



Productividad y ambiente: Eficiencia de uso del nitrógeno en *Brassica carinata* L.

Foto: Sebastián Mazzilli

Sebastián Bonansea

Ing. Agr. Estudiante de maestría, Departamento de Producción Vegetal - EEMAC– Ecofisiología y manejo de cultivos.

Federico Domínguez

Técnico de proyecto, Departamento de Producción Vegetal - EEMAC– Ecofisiología y manejo de cultivos

Sebastián R. Mazzilli

Ing. Agr. (Dr). Profesor Adjunto, Departamento de Producción Vegetal - EEMAC– Ecofisiología y manejo de cultivos.

1- INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una demanda mundial alta y en aumento de proteínas y aceites de origen vegetal producidas en sistemas de cultivos que puedan calificarse como sostenibles (Hossain *et al.*, 2018; Keating *et al.*, 2014). Esto significa, que se considere simultáneamente los impactos de los métodos de producción en el medio ambiente, la productividad y calidad de los cultivos (Miner *et al.*, 2020).

La producción de cultivos es una fuente importante de emisiones de gases con efecto invernadero (GEI) y en especial de óxido nítrico (N_2O), cuyo impacto es 265-315 mayor que el del anhídrido carbónico (CO_2), sumado a que destruye el ozono ambiental (Crutzen, 1970; Crutzen *et al.*, 2008). Aunque la agricultura no es la principal fuente de emisiones de GEI (15% del total) (Del Grosso *et al.*, 2014, 2009), la práctica de fertilización, en especial la fertilización con nitrógeno (N), contribuye fuertemente (42 - 80%) a las emisiones totales de GEI en la producción de alimentos y materias primas para biocombustibles (Adler *et al.*, 2007). El desarrollo de biocombustibles tiene como objetivos principales la sustitución de combustibles fósiles y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, para lo cual su producción debe generar disminuciones reales en las emisiones, lo cual puede ser medido como la intensidad de carbono (kilogramos de Carbono equivalente por unidad de producto producida: kg CO_2eq / Unidad de producto) (Adler *et al.*, 2012).

Por lo tanto, la eficiencia de uso del N (kg de grano / kg de nitrógeno aplicado) es un factor clave para que la estrategia de sustituir combustibles fósiles por biocombustibles tenga éxito y

aporte un beneficio real al ambiente (Ogle *et al.*, 2016). Existen herramientas de manejo disponibles, que pueden reducir las emisiones de GEI en casi un tercio (Del Grosso *et al.*, 2014). Dentro del conjunto de buenas prácticas de manejo que se pueden implementar, se encuentra el cambio en la tecnología de fertilización nitrogenada, la cual podrían ayudar a reducir dichas emisiones en especial de las de N₂O (Ladha *et al.*, 2005; Ogle *et al.*, 2016). Los fertilizantes de liberación controlada y los fertilizantes con inhibidores de la nitrificación proporcionan un suministro gradual de N al cultivo, en sincronía con la demanda de N de la planta (Abalos *et al.*, 2014). Cuando más sincronizada es la oferta y demanda de N, hay menos N disponible (sustrato) para convertirse en nitrógeno gaseoso (N₂ o N₂O) o perderse en profundidad por lavado (lixiviación) (Linquist *et al.*, 2013).

El cultivo de *Brassica carinata* A. Braun (carinata) está siendo desarrollado como un biomaterial no alimenticio de baja intensidad de carbono, capaz de producir combustibles renovables, harinas ricas en proteínas para consumo animal y bioproductos, en diversas regiones del mundo (Cardone *et al.*, 2003; Gesch *et al.*, 2015). Uruguay integra el grupo de regiones en los que se estudia y promueve el desarrollo del cultivo. Dentro de las áreas de estudio se ha trabajado en el ajuste de modelos de fertilización y cuantificación de su impacto productivo y ambiental, para lo cual se ejecuta un convenio de investigación entre la Facultad de Agronomía y la empresa UPM-Biofules. En este trabajo se presenta un avance de resultados asociados a la eficiencia de uso del N de diferentes estrategias de fertilización variando la fuente y el momento de aplicación del N.

2- SITIOS EXPERIMENTALES, TRATAMIENTOS Y CÁLCULOS DE EFICIENCIA

Los ensayos se realizaron durante dos estaciones de cultivo (2019 y 2020) y cuatro sitios de estudio, ubicados en la zona agrícola del litoral norte (Paysandú y Río Negro). Los tratamientos fueron diferentes dosis, fuentes y momentos de apli-

cación para diferentes fertilizantes nitrogenados: (1) inhibidor de nitrificación (NI) disponible en el mercado y con bibliografía de respaldo (ENTEC 26 - DMPP) (2) fertilizante de liberación controlada (SR) a través de protección física aplicadas en cada granulo (SULFAMMO-NPRO) (3) manejo actual con Urea azufrada, fraccionando el N en implantación e inicio de elongación C1. Las dosis de N testeadas fueron 90 y 150 kg ha⁻¹ N y los momentos de aplicación fueron: B2-3 (roseta con 2-3 hojas) para las fuentes alternativas de N (ENTEC y SULFAMMO-NPRO) y B2-3 y C1(inicio de elongación de entrenudos) para el manejo actual con Urea azufrada (Cuadro 1).

Se evaluó el efecto de los tratamientos sobre los diferentes componentes de la eficiencia de uso de N: (1) Eficiencia Agronómica del N aplicado (EA_N = Rendimiento con agregado de N – Rendimiento sin agregado de N (Testigo)/Dosis de N aplicada), (2) Uso aparente de N (UApaN= N absorbido en biomasa aérea con agregado de N– N absorbido en biomasa aérea sin agregado de N (Testigo)/Dosis de N aplicada) y (3) Eficiencia fisiológica del N (EF_N=(Rendimiento con agregado de N – Rendimiento sin agregado de N (Testigo)/(N absorbido en biomasa aérea con agregado de N – N absorbido en biomasa aérea sin agregado de N (Testigo) (Dobermann, 2005).

3- CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LAS ESTACIONES DE CULTIVO 2019-2020

El rendimiento alcanzado en las estaciones de cultivo 2019 y 2020 fue muy diferente, debido principalmente a condiciones de estrés abiótico (heladas tardías) durante la etapa reproductiva (floración y llenado) de la zafra 2020. Las heladas ocurridas principalmente en el mes de setiembre (2 días de persistencia 20/09-21/09) provocaron daños tanto en flores, silicuas y granos. Por tanto, los indicadores de eficiencia de uso del N presentaron una alta interacción con el año (P<0,005), requiriendo ser analizados separados por año.

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos empleados.

Nro	TRATAMIENTO	N-B2	N - C1	N - TOTAL
		kg ha ⁻¹ N		
1	TESTIGO	0	0	0
2	ACTUAL 90	70	20	90
3	ACTUAL 150	70	80	150
4	ENTEC 90	90	0	90
5	SULFAMMO 90	90	0	90
6	ENTEC 150	150	0	150
7	SULFAMMO150	150	0	150

4- EFICIENCIAS DE USO DEL N

4.1. Eficiencia Agronómica

Los valores de EA_N variaron entre 4 – 42 y 1 – 25 kg de grano por kg de nutriente aplicado para las zafras 2019 y 2020, respectivamente (Figura 1). En situaciones ideales de producción, las mejores EA_N se encontrarían entre 10-30 kg/kg (líneas rojas, Figura 1) (Dobermann, 2005). Para esta situación, y en ausencia de heladas tardías (2019) el tratamiento con la fuente alternativa ENTEC a 90 kg ha⁻¹ N fue la que presentó

mayor EA_N (26 kg/kg), no encontrándose diferencias estadísticas entre tratamientos para la estación siguiente (2020). Los resultados sugieren que, en ausencia de estrés abiótico que limiten el rendimiento alcanzable, existió una tendencia a que el rango de EA_N explorado en nuestros ambientes es mayor a los encontrados en otros ambientes (Canadá), los cuales presentan un rango que va de 14-26 kg/kg (Johnson *et al.*, 2013).

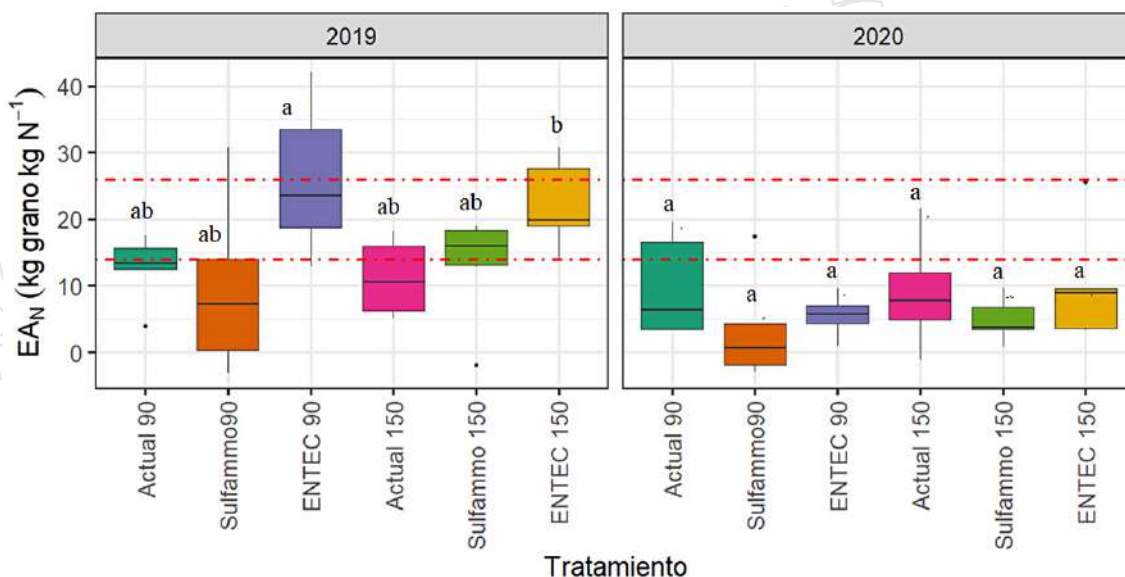


Figura 1. Relación entre dosis, fuente y momento de aplicación de N, con la eficiencia agronómica (EAN) para las diferentes estaciones de cultivo y situaciones ideales de producción (líneas rojas punteadas). Medias con una letra en común dentro de cada momento de evaluación no son significativamente diferentes ($P > 0,05$).

4.2. Eficiencia de Recuperación

En términos generales, las ER_N fueron superiores o cercana al rango considerado adecuado (líneas rojas, Figura 2) según Dobermann (2005), infiriendo que carinata tiene alta capacidad de absorción de N mineral, tanto del proveniente desde el fertilizante, como el mineralizado por el suelo. Esto es fundamental en una materia prima para biocombustibles, dado que el N que no es absorbido por la biomasa queda expuesto a pérdidas (desnitrificación y nitrificación, lixiviación de nitratos en profundidad), comprometiendo así su beneficio ambiental. Para el año sin heladas tardías (2019), ENTEC a la dosis de 90 kg ha⁻¹ N presentó una recuperación de N mayor a los restantes tratamientos. Este efecto se logró con el adicional de que se aplica en forma de dosis total a inicio del cultivo (B1-2), ahorrando una operación de aplicación sobre el cultivo.

Esto implica además de una ventaja operativa, un impacto que puede valorarse en términos de emisiones de GEI asociadas a la operativa de aplicar fertilizantes de manera dividida a lo largo del ciclo. Es importante destacar que cuando carinata logró altos valores de rendimiento alcanzable (2019), la proporción de nutrientes removidos (kg ha⁻¹ N exportados en el grano) son proporcionalmente superiores (Max=2,45, Min=0,65, Media=1.40) (datos no mostrados) con respecto a la cantidad aplicada mediante fertilizante (Balance Primario de Nutriente), lo cual puede conducir a una situación de “minado” del suelo (Fixen *et al.*, 2015). Sin embargo, los valores presentados aquí están limitados espacialmente a un ensayo parcelario y temporalmente a una estación de cultivo, siendo necesario integrarlos en el contexto de la rotación y manejo de los predios.

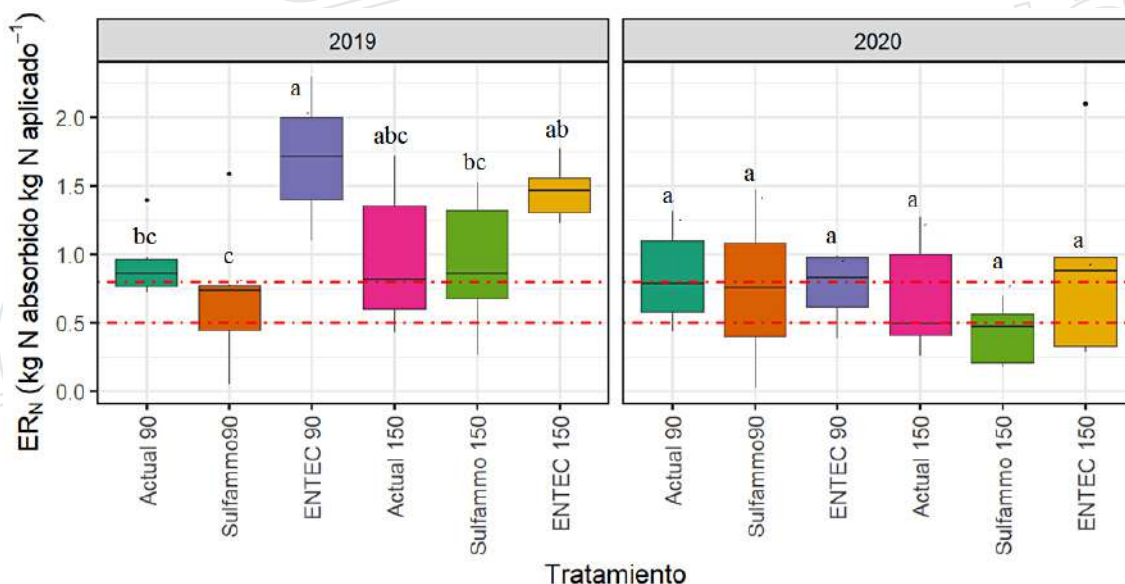


Figura 2. Relación entre dosis, fuente y momento de aplicación de N, con la eficiencia de recuperación (ERN) para las diferentes estaciones de cultivo y situaciones ideales de producción (líneas rojas punteadas). Medias con una letra en común dentro de cada momento de evaluación no son significativamente diferentes ($P>0,05$).

4.3. Eficiencia Fisiológica

La EF_N presentó valores esperados para este tipo de especie (Media-2019=15 kg kg⁻¹ y Media-2020=12 kg kg⁻¹) y con lo reportado para otras regiones del mundo (líneas rojas, figura 3). Es importante destacar que la EF_N es un atributo gobernado tanto por factores genéticos (especies C3 vs C4) y de ambiente-manejo del cultivo. Un factor que ha sido determinante en el aumento de la EF_N es el índice de cosecha de los cultivos, dado que incrementos en el índice de cosecha se traducen en una mayor EF_N , asociado con una disminución en el % de proteína en grano si el flujo de N a los granos no se mantiene constante (Andrade, n.d.; Gaju *et al.*, 2011). Para ninguna de las

estaciones de cultivo (2019 y 2020) los tratamientos generaron diferencias estadísticas significativas en la EF_N ($p>0,05$) entre tratamientos. Las heladas tardías afectaron los valores de índice de cosecha (2019 = 0,24 vs 2020 = 0,15; $P<0,005$). Esto generó una disminución en la EF_N (2019= 15 kg kg, 2020=12 kg) y un aumento en el %N en el grano, dado que el estrés abiótico por heladas tardías afecta en mayor proporción el rendimiento (específicamente su componente principal: nro de grano/unidad de superficie) que la absorción de nutrientes (N), aumentado así, la concentración de N en los granos (2019=25% y 2020=30% proteína en grano) (datos no mostrados).

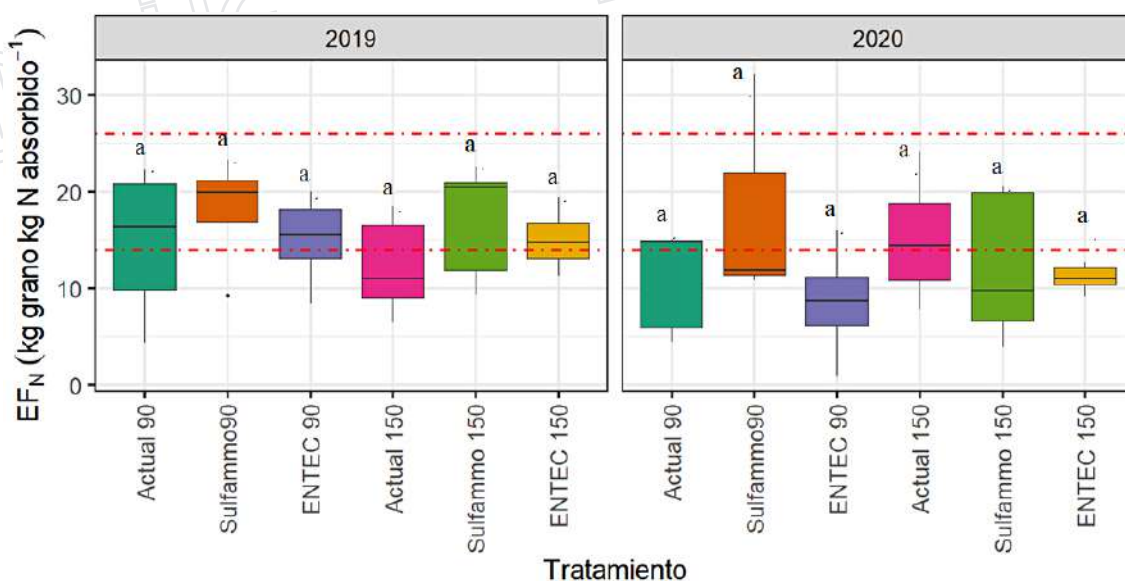


Figura 3. Relación entre dosis, fuente y momento de aplicación de N, con la eficiencia fisiológica (EFN) para las diferentes estaciones de cultivo y situaciones ideales de producción de brassicas (líneas rojas punteadas). Medias con una letra en común dentro de cada momento de evaluación no son significativamente diferentes ($P>0,05$).


5- CONSIDERACIONES FINALES

Brassica carinata L. (carinata) en nuestra zona agroecológica tiene tanto rendimientos potenciales y rendimientos alcanzables mayores a los de otras zonas productoras del mundo, con la ventaja que las dosis de N aplicadas son similares o menores (90-120 kg ha⁻¹ N aplicado). Esto impacta positivamente sobre la eficiencia de uso del N en los sistemas de producción de carinata y coloca en una posición ventajosa a la región (alta EA_N y EF_N).

Los altos valores de ER_N incluso con valores de absorción de N mayores a los valores de N aplicado (ER_N > 1), confirma lo ya reportado para otras regiones sobre la alta capacidad de absorción de N que tiene carinata, ganándose la fama de *scavenger of soil N* (barrendero del N del suelo). Este aspecto es de suma relevancia para un biomaterial, ya que esto determina que su huella de N sea baja, y desde el punto de vista

del manejo de la fertilización nitrogenada debemos maximizar la eficiencia de uso del N agregado.

Las fuentes alternativas de N, en especial ENTEC, parecen ser una alternativa promisoría para mejorar la productividad de carinata manteniendo altas EUN y reduciendo el número de operaciones sobre el cultivo, lo cual también contribuye a bajar la intensidad de C durante la fase de producción.

Nuevas investigaciones que incluyan mayor número de años, sitio y cultivares son necesarios para comprender mejor la variabilidad y los resultados obtenidos (interacción genotipo x ambiente). Sumado a ello, para que la adopción de fuentes alternativas de N por parte de los productores sea posible, es necesario análisis económicos y cálculos de dosis económicamente óptima. 

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abalos, D.; Jeffery, S.; Sanz-Cobena, A.; Guardia, G.; Vallejo, A., 2014. *Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency*. *Agric. Ecosyst. Environ.* 189, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.036>
- Adler, P. R.; Del Grosso, S. J.; Parton, W. J., 2007. *Life-cycle assessment of net greenhouse-gas flux for bioenergy cropping systems*. *Ecol. Appl.* 17, 675–691. <https://doi.org/10.1890/05-2018>
- Andrade, F. H., n.d. Eficiencia de uso de los nutrientes y rol de la nutrición en la producción de los cultivos.
- Cardone, M.; Mazzoncini, M.; Menini, S.; Rocco, V.; Senatore, A.; Seggiani, M.; Vitolo, S., 2003. *Brassica carinata as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: Agronomic evaluation, fuel production by trans-esterification and characterization*. *Biomass and Bioenergy* 25, 623–636. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00058-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00058-8)
- Crutzen, P. J., 1970. *The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content*. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 96, 320–325. <https://doi.org/10.1002/qj.49709640815>
- Crutzen, P. J.; Mosier, A. R.; Smith, K. A.; Winiwarter, W., 2008. *N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels*. *Atmos. Chem. Phys.* 8, 389–395. <https://doi.org/10.5194/acp-8-389-2008>
- Del Grosso, S.; Smith, P.; Galdos, M.; Hastings, A.; Parton, W., 2014. *Sustainable energy crop production*. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 9, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.07.007>
- Del Grosso, S.J.; Ojima, D. S.; Parton, W. J.; Stehfest, E.; Heistemann, M.; DeAngelo, B.; Rose, S., 2009. *Global scale DAYCENT model analysis of greenhouse gas emissions and mitigation strategies for cropped soils*. *Glob. Planet. Change* 67, 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.12.006>
- Dobermann, A. R., 2005. *Nitrogen Use Efficiency – State of the Art*. Univ. Nebraska 17.
- Fixen, P.; Brenturp, F.; Bruulsema, T. W.; Garcia, F.; Norton, R.; Zingore, S., 2015. *Nutrient/ Fertilizer Use Efficiency: Measurement, Current Situation and Trends*. *Manag. Water Fertil. Sustain. Agric. Intensif.* 3400, 8–38.
- Gaju, O.; Allard, V.; Martre, P.; Snape, J. W.; Heumez, E.; LeGouis, J.; Moreau, D.; Bogard, M.; Griffiths, S.; Orford, S.; Hubbard, S.; Foulkes, M. J., 2011. *Identification of traits to improve the nitrogen-use efficiency of wheat genotypes*. *F. Crop. Res.* 123, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.05.010>
- Gesch, R. W.; Isbell, T. A.; Oblath, E. A.; Allen, B. L.; Archer, D. W.; Brown, J.; Hatfield, J. L.; Jabro, J. D.; Kinyri, J. R.; Long, D. S.; Vigil, M. F., 2015. *Comparison of several Brassica species in the north central U.S. for potential jet fuel feedstock*. *Ind. Crops Prod.* 75, 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.084>
- Hossain, Z.; Johnson, E. N.; Blackshaw, R. E.; Liu, K.; Kapiniak, A.; Gampe, C.; Molnar, L.; Luan, L.; Poppy, L.; Gan, Y., 2018. *Agronomic responses of Brassica carinata to herbicide, seeding rate, and nitrogen on the northern great plains*. *Crop Sci.* 58, 2633–2643. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.05.0312>
- Johnson, E. N.; Malhi, S. S.; Hall, L. M.; Phelps, S., 2013. *Effects of nitrogen fertilizer application on seed yield, N uptake, N use efficiency, and seed quality of Brassica carinata*. *Can. J. Plant Sci.* 93, 1073–1081. <https://doi.org/10.4141/CJPS2013-222>
- Keating, B. A.; Herrero, M.; Carberry, P. S.; Gardner, J.; Cole, M. B., 2014. *Food wedges: Framing the global food demand and supply challenge towards 2050*. *Glob. Food Sec.* 3, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.004>
- Ladha, J. K.; Pathak, H.; Krupnik, T. J.; Six, J.; van Kessel, C., 2005. *Efficiency of Fertilizer Nitrogen in Cereal Production: Retrospects and Prospects*. *Adv. Agron.* 87, 85–156. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)87003-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87003-8)
- Linquist, B. A.; Liu, L.; van Kessel, C.; van Groenigen, K. J., 2013. *Enhanced efficiency nitrogen fertilizers for rice systems: Meta-analysis of yield and nitrogen uptake*. *F. Crop. Res.* 154, 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.08.014>
- Miner, G. L.; Delgado, J. A.; Ippolito, J. A.; Stewart, C. E.; Manter, D. K.; Del Grosso, S. J.; Floyd, B. A.; D'Adamo, R. E., 2020. *Assessing manure and inorganic nitrogen fertilization impacts on soil health, crop productivity, and crop quality in a continuous maize agroecosystem*. *J. Soil Water Conserv.* 75, 481–498. <https://doi.org/10.2489/jswc.2020.00148>
- Ogle, S. M.; McCarl, B. A.; Baker, J.; Del Grosso, S. J.; Adler, P. R.; Paus-tian, K.; Parton, W. J., 2016. *Managing the nitrogen cycle to reduce greenhouse gas emissions from crop production and biofuel expansion*. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* 21, 1197–1212. <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9645-0>



Ensayo de carinata previo a la cosecha.