrientes por tratamiento

Nutriente	**Sales en solución C**	**Sales en solución -p**	**Sales en solución -p50**	**Aporte neto solución C**	**Aporte neto solución -p**	**Aporte neto solución -p50**
N	$Ca(NO_3)_2$ KNO_3	$Ca(NO_3)_2$	$Ca(NO_3)_2$	210	210	210
P	KH_2PO_4	-	KH_2PO_4	31	0	15
K	KNO_3 KH_2PO_4	K_2SO_4	K_2SO_4 KH_2PO_4	235	391	215
Mg	$MgSO_4$	$MgSO_4$	$MgSO_4$	97	73	73
Ca	$Ca(NO_3)_2$	$Ca(NO_3)_2$	$Ca(NO_3)_2$	200	301	301
S	$MgSO_4$	K_2SO_4 $MgSO_4$	K_2SO_4 $MgSO_4$	128	256	176

Tabla 2. Micronutrientes aplicados a las plantas.

Elemento	Forma disponible	Cantidad
Fe	Sulfato ferroso EDTA Agua	20g 20g 200ml
Zn	Sulfato de Zn EDTA Agua	3g 3g 200ml
Mn	Sulfato de Mn EDTA Agua	3,2g 3,2g 200ml
B	Ácido bórico	3,2g
Ácido cítrico	Ácido orgánico C6H8O7	3,2g
Cu	Sulfato de Cu	1g
Mo	Molibdato de amonio tetrahidratado	0,05g
Mg	Sulfato de Mg (grado técnico) Agua	600g 1000ml

La aplicación de los tratamientos se realizó de forma manual, vertiendo 15mL de la solución correspondiente a cada tratamiento de macronutrientes y 15mL de solución de micronutrientes por planta, medidos con un tubo Falcon. Las soluciones nutritivas se almacenaron en botellas de vidrio marcadas adecuadamente (figura 4).

Para mantener las plantas hidratadas, durante los primeros 7 dds (días después de la siembra) se regó cada una de las plantas con 15ml de agua desionizada. Posteriormente, se aplicaron 15ml de la solución de micronutrientes para cada una de las plantas y 15ml de cada solución de macronutrientes según correspondiera al tratamiento.

Para el primer experimento, se tomaron los datos a los 73 dds, 80 dds y 91 dds. Para el segundo experimento, se tomaron datos de peso seco a los 41 dds. Para el último experimento se realizó la toma de datos a los 21, 24, 27 y 30 dds, se tomaron medidas de longitud con un metro y diámetro del tallo con un pie de rey a 2cm por encima del sustrato, de cinco plantas por tratamiento escogidas al azar. Adicionalmente, los datos de peso se tomaron con una balanza analítica.

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el análisis de la varianza ANOVA, con el fin de determinar la interacción entre los niveles de P y el crecimiento de la planta.

Resultados

En el experimento 1 se encontró que la longitud del tratamiento –P presenta decrecimiento, mientras que la del tratamiento P50 y el completo sí presentan crecimiento, siendo finalmente mayor la longitud del tratamiento completo (figuras 5).

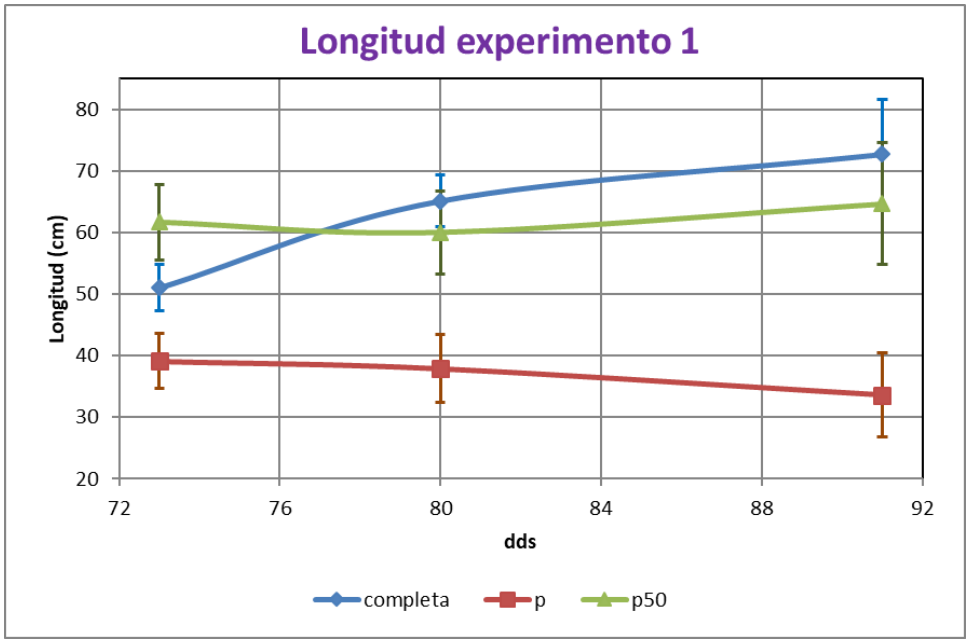

Figura 5. Comparación de los promedios y desviación estándar de longitud experimento 1. Se muestra la variabilidad de los datos según el tratamiento y a través del paso del tiempo.

Para el diámetro de las plantas de maíz del primer experimento entre los 73 y 91 dds, se encontró que para el tratamiento completo y el –P, el diámetro presenta crecimiento y luego tiende a estabilizarse, pero para el tratamiento P50, al principio crece y luego decrece (Figura 6).

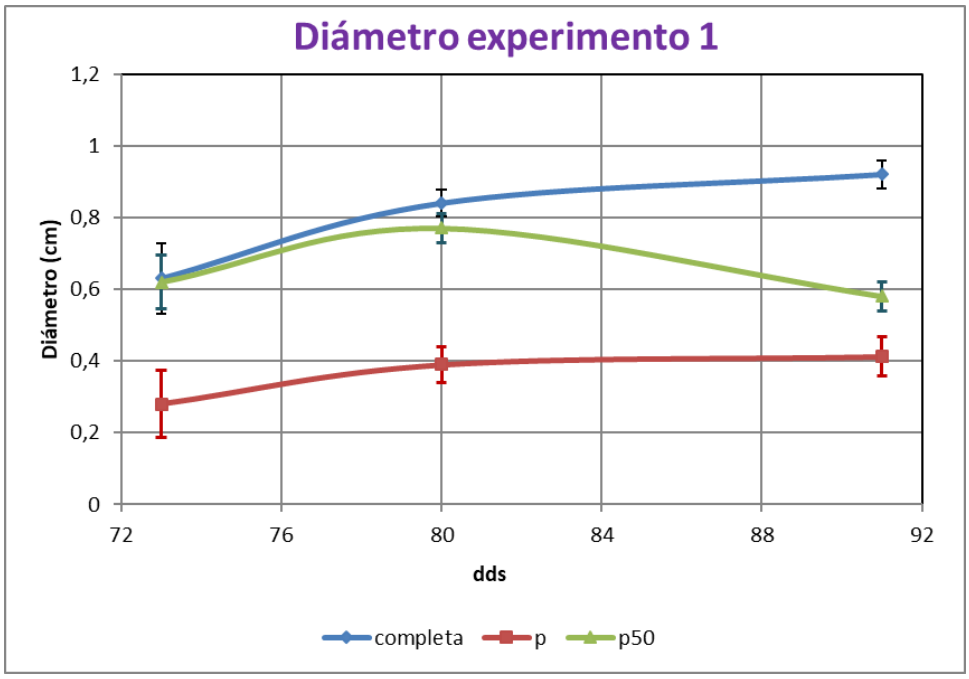

Figura 6. Comparación de los promedios y desviación estándar de diámetro experimento 1. Se muestra la variabilidad de los datos según el tratamiento y a través del paso del tiempo.

En el experimento 2, para la variable del peso seco tomada a los 41 dds, se encontró que las plantas con tratamiento completo presentan la mayor masa y las –P la menor masa, en promedio (figura 7).

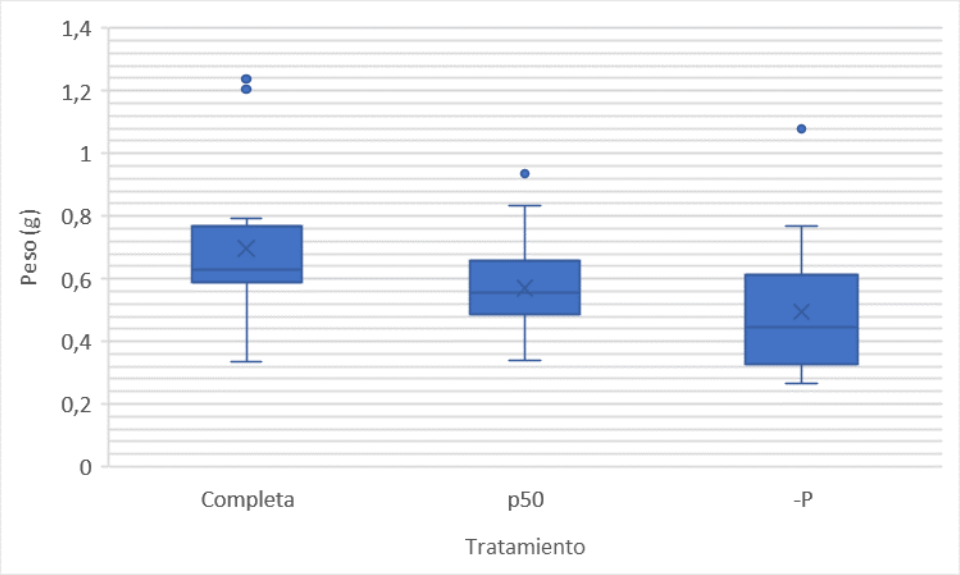

Figura 7. Diagrama de caja para los grupos de tratamientos según el peso seco del segundo experimento, con su correspondiente media, mediana y cuadrado medio.

En el tercer experimento se tomaron los datos de altura, diámetro entre los 21 y 30 dds (figuras 8 y 9) y peso fresco a los 34 dds (figura 10).

Para la altura de las plantas se observó que se presenta variación en los primeros días de crecimiento con los tratamientos, pero al final todas las plantas muestran crecimiento, siendo el tratamiento completo el que más longitud tiene y –P el que menos (figura 8).

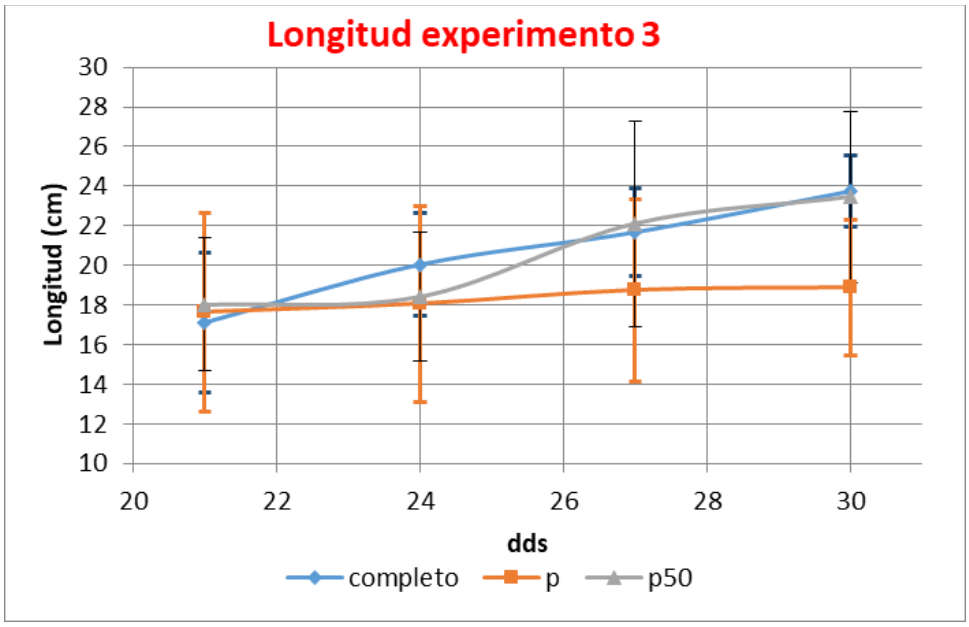

Figura 8. Comparación de los promedios y desviación estándar de longitud experimento 3. Se muestra la variabilidad de los datos según el tratamiento y a través del paso del tiempo.

Para el diámetro del experimento 3, se evidencia un crecimiento continuo en las plantas con tratamiento completo y, en las plantas con P50 y –P un crecimiento menos acelerado (figura 9).

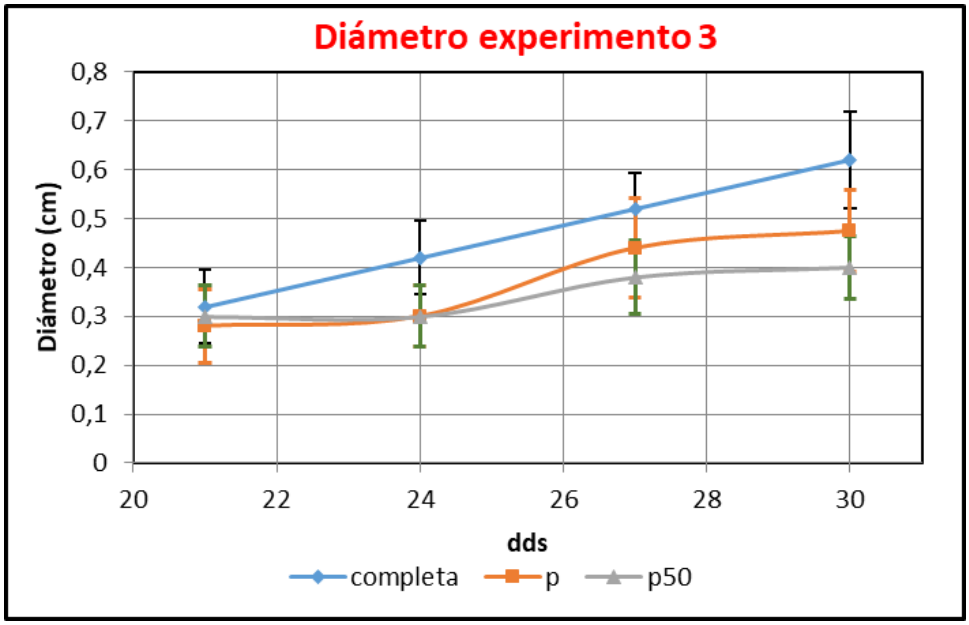

Figura 9. Comparación de los promedios y desviación estándar de diámetro experimento 3. Se muestra la variabilidad de los datos según el tratamiento y a través del paso del tiempo.

Para la variable peso fresco a los 34 días después de la siembra, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 10).

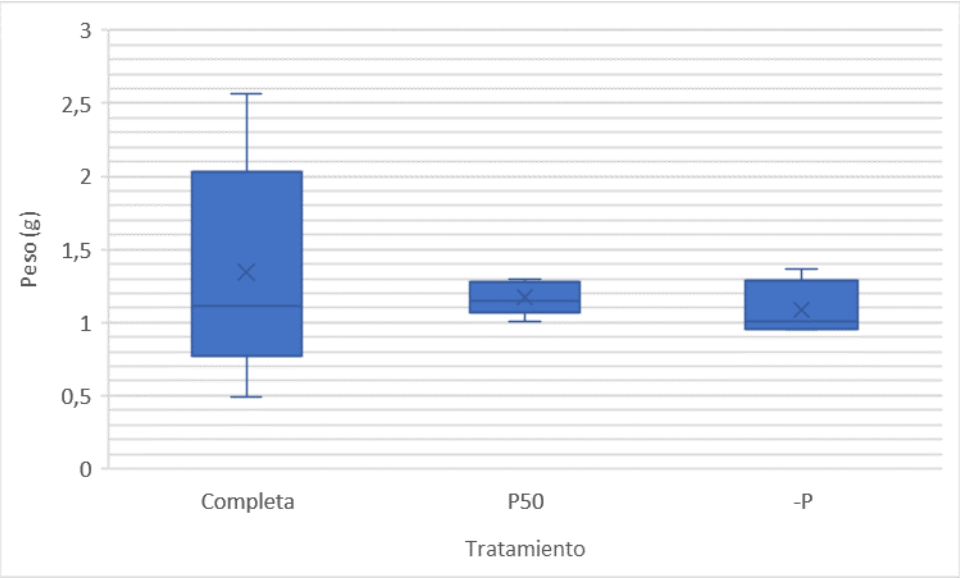

Figura 10. Diagrama de caja para los grupos de tratamientos según el peso fresco de la tercera y última repetición, con su correspondiente media, mediana y cuadrado medio.

Discusión

Al analizar la longitud (figura 5), se muestra que, a pesar de que para la primera fecha en la que se tomaron estos datos las plantas con P50 muestran una mayor longitud, para la última fecha, las plantas con solución completa muestran un mayor crecimiento, lo que se esperaría, ya que estas últimas son las que tenían la solución con todos los macronutrientes, sin embargo no se muestra una diferencia estadísticamente significativa en la solución completa y P50, posiblemente por la etapa de crecimiento en a que se encuentran. En el caso del diámetro (figura 6), las plantas con solución completa y las –P, ambas evidencian crecimiento, aunque las –P

tienen menor diámetro, como se podría esperar, pero al ver el comportamiento de las plantas P50, se podría decir que, al no obtener la cantidad suficiente de P, estas solo la pueden utilizar hasta cierta etapa de crecimiento y luego tienden a perder grosor del tallo, posiblemente para intentar obtener más nutrientes, es por esto que Ali, et al. (2022) recomiendan, en el ámbito de la agricultura, aplicar la dosis completa de P en las primeras etapas de crecimiento de las plantas de maíz, para que ayude a potenciar su crecimiento y cuando ya se alcance la etapa reproductiva disminuirla a la mitad, ya que así la planta podrá mejorar su productividad, porque si se tiene un exceso de P, se puede tener un déficit de zinc, ya que ambos se complementan en los diferentes procesos de la planta. Además la aplicación continua de P provoca una acumulación significativa del mismo tanto en la capa superficial del suelo como en el subsuelo, lo que da lugar a una eficiencia máxima del P, con respecto a disponibilidad en el suelo, inferior al 55% (Khan, et al., 2018).

Al ver el peso seco, del experimento 2 (figura 7) y peso fresco del experimento 3 (figura 10), también se evidencia la influencia del P en las plantas de maíz como también lo muestran los resultados de Bechtaoui, et al. (2021), quienes reportan una reducción de la biomasa de materia seca mayor en las plantas deficientes en P que en las bien abastecidas de P de los cultivos de soja, caupí, trigo y maíz. Las concentraciones de P en los brotes también disminuyeron bajo las carencias de P, mostrando una reducción moderada (26,2%) en la soja, una reducción débil (9,7%) en el caupí, y mayores contenidos de reducción (200 y 185,4%) en las plantas deficientes en P de trigo y maíz, y se puede ver reflejado y relacionar con los datos ya presentados de longitud y diámetro.

Por último, al observar los datos de longitud y diámetro del experimento 3, en la longitud (figura 8) se evidencia que las plantas que más varían son las P50, esto se podría dar por la explicación descrita anteriormente porque estas plantas estaban en las primeras etapas de crecimiento, así que se demuestra que, en especial en estas primeras etapas, necesitan de la cantidad completa de P, sin embargo, a los 30 dds se tiene que las plantas con solución completa alcanzaron una mayor longitud, seguidas por las P50 y las –P se quedan con poca longitud, como se esperaba. Con respecto al diámetro (figura 9), presenta una actividad muy variable, pero que nuevamente puede ser esperada, ya que para los 30 dds se muestra que el tratamiento completo tiene mayor diámetro seguido de P50 y –P, pero aparentemente en esta etapa de crecimiento presenta poca diferencia estadísticamente significativa.

Así que, si se comparan los datos de longitud y diámetro analizando las etapas de crecimiento de la planta, se ve que en el experimento 3, donde las plantas están en sus primeras etapas crecimiento, varían más que las del experimento 1, en el que las plantas están mucho más cerca al punto de floración y por tanto al de producción, esto se puede deber a que en al principio las plantas tienen menos dds y se necesitan adaptar al cambio de maceta y a los tratamientos, mientras que, mientras más dds tienen más se pueden estabilizar entre tratamiento y presentar longitud y diámetro más cercano entre sí. En el libro de Taiz & Zeiger (2006), mencionan que el P puede influir en la maduración de la planta, que se expresa en especial en la longitud y el diámetro, lo que además puede ayudar a explicar la variación que pueden presentar las plantas mientras asimilan este nutriente.

Conclusiones

Es importante garantizar la cantidad adecuada de P al cultivar plantas de maíz, en especial en las primeras etapas de desarrollo de la planta, ya que, si no se tiene lo suficiente o se carece

completamente de este macronutriente, puede afectar de manera significativa el desarrollo y productividad de estas plantas, esto se puede ver reflejado a medida que la planta avanza en sus etapas de crecimiento.

Para futuros estudios, se podría evaluar de manera más profunda el comportamiento que presentan las plantas al tener un 50% del suministro de un macronutriente como el P, así mismo, se podría utilizar otras especies de plantas o con otro macronutriente, siendo esta otra manera de ayudar en la agricultura y el conocimiento del desarrollo de las plantas. En el ámbito de una replicación en laboratorio, es necesario revisar con detalle las soluciones nutritivas, de forma que se pueda optimizar su producción, almacenamiento y aplicación. Así mismo, se hace imperante considerar un sistema de riego automático o bien hidropónico que garantice un cuidado automático y constante del experimento.

Referencias

Aguilar Carpio, C., Escalante Estrada, J. A. S., & Aguilar Mariscal, I. (2015). Análisis de crecimiento y rendimiento de maíz en clima cálido en función del genotipo, biofertilizante y nitrógeno. *Terra latinoamericana*, 33(1), 51-62.

Ali, S., Shah, S., Amin, M., Khan, A. A., Ahmad, D., Ullah, I., Ahmad, F., Sajjad, & Azam, S. (2022). Efficacy of Soil Applied Phosphorus and Foliar Zinc Application on Different Growth Stages to Improve Productivity of Maize (Zea mays). *Sarhad Journal of Agriculture*, *38*(3), 912–917. https://doi-org.ezproxy.eafit.edu.co/10.17582/journal.sja/2022/38.3.912.917

Bechtaoui, N., Rabiu, M. K., Raklami, A., Oufdou, K., Hafidi, M., & Jemo, M. (2021). Phosphate-dependent regulation of growth and stresses management in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 679916.

Chaudhary, H., Kaila, V. and Rather, S. (2013). Maize. *Alien Gene Transfer in Crop Plants, Volume 2*, pp.27-50.

Figueroa, E. (2019). Maíz para Colombia visión 2030, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Centro Internacional para el Mejoramiento del maíz y del Trigo (Cimmyt). url: https://www.fenalce.org/archivos/maiz2030.pdf.

Hoyos-Gómez, G. M., & Ocampo, J. E. (2018). Producción y consumo del maíz en Colombia, descripción de la cadena y propuesta de estrategias para un mejor desempeño de la misma. *Fondo Editorial Biogénesis*, 95-112.

Khan, A., Lu, G., Ayaz, M., Zhang, H., Wang, R., Lv, F., ... & Zhang, S. (2018). Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems. Agriculture, Ecosystems & Environment, 256, 1-11.

Mollier, A. and Pellerin, S. (1999). Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. *Journal of Experimental Botany*, 50(333), pp.487-497.

Postma, J. A., & Lynch, J. P. (2011). Theoretical evidence for the functional benefit of root cortical aerenchyma in soils with low phosphorus availability. *Annals of botany*, 107(5), 829-841.

Richardson, A., Lynch, J., Ryan, P., Delhaize, E., Smith, F., Smith, S., Harvey, P., Ryan, M., Veneklaas, E., Lambers, H., Oberson, A., Culvenor, R. and Simpson, R. (2011). Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant and Soil*, 349(1-2), pp.121-156.

Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Plant Physiology* (4th ed., Vol. 1). Sinauer Associates.