

Definiendo una hoja de ruta para una fertilización nitrogenada sostenible

Soriano, B.¹, Lassaletta, L.¹, Ruiz-Ramos, M.¹, Sánchez, B.², Brañas, J.³, Erice, D.⁴, Fernández-Alonso, M.J.⁵, Gallart, R.⁶, Herrero, M.⁷, Salaet, I.⁸, Aguilera, E.¹, Galea, C.¹, Garde, S.¹, Hurtado, J.¹, Lizaso, J.¹, Rodríguez, A.⁹, Sanz-Cobeña, A.¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid-CEIGRAM

² INIA, CSIC; 28040 Madrid

³ Fertiberia

⁴ Unión de Pequeños Agricultores y Ganaderos, UPA

⁵ Universidad Rey Juan Carlos. Red REMEDIA

⁶ Interporc - Grup de Sanejament Porcí- GSP Lleida

⁷ Interporc - Federación de Asociaciones de Productores de Ganado Porcino

⁸ Fertinagro

⁹ Universidad de Castilla la Mancha

DOI: <https://zenodo.org/records/10197111>

El reto de la fertilización nitrogenada sostenible en la agricultura española

Producir alimentos de calidad y en cantidad suficiente minimizando el impacto medioambiental bajo condiciones de cambio climático y agotamiento de recursos naturales es uno de los principales retos a los que se enfrenta la sociedad actual, en un contexto global de rentabilidad económica muy limitada de las explotaciones agrícolas. El nitrógeno (N) es un elemento clave para mantener o aumentar la productividad de los cultivos (Sutton *et al.*, 2021). El N requiere de una gestión sostenible orientada a reducir la sobrefertilización de los cultivos (Gu *et al.*, 2023), dado que su excedente se emite al medio como N reactivo, pudiendo contaminar con las masas de agua con nitratos (Quemada *et al.*, 2013) y el aire con amoníaco (Sanz-Cobena *et al.*, 2014), además de contribuir al cambio climático (Guardia *et al.*, 2018). La gestión del N en España ha de considerar a su vez las particularidades de la agricultura bajo clima mediterráneo (Lassaletta *et al.*, 2021), con una gran superficie de secano sujeta a una elevada incertidumbre sobre los rendimientos de las producciones, especialmente vulnerable al cambio climático y a la escasez de agua. Además, es esencial reducir la contaminación por nitratos en el agua por el daño ambiental que produce, y por su incremento en el agua de abastecimiento para consumo humano. España también ha de cumplir con el techo de emisiones de amoníaco, por lo que su reducción es prioritaria. Por otro lado, la inestabilidad geopolítica reciente ha generado una importante subida del precio de los fertilizantes minerales y piensos (Alexander *et al.*, 2023), desestabilizando los sistemas productivos españoles (Quemada and Gabriel, 2023). España, al igual que la Unión Europea, es un área geográfica netamente importadora de fertilizantes inorgánicos, muchos de ellos de síntesis producidos con un alto coste energético y de huella de carbono en países actualmente en conflicto. Por tanto, una gestión sostenible del N es un pilar fundamental en la sostenibilidad ambiental, económica y social de los sistemas agrarios (Rodríguez *et al.*, 2023). Para lograr dicho objetivo, la dimensión social de la sostenibilidad de los sistemas agrarios está tomando un creciente protagonismo, reflejado en la participación cada vez mayor de los grupos de interés en la definición de los retos que afectan al sistema y de las estrategias a llevar a cabo para enfrentarse a los mismos (Soriano, et al., 2023).



AgroSceNa-UP

El proyecto “Evaluación de escenarios de manejo agrícola a diferentes escalas para sistemas de cultivo mediterráneos sostenibles mediante la reducción de las pérdidas de N (AgrosceNA-Up; PID2019-107972RB-I00)”, financiado por el Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación (2019), tiene como objetivo identificar escenarios de manejo para la reducción de pérdidas de N que tengan un impacto significativo a escalas regional y nacional, persiguiendo alcanzar un equilibrio que contemple de forma integrada los ámbitos agronómico, ambiental, social y económico. Bajo el marco de este proyecto, se ha realizado un trabajo de co-creación con los principales grupos de interés con el fin de analizar las principales limitaciones en la implementación de distintos escenarios de manejo orientados a la reducción de pérdida de N en sistemas de cultivo mediterráneos, y co-diseñar posibles acciones que faciliten su puesta en marcha (Figura 1). En el taller han participado representantes de las asociaciones de agricultores, del sector ganadero, de empresas de fertilizantes, de unidades sectoriales de la administración pública, de ONGs ambientales y del sector académico.

Figura 1. Proceso participativo para la definición de una hoja de ruta para la fertilización nitrogenada sostenible¹



¹ El círculo verde presenta los diferentes grupos de interés implicados en el proceso participativo. Los recuadros amarillos muestran los principales hitos del proceso participativo: Identificación de escenarios de manejo de N y de las barreras y las acciones a llevar a cabo para favorecer su implementación. Todo ello con el fin de favorecer la fertilización nitrogenada sostenible (círculo marrón).

Los resultados de este **proceso participativo** han permitido dar respuesta a las preguntas que se presentan a continuación:

¿Qué posibles escenarios de manejo existen en la actualidad para reducir las pérdidas de nitrógeno?

El proceso participativo ha centrado su foco en la definición de escenarios de reducción de pérdidas de N circunscritos al sector productivo, sin considerar la demanda o profundos cambios estructurales del sector agroalimentario. Basándose en los resultados de la evaluación de escenarios obtenidos en el proyecto (Sanz-Cobena *et al.*, 2023), los grupos de interés identificaron **siete escenarios de manejo** con un potencial para reducir las pérdidas de N, apoyándose en el tipo y la cantidad de fertilizante, modo y momento de aplicación del fertilizante, tipo de riego, manejo del cultivo (rotaciones, cubiertas vegetales, manipulación del suelo), las variedades vegetales utilizadas y la aplicación o no de urea:

- Escenario 1. Uso parcial/total de fertilizantes orgánicos
- Escenario 2. Incorporación del fertilizante al suelo
- Escenario 3. Uso de inhibidores u otras tecnologías de la fertilización
- Escenario 4. Gestión del riego (fertirriego)
- Escenario 5. Manejo del cultivo y suelo
- Escenario 6. Variedades de cultivo
- Escenario 7. Eliminación de urea

¿Cuáles son las principales barreras para implementar los escenarios de manejo para reducir las pérdidas de N?

La puesta en práctica de escenarios para la reducción de pérdidas de N se encuentra en la actualidad con limitaciones de diversa naturaleza, detalladas en la Tabla 1. Entre ellas existen **barreras de carácter técnico**, las cuales afectan a todos los escenarios analizados. Así, por ejemplo, el conocimiento insuficiente sobre la caracterización precisa del comportamiento agronómico de los fertilizantes orgánicos y de su plan de abonado (tratamiento, momento y tipo de aplicación), debido principalmente a su alta heterogeneidad, limita la implementación del *Escenario 1. Uso parcial/total de fertilizantes orgánicos*. La complejidad de reemplazar la urea por otros fertilizantes sustitutivos a precios competitivos limita el *Escenario 7. Eliminación de urea*.

Además, el incremento de los costes y la consecuente reducción de la rentabilidad de las explotaciones se identifica como una **barrera de carácter económico** común en todos los escenarios analizados. Junto a ésta, otras barreras económicas identificadas son la elevada inversión requerida en el caso del *Escenario 4. Gestión del riego (fertirriego)* o la dependencia de la identificación y producción de variedades adaptadas por parte de las empresas comercializadoras de semillas en la implementación del *Escenario 6. Variedades de cultivo*.

Existen también **barreras sociales**, principalmente relacionadas con la falta de formación y acompañamiento necesarios para llevar a cabo todos los escenarios planteados. A estas barreras sociales, también se une la reducida aceptación por parte de la sociedad en general (en



el caso del *Escenario 1. Uso parcial/total de fertilizantes orgánicos*, por ejemplo, debido al olor asociado a determinados sistemas de manejo y el desconocimiento de la carga microbiana) y de los productores en particular (en el caso del *Escenario 3. Uso de inhibidores u otros limitantes* y *Escenario 5. Manejo del cultivo y suelo*). Las reticencias de los productores se deben principalmente al bajo nivel de confianza en estas prácticas, dado que requieren de una tecnología que en algunos casos está en proceso de desarrollo y existe un conocimiento limitado sobre sus impactos en el medio-largo plazo. Además, los escenarios que conllevan cambios de prácticas más radicales, como es el caso del *Escenario 7. Eliminación de urea*, aunque pueden ser relevantes desde el punto de vista académico, pueden generar confusión y conflictividad en el sector agroalimentario complicando su discusión objetiva.

También se identifican **barreras institucionales** que transversalmente afectan a todos los escenarios analizados. Se refieren principalmente a la falta de desarrollo normativo que ampare, dé seguridad y estabilidad al desarrollo de nuevos productos y manejos alternativos y a la rentabilidad de las inversiones asociadas. Se deben destacar las barreras identificadas en el *Escenario 1. Uso parcial/total de fertilizantes orgánicos*, relativas a la falta de soberanía nacional y europea en la producción de fertilizantes, lo que debilita en el corto plazo la posibilidad de marcar las reglas del juego para la entrada de competidores en el mercado y favorecer la producción de nuevos fertilizantes en nuestro territorio. La relevancia de esta carencia se ha hecho especialmente patente tras las crisis recientes, como el COVID-19 y la guerra de Ucrania. Además, la inexistencia de un marco regulatorio (incluyendo incentivos) y una planificación apropiada a distintas escalas geográficas para la colaboración agricultura-ganadería y el acoplamiento de las producciones vegetales y animales, favorece la desconexión entre ambos sectores productivos, lo que limita a su vez el alcance de la fertilización orgánica.

Por último, se han identificado **barreras medioambientales**, que afectan principalmente a los escenarios 1, 4 y 6. En el caso del *Escenario 1. Uso parcial/total de fertilizantes orgánicos* la causa es la presencia, en algunos fertilizantes orgánicos, de posibles trazas de residuos de antimicrobianos o de metales pesados. La escasez de agua (en cantidad y calidad) en España supone una barrera para la implementación del *Escenario 4. Gestión del riego (fertiriego)*. Finalmente, el *Escenario 6. Variedades de cultivo* está limitado por la necesidad de identificar y desarrollar variedades adaptadas simultáneamente a un uso más eficiente de los aportes nitrogenados y las nuevas condiciones climáticas.

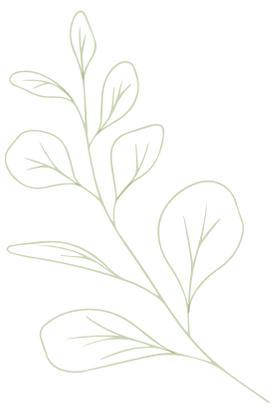


Tabla 1. Barreras a la implementación de escenarios de reducción de pérdidas de N

Escenarios de manejo	Barreras a la implementación				
	Técnicas	Económicas	Sociales	Institucionales	Medioambientales
1. Uso parcial/ total de fertilizantes orgánicos	Insuficiente conocimiento sobre caracterización y comportamiento agronómico de fertilizantes orgánicos, y balances de nutrientes más allá del N (p. ej. Fósforo); Dificultad en ajuste de nutrientes (plan de abonado); Disponibilidad de fertilizantes orgánicos condicionada (distancia a explotaciones ganaderas).	Potencial reducción de productividad resultante de un desequilibrio de nutrientes derivado de una fertilización no equilibrada de fertilizantes orgánicos; Elevado coste de oportunidad en cultivos de alto valor.	Reducida aceptación de los productores (principalmente entre aquellos sin vínculo con la ganadería) y de la sociedad (p. ej. olor de algunos fertilizantes orgánicos); Falta de conocimiento; Falta de acompañamiento.	A corto plazo, escasa soberanía en la producción de fertilizantes, que puede representar una oportunidad a medio y largo plazo; Necesidad de legislación alineada con la generación de conocimiento que sea menos restrictiva en el uso de fertilizantes orgánicos; Desarrollo normativo para la reconexión agricultura-ganadería.	Presencia, en algunos fertilizantes orgánicos, de posibles trazas de residuos de antimicrobianos o de metales pesados que podrían requerir procesado previo. La dosis se ha de adaptar la capacidad productiva del cultivo (dosis óptima), evitando fertilizar en exceso los cultivos en los que se aporten estiércoles.
2. Incorporación del fertilizante al suelo	Cambio en operativa mecánica; Cambio en organización laboral (coordinación maquinaria/trabajadores); Necesidad de mayor espacio en la explotación (distancia entre parcelas, nave...); Estructura de las explotaciones (parcelas pequeñas, elevadas pendientes, etc.).	Incremento de costes; Inversión en nueva maquinaria.	Necesidad de formación; Falta de acompañamiento.	Escasez de incentivos más allá de subsidios (PAC), (créditos, fiscalidad favorable, etc.).	
3. Uso de inhibidores/ otros limitantes	Limitada innovación y desarrollo tecnológico.	Incremento de costes.	Inquietud de productores al cambio; Falta de formación (tipo de inhibidor y momento óptimo de manejo).	Necesidad de desarrollo normativo.	Dudas sobre efectos en la biodiversidad o el microbioma del suelo
4. Gestión del riego/fertirriego	Elevado nivel de tecnificación; Elevado nivel infraestructuras.	Elevada inversión; Elevados costes de mantenimiento.	Falta de formación (tipo de fertilizante, dosis, fraccionamiento); Falta de acompañamiento.	Escasez de incentivos más allá de subsidios (PAC), (créditos, fiscalidad favorable, etc.); Incumplimiento de normativa (Directiva Marco del Agua y de Nitratos); Falta de coherencia normativa entre los distintos sectores de la administración.	Limitación de recursos hídricos (cantidad y calidad); No replicable a cultivos de secano.
5. Manejo del cultivo y suelo	Complejidad; Necesidad de investigación sobre impacto a largo plazo de las prácticas y efectos compensatorios.	Incremento de costes (*).	Resistencia de productores al cambio; Falta de formación; Falta de acompañamiento; Incertidumbre ante el impacto; Reducida difusión y	Necesidad de desarrollo normativo; Escasez de incentivos más allá de subsidios (PAC), (créditos, fiscalidad favorable, etc.).	Desconexión ecológica sistema planta-suelo-microbioma

			divulgación de buenas prácticas.		
6. Variedades de cultivo	Necesidad de disponer de variedades más eficientes en el uso del N, adaptadas a los nuevos manejos agronómicos y a condiciones climáticas más adversas.	Dependencia de comercializadoras; Coste de recuperación/desarrollo de nuevas variedades.	Falta de acompañamiento.	Inexistencia de un plan estratégico de variedades de cultivo; Requerimientos que ralentizan el registro de variedades comerciales.	Necesidad adicional de adaptación a condiciones climáticas.
7. Eliminación de urea	Necesidad de desarrollo de fertilizantes sustitutivos a precios competitivos y estudio de impactos; Necesidad de cambio en la operativa.	Incremento de costes.	Falta de conocimiento de otros fertilizantes; Falta de aceptación de los productores.	Escasez de mecanismos de incentiviación para su desarrollo e implantación.	

(*) En el caso de menor laboreo, no se identificaría esta limitación al suponer una reducción de costes.

¿Qué acciones se pueden llevar a cabo para superar las barreras identificadas, y qué actores deben protagonizarlas?

Conocer las principales barreras a la implementación de escenarios de reducción de pérdidas de N facilita identificar qué acciones han de llevarse a cabo para superarlas, y qué actores del sector han de liderarlas. Se han identificado diversas acciones, las cuales pueden ser agrupadas en dos grandes bloques transversales a los escenarios analizados, conectados por un tercer bloque a caballo entre ambos.

Un primer bloque agrupa **acciones de carácter técnico**, principalmente orientadas al impulso de la investigación, formación, asesoramiento y transferencia en diversas temáticas como: i) diseñar un plan de abonado; ii) desarrollar nuevos productos que aumenten la eficiencia de las materias orgánicas cuando sean utilizadas solamente o en una combinación adecuada con fertilizantes minerales; iii) diseñar una acción integral que reúna prácticas de gestión del suelo que, mediante el secuestro de carbono y la promoción de su biodiversidad, reduzcan las necesidades de aporte de N de los cultivos (p. ej. promoviendo asociaciones simbióticas con bacterias fijadoras de N u hongos formadores de micorrizas); iv) avanzar en la agricultura de precisión y digitalización (p. ej. riego); v) fomentar la recuperación de drenajes; vi) avanzar en el estudio de balance de nutrientes en el uso de fertilizantes orgánicos; vii) diseñar sistemas de control efectivos para detectar la superación de los umbrales indicados por la normativa vigente; viii) fomentar el incremento de las leguminosas en las rotaciones, aumentando la entrada de nitrógeno fijado por algunos cultivos a los sistemas; ix) analizar las ventajas e inconvenientes en el uso de fertilizantes de reemplazo; x) favorecer la recuperación de variedades tradicionales con características de interés y/o utilización para la creación de nuevas variedades; xi) poner en marcha demostraciones de manejos alternativos con resultados positivos a diversas escalas espaciales; y xii) considerar las dosis óptimas para evitar la fertilización excesiva de cultivos a



los que se aporten estiércoles procedentes de explotaciones ganaderas (por ejemplo en cultivos de secano con un potencial productivo bajo); xiii) considerar las emisiones de amoníaco del fertilizante sintético y orgánica y la reducción de las mismas por buenas prácticas de cara al cálculo de la dosis óptima.

Un segundo bloque enmarca **acciones de carácter institucional**, destacando: i) la definición de políticas con objetivos claros y coherentes que se encuentren alineadas con los últimos avances científicos; ii) incentivos (más allá de la PAC) para compensar las pérdidas económicas asociadas a la implementación de prácticas que fomenten la circularidad y el uso de subproductos de origen orgánico; iii) el impulso a espacios regulados para examinar el comportamiento de prácticas innovadoras (Sandbox); y iv) el desarrollo de medidas incentivadoras que posibiliten la puesta en mercado y el uso de nuevos fertilizantes orgánicos y nuevas variedades que sean simultáneamente más eficientes en el uso del nitrógeno, más resilientes frente a condiciones climáticas adversas y adaptadas a los nuevos manejos de los cultivos. Ello permitirá aprovechar al máximo la gran disponibilidad de N que existe en el sistema productivo español (N verde), favoreciendo así la soberanía en la producción de fertilizantes.

A caballo entre ambas categorías de acciones, se identifica el tercer bloque de **acciones orientadas a fortalecer la reconexión entre la producción animal y vegetal** para estimular la economía circular del N. La reconexión requiere de una coordinación pública, a nivel nacional o regional que apoye la vertebración de actores claves del sistema (agricultores, ganaderos y fabricantes de fertilizantes) y el acoplamiento de la producción agrícola-ganadera y de los recursos locales a escala regional, para revalorizar como fertilizantes los subproductos producidos en las explotaciones agrícolas y ganaderas de la zona y priorizar su uso. La iniciativa institucional ha de ir acompañada de medidas impulsadas desde el sector agrícola, lideradas por las cooperativas. Estas acciones, demandarán a su vez un esfuerzo importante en la formación de los técnicos de las cooperativas y de la administración pública y, en consecuencia, requerirá ampliar la oferta formativa en circularidad y nuevas tecnologías por parte de las universidades y escuelas de formación profesional.

Tal como muestran las acciones identificadas, su puesta en marcha implica la participación activa de una gran diversidad de actores clave que abarcan a todo el sector: i) agricultores individuales que toman decisiones sobre las variedades a utilizar, el tipo de manejo y su adaptación a las condiciones locales; ii) empresas que ofrecen servicios de asesoramiento, acompañamiento y nuevos productos; iii) asociaciones de agricultores y comunidades regantes que cuentan con el apoyo de técnicos de campo vinculados al sector agrícola/ganadero, a centros gestores/empresas intermediarias de estiércoles y de sus subproductos; iv) administraciones públicas que diseñan e implementan políticas y facilitan la transferencia; y v) centros de investigación públicos y privados que generan nuevo conocimiento y demuestran los beneficios de ponerlo en práctica.



Conclusiones

Avanzar en la reducción de pérdidas de N en la fertilización de cultivos es clave para reducir el impacto medioambiental de la producción de alimentos, así como para mejorar los rendimientos económicos de las explotaciones. A partir de un proceso participativo con los principales grupos de interés del sector agrario (asociaciones de agricultores, el sector ganadero, empresas de fertilizantes, unidades sectoriales de la administración pública, ONG medioambientales y el sector académico), se han identificado diversos escenarios de manejo que favorecen la reducción de pérdidas de N, los cuales han sido validados considerando simultáneamente su impacto medioambiental y su nivel de factibilidad. La puesta en práctica de estos escenarios de reducción de N supone superar barreras de carácter técnico (p. ej. formación, investigación e innovación), económico (p. ej. inversiones), social (aceptación por parte de los productores y sociedad en general), institucional (adaptación normativa y desarrollo de incentivos) y medioambiental. La diversidad de limitaciones implica que el diseño de la hoja de ruta para avanzar en la sostenibilidad de la fertilización nitrogenada requiera de un enfoque holístico, considerando acciones de diversa naturaleza que faciliten transitar desde un enfoque centrado únicamente en las explotaciones agrícolas a otro integrado territorialmente, considerando por ejemplo el acoplamiento de los cultivos y la ganadería. Esta transición debe realizarse con un enfoque multiactor, considerando todos los actores de la cadena de valor, y contando con la participación de la academia, sociedad civil y las autoridades locales, regionales y nacionales.

Nota

Las opiniones expresadas en este policy brief son de los coautores y no deben considerarse como una posición oficial de las instituciones a las que representan.

El contenido de este documento refleja los consensos generales alcanzados por los participantes en la actividad participativa organizada bajo el proyecto AgroSceNA-UP, sin considerar las especificaciones/diferencias que cada uno de ellos puedan suscribir.



Referencias

- Alexander, P., Arneth, A., Henry, R., Maire, J., Rabin, S., Rounsevell, M.D.A., 2023. High energy and fertilizer prices are more damaging than food export curtailment from Ukraine and Russia for food prices, health and the environment. *Nature Food* 4, 84-95.
- Gu, B., Zhang, X., Lam, S.K., Yu, Y., van Grinsven, H.J.M., Zhang, S., Wang, X., Bodirsky, B.L., Wang, S., Duan, J., Ren, C., Bouwman, L., de Vries, W., Xu, J., Sutton, M.A., Chen, D., 2023. Cost-effective mitigation of nitrogen pollution from global croplands. *Nature* 613, 77-84.
- Guardia, G., Sanz-Cobena, A., Sanchez-Martín, L., Fuertes-Mendizábal, T., González-Murua, C., Álvarez, J.M., Chadwick, D., Vallejo, A., 2018. Urea-based fertilization strategies to reduce yield-scaled N oxides and enhance bread-making quality in a rainfed Mediterranean wheat crop. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265, 421-431.
- Lassaletta, L., Billen, G., Garnier, J., Bouwman, L., Velazquez, E., Mueller, N.D., Gerber, J.S., 2016. Nitrogen use in the global food system: past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand. *Environmental Research Letters* 11, 95007-95007.
- Lassaletta, L., Sanz-Cobena, A., Aguilera, A., Quemada, M., Billen, G., Bondeau, A., Cramer, W., Eekhout, J.P.C., Garnier, J., Grizzetti, B., Intrigliolo, D.S., Romero, E., Ruiz-Ramos, M., Vallejo, A., Gimeno, B.S., 2021. Nitrogen dynamics in cropping systems under Mediterranean climate: a systemic analysis. *Environmental Research Letters* 16, 073002.
- Quemada, M., Baranski, M., Nobel-de Lange, M.N.J., Vallejo, A., Cooper, J.M., 2013. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 174, 1-10.
- Quemada, M., Gabriel, J.L., 2023. Fertilizantes, energía y su impacto en la producción de alimentos. *The Conversation*.
- Rodríguez, A., Sanz-Cobena, A., Ruiz-Ramos, M., Aguilera, E., Quemada, M., Billen, G., Garnier, J., Lassaletta, L., 2023. Nesting nitrogen budgets through spatial and system scales in the Spanish agro-food system over 26 years. *Science of The Total Environment* 892, 164467.
- Soriano, B., et al. (2023). Actors and their roles for improving resilience of farming systems in Europe. *Journal of Rural Studies*, 98, 134-146.
- Sanz-Cobena, A., Lassaletta, L., Estelles, F., Del Prado, A., Guardia, G., Abalos, D., Aguilera, E., Pardo, G., Vallejo, A., Sutton, M.A., Garnier, J., Billen, G., 2014. Yield-scaled mitigation of ammonia emission from N fertilization: the Spanish case. *Environmental Research Letters* 9.
- Sanz-Cobena, A., Lassaletta, L., Rodríguez, A., Aguilera, E., Piñero, P., Moro, M., Garnier, J., Billen, G., Einarsson, R., Bai, Z., Ma, L., Puigdueta, I., Ruiz-Ramos, M., Vallejo, A., Zaman, M., Infante-Amate, J., Gimeno, B.S., 2023. Fertilization strategies for abating N pollution at the scale of a highly vulnerable and diverse semi-arid agricultural region (Murcia, Spain). *Environmental Research Letters* 18, 064030.
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Kanter, D.R., Lassaletta, L., Möring, A., Raghuram, N., Read, N., 2021. The nitrogen decade: mobilizing global action on nitrogen to 2030 and beyond. *One Earth* 4, 10-14.

