

El rol del nitrógeno (N) en el crecimiento de las plantas, pigmentos de fotosíntesis y eficiencia del empleo del nitrógeno. Artículo de revisión

Amin Fathi¹

¹ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7539-0053>, Universidad Islámica de Azad, Departamento de Agronomía. Dr en Agronomía, Sede Ayatollah Amoli Amol, Iran.

Citación: Fathi, A. (2022). El rol del nitrógeno (N) en el crecimiento de las plantas, pigmentos de fotosíntesis y eficiencia del empleo del nitrógeno. Artículo de revisión. *Agrisost*, 28, 1-8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7458165>

Recibido: 5 abril 2022

Aceptado: 13 septiembre 2022

Publicado: 4 octubre 2022

Financiamiento: No se declara.

Conflicto de interés: No se declaran.

Correo electrónico: dr.aminfathi@gmail.com

Resumen

Contexto: Entre los compuestos nutricionales esenciales, el nitrógeno es un elemento vital para el crecimiento y desarrollo de plantas. Este elemento desempeña un rol fundamental en la mayoría de los procesos metabólicos de las plantas.

Objetivo: Realizar una revisión de la literatura relacionada con el rol del nitrógeno en el crecimiento, rendimientos, niveles de pigmentos de clorofila y la eficiencia en el empleo de nitrógeno.

Métodos: EL artículo ofrece una revisión exhaustiva del estatus del nitrógeno en la agricultura. Además, al ser el nitrógeno el elemento más empleado por los agricultores, este estudio investigará los efectos e impacto sobre la eficiencia del empleo del nitrógeno.

Resultados: La deficiencia de N afecta el crecimiento de las plantas, su fotosíntesis y la producción, en última instancia. Sin embargo, el consumo excesivo de N reduce la calidad de los cultivos. Por consiguiente, N es uno de los componentes principales de la estructura de la clorofila de las plantas. El contenido de N y el contenido de clorofila en las plantas están estrechamente relacionados. El contenido de clorofila desempeña un rol crucial para determinar la velocidad de fotosíntesis y producción de las plantas. El contenido de N en las hojas de las plantas aumenta cuando se aplican fertilizantes a base de nitrógeno. Un mayor contenido de N en las hojas está asociado a mayores contenidos de clorofila y el incremento de la actividad del cloroplasto, que conlleva a un aumento en la productividad fotosintética.

Conclusiones: Es posible reducir la contaminación ambiental y elevar la productividad si se comprende mejor los métodos de manejo que aumentan la eficiencia en el empleo de N (NUE).

Palabras clave: *crecimiento de las plantas, fotosíntesis, contaminación medioambiental, eficiencia en el empleo de nitrógeno.*

Introducción

En la agricultura sostenible, las nuevas tendencias apuntan a una reducción en el empleo de insumos variados, particularmente los químicos, y con ello, se busca reducir los efectos adversos sobre el medio ambiente. No existe dudas de que el N es uno de los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas y que la eficiencia de su empleo es uno de los principales factores que limitan la producción de cultivos en el mundo (Fathi & Zeidali, 2021). Los fertilizantes nitrogenados suministran nutrientes directa o indirectamente a la mitad de la población mundial (Yadav et al., 2017). Los volúmenes de N sintético aplicado a los cultivos se han incrementado significativamente en los últimos 40 años, lo que ha conllevado a un aumento importante de los

rendimientos de los cultivos, con una gran incidencia en el medio (McAllister et al., 2012). Actualmente, se estima que el arroz, trigo y maíz consumen más del 90% de todos los fertilizantes nitrogenados que se aplican a los cereales (Yadav et al., 2017). Un suministro excesivo de N causa diferentes efectos en el suelo y el medio, mientras que su déficit está asociado a una pobre producción. Los productores necesitan aplicar grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados a los cultivos debido a que solo el 30-50% del nitrógeno se recupera como resultado de innumerables pérdidas en el sistema planta-raíz (Fageria, 2002). Para satisfacer las altas demandas de N en la agricultura mundial, los productores emplean cerca de 120 millones de toneladas de fertilizantes nitrogenados cada año (Yadav et al., 2017). Existe una gran deficiencia en casi todos los suelos agrícolas

y sistemas de cultivos a nivel global. Como consecuencia, el empleo de fuentes externas de N es esencial (fertilizantes nitrogenados), para producir cultivos que satisfagan la creciente demanda de la población mundial (Mohan et al., 2015). Aunque el N_2 comprende cerca del 78% de la composición gaseosa de la atmósfera, los cultivos no pueden utilizar este elemento como tal, al menos que se transforme en formas utilizables por las plantas (Barbieri et al., 2000). Generalmente, el nitrógeno se puede tomar del suelo en dos formas inorgánicas. El nitrato (NO_3^-) y el amonio (NH_4^+) (Guo et al., 2019). A pesar de que el segundo es un elemento intermediario en muchas reacciones metabólicas, puede causar síntomas de toxicidad en muchas plantas superiores cuando se suministra como una fuente separada de N (Guo et al., 2019). Los procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas se ven afectados por varias formas de N, tales como, la absorción de nutrientes, actividad enzimática, velocidad de fotosíntesis y respiración, equilibrio hídrico, y rutas señaladoras que en última instancia afectan el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos (Guo et al., 2007; Ding et al., 2015). Muchas legumbres y microorganismos del suelo tienen la capacidad de transformar el nitrógeno en formas utilizables por las plantas. Para satisfacer la alta demanda de N, los agricultores emplean solo el N químico. El uso excesivo de N afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas de manera desfavorable, y causa contaminación ambiental. Estas causaron una rápida pérdida de N de los agroecosistemas, eutroficación de los cuerpos acuáticos (Hamilton et al., 2018), provocando una contaminación ambiental significativa conocida como acidificación del suelo (Guo et al., 2010), así como un aumento de las emisiones de gas (Cassman et al., 2003).

Desde la década del 60 del pasado siglo, el empleo global de los fertilizantes sintéticos a base de nitrógeno químico aumentó nueve veces (Lu & Tian, 2017). Los estudios muestran que el 76% del total de N antropogénico aplicado a la superficie total del suelo regresó a la atmósfera o se filtró a la superficie y por debajo de ella en los cuerpos de agua (Schlesinger, 2009). Esa parte del N representa casi el 40% de la entrada de N total en el mundo, incluyendo la fijación de nitrógeno biológico (Liu et al., 2010). Las pérdidas masivas de N dañan la diversidad y función de los agroecosistemas receptores (Van Meter et al., 2017; Lu et al., 2019). A mayor pérdida de N y mejor eficiencia en el empleo de N en los cultivos, casi la única manera de elevar la productividad de los cultivos y aliviar la degradación ambiental es incrementar las cosechas por unidad de N aplicado (Davidson & Kanter, 2014; Lu et al., 2019). El estudio sobre la eficiencia en el empleo de N es determinante para manejar los desafíos impuestos por la degradación ambiental, seguridad alimentaria y cambio climático desde las perspectivas de la socioeconomía y la tecnología (Zhang et al., 2015; Lu et al., 2019). Un incremento del 20% en

toda la cadena NUE para 2020 pudiera ahorrar cerca de 20 millones de toneladas (TM) de fertilizantes nitrogenados cada año (Sutton et al., 2013). Varios países han propuesto el empleo de NUE como un indicador para medir el progreso agrícola sustentable (Norton et al., 2015; Lu et al., 2019).

Crecimiento de las plantas

El nitrógeno es uno de los nutrientes determinantes del crecimiento y desarrollo de los cultivos, que si no se consumen en cantidades suficientes, limitan el crecimiento de las plantas (Fathi et al., 2013). Por otra parte, se ha reportado que el consumo excesivo de N en el suelo produce un efecto negativo en el crecimiento y producción de los cultivos (Valentinuz & Tollenaar, 2006). El crecimiento es un proceso complejo influenciado por la absorción de nutrientes y la creación de condiciones de humedad. Debido que el N es uno de los elementos mayormente consumidos, este desempeña un rol esencial en la asimilación y transferencia hacia los órganos en desarrollo (Fathi & Zeidali, 2021). La presencia de este elemento siempre aumenta el crecimiento y desempeño vegetal mediante el suministro del agua requerida. También, la abundancia del N del suelo estimula la producción de hojas nuevas del meristemo terminal del tallo y los brotes laterales de las hojas más viejas. Esta aumenta el crecimiento de las partes aéreas (Fathi, 2020).

EL nitrógeno es uno de los componentes esenciales, junto a los amino ácidos, las proteínas y los ácidos nucleicos. Su deficiencia retrasa el desarrollo fenológico en las etapas vegetativas y reproductivas (Fathi & Zeidali, 2021). La aplicación de cantidades adecuadas de fertilizantes nitrogenados puede aumentar la biomasa significativamente y también, altos volúmenes de biomasa son solo posibles si existe fertilización con nitrógeno (Fathi et al., 2016). El N parece estimular la competencia por la supervivencia de las hojas. A medida que esta crece, la duración del ritmo de la fotosíntesis de las hojas crece igualmente, permitiéndole a la planta producir más materia seca (Zebarth & Sheard, 1992). La deficiencia de N estimula la competencia por la transferencia de este elemento en la planta, daña la formación a tiempo y completa de los órganos reproductivos con la reducción del ritmo de crecimiento de los cultivos (CGR), demora la fenología de las plantas, disminuye el índice de cosecha y finalmente, reduce el rendimiento de granos en las plantas (Fathi & Zeidali, 2021) y retrasa la velocidad de asimilación pura (Echarte et al., 2008), además de acelerar la senescencia de las hojas (Ding et al., 2005).

Rendimientos

Son determinantes para manejar de manera correcta el consumo de N y aumentar la producción de la planta, ya que N desempeña un rol esencial para las plantas (Karami et al., 2018; Taheri et al., 2021). La

escasez de N disminuye el tamaño de las hojas, la causa de una menor eficiencia en la absorción de luz y eficiencia en la utilización de la luz para realizar la fotosíntesis, que conlleva a menores rendimientos productivos y vice versa (Nasim et al., 2012). La absorción de N debe ser proporcional a las necesidades de la planta. El empleo excesivo de N como resultado de la lixiviación, pobre eficiencia del N, falta de empleo por las plantas del N sobrante en el suelo (Ghobadi et al., 2018), son elementos significativos. Por lo tanto, un buen manejo equivale al suministro óptimo del N requerido por la planta. El N tiene un efecto positivo sobre la producción de granos cuando afecta los rasgos morfológicos de las plantas. El mejor rendimiento se obtiene cuando el N se emplea en diferentes etapas fenológicas de la planta (Fageria et al., 2013). Comúnmente, los agricultores aplican el fertilizante nitrogenado a un mayor ritmo que el recomendado, ya que estiman que, al aumentar el N, siempre se incrementarán los rendimientos en los cultivos. Esto afecta la sostenibilidad de manera adversa e incrementa los costos de producción (Djaman et al., 2018). En cuanto a la producción de biomasa y los rendimientos, el nivel óptimo de N es la cantidad que produce la mayor velocidad de crecimiento y rendimientos. Sin embargo, los indicadores de calidad y salud del producto, como la cantidad de nitrato en el producto, determinan el nivel deseado de N (Goodarzi et al., 2020). El consumo incrementado de N produce mayores volúmenes de materia seca y rendimientos de granos, así como crecimiento de la raíz fuera de su volumen natural y la absorción de la humedad del suelo. Además, el consumo elevado de N acelera el crecimiento verde, aumenta el volumen de las partes aéreas de la planta y evita la evotranspiración (Mirzaei et al., 2018). Ying et al. (1998) reportó que a medida que aumentan los rendimientos y la biomasa, la planta debe absorber más N; por ejemplo: una planta que produce más de 13 toneladas de biomasa por hectárea necesita absorber más de 250 kg de N por ha. Los investigadores encontraron que un incremento en la aplicación de fertilizantes nitrogenados eleva la acumulación de este elemento en los granos y los brotes de variedades de trigo. Esta condición, con el tiempo, conlleva a un mejoramiento en los contenidos de proteína de los granos (Hosseini et al., 2013).

Fotosíntesis

EL aparato de la fotosíntesis de las plantas descansa fundamentalmente en la utilización de N, un fertilizante ampliamente utilizado en las plantas (Bassi et al., 2018). La fotosíntesis es el proceso fundamental de las plantas en favor del crecimiento y producción de biomasa. Por lo tanto, está asociado a los rendimientos (Chen et al., 2018). En otras palabras, el rendimiento de los cultivos está determinado por la fotosíntesis, la asimilación y la eficiencia de la distribución. Consecuentemente, los

iones de N son esenciales en estos procesos (Olszewski et al., 2014). Además del aumento del área foliar, la fertilización con N afecta los hábitos de crecimiento y la longevidad de las hojas, hasta afectar la eficiencia de la fotosíntesis (Olszewski et al., 2014). Una cantidad adecuada de N absorbido en las últimas tres etapas de crecimiento retarda la degradación de la clorofila y soluciones de proteínas, y prolonga la duración de la fotosíntesis, lo cual aumenta las defensas de las hojas y previene la senescencia de las foliar (Qing et al., 2002). Al cultivar cereales, la hoja principal continúa siendo la más larga y contribuye significativamente a los rendimientos. En las hojas principales, la actividad fotosintética se prolonga por un tiempo, lo cual es determinante a medida que las hojas más viejas mueren durante el llenado con los granos (Loss & Siddique, 1994). En ese proceso, los nutrientes primarios se derivan de productos de la fotosíntesis acumulados en las últimas hojas que emergieron. Según algunas investigaciones, mayores rendimientos a partir de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados tienen su explicación en la regulación fotosintética (Zhang et al., 2017). La composición química de las hojas y sus características estructurales pueden influir en su capacidad fotosintética (Wright et al., 2004). Dos de los rasgos principales que determinan la capacidad fotosintética son el área foliar específica y el contenido de nitrógeno (Hikosaka 2004; Poorter et al., 2009). Los investigadores examinaron la relación entre el contenido de nitrógeno foliar y la fotosíntesis (Evans, 1989). Como resultado de una mayor división celular y división de las células del meristemo, el N aumentó el crecimiento vegetativo y las ramificaciones de la planta. Por su parte, se producen más hojas en la planta, aumentando el nivel de fotosíntesis. Estos cambios afectarán el proceso de fotosíntesis y su materialización (Arvin, 2019).

La clorofila

El N es uno de los componentes principales de la clorofila y la proteína en las células de las plantas. El contenido de clorofila es vital para determinar la velocidad de la fotosíntesis y la producción de materia seca. El contenido de N y el contenido de clorofila en las plantas están estrechamente relacionados, ya que el 70% del nitrógeno de las hojas se acumula en los cloroplastos, los cuales producen los pigmentos de la clorofila (Fathi & Zeidali, 2021; Moeinirad et al., 2021). El nitrógeno es el componente principal de los aminoácidos, ácidos nucleicos, proteínas, y la estructura de la clorofila (Mendoza-Tafolla et al., 2019). Como el contenido foliar de clorofila está directamente relacionado con las concentraciones de N, es importante monitorear la clorofila y las concentraciones de N durante la producción, para mejorar el crecimiento, rendimiento y ventas (Zebarth et al., 2002; Gitelson et al., 2003; Mendoza-Tafolla et al., 2019). Un grupo de especies

de plantas han demostrado una alta correlación entre la clorofila y las concentraciones de N, incluyendo la col (Westerveld et al., 2002), el maíz (Hurtado et al., 2010; Sawyer et al., 2011), el trigo (Kızılgöç et al., 2015; Shah et al., 2017) y el arroz (Huang et al., 2016). Moeinirad et al. (2021) reportó que el consumo de N mejoró los pigmentos, a medida que aumentaba la clorofila (a, b) con el empleo de N. También hallaron una relación significativamente positiva entre los índices de clorofila, el índice de nutrición de N, la concentración de N y la clorofila. La fluorescencia de la actividad de la clorofila está directamente relacionada con los centros de reacción de los fotosistemas. La existencia de cualquier disrupción en la estructura y los pigmentos del fotosistema II conlleva a un rendimiento reducido de quantum en el fotosistema en la oscuridad; uno de los principales elementos en la formación de clorofila en las plantas es el N (Fracheboud & Leipner, 2003). La reducción del quantum producido por la deficiencia de N se justifica por la reducida capacidad fotosintética de la planta, que se debe a una disminución de la síntesis de enzimas claves durante la fotosíntesis, la más importante es la enzima Rubisco (Qi et al., 2013). Además, suficientes cantidades de N en las plantas aumentan el rendimiento cuántico con la elevación del índice del área foliar, y la subsecuente asimilación de carbono durante la fotosíntesis en el ticaloides del cloroplasto, mientras se mantiene una alta eficiencia en la conversión de energía y la cadena de transferencia de electrones fotosintéticos (Qi et al., 2013; Moeinirad et al., 2021). Los investigadores reportan que con el aumento del empleo de fertilizantes nitrogenados, crecieron los niveles de clorofila b en el maíz (Haghjoo & Bahrani, 2015).

NUE

La eficiencia en su empleo desempeña un rol fundamental en el crecimiento de la planta y la sobrevivencia durante la fase de cambios ambientales. Sin embargo, a veces, un incremento de la eficiencia de una de las fuentes causa un decrecimiento en la eficiencia de las otras fuentes (relación negativa entre la eficiencia de la luz y N) (Hirose & Bazzaz, 1998). Por ejemplo: Field et al. (1983) propuso un acuerdo sobre la eficiencia del consumo de agua y N que cualquier aumento en la conducción de los estomas provoca un incremento del CO_2 , intracelular, que, por su parte, producen un incremento de N y un decrecimiento en la eficiencia del consumo. NUE es la relación entre la cantidad de N que absorbe un cultivo y lo que retiene hasta la cosecha y la cantidad de N disponible en el cultivo. El énfasis de esta relación se pone de manifiesto cuando se compara la cantidad de fertilizante que se aplica a los suelos con la cantidad de N que retienen los cultivos (Fathi, 2020). Como métrica, NUE se ha usado ampliamente para relacionar la absorción de N con la aplicación de N (Sharma & Bali 2017). Bajo estas condiciones en que las plantas requieren

enormes cantidades de fertilizantes nitrogenados para maximizar los cultivos, optimizar NUE es sumamente difícil, ya que se estima que NUE está por debajo de 50% (Raun & Johnson, 1999; Dehpouri et al., 2022). Los mecanismos fisiológicos que controlan la utilización de N en plantas que tienen diferentes formas de aplicación es crucial para optimizar la eficiencia en el empleo de N, mientras los rendimientos y la calidad ambiental se mantienen a niveles aceptables (Ciampitti & Vyn, 2011; Sharma & Bali, 2017). La eficiencia en la absorción y empleo son dos componentes de NUE. Cuando existe un bajo N, la eficiencia de la absorción debe ser más importante que la eficiencia en la utilización (Witcombe et al., 2008; Khan et al., 2017). Las emisiones de óxido nitroso crean un impacto ambiental adverso en la forma de nitrato, que es mucho más inestable que cualquier otro nutriente (Shimono & Bunce, 2009). Por lo tanto, es esencial que el nitrógeno se utilice eficientemente para reducir el riesgo pérdida improductiva y contaminante de N en los sistemas agrícolas, así como un aumento de la productividad y rentabilidad (Cassman et al., 2003; Good et al., 2004; Khan et al., 2017). Gaudin et al. (2015), en un estudio del NUE en trigo, maíz y soya, reportó que el más bajo NUE se obtuvo cuando se empleó la mayor cantidad de N. El mayor valor de NUE se observó en los tratamientos que no fueron fertilizados, o cuando la cantidad de fertilizante aplicado fue baja. Además, esos autores hallaron que la absorción de N por parte de las plantas aumentó ligeramente a medida que se incrementaron los niveles de fertilizantes nitrogenados. Algunos experimentos muestran la optimización de la cantidad de fertilizante nitrogenado químico aplicada, o su división, como una excelente manera de aumentar la eficiencia en el consumo de N (Fathi, 2020).

Conclusiones

Este estudio demostró que N desempeña un rol importante en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La deficiencia de N reduce el crecimiento de las plantas y por lo tanto, los rendimientos. Sin embargo, la ausencia de comprensión sobre el empleo apropiado de los fertilizantes nitrogenados ocasiona problemas. EL empleo excesivo de N disminuye los rendimientos de la planta. Por lo tanto, antes de aplicar cualquier fertilizante es necesario probar el N en el suelo y emplearlo según las recomendaciones descritas por los expertos para cada planta. La optimización de NUE es una estrategia crucial para el desarrollo de una agricultura sostenible que conduzca a la obtención de rendimientos máximos a cambio de la utilización de mínimas cantidades de insumos y la menor ocurrencia de pérdida de N.

Contribución de los autores

Amin Fathi: Planificación de la investigación, diseño, análisis de los resultados, redacción del artículo, revisión final.

Conflictos de interés

No se declaran.

Referencias

- Arvin, P. (2019). Study of Different Levels of Nitrogen, Phosphorus and Potassium on Physiological and Morphological Parameters and Essential Oils in Savory Plant (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 32(2), 260–279. https://plant.ijbio.ir/article_1366_0098bb0b940_3221d05a3b0b62cb25c88.pdf?lang=en
- Barbieri, P.A., Rozas, H.R.S., Andrade, F.H., & Echeverria, H.E. (2000). Row Spacing Effects at Different Levels of Nitrogen Availability in Maize. *Agron. J.*, 92, 283–288. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.922283x>
- Bassi, D., Menossi, M., & Mattiello, L. (2018). Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. *Sci. Rep.*, 8(1), 2327. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20653-1>
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., & Yang, H. (2003). Meeting Cereal Demand While Protecting Natural Resources and Improving Environmental Quality. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 315–358. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.0402.02.122858>
- Chen, Z., Tao, X., Khan, A., Tan, D.K.Y., Luo, H. (2018). Biomass Accumulation, Photosynthetic Traits and Root Development of Cotton as Affected by Irrigation and Nitrogen-Fertilization. *Front. Plant. Sci.* 9, 173. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00173>
- Ciampitti, I.A., & Vyn, T.J. (2011). A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Research*, 121 (1), 2–18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.10.009>
- Davidson, E.A., & Kanter, D. (2014). Inventories and scenarios of nitrous oxide emissions. *Environmental Research Letters*, 9, 105012. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/10/105012/pdf>
- Dehpouri, F., Tari, D.B., & Niknejad, Y., Fallah Amoli, H., & Amiri, E. (2022). Study of nitrogen fertilization management on corn yield and nitrogen use efficiency in the Southern caspian sea region. *Rom. Agric. Res.*, (39).
- Ding, L., Gao, C., Li, Y., Li, Y., Zhu, Y., Xu, G., Shen, Q., Kaldenhoff, R., Kai, L., & Guo, S. (2015). The enhanced drought tolerance of rice plants under ammonium is related to aquaporin (AQP). *Plant Sci.*, 234, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.01.016>
- Ding, L., Wang, K.J., Jiang, G.M., Biswas, D. K., Xu, H., Li, L. F., Li, Y. H. (2005). Effects of nitrogen deficiency on photosynthetic traits of maize hybrids released in different years. *Annals of Botany*, 96, 925–930. <https://doi.org/10.1093/aob/mci244>
- Djaman, K., Mel, V.C., Ametonou, F.Y., El-Namaky R., Diallo, M.D., & Koudahe, K. (2018). Effect of nitrogen fertilizer dose and application timing on yield and nitrogen use efficiency of irrigated hybrid rice under semi-arid conditions. *Journal of Agricultural Science and Food Research*, 9(2), 2-7. <https://www.longdom.org/open-access/effect-of-nitrogen-fertilizer-dose-and-application-timing-on-yield-and-nitrogen-use-efficiency-of-irrigated-hybrid-rice-under-semia.pdf>
- Echarte, L., S., Rothstein, S., & Tollenaar, M. (2008). The Response of Leaf Photosynthesis and Dry Matter Accumulation to Nitrogen Supply in an Older and a Newer Maize Hybrid. *Crop. Sci.*, 48(2), 656–665. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.06.0366>
- Evans, J.R. (1989). Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. *Oecologia* 78, 9–19. <https://doi.org/10.1007/BF00377192>,
- Fageria, N.K. (2002). Soil quality vs. environmentally-based agricultural management practices. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(13-14), 2301–2329. <https://doi.org/10.1081/CSS-120005764>
- Fageria, N.K., dos Santos, A.B., de Oliveira, J.P. (2013). Nitrogen-Use Efficiency in Lowland Rice Genotypes under Field Conditions. *Commun Soil Sci. Plant Anal*, 44(17), 2497–2506. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.812732>
- Fathi, A. (2020). *Tillage systems and use of chemical fertilizers (N.P.K) Interaction on soil properties and maize quantitative and qualitative traits*. Faculty of Agriculture. Islamic Azad University, Ayatollah Amoli Branch.
- Fathi, A., Farnia, A., & Maleki, A. (2013). Effects of Nitrogen and Phosphorous Biofertilizers on Yield and Yield Components of Corn AS71 in Dareh-shahr, Iran. *J. Crop Ecophysiol.*, 7,1(25), 105–114. <https://www.sid.ir/paper/182741/en>
- Fathi, A., Farnia, A., & Maleki, A. (2016). Effects of biological nitrogen and phosphorus fertilizers on vegetative characteristics, dry matter and yield of corn. *Appl. F. Crop. Res.*, 29, 1–7. <https://doi.org/10.22092/aj.2016.109214>
- Fathi, A., & Zeidali, E. (2021). Conservation tillage and nitrogen fertilizer: a review of corn growth, yield and weed management. *Cent Asian J Plant Sci. Innov.*, 1(3), 121–142. https://www.cajpsi.com/article_137559_7f1740_9644996104fe39b1b433015cfb.pdf
- Field, C., Merino, J., & Mooney, H.A. (1983). Compromises between water-use efficiency and nitrogen-use efficiency in five species of California evergreens. *Oecologia*, 60, 384–389.

- <https://doi.org/10.1007/BF00376856>
Fracheboud, Y., & Leipner, J. (2003). The Application of Chlorophyll Fluorescence to Study Light, Temperature, and Drought Stress. In J.R. DeEll, & P.M.A. Toivonen (eds.), *Practical Applications of Chlorophyll Fluorescence in Plant Biology*. (pp 125–150) Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0415-3_4
- Gaudin, A.C.M., Janovicek, K., Deen, B., & Hooker D.C. (2015). Wheat improves nitrogen use efficiency of maize and soybean-based cropping systems. *Agric. Ecosyst. Environ.*, *210*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.034>
- Ghobadi, R., Ghobadi, M., Honarmand, S.J., Farhadi, B., & Mondani, F. (2018). Study the responses of some leaf physiologic characteristics to different water and nitrogen levels in grainy maize (*Zea mays* L.). *Iran J. F. Crop. Res.*, *16*(3), Fa583-Fa597. <https://doi.org/10.22067/gsc.v16i3.68456>
- Gitelson, A.A., Gritz, † Y., & Merzlyak, M.N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant. Physiol.*, *160*, 271–282. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>
- Good, A.G., Shrawat, A.K., & Muench, D.G. (2004). Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *Trends Plant Sci.*, *9*(12), 597–605. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.10.008>
- Goodarzi, F., Delshad, M., Soltani, F., & Mansouri, H. (2020). Changes in some growth and yield indices of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) under nitrogen fertilization and plant density. *Iran J. F. Crop Sci.*, *51*(2), 183–198. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2019.279354.654601>
- Guo, J., Jia, Y., Chen, H., Zhang, L., Yang, J., Zhang, J., Hu, X., Ye, X., Li, Y., & Zhou, Y. (2019). Growth, photosynthesis, and nutrient uptake in wheat are affected by differences in nitrogen levels and forms and potassium supply. *Sci. Rep.*, *9*(1), 1248. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37838-3>
- Guo, J.H., Liu, X.J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., Christie, P., Goulding, K. W. T., Vitousek, P. M., & Zhang, F. S. (2010). Significant Acidification in Major Chinese Croplands. *Science* (80-) *327*, 1008–1010. <https://doi.org/10.1126/science.1182570>
- Guo, S., Zhou, Y., Shen, Q., & Zhang, F. (2007). Effect of ammonium and nitrate nutrition on some physiological processes in higher plants-growth, photosynthesis, photorespiration, and water relations. *Plant Biol.*, *9*, 21–29. <https://doi.org/10.1055/s-2006-924541>
- Haghjoo, M., & Bahrani, A. (2015). Effect of irrigation and nitrogen fertilizer on grain yield, yield components and dry matter remobilization of maize cv. SC260. *Iran J. Crop Sci.*, *16*(4), 278-292. <http://agrobreedjournal.ir/article-1-22-en.pdf>
- Hamilton, H.A., Ivanova, D., Stadler, K., Merciai, S., Schmidt, J., Zelm, R., Moran, D., & Wood, R. (2018). Trade and the role of non-food commodities for global eutrophication. *Nat. Sustain.*, *1*, 314–321. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0079-z>
- Hikosaka, K. (2004). Interspecific difference in the photosynthesis-nitrogen relationship: patterns, physiological causes, and ecological importance. *J. Plant Res.*, *117*, 481–494. <https://doi.org/10.1007/s10265-004-0174-2>
- Hirose, T., & Bazzaz, F.A. (1998). Trade-off Between Light- and Nitrogen-use Efficiency in Canopy Photosynthesis. *Ann Bot.*, *82*, 195–202. <https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0668>
- Hosseini, R.S., Galeshi, S., Soltani, A., Kalateh, M., & Zahed, M. (2013). The effect of nitrogen rate on nitrogen use efficiency index in wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *11*(2), 300–306.
- Huang, L., Yang, J., Cui, X., Yang, H., Wang, S., & Zhuang, H. (2016). Synergy and Transition of Recovery Efficiency of Nitrogen Fertilizer in Various Rice Genotypes under Organic Farming. *Sustainability*, *8*(9), 854. <https://doi.org/10.3390/su8090854>
- Hurtado, S.M.C., Silva, C.A., Resende, Á.V. de, Corazza, E., Shozo L., & Satoshi, F. (2010). Sensibilidade do clorofilômetro para diagnóstico nutricional de nitrogênio no milho. *Ciência e Agrotecnologia*, *34*(3), 688–697. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000300023>
- Karami, H., Maleki, A., & Fathi, A. (2018). Determination effect of mycorrhiza and vermicompost on accumulation of seed nutrient elements in maize (*Zea mays* L.) affected by chemical fertilizer. *J. Crop. Nutr. Sci.*, *4*(3), 15–29.
- Khan, A., Tan, D.K.Y., Afridi, M.Z., Luo, H., Tung, S. A., Ajab, M., & Fahad, S. (2017). Nitrogen fertility and abiotic stresses management in cotton crop: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, *24*, 14551–14566. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8920-x>
- Kızılgöç, F., Yıldırım, M., Akıncı, C., Albayrak, Ö., & Basdemir, F. (2015). The availability of advanced durum wheat population in yield and quality basis selection. *Ziraat Fakültesi Dergisi-Süleyman Demirel Üniversitesi*, *10*(2), 62–68.
- Liu, J., You, L., Amini, M., Obersteiner, M., Herrero, M., Zehnder, A. J. B., & Yang, H. (2010). A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, *107*, 8035–8040.

- <https://doi.org/10.1073/pnas.0913658107>
- Loss, S.P., & Siddique, K.H.M. (1994). Morphological and Physiological Traits Associated with Wheat Yield Increases in Mediterranean Environments. *Advances in Agronomy*, 52, 229–276. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60625-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60625-2)
- Lu, C., & Tian, H. (2017). Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half century: shifted hot spots and nutrient imbalance. *Earth Syst. Sci. Data*, 9(1), 181–192. <https://doi.org/10.5194/essd-9-181-2017>
- Lu, C., Zhang, J., Cao, P., & Hatfield, J.L. (2019). Are We Getting Better in Using Nitrogen?: Variations in Nitrogen Use Efficiency of Two Cereal Crops Across the United States. *Earth's Future* 7, 939–952. <https://doi.org/10.1029/2019EF001155>
- McAllister, C.H., Beatty, P.H., & Good, A.G. (2012). Engineering nitrogen use efficient crop plants: the current status. *Plant Biotechnol. J.*, 10(9), 1011–1025. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2012.00700.x>
- Mendoza-Tafolla, R.O., Juarez-Lopez, P., Ontiveros-Capurata, R. E., Sandoval-Villa, M., Iran, A. T., & Alejo-Santiago, G. (2019). Estimating Nitrogen and Chlorophyll Status of Romaine Lettuce Using SPAD and at LEAF Readings. *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca*, 47(3), 751–756. <https://doi.org/10.15835/nbha47311525>
- Mirzaei, A., Naseri, R., Torab Miri, S.M., Fard, A., & Fathi, A. (2018). Reaspose of Yield and Yield Components of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Cultivars to the Application of Plant Growth Promoting Rhizobacteria and Nitrogen Chemical Fertilizer under Rainfed Conditions. *J. Crop. Ecophysiol*, 11(4(44)), 775–790.
- Moenirad, A., Zeinali, A., Galeshi, S., Afshin, S., & Eganepour, F. (2021). Investigation of fluorescence chlorophyll sensitivity, chlorophyll index, rate of Chlorophyll (a, b), nitrogen concentration and nitrogen nutrition index under under nitrogen and phosphorus nutrition in wheat. *J. Crop Prod* 14(1), 1–18. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2021.12259.1947>
- Mohan, S., Singh, M., & Kumar, R. (2015). Effect of nitrogen, phosphorus and zinc fertilization on yield and quality of kharif fodder-A review. *Agricultural Review*, 36(3), 218–226. <https://doi.org/10.5958/0976-0741.2015.00025.2>
- Nasim, W., Ahmad, A., Hammad, H.M., Chaudhary, H.J., & Munis, M.F.H. (2012). Effect of nitrogen on growth and yield of sunflower under semi-arid conditions of Pakistan. *Pakistan J. Bot.*, 44(2), 639–648.
- Norton, R., Davidson, E., & Roberts, T. (2015). Nitrogen use efficiency and nutrient performance indicators. *Global Partnership on Nutrient Management*. http://www.nutrientchallenge.org/sites/default/files/documents/files/NUE%20and%20nutrient%20performance%20indicators_GPNM2015_FINAL.pdf
- Olszewski, J., Makowska, M., Pszczółkowska, A., Okorski, A., & Bieniaszewski, T. (2014). The effect of nitrogen fertilization on flag leaf and ear photosynthesis and grain yield of spring wheat. *Plant, Soil Environ*, 60(12), 531–536. https://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/880_2013-PSE.pdf
- Poorter, H., Niinemets, Ü., Poorter, L., Wright, I. J., & Villar, R. (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. *New Phytol*, 182(3), 565–588. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x>
- Qi, H., Wang, J., & Wang, Z. (2013). A comparative study of the sensitivity of F v/F m to phosphorus limitation on four marine algae. *Journal of Ocean University of China*, 12, 77–84. <https://doi.org/10.1007/s11802-011-1975-5>
- Qing, Y., Yanming, L., Kai, X., & Yanhua D. (2002). Effect of different amount of nitrogen on flag leaf senescence and yield components of wheat. *J. Hebei Agric. Univ.*, 25(4), 20–24.
- Raun, W.R., & Johnson, G.V. (1999). Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. *Agron J.* 91, 357–363. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.000219620.09100030001x>
- Sawyer, J.E., Lundvall, J., Hawkins J.S., & Barker, D.W. (2011). *Sensing nitrogen stress in corn*. Iowa State University. <https://store.extension.iastate.edu/Product/Sensing-Nitrogen-Stress-in-Corn-pdf>
- Schlesinger, W.H. (2009). On the fate of anthropogenic nitrogen. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106(1), 203–208. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810193105>
- Shah, S., Houborg, R., & McCabe, M. (2017). Response of Chlorophyll, Carotenoid and SPAD-502 Measurement to Salinity and Nutrient Stress in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy*, 7(3), 61. <https://doi.org/10.3390/agronomy7030061>
- Sharma, L., & Bali, S. (2017). A Review of Methods to Improve Nitrogen Use Efficiency in Agriculture. *Sustainability*, 10(1), 51. <https://doi.org/10.3390/su10010051>
- Shimono, H., & Bunce, J.A. (2009). Acclimation of nitrogen uptake capacity of rice to elevated atmospheric CO₂ concentration. *Ann Bot*, 103(1), 87–94. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn209>
- Sutton, M.A., Bleeker, A., Howard, C.M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W., van Grinsven,

- H.J.M., Abrol, Y.P., Adhya, T.K., Billen, G., Davidson, E.A., Datta, A., Diaz, R., Erisman, J.W., Liu, X.J., Oenema, O., Palm, C., Raghuram, N., Reis, S., ... Zhang, F.S. (2013). *Our nutrient world: the challenge to produce more food and energy with less pollution. Global Overview of Nutrient Management. Centre for Ecology and Hydrology Edinburgh, UK, on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Centre for Ecology & Hydrology.* <https://edepot.wur.nl/249094>
- Taheri, F., Maleki, A., & Fathi, A. (2021). Study of different levels of nitrogen fertilizer and irrigation on quantitative and qualitative characteristics of Quinoa grain yield. *Crop Physiol. J.*, 13(50), 135–149.
- Valentinuz, O.R., & Tollenaar, M. (2006). Effect of Genotype, Nitrogen, Plant Density, and Row Spacing on the Area-per-Leaf Profile in Maize. *Agron. J.* 98(1), 94–99. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0111>
- Van Meter, K.J., Basu, N.B., & Van Cappellen, P. (2017). Two centuries of nitrogen dynamics: Legacy sources and sinks in the Mississippi and Susquehanna River Basins. *Global Biogeochem. Cycles*, 31(1), 2–23. <https://doi.org/10.1002/2016GB005498>
- Westerveld, S.M., McKeown, A.W., McDonald M.R., & Scott-Dupree, C.D. (2002). Chlorophyll and nitrate meters as nitrogen monitoring tools for selected vegetables in southern Ontario. In *XXVI International Horticultural Congress: Toward Ecologically Sound Fertilization Strategies for Field Vegetable Production*. 627, (pp 259–266). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.627.33>
- Witcombe, J., Hollington, P., Howarth, C., Reader, S., & Steele, K.A (2008). Breeding for abiotic stresses for sustainable agriculture. *Philos Trans. R. Soc. B. Biol. Sci.*, 363, 703–716. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2179>
- Wright, I.J., Reich, P.B., Westoby, M., Ackerly, D.D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J. H. C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P. K., Gulias, J., Hikosaka, K., Byron B. Lamont, B.B., Lee, T., Lee, W., ... Villar, R. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428(6985), 821–827. <https://doi.org/10.1038/nature02403>
- Yadav, M.R., Kumar, R., Parihar, C.M., Yadav, R.K., Jat, S.L., Ram, H., Meena, R.K., Singh, M., Birbal, Verma, A. P., Kumar, U., Ghosh, A., & Jat, M.L. (2017). Strategies for improving nitrogen use efficiency: A review. *Agric. Rev.*, 38(1), 29–40. <https://doi.org/10.18805/ag.v0iOF.7306>
- Ying, J., Peng, S., He, Q., Yang, H., Yang, C., R. Visperasa, R. M., & Cassmand, K. G. (1998). Comparison of high-yield rice in tropical and subtropical environments. *F. Crop. Res.*, 57(1), 71–84. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00077-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00077-X)
- Zearth, B.J., & Sheard, R.W. (1992). Influence of rate and timing of nitrogen fertilization on yield and quality of hard red winter wheat in Ontario. *Can J. Plant Sci.*, 72(1), 13–19. <https://doi.org/10.4141/cjps92-002>
- Zearth, B.J., Younie, M., Paul, J.W., & Bittman, S. (2002). Evaluation of leaf chlorophyll index for making fertilizer nitrogen recommendations for silage corn in a high fertility environment. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 33(5-6), 665–684. <https://doi.org/10.1081/CSS-120003058>
- Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T. D., Dumas, P. & Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528(7580), 51–59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>
- Zhang, Y., Wang, J., Gong, S., Xu, D., & Sui, J. (2017). Nitrogen fertigation effect on photosynthesis, grain yield and water use efficiency of winter wheat. *Agric. Water Manag.*, 179, 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.007>