

Aplicación de nanomolibdeno en frijol y su impacto sobre la eficiencia del nitrógeno

Ezequiel Muñoz-Márquez¹
Juan Manuel Soto-Parra²
Ramona Pérez-Leal²
Rosa María Yáñez-Muñoz²
Linda Citlalli Noperi-Mosqueda²
Esteban Sánchez-Chávez^{1§}

¹Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo AC. Av. 4 sur 3820, Fracc. Vencedores del Desierto, Ciudad Delicias, Chihuahua, México. CP. 33089. Tel. 639 4740400. (emunoz@ciad.mx). ²Universidad Autónoma de Chihuahua-Facultad de Ciencias Agrotecnológicas. Av. Pascual Orozco s/n, Campus 1, Santo Niño, Chihuahua, México. Tel. 614 4391844. (jmsotoparra@gmail.com; lindanoperi@gmail.com; rleal@uach.mx; roskey1388@gmail.com).

§Autor para correspondencia: esteban@ciad.mx.

Resumen

El uso eficiente del nitrógeno es una técnica utilizada para mejorar los rendimientos sin el aporte excesivo de fertilizantes nitrogenados, del mismo modo, el uso de nanofertilizantes es una alternativa para solucionar los problemas nutricionales con mayor eficiencia y precisión, ambos con el propósito de incrementar productividad de los cultivos. Por lo que el objetivo del presente estudio fue evaluar la aplicación foliar de nanofertilizante de molibdeno (Mo) combinado con la fertilización edáfica de NH_4NO_3 , sobre la biomasa total, rendimiento y eficiencia en frijol ejotero. Las plantas fueron germinadas y cultivadas bajo condiciones controladas en un invernadero experimental en Lázaro Cárdenas, Meoqui, Chihuahua, México en septiembre de 2020 y se regaron con solución nutritiva. Los tratamientos consistieron en la aplicación foliar de cuatro dosis del nanofertilizante de molibdeno BROADACRE (0, 5, 10 y 20 ppm de Mo), complementado con la aplicación edáfica de cuatro dosis de nitrógeno en forma de NH_4NO_3 (0, 3, 6 y 12 mM de N). Los resultados obtenidos indican que las dosis de 10 ppm de Mo y 6 mM de N favorecieron la acumulación de biomasa y el mayor rendimiento por planta; es importante destacar, que la mayor eficiencia se logró con las dosis de 5 ppm de Mo y 3 mM de N. Finalmente, se concluye que la aplicación de NanoMo incrementa la eficiencia de uso del nitrógeno, pudiendo reducir las aplicaciones excesivas de fertilizantes nitrogenados, sin afectar el rendimiento del frijol ejotero.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L., micronutrientes, nanofertilizantes, nutrición de cultivos.

Recibido: junio de 2022

Aceptado: septiembre de 2022

Introducción

El nitrógeno (N) es un elemento móvil que siempre está expuesto a factores de pérdida por lixiviación, volatilización y desnitrificación (Bowles *et al.*, 2018); su aplicación excesiva e ineficaz, combinada con el manejo ineficiente del agua de riego tiene como consecuencia la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas y corrientes superficiales (Landeros *et al.*, 2016). Al sufrir desnitrificación, puede ser liberado a la atmósfera como óxido nitroso, que es un fuerte gas de efecto invernadero (Bouwman *et al.*, 2002).

Las aplicaciones excesivas de N y sus efectos negativos en el medio ambiente se han convertido en una preocupación a nivel mundial, por lo que investigadores e investigadoras de todo el mundo, tienen como objetivo desarrollar estrategias como el uso eficiente del N para mejorar los rendimientos sin el aporte excesivo de fertilizantes nitrogenados. El N orgánico e inorgánico absorbidos por las raíces, pueden ser transportados entre los diferentes tejidos de la planta para optimizar la eficiencia de uso del nitrógeno (UEN) durante su desarrollo, y mantener su crecimiento y rendimiento óptimo (Dong y Lin, 2020). Además, estudios actuales se centran en encontrar alternativas que impacten directamente en la producción de los cultivos (Raliya *et al.*, 2017), es por esto, que la nanotecnología se posiciona como una alternativa para la agricultura con un enorme potencial para desarrollar nanofertilizantes que ayudan y dan solución a problemas de las demandas biológicas, asociadas a la nutrición de los cultivos con mayor eficiencia y precisión y de esta manera, mejorar la eficiencia de los fertilizantes para incrementar la productividad, con el fin de migrar de una agricultura convencional a una agricultura de mayor precisión (Naderi y Danesh, 2013; Chhipa, 2017).

El uso de nanofertilizantes provoca un aumento en su eficiencia, minimiza la aplicación excesiva y sus potenciales efectos tóxicos; por lo que se tiene una oportunidad para que la nanotecnología tenga una influencia significativa en la agricultura, la economía del productor y el medio ambiente (Naderi y Danesh, 2013). Una de las características más destacadas de los nanofertilizantes es que tienen una alta superficie de contacto del ion nutriente, una liberación más lenta y precisa a comparación de los fertilizantes tradicionales (Subramanian *et al.*, 2015). Por otra parte, a pesar del prometedor panorama que presenta el uso de nanofertilizantes, es necesario evaluarlos de manera más profunda para determinar que el uso de esta nueva tecnología es superior al uso de los fertilizantes tradicionales, además de que los estudios deben también enfocarse en establecer los efectos sobre el desarrollo de las plantas (Subramanian *et al.*, 2015; Kah *et al.*, 2018). Por lo que el objetivo del presente estudio fue evaluar la aplicación foliar de nanofertilizante de Mo combinado con la fertilización edáfica de NH_4NO_3 , sobre la biomasa total, rendimiento y eficiencia en frijol ejotero.

Materiales y métodos

Manejo del cultivo

El cultivo se desarrolló en un invernadero cubierto con malla antiáfidos ubicado en Lázaro Cárdenas, Meoqui, Chihuahua, México (28° 23' 9.80232'' latitud norte, 105°36' 58.09392'' longitud oeste) en septiembre de 2020. Las semillas de frijol cv Strike se germinaron en charolas de poliestireno de 200 cavidades, 12 días después de la germinación se trasplantaron a bolsas de polietileno calibre 400 y 10 kg de capacidad, las cuales contenían vermiculita y perlita como sustrato en una proporción 2:1.

Se aplicó una solución nutritiva completa durante 20 días según Hoagland y Arnon (1950) y de acuerdo a lo propuesto por Sánchez *et al.* (2006) para frijol ejotero a partir de la germinación de las plantas, la cual llevó la siguiente composición: 6 mM NH_4NO_3 , 1.6 mM K_2HPO_4 , 0.3 mM K_2SO_4 , 4 mM $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 1.4 mM MgSO_4 , 5 μM Fe-EDDHA, 2 μM $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 1 μM of $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.25 μM $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.3 μM Na_2MoO_4 y 0.5 μM H_3BO_3 (todos los reactivos J. T. Baker, Estado de México, México), esto con el objetivo de que las plantas estuvieran bien nutridas en sus primeras etapas de desarrollo y evitar mortandad por desnutrición temprana para asegurar la vida de las plantas hasta cosecha.

Pasados los 20 días, se aplicaron los tratamientos diferenciados de N cada tercer día y hasta término del cultivo. Los tratamientos de Mo se aplicaron cada semana a partir de la aparición de las hojas verdaderas, y se realizaron cinco aplicaciones atendiendo a las especificaciones del producto.

Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo de tratamientos tipo factorial combinatorio con cuatro repeticiones, las dosis de Mo en forma de nanofertilizante de molibdeno (NanoMo): 0, 5, 10 y 20 ppm con aplicación foliar, y las dosis de N en forma de NH_4NO_3 : 0, 3, 6 y 12 mM con aplicación edáfica, se consideró la dosis de 6 mM de N como óptima según Sánchez *et al.* (2016).

Muestreo vegetal

Una vez alcanzada la madurez fisiológica de las plantas (60 días después de la germinación), se tomaron las muestras. Las plantas fueron separadas en sus diferentes órganos raíz, hoja, tallo y fruto. Con el material en fresco, conservado a 4° C (Refrigerador Forma Scientific, Marietta, Ohio, USA), se determinó el rendimiento, mientras que el material seco se utilizó para determinar la biomasa total, la concentración de N total y la concentración de Mo. Todo el material se lavó previamente con agua corriente para eliminar la contaminación ambiental superficial, después se realizaron dos enjuagues más con agua destilada y agua tridestilada (J. T. Baker, Estado de México, México). Se utilizaron cuatro repeticiones por tratamiento para cada variable analizada.

Análisis vegetal

Biomasa

Después de la descontaminación ambiental, las muestras se colocaron en un horno de aire forzado a 70 °C (Horno Felisa® St. Livonia, Michigan, USA) durante 24 h y hasta su total desecación. La producción de biomasa total se calculó en base al peso seco del material vegetal expresado en gramos por planta (g planta^{-1}) (Ponce *et al.*, 2019).

Rendimiento

El rendimiento se obtuvo con el promedio de las repeticiones del peso fresco de los frutos por planta. Los ejotes verdes se recolectaron de cada una de las plantas cultivadas y se pesaron al momento del muestreo (balanza analítica, Precision Electronic Balance and Company Limited, Milpitas, CA, USA). El rendimiento total se expresó en gramos por planta (g planta^{-1}) (Ponce *et al.*, 2019).

Determinación de N total

Las muestras secas se molieron en una licuadora (licuadora Osterizer[®], Milwaukee, Wisconsin, USA) y se colocaron en bolsas de plástico (Nasco Whirl-Pak[®], Cincinnati, Ohio, USA) para su análisis. La concentración de N total se determinó por medio del analizador elemental orgánico flash 2000 (Thermo Scientific[®] Corporation, Cambridge, UK), el cual basa su funcionamiento en el método de Dumas (Armendáriz *et al.*, 2019). Se colocó una cápsula de estaño en una microbalanza (Mettler Toledo[®], Columbus, Ohio, USA), se pesaron 9 mg de pentóxido de vanadio (JT Baker, México) y 3 mg de la muestra finamente molida, una vez tomado el peso se cerró la cápsula. Enseguida, las muestras se colocaron en el automuestreador del Flash 2000 para su análisis; también se analizaron dos estándares certificados de Metionina y Sulfanilamida (Thermo Scientific[®] Corporation, Cambridge, UK) para garantizar la exactitud de los resultados. Finalmente se corrió el análisis y la concentración de N total se expresó en porcentaje.

Eficiencia agronómica del N edáfico y Mo foliar aplicados

La eficiencia agronómica (EA) del N y Mo, considera la cantidad en rendimiento o biomasa total del cultivo por unidad de fertilizante aplicado, estimado de acuerdo con la siguiente relación: $EA = R/F$. $EA = B/F$. Donde: R= rendimiento en frutos por planta; B= biomasa total por planta; y F= cantidad de fertilizante aplicado (Díaz *et al.*, 2004).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza, para determinar diferencias entre las medias de los tratamientos, se utilizó la prueba de Tukey (95%), utilizando el software estadístico SAS 9 (SAS Institute, 2007). Los datos mostrados son valores medios \pm error estándar.

Resultados y discusión

Efecto de la aplicación edáfica de N complementada con fertilización foliar de Mo sobre la biomasa total

Uno de los parámetros fundamentales para medir la eficiencia de los nutrientes es la acumulación de biomasa (Szarka *et al.*, 2012). Las aplicaciones foliares de NanoMo y NH_4NO_3 edáfico influyeron directamente en la biomasa total del frijol ejotero (Figura 1). La mayor acumulación de biomasa se obtuvo con las dosis de 10 ppm de Mo y 6 mM de N, que tuvo un incremento de 57.47% sobre el valor del tratamiento control; en este punto, es necesario resaltar que por sí mismo, el NanoMo jugó un papel importante en la activación del metabolismo de la asimilación del N, ya que las diferentes dosis evaluadas tuvieron un impacto positivo en la acumulación de biomasa.

El incremento en la biomasa de la planta se debe a que el nanofertilizante es capaz de penetrar las barreras biológicas y entrar en los tejidos vegetales donde puede ser traslocado a los distintos órganos y ser asimilado en el metabolismo de la planta con mayor facilidad (Echeverría, 2019). En este caso, se puede suponer que el Mo quedó mayormente disponible para desempeñar su labor como parte esencial en el metabolismo enzimático encargado de la asimilación del N, lo que permite un mayor desarrollo del área foliar.

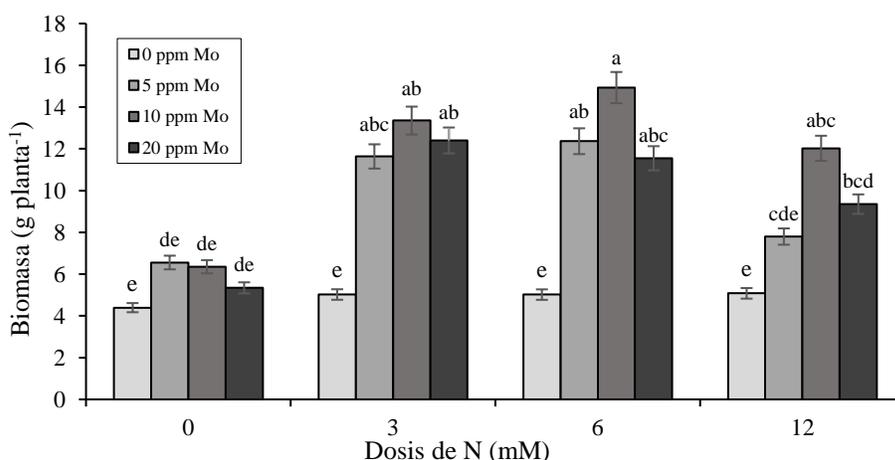


Figura 1. Efecto de la aplicación edáfica de N complementada con fertilización foliar de NanoMo, sobre la biomasa total de frutos en peso seco por planta en frijol ejotero *cv* Strike. Las columnas con letras diferentes difieren estadísticamente entre ellas (Tukey $p \leq 0.05$).

En estudios realizados por Benzon *et al.* (2015) la aplicación de nanofertilizantes promovió el crecimiento y desarrollo en plantas de arroz aumentado su contenido de materia seca, atribuyendo los resultados a las buenas condiciones de disponibilidad del nutriente propiciadas por la nanofertilización para la absorción de N y otros macronutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo adecuado del cultivo. Por lo anterior, es importante analizar de manera particular el efecto del N y Mo sobre la eficiencia enfocada a la producción de biomasa total por la cantidad de N y Mo aplicados, a fin de observar con mayor precisión las dosis más eficientes para el cultivo con el uso de nanofertilizantes.

Efecto de la aplicación de N edáfico sobre la biomasa total

El N es el nutrimento más crítico en un programa de fertilización, en virtud de su esencialidad para un crecimiento óptimo del cultivo, así mismo, el desarrollo vegetativo de la planta depende en gran medida de la cantidad de N aplicado (Orozco *et al.*, 2008). En el caso del efecto del N sobre la biomasa total que está muy relacionada con el rendimiento, los tratamientos aplicados tuvieron un efecto directo sobre la variable, siendo las dosis de mayor biomasa la de 6 mM de N con una diferencia de 48.38% sobre el tratamiento control, es importante mencionar que no se presentó diferencia estadística significativa entre las dosis de 6 mM de N y 3 mM de N cuya diferencia fue de solo 3.32% (Figura 2A).

En términos de eficiencia, la dosis de 3 mM de N fue más eficiente, acumulando 3.53 g planta⁻¹ contra 1.82 en la dosis de 6 mM de N (Figura 2B). Estos resultados de eficiencia agronómica, da información que permite ver que se puede aplicar una menor cantidad de fertilizante nitrogenado sin afectar el crecimiento de la planta, y sin caer en la deficiencia de N, ya que una baja disponibilidad de este macroelemento afecta negativamente la biomasa y producción de frutos (Stefanelli *et al.*, 2010).

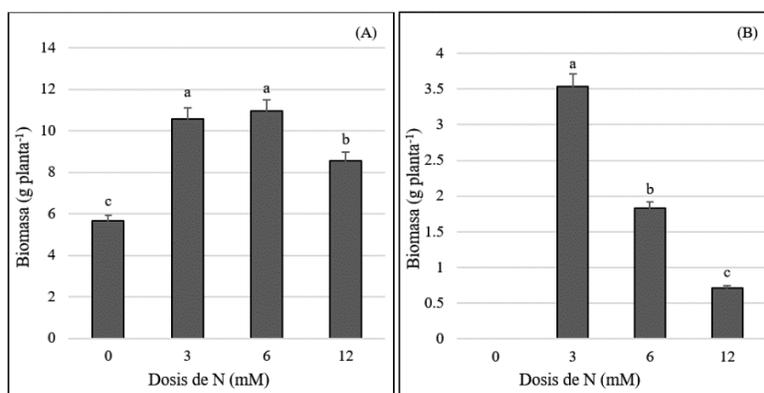


Figura 2. A) efecto de la aplicación edáfica de N sobre la biomasa total en peso fresco por planta; y B) eficiencia agronómica en biomasa total producida por cantidad de N edáfico aplicado por planta en frijol ejotero. Las columnas con letras diferentes difieren estadísticamente entre ellas (Tukey $p \leq 0.05$).

Efecto de la aplicación de foliar de Mo sobre la biomasa total

En el proceso de fijación de N, el Mo es el cofactor del nitrato reductasa y nitrogenasa para que puedan catalizar la reacción redox y convertir el N elemental en iones NH_4^+ para que sean asimilados (Mendel y Hänsch 2002) de esta manera, el Mo influye en el incremento de la biomasa y rendimiento de los cultivos. En este estudio, se puede apreciar que las aplicaciones foliares de NanoMo influyeron significativamente en el aumento de la biomasa, donde la dosis de 10 ppm de Mo tuvo la mayor concentración (Figura 3A).

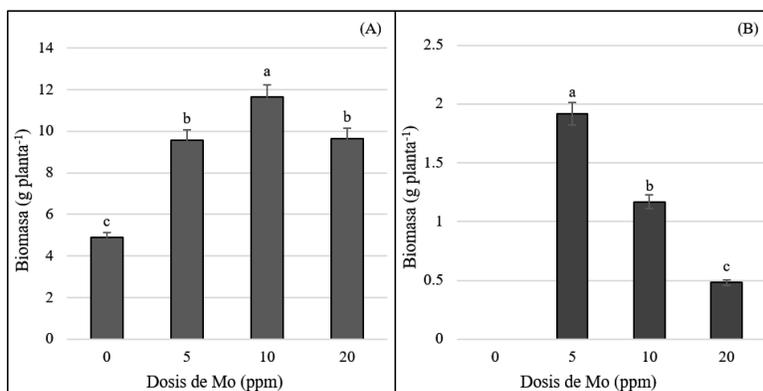


Figura 3. A) efecto de la aplicación foliar de NanoMo sobre la biomasa total en peso fresco por planta; y B) eficiencia agronómica de biomasa producida por cantidad de Mo foliar aplicado por planta en frijol ejotero. Las columnas con letras diferentes difieren estadísticamente entre ellas (Tukey $p \leq 0.05$).

Hay que destacar que, en términos de eficiencia, la dosis de 5 ppm fue la más eficiente con 1.91 contra 1.16 con la dosis de 10 ppm de Mo (Figura 3B), esto quiere decir que con la dosis menor de Mo (5 ppm) se puede obtener la mayor acumulación de biomasa producida por unidad de fertilizante aplicado. En este caso, el nanofertilizante situó de manera más eficiente el Mo en los sitios activos donde pudo ser asimilado con mayor facilidad y desempeñar su papel elemental en la asimilación del N para el desarrollo de la biomasa del cultivo.

En estudios previos, Nasar y Shah (2017) demostraron que las aplicaciones de Mo incrementaron significativamente el contenido de biomasa en cultivo de lenteja. De igual manera, las aplicaciones de Mo mejoraron drásticamente el contenido de biomasa total en garbanzo en estudios realizados por Sawires (2001). Bajo las condiciones experimentales, las dosis de 5 ppm de Mo y 3 mM de N obtuvieron la mayor eficiencia en la producción de biomasa y productividad del cultivo por cantidad de N y Mo aplicados.

En definitiva, la aplicación de NH_4NO_3 edáfico en dosis bajas, combinado con la aplicación foliar de un nanofertilizante de Mo en bajas concentraciones, son alternativa para disminuir la desmedida fertilización nitrogenada sin afectar la productividad del cultivo de frijol ejotero. Efecto de la aplicación edáfica de N complementada con fertilización foliar de Mo sobre el rendimiento. Como se mencionó anteriormente, el Mo tiene un papel central en el metabolismo del N, aunque no directamente, si como parte compositiva de las enzimas encargadas de la fijación del N. Los efectos del Mo sobre la fijación del N se estudian detenidamente ya que tiene efecto directo en el rendimiento de las plantas (Li *et al.*, 2007).

En el presente experimento, las aplicaciones foliares de NanoMo y fertilización edáfica de NH_4NO_3 influyeron directamente en el rendimiento del frijol ejotero, donde la mayor producción de fruto recae en las dosis de 10 ppm de Mo y 6 mM de N, con un incremento de 75.92% en relación con el valor mínimo del control y 43.17% al tratamiento 10 ppm de Mo y 3 mM de N (Figura 4). En este punto conviene destacar, que la combinación del NanoMo y el NH_4NO_3 lograron elevar la productividad del cultivo.

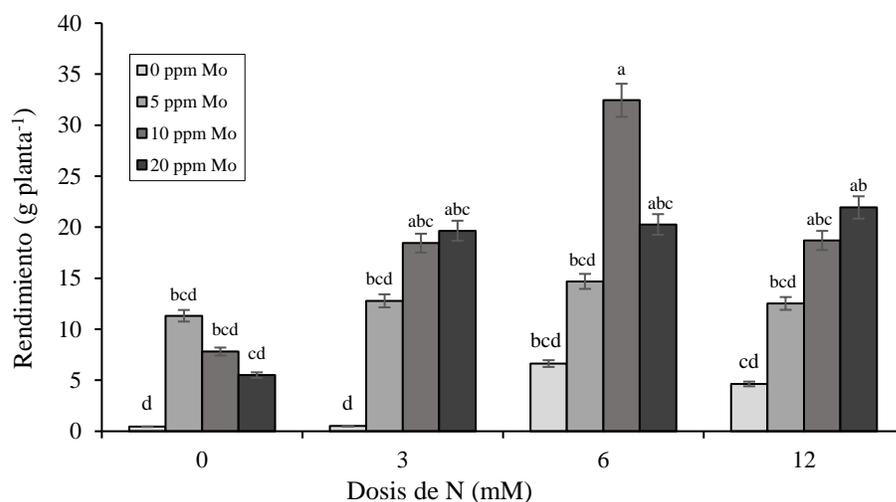


Figura 4. Efecto de la aplicación edáfica de N complementada con fertilización foliar de NanoMo, sobre el rendimiento total de frutos en peso fresco por planta en frijol ejotero cv Strike. Las columnas con letras diferentes difieren estadísticamente entre ellas (Tukey $p \leq 0.05$).

Lo anterior se puede explicar mediante el funcionamiento adecuado del metabolismo nitrogenado de la planta, que al contar con suficiente cantidad de estos dos elementos esenciales pudo asimilar el N y metabolizarlo para lograr el buen desarrollo y producción del fruto. Snyder (2017) menciona que para optimizar la producción de cultivos y minimizar las pérdidas, es de vital importancia la dosis y tipo de los fertilizantes minerales aplicados y el momento y método de aplicación, siendo prácticas críticas para el cultivo.

Por lo anterior, es preciso destacar que el rendimiento está estrechamente ligado a la biomasa de la planta, es por esta razón que el metabolismo del N afecta de forma similar a estas dos variables, cabe recordar, que una gran cantidad de investigaciones a nivel mundial respaldan este hecho, además un indicativo importante respecto al uso eficiente del N es precisamente el rendimiento del fruto y la producción de materia seca del cultivo (Arenas *et al.*, 2021). En este contexto, es importante ver de manera individual el efecto del N y Mo sobre la eficiencia enfocada en la cantidad de fruto producido por la cantidad de M y Mo aplicados, de esta manera se observa con mayor precisión la dosis más eficiente para la productividad del cultivo.

Efecto de la aplicación de N edáfico sobre el rendimiento

El N incrementa los niveles de compuestos producidos y sintetizados por el aumento de la tasa fotosintética, estos asimilados son traslocados a diferentes partes de las plantas, investigaciones recientes han demostrado que el suministro de fertilizantes minerales nitrogenados aumentó el peso y número de semillas por planta, además del rendimiento total (Bekele *et al.*, 2019).

En el presente estudio, la aplicación edáfica de NH_4NO_3 influyó significativamente en el rendimiento de las plantas, la dosis de 6 mM de N tuvo la mayor producción de frutos por planta con una diferencia de 66.2% sobre el valor del control y de 30.6% sobre la dosis menor de 3 mM de N (Figura 5A). Es preciso tener presente, que se busca la mayor eficiencia de frutos producidos por unidad de N aplicado y que en esta investigación se obtuvo con la dosis de 3 mM de N, la cual tiene una eficiencia de 4.27 contra 3.07 con la dosis de 6 mM de N (Figura 5B).

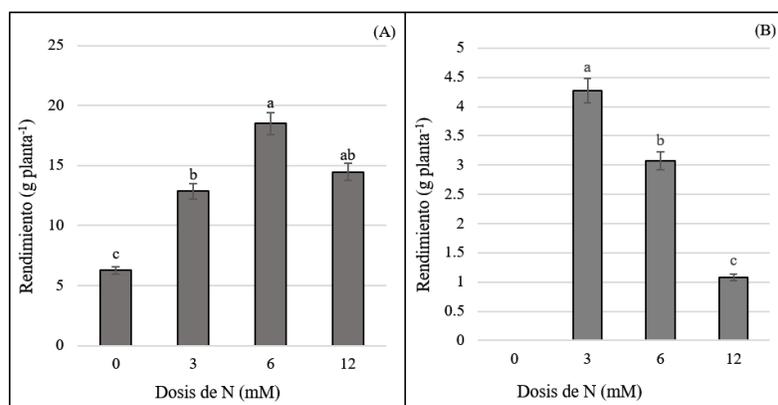


Figura 5. A) efecto de la aplicación edáfica de N sobre el rendimiento en peso fresco por planta; y B) eficiencia en frutos producidos por cantidad de N edáfico aplicado por planta en frijol ejotero. Las columnas con letras diferentes difieren estadísticamente entre ellas (Tukey $p \leq 0.05$).

Efecto de la aplicación de foliar de Mo sobre el rendimiento

Las plantas con deficiencia de Mo muestran un crecimiento raquítrico (Rana *et al.*, 2020b) con menos contenido de clorofila y ácido ascórbico (Liu, 2002); es decir, que una baja concentración de este micronutriente esencial, trae como consecuencia el deterioro del desarrollo y rendimiento de las plantas (Rana *et al.*, 2020a). En este estudio, al igual que en biomasa el efecto directo de la aplicación foliar de NanoMo muestra que con la dosis de 10 ppm se obtuvo la mayor producción de fruto (Figura 6A). Sin embargo, tenemos que la dosis más eficiente es la de 5 ppm con una

eficiencia de 2.56 contra 1.93 con la dosis de 10 ppm Mo (Figura 6B). Con estos resultados se puede indicar que la mejor dosis de NanoMo es la de 5 ppm, confirmando que con la aplicación del nanofertilizante en bajas concentraciones no se afecta el rendimiento.

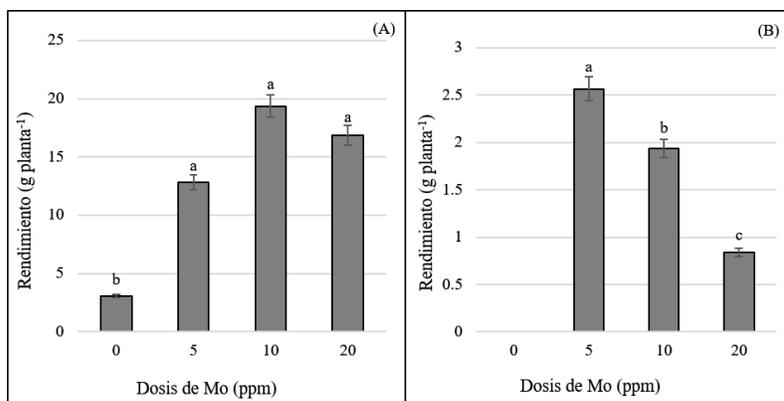


Figura 6. A) efecto de la aplicación foliar de NanoMo sobre el rendimiento total en peso fresco por planta; y B) eficiencia en frutos producidos por cantidad de Mo foliar aplicado por planta en frijol ejotero. Las columnas con letras diferentes difieren estadísticamente entre ellas (Tukey $p \leq 0.05$).

Conclusiones

La aplicación foliar de Nano fertilizante de Mo incrementó la eficiencia de uso del nitrógeno, y se logró la mayor eficiencia en la productividad por unidad de fertilizante aplicado con la dosis de 5 ppm de Mo y 3 mM de N, lo anterior sugiere que las aplicaciones excesivas de fertilizantes nitrogenados pueden reducirse, y con ello minimizar los efectos tóxicos en el medio ambiente y el ser humano, sin afectar el rendimiento del cultivo del frijol ejotero.

Literatura citada

- Arenas, J. Y. R.; Escalante, E. J. A. S.; Aguilar, C. C.; Rodríguez, G. M. T. y Sosa, M. E. 2021. Rentabilidad y rendimiento de girasol en función del tipo de suelo, nitrógeno y biofertilizante. *Biocencia*. 23(1):45-51. <https://doi:18633/biocencia.v23i1.1284>.
- Armendáriz, F. K. V.; Herrera, H. I. M.; Muñoz, M. E. and Sánchez, E. 2019. Characterization of bioactive compounds, mineral content, and antioxidant activity in bean varieties grown with traditional methods in Oaxaca, Mexico. *Antioxidants*. 8(26):1-17. <https://doi:10.3390/antiox8010026>.
- Bekele, G.; Dechassa, N.; Tana, T. and Sharma, J. J. 2019. Effects of nitrogen, phosphorus and vermicompost fertilizers on productivity of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) in babile, Eastern Ethiopia. *Agron. Res.* 17:1532-1546.
- Benzon, H. R. L.; Rubenecia, M. R. U.; Ultra, V. U. and Lee, S. C. 2015. Nano-fertilizer affects the growth, development, and chemical properties of rice. *Inter. J. Agron. Agric. Res.* 7(1):105-117.
- Bowles, T. M.; Atallah, S. S.; Campbell, E. E.; Gaudin, A. C. M.; Wieder, W. R. and Grandy, A. S. 2018. Addressing agricultural nitrogen losses in a changing climate. *Nature Sustainability*. 1(8):399-408. <https://doi:10.1038/s41893-018-0106-0>.

- Bouwman, A.; Boumans, L. and Batjes, N. 2002. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochem Cy.* 16:6-1-6-13.
- Chhipa, H. 2017. Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. *Environ. Chem. Letters.* 15(1):15-22.
- Díaz, O. A. C.; Escalante, E. J. A.; Trinidad, S. A.; Sánchez, G. P.; Mapes, S. C. y Martínez, M. D. 2004. Rendimiento, eficiencia agronómica del nitrógeno y eficiencia en el uso del agua en amaranto en función del manejo del cultivo. *Terra Latinoam.* 22(1):109-116.
- Dong, N. Q. and Lin, H. 2020. Higher yield with less nitrogen fertilizer. *Nat. Plants.* 6:1078-1079. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-00763-3>.
- Echeverría, M. I. 2019. El tamaño sí importa: los nanofertilizantes en la era de la agricultura de precisión, desde el herbario Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), AC. 11:69-75.
- Hoagland, D. R. and Arnon, D. I. 1950. The water culture method for growing plants without soil. California agricultural experiment station, University of California, Berkeley, CA. 347 p.
- Kah, M. Kookana, R. S.; Gogos, A. and Bucheli, T. D. 2018. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nat. Nanotechnol.* 13(8):677-684.
- Landeros, S. C.; Moreno, S. J. C.; Castañeda, C. M. R.; Lango, R. F.; Hernández, P. J. M.; Hernández, L. O. y Caballero, H. A. J. 2016. Manejo del nitrógeno en la caña de azúcar de la zona centro de Veracruz. México. *Rev. Iberoamer. Bioecon. Camb. Climat.* 2(1):43-52.
- Li, P. W.; Yang, R. L. and Li, T. Y. 2007. Effects of molybdenum on nitrogen metabolism of sugarcane. Academy of agricultural sciences, sugarcane research center. Chinese Academy of Agricultural Sciences, China, *Sugar Tech.* 9(1):36-42.
- Liu, P. 2002. Effects of the stress of molybdenum on plants and the interaction between molybdenum and other element. *Agri-Environ. Protec.* 21:276-278.
- Mendel, R. R. and Hänsch, R. 2002. Molybdoenzymes and molybdenum cofactor in plants. *J. Exp. Bot.* 53:1689-698. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf038>.
- Naderi, M. R. and Danesh, S. A. 2013. Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *Inter. J. Agric. Crop Sci.* 5(19):22-29.
- Nasar, J. and Shah, Z. 2017. Effect of iron and molybdenum on yield and nodulation of lentil. *ARPN J. Agric. Biol. Sci.* 12(11):332-339.
- Orozco, V. J. A.; Palomo, G. A.; Gutiérrez, R. E.; Espinoza, B. A. y Hernández, H. V. 2008. Dosis de nitrógeno y su efecto en la producción y distribución de biomasa de algodón transgénico. *Terra Latinoam.* 26(1):29-35.
- Ponce, G. C. O.; Soto, P. J. M.; Sánchez, E.; Muñoz, M. E.; Piña, R. F. J.; Flores, C. M. A.; Pérez, L. R. and Yáñez, M. R. M. 2019. Efficiency of nanoparticle, sulfate, and zinc-chelate use on biomass, yield, and nitrogen assimilation in green beans. *Agronomy.* 9(3):128-138. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030128>.
- Raliya, R.; Saharan, V.; Dimkpa, C. and Biswas, P. 2017. Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: current state and future perspectives. *J. Agric. Food Chem.* 66(26):6487-6503. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02178>.
- Rana, M. S.; Bhandana, P.; Imran, M.; Saleem, M. H. and Chengxiao, H. 2020a. Molybdenum potential vital role in plants metabolism for optimizing the growth and development. *Environ. Sci. Toxicol.* 4(1):032-044. <https://dx.doi.org/10.17352/aest.000024>.
- Rana, M. S.; Sun, X.; Imran, M.; Ali, S. and Shaaban, M. 2020b. Molybdenum-induced effects on leaf ultra-structure and rhizosphere phosphorus transformation in *Triticum aestivum* L. *Plant Physiol. Biochem.* 153:20-29.

- Sánchez, C. E.; Ruiz J. M. y Romero, L. 2016. Compuestos nitrogenados indicadores de estrés en respuesta a las dosis tóxicas y deficientes de nitrógeno en frijol ejotero. *Rev. Electrón. Nov. Scientia*. 16(8):228-244.
- Sánchez, E.; Romero, L. y Ruíz, J. M. 2006. Caracterización del estado nutricional y fisiológico en plantas de judía (*Phaseolus vulgaris* L. cv Strike) sometidas a un estrés por nitrógeno. Universidad de Granada, Granada, España. 86-98.
- Sawires, E. S. 2001. Effect of phosphorus fertilization and micronutrients on yield and yield components of chickpea (*Cicerarietinum*.) *Annals Agric. Sci. Cairo*. 46:155-164.
- Snyder, C. S. 2017. Enhanced nitrogen fertiliser technologies support the '4^R' concept to optimise crop production and minimise environmental losses. *Soil Res.* 55:463-472. <https://doi.org/10.1071/SR16335>.
- Statistical Analysis System. 2007. SAS/STAT Users guide: Statics, Ver. 9.00; SAS Institute, Inc. Cary, NC, USA. 1503 p.
- Stefanelli, D.; Goodwin, I. and Jones, R. 2010. Minimal nitrogen and water use in horticulture: effects on quality and content of selected nutrients. *Food Res. Inter.* 43:1833-1843. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.04.022>.
- Subramanian, K. S.; Manikandan, A.; Thirunavukkarasu, M. and Rahale, C. S. 2015. Nano-fertilizers for balanced crop nutrition. *In: Nanotechnologies in Food and Agriculture* Springer, Cham. 69-80 pp.
- Szarka, A.; Tomasskovics, B. and Bánhegyi, G. 2012. The ascorbate-glutathione- α -tocopherol triad in abiotic stress response. *Inter. J. Mol. Sci.* 13(4):458-4483.